

Niina Laasonen

# LVIJ-järjestelmien kustannusoptimointi korkeis- sa asuinkerrostaloissa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

YAMK

Talotekniikka

Opinnäytetyö

11.09.2018

Tekijä Otsikko  Sivumäärä Aika	Niina Laasonen LVIJ-järjestelmien kustannusoptimointi korkeissa asuinkerrostaloissa  60 sivua 11.09.2018
Tutkinto	YAMK
Koulutusohjelma	Talotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	LVI-tekniikka
Ohjaaja(t)	Yliopettaja Aki Valkeapää Johtava asiantuntija Antti Hänninen LVI-asiantuntija Kai Mäkinen
<p>Opinnäytetyön tavoitteena oli löytää kustannusoptimaalisin LVIJ-järjestelmäratkaisu Suomeen rakennettavalle korkealle asuinkerrostalolle. Tavoitteen saavuttamiseksi kartoitettiin kirjallisuuskatsauksen sekä kolmen tutkimuskohteen avulla erilaisia vaihtoehtoja korkeiden rakennusten LVIJ-järjestelmien toteutukselle.</p> <p>Tutkimusosiossa perehdyttiin asuintornien LVIJ-järjestelmäratkaisuun sekä niiden teknisiin tilatarpeisiin. Tutkimustapausten järjestelmäkustannukset arvioitiin kustannuslaskentaohjelmalla hyödyntäen tutkimustapauksille tehtyjä IFC-malleja. Lisäksi arvioitiin teknisten tilojen rakentamiskustannukset sekä vaikutus myyntituloihin.</p> <p>Tutkimuksen perusteella ilmanvaihtojärjestelmän kustannuserot syntyvät erilaisista tilatarpeista, sillä järjestelmäkustannukset eri ratkaisuilla olivat lähes samansuuruisia. Näin ollen kustannusoptimaalisimman ilmanvaihtojärjestelmän valinta riippuu siitä, miten tilakustannuksia arvioidaan. Vesihuollon osalta kustannustehokkain ratkaisu on tutkimustapausten perusteella korkeapainelinjastoihin perustuva ratkaisu. Lämmitys- ja jäähdytyslaitteiston osalta merkittävin vaikutus on tilalämmityslaitteiston valinnalla, sillä erilaiset verkostovaihtoehdot olivat tutkimuksen perusteella yhtä kustannustehokkaita.</p> <p>Opinnäytetyön perusteella voidaan todeta, että korkeissa rakennuksissa kustannusoptimaalisimman LVIJ-järjestelmän valintaan vaikuttavat merkittävästi haluttu sisäilmaston laatutaso, rakennuksen pohjaratkaisu sekä tilakustannusten arvottamisperiaatteet. Opinnäytetyötä voidaan hyödyntää korkeiden asuinrakennusten LVIJ-järjestelmien suunnittelussa ja parhaimman järjestelmäratkaisun valinnassa.</p>	
Avainsanat	korkearakentaminen, tornitalo, korkeat asuinkerrostalot, tekniset tilavaraukset, kustannusoptimointi

Author Title	Niina Laasonen Cost Optimization of HVAC systems in high-rise residential buildings
Number of Pages Date	60 pages 11th September 2018
Degree	Master of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Specialisation option	HVAC Engineering
Instructor(s)	Aki Valkeapää, Principal Lecturer Antti Hänninen, Leading Specialist Kai Mäkinen, HVAC Specialist
<p>The Master's thesis aimed at finding the most cost-effective HVAC design solutions for high-rise residential buildings in Finland. Therefore, literature about various solutions and three Finnish high-rise residential buildings with different HVAC solutions were studied.</p> <p>In the buildings, both the solutions and the space taken by each solution were studied. The system costs for each solution were estimated with a cost-calculation program, using IFC models created for the cases. In addition, the costs of the technical spaces and their influence on income were estimated.</p> <p>The thesis established that the costs of ventilation systems differ due to the space required for each, as the costs of the different systems are the same. Thus, the choice of a cost-effective solution is based on the value of the technical spaces. The most cost-effective water system solution was shown to be high pressure pipe lines. For the heating and cooling systems, the room units seemed to be the most significant factor since various pipe lines seemed to be as cost-effective.</p> <p>The Master's thesis showed that the required indoor environment quality level, the layout of the building and the value set for the technical spaces have a great impact on the most cost optimal HVAC system. The thesis can be used as a guideline when choosing the best solution for a building.</p>	
Keywords	high-rise, high-rise residential buildings, technical space, cost optimization

## Sisällys

1	Johdanto	1
1.1	Tutkimuksen tausta ja tutkimusongelma	1
1.2	Korkearakentamisen erikoispiirteet	1
1.3	Tutkimuksen tavoite ja rajaus	2
2	Korkearakentamisen LVIJ-järjestelmät	4
2.1	Lämmitys- ja jäähdytysverkot	4
2.1.1	Korkeapaineinen pystynousu siirtoverkkona	5
2.1.2	Siirtoverkot	6
2.1.3	Useampi alajakokeskus kellarikerroksessa	8
2.1.4	Paisuntajärjestelmä	9
2.1.5	Tilalämmitys ja -jäähdytyslaitteet	10
2.2	Vesihuolto	14
2.2.1	Käyttövesilinjat	14
2.2.2	Viemärijärjestelmät	19
2.3	Ilmastointi	20
2.3.1	Tuloilman lämmitys ja viilennys/jäähdytys	20
2.3.2	Rakentaminen ja huolto	23
2.3.3	Asuntokohtainen ilmanvaihto	25
2.3.4	Keskitetty ilmanvaihto	27
2.3.5	Kustannuserot	28
3	Tutkimusaineisto ja tutkimusmenetelmät	30
3.1	Tutkimusmenetelmät ja tutkimuksen tavoitteet	30
3.2	SRV:n kustannusohjelman esittely	31
3.3	Tilavarausten kustannusten määrittely	32
3.4	Tutkimustapaukset	32
3.4.1	Torni A	32
3.4.2	Torni B	34
3.4.3	Torni C	36
3.4.4	Yhteenveto tutkimustapausten teknisistä ratkaisuista	38
4	Tutkimustulokset	39
4.1	Torni A	39
4.1.1	Tilantarpeiden kustannusvaikutus	39
4.1.2	Järjestelmäkustannukset	42

4.2	Torni B	43
4.2.1	Tilantarpeiden kustannusvaikutus	43
4.2.2	Järjestelmäkustannukset	45
4.3	Torni C	46
4.3.1	Tilantarpeiden kustannusvaikutus	46
4.3.2	Järjestelmäkustannukset	47
4.4	Tutkimustapausten vertailu	48
4.4.1	Tilantarpeet ja niiden kustannukset	48
4.4.2	Järjestelmäkustannukset	52
4.4.3	Tila- ja järjestelmäkustannusten yhdistäminen	53
4.4.4	Eri järjestelmävaihtoehtojen toimivuus	55
5	Yhteenveto	56
6	Johtopäätökset	58
	Lähteet	

## Termit ja käsitteet

**Jäähdytetyllä asuinkerrostalolla** tarkoitetaan kohdetta, jossa sisälämpötila vaihtelee 20–26 celsiusasteen välillä ulkoilman lämpötilasta riippuen. Tämä vastaa asuinkerrostalolla suurin piirtein sisäilmastoluokitusta S1.

**Korkea rakennus** on 35–100 metriä korkea rakennus. Mikäli kohteen korkeus ei ole tiedossa, lasketaan rakennus korkeaksi, jos siinä on 12–39 kerrosta.

**Perinteisellä asuinkerrostalolla** tarkoitetaan kohdetta, jossa sisälämpötila vaihtelee 18–30 celsiusasteen välillä ulkoilman lämpötilasta riippuen. Tämä vastaa asuinkerrostalolla suurin piirtein sisäilmastoluokitusta S3.

**Pilvenpiirtäjä** on yli 100 metriä korkea rakennus.

**Viilennetyllä asuinkerrostalolla** tarkoitetaan kohdetta, jossa sisälämpötila vaihtelee 20–27 celsiusasteen välillä ulkoilman lämpötilasta riippuen. Tämä vastaa asuinkerrostalolla suurin piirtein sisäilmastoluokitusta S2.

$c_p$	Ominaislämpökapasiteetti kuvaa, kuinka paljon lämpöenergiaa materiaaliin sitoutuu massaa ja lämpötilaeroa kohti. Ominaislämpökapasiteetin SI-yksikkö on $J / (kg \cdot K)$
$g$	Putoamiskiihtyvyys kuvaa vetovoiman aiheuttamaa kiihtyvyyttä kappaleille. Putoamiskiihtyvyys on riippuvainen sijainnista. Maassa putoamiskiihtyvyydelle käytetään arvoa $9,81 \text{ m/s}^2$
$h$	Korkeus tai etäisyys. Kappaleen etäisyys esimerkiksi maan pinnasta. Yksikkönä käytetään metriä, m.
$m$	Massa kuvaa kappaleen hitautta voiman vaikuttaessa siihen ja toisaalta kappaleen kykyä tuntea ja aiheuttaa gravitaatiovoimia. Massan SI-yksikkö on kg, kilogramma.
$\Delta T$	Lämpötilan muutos. Käytetään ilmaisemaan systeemiin tai siitä pois siirtyvää lämpömäärää. Esimerkiksi veden jäähtyessä $60 \text{ }^\circ\text{C}$ :sta $20 \text{ }^\circ\text{C}$ :een saa $\Delta T$ arvon $40 \text{ }^\circ\text{C}$ . SI-yksikkö on K, kelvin.

$\rho$  Tiheys kuvaa kappaleen massan ja tilavuuden suhdetta. SI-järjestelmässä tiheyden yksikkö on  $\text{kg/m}^3$

# 1 Johdanto

## 1.1 Tutkimuksen tausta ja tutkimusongelma

Suomessa on vasta muutamia korkearakentamisen kohteita. Ensimmäiset korkearakentamisen kohteet olivat julkisia tai hengellisiä kohteita, kuten Helsingin Hotelli Torni (1931). Yksityisiä korkearakentamisen kohteita alkoi kohota vasta 1980-luvulla, kun haluttiin korostaa esikaupunkien keskustoja. Tällöin valmistuivat esimerkiksi Itäkeskukseen ”Hammas” (1987, muutettu asuintorniksi 2015) sekä Hakaniemenrannan 16-kerroksinen asuinrakennus (1985). (Nousiainen 2017.)

Korkearakentaminen on lisääntynyt hiljalleen, mutta varsinaisen ”korkearakentamisen buumin” odotetaan olevan vielä tulossa. Helsingissä on kaavoitettu kaksi suurempaa korkearakentamisen kompleksia: Kalasataman keskusta REDI (8 tornia) sekä Pasilan Triplan tornit (3 kpl). Lisäksi Verkkosaarella, Länsisatamassa, Munkkivuorella ja Herttoniemessä on useita asemakaavoitettuja tontteja, joihin suunnitellaan 12–17-kerroksisia rakennuksia. Lisäksi Helsingissä on vireillä muita kaavahankkeita, kuten Keski-Pasila, joissa tutkitaan korkearakentamista. (Nousiainen 2017.) Myös muihin kaupunkeihin on suunnitteilla yli 20-kerroksisia asuintorneja: Esimerkiksi Tampereelle ollaan rakentamassa 21-kerroksista Luminary II:sta ja Espoon Keilaniemeen suunnitellaan neljän tornin kompleksia, joista korkein on 40-kerroksinen (Koivuranta 2017).

## 1.2 Korkearakentamisen erikoispiirteet

Rakennusten korkeuden kasvaessa erityisesti paloturvallisuuteen liittyvät vaatimukset kasvavat. Vuonna 2017 julkaistu Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta vaatii rakennukseen vähintään kaksi palolta suojattua uloskäyntiä, jos ylimmän kerroksen lattian etäisyys sitä palvelevan porrashuoneen sisäänkäyntitasosta on yli 38 metriä. Uloskäyntien määrä voidaan laskea yhteen kappaleeseen, mikäli uloskäynti on palolta ja savulta suojattu ja rakennus on varustettu automaattisella sammutuslaitteistolla. Lisäksi tämän korkuisessa rakennuksessa tarvitaan myös palomieshissi. Mikäli ylimmän kerroksen lattian ja porrashuoneen sisäänkäyntitaso on yli 52 metriä, tarvitaan kohteeseen yksi palolta suojattu ja yksi palolta ja savulta suojattu uloskäynti. Lisäksi rakennuksessa täytyy olla automaattinen sammutuslaitteisto. (YMa rakennusten paloturvallisuudesta 2017.)



Korkeissa rakennuksissa myös paine-erot aiheuttavat muutoksia lämmitys-, vesi-, ilmanvaihto- ja jäähdytysjärjestelmien (LVIJ) suunnitteluun. Suomen ilmastossa lämmityskaudella ulko- ja sisäilman välinen lämpötilaero voi olla yli 50 astetta, jolloin termien paine-ero ulko- ja sisäilman välillä on merkittävä (2 Pa / m). Tämä aiheuttaa erityisesti korkeissa rakennuksissa suuren hormivaikutuksen, jota voidaan hallita rakenteellisilla, arkkitehtonisilla sekä taloteknisillä keinoilla. Näistä tehokkaimmiksi on osoittautunut rakennusten tiivistäminen, osastointi sekä kuilujen lämpötilan pudottaminen lämmityskaudella. Mikäli kuiluja päätetään jäähdyttää, täytyy niiden lämpötilataso asettaa siten, että kuilun kaikissa osissa ollaan yli nollan asteen jäätymisriskin estämiseksi. Hormivaikutuksen hallinta on tärkeää, sillä ilman asian huomiointia korkeiden rakennusten alimmissa ja ylimmissä kerroksissa voi olla vaikeuksia avata ja sulkea ovia, vedon tunne lisääntyy ja hajut voivat siirtyä huoneistosta toiseen. Lisäksi lämmitysenergiankulutus kasvaa, sillä hormivaikutus lisää vuotoilmamäärää rakennuksen vaiipan läpi. Tämä johtuu alimmissa kerroksissa vaikuttavasta alipaineesta ja ylimpiin kerroksiin syntyvästä ylipaineesta. (Nyberg 2016.)

Korkearakentamiseen liittyvät suuremmat vaatimukset lisäävät sekä suunnittelu- että rakentamiskustannuksia ja kasvattavat teknisten järjestelmien tilavarauksia, jolloin myytävän huonealan osuus on korkeissa rakennuksissa usein pienempi kuin matalissa rakennuksissa. Jotta tornitalojen rakentamisesta saadaan taloudellisesti kannattavampaa, tarvitaan teknisten järjestelmien tilavarausten ja rakentamiskustannusten kustannusoptimointia.

### 1.3 Tutkimuksen tavoite ja rajaus

Opinnäytetyön tarkoituksena on koota korkearakentamiseen liittyvät erilliset suunnitteluratkaisut yhteen ja tarkastella niiden tila- ja kustannusvaikutuksia. Tarkan kustannustiedon saamiseksi työ suoritetaan yhteistyössä SRV:n kanssa heidän kolmelle rakenteilla tai suunnitteilla olevalle asuintornille, joita kutsutaan tässä työssä nimillä torni A, torni B ja torni C.

Projektin tavoitteena on löytää tilatehokkuuden ja rakentamiskustannusten kannalta optimaalisin ratkaisu korkeiden asuinrakennusten LVIJ-suunnitteluun. Projektin yhteydessä valmistuu korkeiden asuinrakennusten LVIJ-suunnitteluohje, jonka avulla kustannustehokkaat tilavaraukset voidaan tehdä heti suunnittelun alussa. Tällöin teknisten järjestelmien tilavarausten sijainti ja muoto voidaan valita siten, että tekniset tilat vähen-

tävät myytävää huonealaa mahdollisimman vähän ja toisaalta järjestelmien kustannukset ovat kohtuulliset.

Projektissa tarkastellaan korkeiden asuinkerrostalojen LVIJ-järjestelmien tila- ja kustannusvaikutuksia. Tutkimuksessa rajaudutaan tarkastelemaan Suomessa sijaitsevia asuinkerrostaloja, joiden ylimmän kerroksen lattian ja porrashuoneen sisäänkäyntitason etäisyys on yli 52 metriä. Opinnäytetyössä ei huomioida paloturvallisuuteen liittyviä järjestelmiä eikä maanalaisia tiloja. Lämmitys- ja jäähdytysratkaisun osalta tutkimuksessa tarkastellaan tarvittavia komponentteja lämmönjakohuoneesta eteenpäin, joten lämmitys- tai jäähdytysmuotoon (esim. kaukolämpö, kaukokylmä tai lämpöpumppujärjestelmät) ja sen tilavarauksiin ei oteta kantaa.

Opinnäytetyössä ei huomioida eri suunnitteluratkaisujen vaikutuksia muihin suunnittelualoihin, kuten sähkösuunnitteluun. Esimerkiksi hajautetussa ilmanvaihtojärjestelmässä jokaisen huoneiston ilmanvaihtokone kytketään kerroksessa olevaan jakokeskukseen, jolloin materiaalia tarvitaan enemmän kuin keskitetyssä ilmanvaihtoratkaisussa. Vastaavasti keskitetty ilmanvaihto vaatii erilaisia rakenneratkaisuja esimerkiksi kanavistojen läpivientien vuoksi. Nämä vaikutukset jätetään tämän opinnäytetyön ulkopuolelle.

## 2 Korkearakentamisen LVIJ-järjestelmät

### 2.1 Lämmitys- ja jäähdytysverkostot

Korkeissa rakennuksissa lämmitys- ja jäähdytysverkko joudutaan jakamaan pystysuuntaisiin vyöhykkeisiin putkiston ja tilalaitteiden paineenkeston vuoksi, sillä niihin kohdistuva staattinen paine kasvaa korkeuden kasvaessa (LVI-kortti 11-10472 2011). Esimerkiksi 35 metrin korkeus tarkoittaa noin 3,4 barin hydrostaattista painetta ja 100 metriä vastaa 9,8 barin painetta (Hydrostatic pressure 2018). Useilla valmistajilla on saatavilla 10 barin työpaineen kestäviä lämmityksen ja jäähdytyksen tilalaitteita (Stravent radiaattorit: Modul 4 2018; WehoFloor-käsikirja/asennusohje 2018; Purmo: Paneeliradiaattorit - PURMO Compact [C] 2018), mikä mahdollistaa lämmitys- ja jäähdytyspuolella asuinrakennuksen jakamisen yli 10 kerroksen pystysuuntaisiin vyöhykkeisiin. Tilalaitteiden yleisyyden ansiosta lämmitys- ja jäähdytyslaitteiden suunnittelu 10 barin paineenkestolle ei vaikuta kustannuksiin merkittävästi. Käyttövesiverkoston osalta 10 barin paineenkesto vaaditaan YM:n asetuksessa rakennusten vesi- ja viemärlaitteistoista (2017) joten sen osalta 10 barin paineenkesto ei aiheuta lisäkustannuksia.

Pystysuuntainen vyöhykejako voidaan toteuttaa tekemällä jokaiselle vyöhykkeelle oma pystynousunsa kellarikerroksesta. Tällöin kellarikerrokseen sijoitetaan oma lämmönsiirrin jokaiselle vyöhykkeelle. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää siirtoverkkoja, jolloin pystysuuntaiset vyöhykkeet on erotettu toisistaan niiden väliin asetetuilla lämmönsiirtimillä. Tämän ratkaisun toimivuus on kuitenkin kyseenalaista, sillä ensimmäisissä verkostoissa tulisi pitää jatkuva virtaus, jotta viimeisimmän verkoston lämmitys-/jäähdytystarve pystytään kattamaan kaikissa tilanteissa. Tämä lisää rakennuksen lämpöhäviöitä ja on siten energiaa tuhlaava vaihtoehto.

Kolmas vaihtoehto on toteuttaa pystysuuntainen lämmön-/kylmänjako korkeapainenusulinjoilla, joihin liitetään lämmönsiirtimillä noin kymmentä kerrosta palvelevia lämmitys-/jäähdytysverkkoja. Kaikissa ratkaisuissa tarvittava lämmönsiirtimien määrä on moninkertainen mataliin rakennuksiin verrattuna. Monimutkaisempi ja useampia komponentteja sisältävä talotekniikka johtaa siihen, että korkeiden asuinkerrostalojen suunnittelu-, rakennus- ja ylläpitokustannukset ovat korkeammat kuin matalissa asuinkerrostaloissa. Toisaalta korkeissa asuinkerrostaloissa huoneistojen ja asukkaiden määrä on merkittävästi suurempi kuin matalissa kerrostaloissa, mikä osaltaan kompensoi korkeampia toteutus- ja ylläpitokustannuksia.

### 2.1.1 Korkeapaineinen pystynousu siirtoverkkona

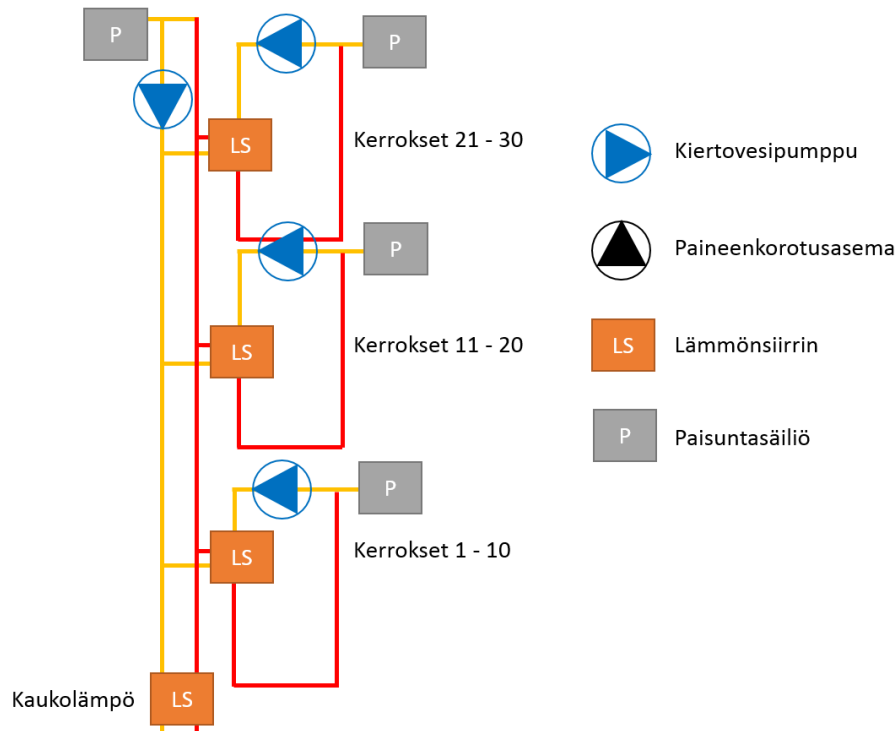
Ratkaisussa tornitalon alakertaan sijoitetaan lämmön- ja kylmänjakohuoneet, joista lähtevät pystysuuntaiset korkeapainenousulinjat rakennuksen ylimmän vyöhykkeen lämmönsiirtimille asti. Rakennus jaetaan staattisen paine-eron hallitsemiseksi pystysuunnassa noin 10 kerroksen korkuisiin vyöhykkeisiin, joiden lämmitys-/jäähdytysverkko liitetään korkeapainenousupariin lämmönsiirtimellä. Nämä lämmönsiirtimet sijoitetaan kerroksiin. Lämmönsiirtimeltä lähtevä lämmitys-/jäähdytysverkko palvelee kaikkia kyseisen vyöhykkeen huoneistoja. Lämmönsiirtimeltä lähtevät lämmitys-/jäähdytysverkot voidaan jakaa myös pienempiin osiin esimerkiksi palvelemaan eri ilmansuuntia, jolloin lämmitys- ja jäähdytystarvetta on mahdollista ohjata aurinkokuorman mukaan.

Korkeapainenousulinjaa käsitellään kuten kaukolämmön ensiöpuolta ja vasta kerroksiin sijoitettujen lämmönsiirtimien jälkeen alkaa lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien toisipuoli, jossa suurin sallittu käyttöpaine on usein 6 bar pääasiassa tilalaitteiden paineenkeston vuoksi.

Kerroksiin sijoitettavien teknisten tilojen haasteena ovat äänihaitat, sillä teknisten tilojen viereen tai ylä- ja alapuolelle sijoitettavien asuintilojen rakenteet saattavat vaatia erikoisratkaisuja talotekniikkalaitteista aiheutuvien äänten vaimentamiseksi. Korkeapainenousulinjaratkaisussa tekniset tilat voidaan toteuttaa eri kerroksiin, jolloin ne voivat olla keskenään päällekkäin kerroskäytävien ympäröimänä.

Korkeapainenousulinjan periaatekuva lämmityspuolelle on esitetty kuvassa 1. Korkeapainenousulinja yhdistetään lämmönsiirtimillä vyöhykkeittäin ilmanvaihtoon, tilalämmityslaitteisiin sekä käyttöveden lämmitykseen, minkä vuoksi jokaisessa pystysuuntaisessa vyöhykkeessä tarvitaan lämmönsiirrin korkeapainenousulinjan ja vyöhykeverkon välille.

Ratkaisussa korkeapainenousulinjaparilla on oma paisuntasäiliönsä, kuten jokaisella pystysuuntaisella vyöhykkeellä palvelevalla lämmitys-/jäähdytysverkolla. Vastaavasti jokaisella verkolla sekä korkeapainenousulinjaparilla on oma kiertovesipumppu.



Kuva 1. Korkeapainenusulinjoihin perustuvan lämmitysverkoston periaatekuva.

Ylimmän vyöhykkeen ja korkeapainenusulinjaparin väliin ei ole välttämätöntä asentaa lämmönsiirrintä, vaan ylin vyöhyke voidaan toteuttaa vastaavassa paineessa osana korkeapaineverkostoa esimerkiksi säätöryhmän avulla. Tämä kuitenkin hankaloittaa mahdollisten vesivuotojen paikantamista eikä toisaalta alenna rakentamiskustannuksia merkittävästi, joten lämmönsiirrintä suositellaan kaikkien vyöhykkeiden ja korkeapainenusulinjojen välille.

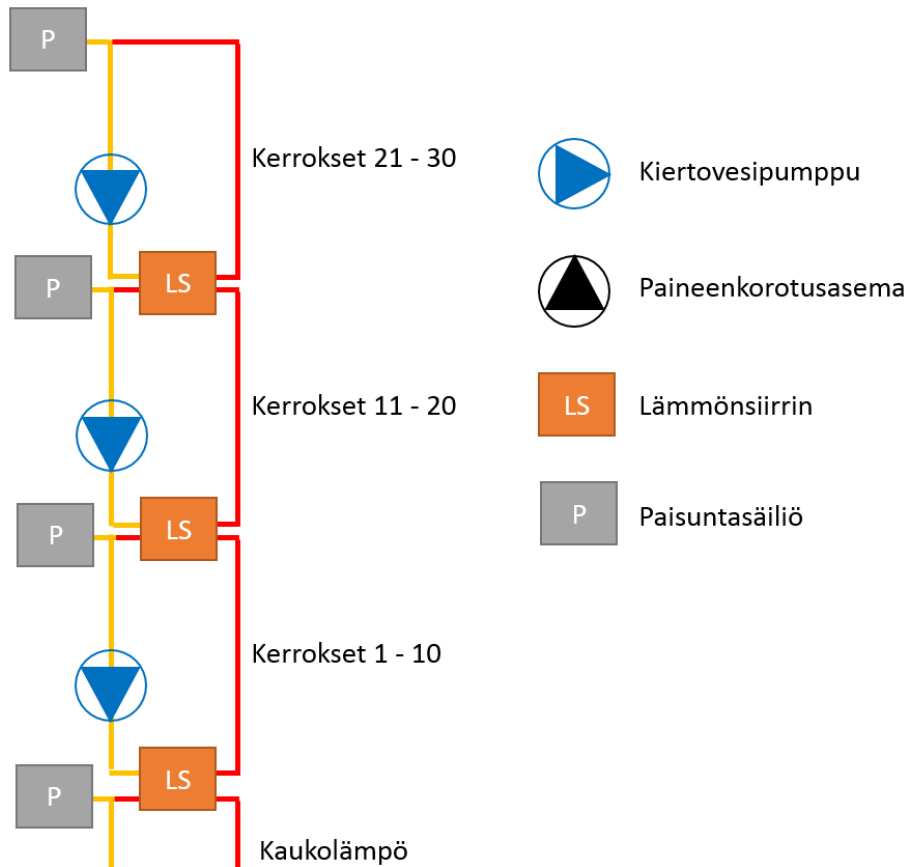
### 2.1.2 Siirtoverkot

Tornitalojen lämmitys- ja jäähdytysenergian siirto voidaan toteuttaa rakennuksen sisäisten siirtoverkkojen avulla. Tällöin lämmön-/kylmänjakuhuoneelta lähtee ensimmäinen siirtoverkko, joka palvelee esimerkiksi kerroksia 1–10. Kymmenennessä kerroksessa on toinen lämmönsiirrin, jonka avulla ensimmäisen lämmitys-/jäähdytysverkoston lämpöenergiaa siirretään seuraavan vyöhykkeen lämmitys-/jäähdytysverkostoon. Tämän vyöhykkeen lämmitys-/jäähdytysverkko palvelee vastaavasti seuraavaa kymmentä kerrosta, jolloin 20. kerroksessa on taas lämmönsiirrin, jonka avulla lämpöä/jäähdytystä siirretään seuraavia vyöhykkeitä palvelemaan lämmitys- tai jäähdytysverkostoon.

Koska ratkaisussa on useita toisiinsa kytkettyjä lämmitysverkkoja, jotka syöttävät toisiinsa lämmönsiirtimien avulla, täytyy lämmitysverkoston suunnittelussa kiinnittää erityistä huomiota toimintalämpötiloihin ja virtausmääriin. Virtausmäärät voivat kasvaa suu-

riksi väliverkoston vuoksi, sillä lämpötilaerot verkoston välillä ovat pieniä. Suuret virtausmäärät johtavat suuriin putkikokoihin. Erityisesti jäähdytyspuolella tästä voi aiheutua ongelmia, jos jäähdytysenergia otetaan kaukokylmäverkosta. Kaukokylmää hyödynnettäessä ylempien verkoston lämpötilatasot nousevat korkeiksi (esim. kolmannessa siirtoverkossa noin 14...16 °C, kun verkoston välinen  $\Delta T=2^{\circ}\text{C}$ ), jolloin ilmanvaihtojärjestelmän kuivausteho laskee merkittävästi ja vaarana on kondenssiveden syntyminen huoneistoissa. Lisäksi ratkaisussa täytyy huomioida, että alemmissa vyöhykkeissä lämmitys-/jäähdytystarve voi olla erilainen kuin ylemmissä vyöhykkeissä johtuen muun muassa hormivaikutuksesta sekä ympäristöstä tulevista varjostuksista.

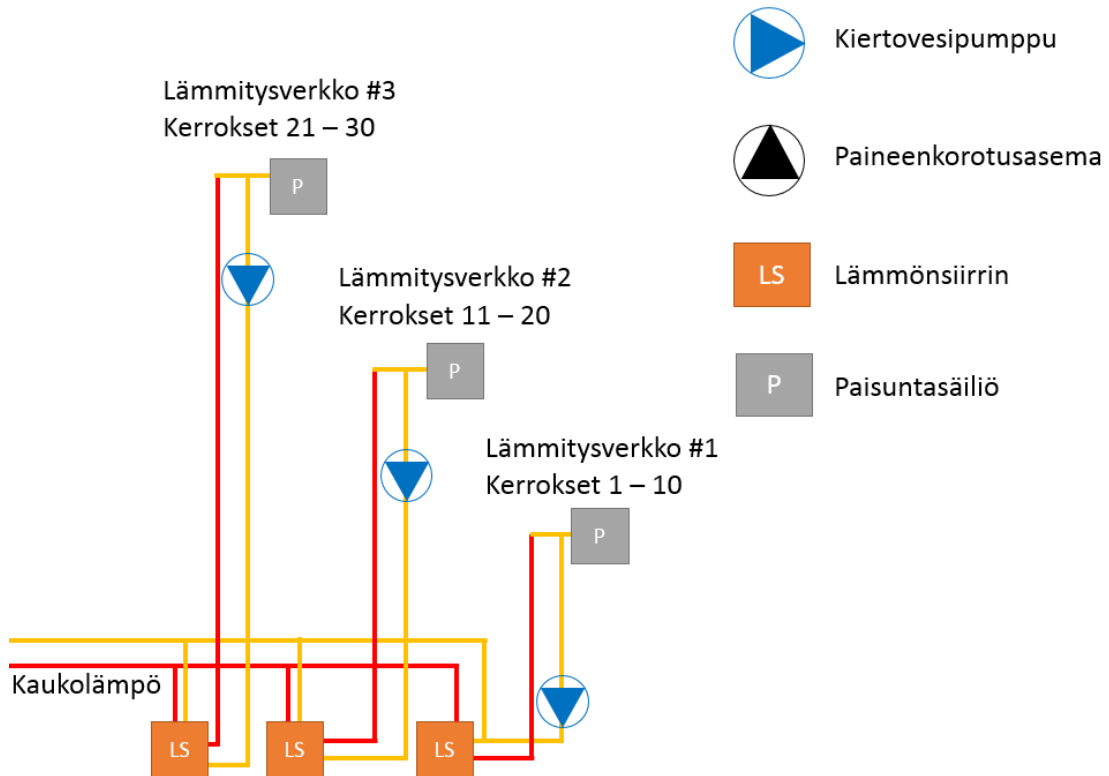
Ratkaisussa jokaisella lämmitys-/jäähdytysverkostolla on oma paisuntasäiliönsä. Lisäksi jokaisella lämmitys-/jäähdytysverkostolla on oma kiertovesipumppu, kuten korkeapainenusulinjapari-ratkaisussa. Mahdollisena etuna järjestelmällä on tarvittavien lämmitys-/jäähdytysverkoston sekä lämmönsiirtimien pienempi määrä, kun vyöhykkeiden omat energiaverkot toimivat myös siirtoverkkoina. Lämmönsiirtimien määrä vähenee yhdellä jokaisessa lämmitysverkossa (IV, tilalaitteet, LKV), mutta niiden koko on suurempi kuin korkeapainenusulinja-ratkaisussa tai useamman lämmönjakohuoneen ratkaisussa, sillä alempien kerrosten lämmönsiirtimien tehon täytyy kattaa myös kaikkien ylempien kerrosten tehontarve. Tämä johtaa suurempaan teknisen tilan tarpeeseen kerroksissa 11 ja 21. Kuvassa 2 on esitetty siirtoverkkojen periaatekuva.



Kuva 2. Siirtoverkkoihin perustuvan lämmitys- ja jäähdytysverkoston periaatekuva.

### 2.1.3 Useampi alajakokeskus kellarikerroksessa

Kolmas vaihtoehto staattisen paineen hallitsemiseksi on toteuttaa tornitalon lämmön/kylmänjako jakamalla rakennus jo kellarikerroksessa useampaan pystynousuun, joista jokainen palvelee omaa noin 10 kerroksen vyöhykettään kullekin vyöhykkeelle soveltuvalla painetasolla. Yksi alajakokeskuksista palvelee esimerkiksi kerroksia 1–10, toinen kerroksia 11–20 ja kolmas kerroksia 21–30. Samaa periaatetta voidaan soveltaa jäähdytyspuolella. Periaatekuva ratkaisusta on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Periaatepiirros useamman pystynousun ratkaisusta. Periaate on sama jäähdytyksessä.

Kuvan 3 mukainen ratkaisu vaatii, että ylempien vyöhykkeiden pystynousut toteutetaan korkeapainelinjoina. Korkeapainelinjoista päästään eroon sijoittamalla ylempien vyöhykkeiden pystynousuihin yksi välilämmönsiirrin, jolloin toteutusperiaate on kuvan 2 ja kuvan 3 ratkaisujen välimalli. Tällaisessa ratkaisussa jokaisella vyöhykkeellä on oma pystynousunsa, jolloin alempien vyöhykkeiden energiantarve ei vaikuta ylempien vyöhykkeiden energianjakeluun toisin kuin kuvan 2 mukaisessa ratkaisussa. Välisiirtimet vievät kuitenkin tilaa kerroksista, jolloin tällaisessa kuvien 2 ja 3 välimallissa joudutaan varaamaan usean pystynousun lisäksi tilaa myös kerrokseen tuleville välisiirtimille.

#### 2.1.4 Paisuntajärjestelmä

Järjestelmän staattinen paine lasketaan lämmitysverkostossa paisunta-astian alapinnan ja lämmitys-/jäähdytysverkoston ylimmän pisteen korkeuseron perusteella staattisen paineen kaavalla ( $\rho gh$ ) (LVI-kortti 11-10472 2011; Hydrostatic pressure 2018). Tästä johtuen erityisesti korkeissa rakennuksissa paisunta-astia kannattaa sijoittaa lähelle verkoston ylintä kohtaa, tai staattinen paine ja tätä kautta paisunta-astialle valittava esipaine kasvavat erittäin suuriksi.

Paisunta-astiamallin valinnalla voidaan vaikuttaa tilantarpeeseen. Korkeissa rakennuksissa voidaan käyttää kompressori- tai pumppuohjattua paisunta-automaattia, joka on



huomattavasti pienempi kuin tavanomainen paisunta-astia. Taulukossa 1 on esitetty Rajapuron (2015) laskemat paisunta-astioiden tilavuudet kompressoriohjatulle ja tavalliselle paisunta-astialle erikokoisissa verkostoissa. Ero kompressoriohjatun ja tavallisen paisunta-astian tilavuudella välillä on yli 5-kertainen, joten useita paisunta-astioita tarvitsevilla ratkaisuilla – kuten tornitaloissa – tilantarve on suurempi tavallista paisunta-astiaa käytettäessä ja kompressoriohjatun paisunta-astian valinta voi täten olla perusteltua.

*Taulukko 1. Kompressoriohjatun ja tavallisen paisunta-astian tilavuudet erikokoisissa verkostoissa (Rajapuro 2015).*

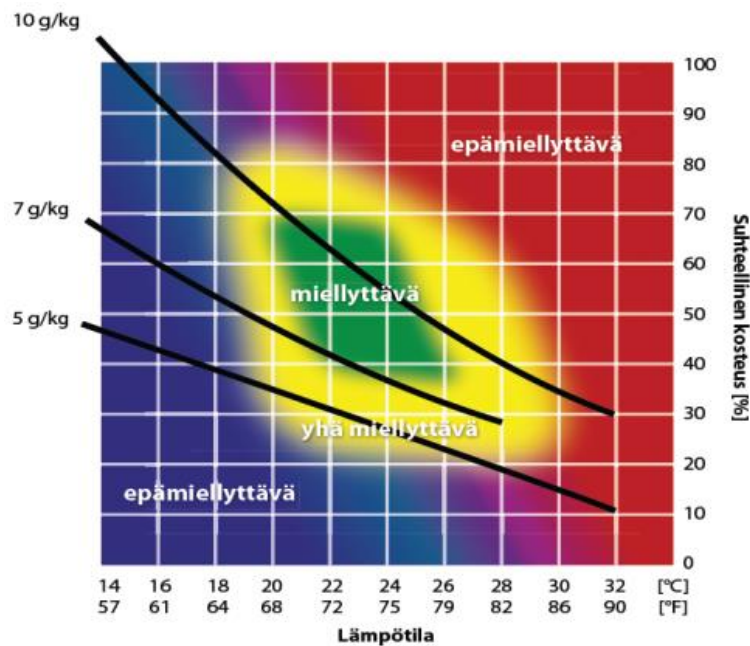
Paisunta-astia tyyppi	Järjestelmän tilavuus dm <sup>3</sup>	Esipaine kPa	Varoventtiilin avautumispaine kPa	Korkein lämpötila °C	Alin lämpötila °C	Paisunta-astia tilavuus dm <sup>3</sup>
<b>Kompressoriohjattu</b>	1500	400	600	60	10	<b>36</b>
<b>Tavallinen</b>	1500	400	600	60	10	<b>201</b>
<b>Kompressoriohjattu</b>	3000	400	600	60	10	<b>71</b>
<b>Tavallinen</b>	3000	400	600	60	10	<b>401</b>
<b>Kompressoriohjattu</b>	5000	400	600	60	10	<b>119</b>
<b>Tavallinen</b>	5000	400	600	60	10	<b>669</b>

Tutkimuskohteeksi valitussa rakennuksessa tornitalon korkeapainenusulinjan järjestelmän tilavuus on noin 1 200 litraa. Lämmitysverkoston tilavuus tornitalossa voi yhden vyöhykkeen osalta olla yli 6 000 litraa, kun huomioidaan runkoputkiston lisäksi myös lattialämmitysverkoston tilavuus. Taulukon 1 perusteella pienemmissä järjestelmätaluuksissa paisunta-astia ei vie merkittävästi tilaa riippumatta sen tyypistä, mutta suuremmissa järjestelmissä kokoero alkaa olla jo huomattava. Tornitalon lattialämmitysverkoston lämpötilaero on kuitenkin pienempi kuin taulukossa 1 esitetyt lämpötilat, minkä vuoksi paisunta-astian koko jää lattialämmitysverkostossakin maltilliseksi, arviolta noin 200 litraan käytettäessä tavallista paisunta-astiaa.

#### 2.1.5 Tilalämmitys ja -jäähdytyslaitteet

Tuloilman viilennys tai sen puuttuminen vaikuttaa tilajäähdytyslaitteiden valintaan. Ilman tuloilman viilennystä toteutettavissa kohteissa tilajäähdytyslaitteet täytyy valita siten, että niissä on kondenssiveden keräys. Tämän kriteerin täyttäviä jäähdytyksen tilalaitteita ovat käytännössä ainoastaan puhallinkonvektorit. Tuloilman viilennyksellä varustettuihin kohteisiin käyvät kaikki tilajäähdytyslaitteet, koska tällöin tilaan saapuva ilma voidaan kuivattaa jo ilmastointikoneella, jolloin tilassa ei synny kondenssivettä.

Kosteudenhallinnan lisäksi ilman kuivatus parantaa sisäilmasto-olosuhteita, sillä kuivattu 24 °C (RH 40..65%) ilma koetaan huomattavasti miellyttävämmäksi kuin vastaavassa lämpötilassa oleva kostea tai erittäin kuiva ilma, kuva 4 (Kuusinen 2017).



Kuva 4. Suhteellisen kosteuden ja lämpötilan yhteisvaikutus ihmisen kokemaan sisäilmastoon (Kuusinen 2017).

Asuintorneissa täytyy muistaa, että käyttäjät voivat avata ikkunoita ja päästää kosteaa ilmaa tätä kautta sisään. Tällöin kohteissa, joissa on tilajäähdytyslaite ilman kondenssi-veden keräystä, täytyy automaatio toteuttaa siten, että tilajäähdytyslaitteet menevät pois päältä suhteellisen kosteuden noustessa liian korkeaksi. Tämä voidaan toteuttaa esimerkiksi kastepisteeseen perustuvalla ohjauksella.

Tornitaloissa mahdollisia tilalämmityslaitteita ovat

- lattialämmitys
- patterit
- puhallinkonvektorit
- säteilijät.

Tornitaloissa mahdollisia tilajäähdytyslaitteita ovat

- lattiaviilennys
- puhallinkonvektorit
- säteilijät
- jäähdytyspalkit.

Yllä esitetyistä tilalämmitys- ja tilajäähdytyslaitteistoista patterit ovat ainoa tilalaitte, jonka hyödyntäminen jäähdytystarkoituksessa on haastavaa riittävien jäähdytystehojen saamiseksi. Vaikka puhallinkonvektoreilla ja säteilijöillä voidaan tuottaa jäähdytyksen lisäksi myös lämmitystä, käytetään yleensä niiden rinnalla muita lämmityksen tilalaitteita, kuten pattereita tai lattialämmitystä. Taulukossa 2 on esitetty eri vaihtoehdot tilajäähdytyslaitteille riippuen ilmanvaihdon toteutuksesta.

*Taulukko 2. Vaihtoehtoja tilalämmitys- ja -jäähdytyslaitteiden valintaan ja niiden vaikutus sisäilmastoon.*

Tilalämmitys	IV-järjestelmä	Tuloilman viennitys	Jäähdytys	Sisäilmasto
lattialämmitys tai patterit	asunto	ei	puhallinkonvektorit	S1
lattialämmitys tai patterit	asunto	ei	tuloilman jäähdytys	S2
lattialämmitys tai patterit	asunto	ei	ei ole	S3
lattialämmitys tai patterit	keskitetty	ei	puhallinkonvektorit	S1
lattialämmitys tai patterit	keskitetty	ei	tuloilman jäähdytys	S2
lattialämmitys tai patterit	keskitetty	ei	ei	S3
lattialämmitys tai patterit	keskitetty	kyllä	ei	S3+
lattialämmitys tai patterit	keskitetty	kyllä	puhallinkonvektorit	S1
lattialämmitys tai patterit	keskitetty	kyllä	säteilijät	S1
lattialämmitys tai patterit	keskitetty	kyllä	jäähdytyspalkit	S1
lattialämmitys	keskitetty	kyllä	lattiajäähdytys	S1

Kattosäteilijöitä ja puhallinkonvektoreita voidaan käyttää sekä tilalämmitys- että -jäähdytyslaitteina. Kattosäteilijöissä haasteena on riittävän lämmitystehon saaminen heikentämättä asumismukavuutta: huoneistoihin voi jäädä katvealueita, joita tilalämmityslaitteet eivät kata (Kattolämmityksen opas 2001). Radiaattorit ja lattialämmitys on helpompi sijoittaa siten, että ne tuovat lämpöä tasaisesti kaikkialle huoneistoon. Asuinrakennuksissa yleisin tilalämmityslaitte on radiaattorilämmitys sen edullisuuden vuoksi. Lattialämmitys soveltuu lämpötilatasonsa ansiosta myös uusiutuville energianlähteille eikä siinä ole erillisiä näkyviä lämmönluovuttimia (Seppänen 2001).

Asuntojen keskimääräinen lämmitystehontarve on noin 40–50 W / m<sup>2</sup> (Suunnitteluohje LK Lämmitys 2018; LVISK kalenteri 2018). Lattialämmitysjärjestelmän lämmitysteho on keskimäärin 11 W / (m<sup>2</sup> °C), jolloin esimerkiksi 21 °C:n huonelämpötilalla ja 27 °C:n

lattianpintalämpötilalla lämmitysteho on  $66 \text{ W / m}^2$ . Osa tehosta suuntautuu kuitenkin alaspäin, jolloin lattialämmityspiiristä huoneistoon saatava lämmitysteho on noin 15 % pienempi eli noin  $55 \text{ W / m}^2$ . Lattiaviilennysteholle voidaan arvioida  $7 \text{ W / (m}^2 \text{ °C)}$ , jolloin huonelämpötilalla  $25 \text{ °C}$  ja lattianpintalämpötilalla  $21 \text{ °C}$  saadaan viilennystehoksi  $28 \text{ W / m}^2$ . Käytännössä lattiaviilennysjärjestelmän tehontuotto on simuloitava, koska siihen vaikuttaa voimakkaasti auringon säteilyn tuoma lisäteho. (Lattialämmitys- ja viilennysratkaisut kerrostaloissa 2017.) Muiden tilalaitteiden osalta lämmitys- ja jäähdytystehoon voidaan vaikuttaa merkittävästi esimerkiksi muuttamalla ilmamääriä tai tilalaitteiden kokoja. Esimerkiksi radiaattorilämmityksestä saatava teho riippuu olennaisesti radiaattorien pinta-alasta. Käytännössä kaikilla tilalaitteilla saadaan katettua lämmitystehontarve, jos laitteita asennetaan kohteeseen riittävästi. Jäähdytystehontarpeen osalta lattiaviilennysjärjestelmän kapasiteetti on rajallisin, mutta tehtyjen simulointien perusteella se riittää pitämään asuinhuoneiston lämpötilan alle  $25 \text{ °C}$ . Lattialämmitys- ja -viilennyslaitteistolla energia saadaan jaettua huoneistoon tasaisesti.

Taulukossa 3 on esitetty asuintorniin laskettuja kokonais- ja ominaiskustannuksia hyödyntäen Talon rakennuksen kustannustiedon (2012) ominaiskustannuksia yleisratkaisultaan vaativampaan asuinkerrostaloon. Laskennassa on käytetty tutkimuskohteena olevan torni C:n pinta-alatietoja, jossa bruttopinta-alaa on noin  $23\,000 \text{ m}^2$  ja hyötyalaa noin  $13\,000 \text{ m}^2$ . Talon rakennuksen kustannustiedon (2012) mukaan radiaattorilämmitys on rakennuskustannuksiltaan selvästi edullisempi kuin lattialämmitys. Suuri osa lattialämmityksen kustannuksista syntyy pintavalusta, jota ei esimerkiksi ontelolaatta+märkätilaelementti -kohteessa tarvittaisi ilman lattialämmitysjärjestelmää. Mikäli kohteeseen tarvitaan pintavalu tilalämmityslaitteiden tyypistä riippumatta, kustannusero radiaattoreiden ja lattialämmityksen välillä on huomattavasti pienempi.

*Taulukko 3. Tilalämmityslaitteiden rakennuskustannuksia vaativaan asuinkerrostaloon (Talon rakennuksen kustannustieto 2012).*

	Kokonaiskustannus, €	Ominaiskustannus, €/brm <sup>2</sup>
<b>Radiaattorit</b>	149 130	6,4
<b>Lattialämmitys</b>	383 322	16,5
<b>Vesikiertoiset kattosäteilijät</b>	300 589	12,9
<b>Puhallinkonvektorit, huonekohtainen</b>	442 729	19,0
<b>Puhallinkonvektorit, tilakohtainen</b>	216 704	9,3
<b>Radiaattorit ja säteilijät</b>	449 719	19,3
<b>Radiaattorit ja konvektorit</b>	365 834	15,7
<b>Tuloilman jäähdytys + radiaattorit</b>	267 965	11,5

Viilennetyissä ratkaisuisa kohteessa on tilalämmityslaitteiden lisäksi vähintään tilajäähdytyslaite. Jäähdytetyissä eli sisäilmastoltaan laadukkaammissa kohteissa on lisäksi tuloilman jäähdytys tai viilennys. Tilalämmityslaitteita valittaessa tulee muistaa aiemmin mainittu kondenssiveden keräys, mikäli kohteeseen ei toteuteta tuloilman viilennystä tai jäähdytystä.

Radiaattoreita ei voida hyödyntää tilajäähdytyslaitteina toisin kuin lattialämmitystä, joten jäähdytettymiin kohteisiin tarvitaan radiaattoreiden lisäksi erilliset laitteet tilajäähdytyksen toteuttamiseksi. Esimerkiksi radiaattorilämmitys ja kattosäteilijät maksavat taukukon 3 perusteella laajuudeltaan 20 000 brm<sup>2</sup> vaativassa asuin-kohteessa yhteensä noin 450 000 euroa. Radiaattorilämmitys ja tilakohtaiset puhallinkonvektorit vastaavassa kohteessa kustantavat yhteensä lähes 370 000 euroa. Lattialämmitysjärjestelmä vastaavaan kohteeseen maksaa hieman yli 380 000 euroa, joten lattialämmitys- ja viilennysjärjestelmän voidaan sanoa olevan lähes samanhintainen tai edullisempi kuin radiaattorilämmitys yhdistettynä toiseen tilajäähdytyslaitteeseen.

Kohteen sisäilmasto-olosuhteita voidaan parantaa radiaattorilämmitteisessä kohteessa lisäämällä ilmanvaihtoon tuloilman jäähdytys. Talon rakennuksen kustannustiedon (2012) mukaan IV-koneiden jäähdytysverkosto maksaa 3,5 € / brm<sup>2</sup> eli mallikohteessa noin 80 000 euroa. Lisäksi tarvitaan vedenjäähdytysyksikkö ja lauhduttimet, jotka varusteineen maksavat tässä kokoluokassa yhteensä hieman alle 40 000 euroa. Tuloilman jäähdytys ei välttämättä vaadi erikoispäätelaitteita, jolloin kokonaiskustannus tuloilman jäähdytykselle on noin 120 000 euroa. Tällöin radiaattoreiden kanssa tämä ratkaisu kustantaisi yhteensä noin 270 000 euroa.

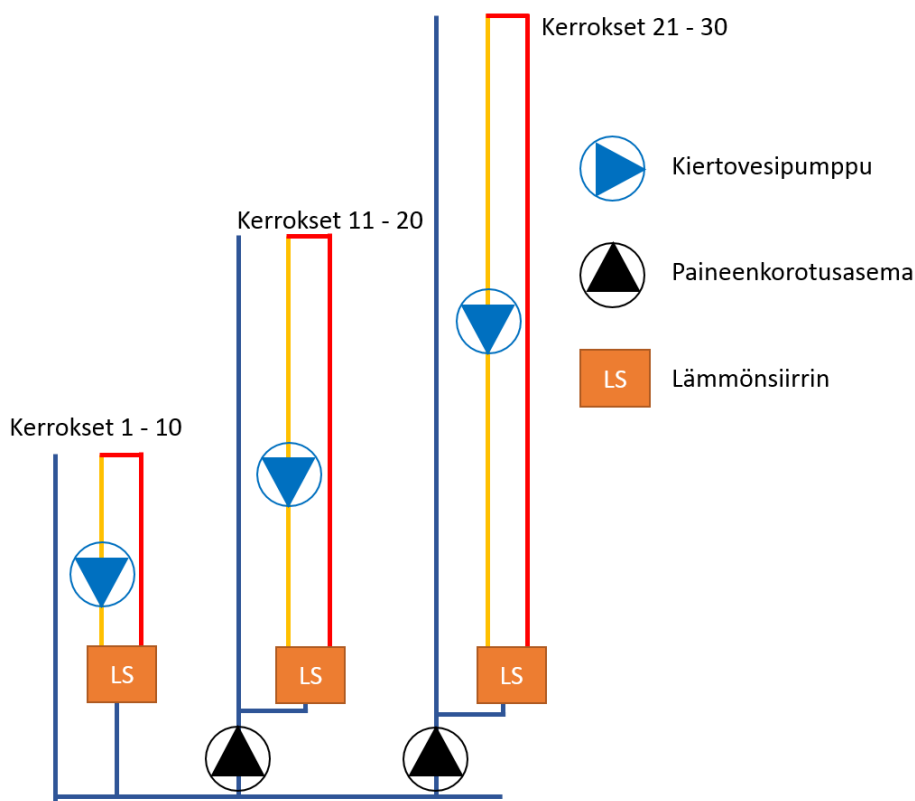
## 2.2 Vesihuolto

### 2.2.1 Käyttövesilinjat

Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D1 mukaisesti korkeissa rakennuksissa tulee käyttää paineenkorotuslaitteistoja (YMa rakennusten vesi- ja viemärlaitteistoista 2017), jotta voidaan varmistaa käyttövesilinjaston paineen riittävyys. Tarvittavien paineenkorotuslaitteistojen määrä riippuu rakennuksen korkeudesta. Rakennus jaetaan tyyppillisesti korkeussuunnassa noin 6–8 kerroksen korkuisiin vyöhykkeisiin, jotta paineero vyöhykkeen ala- ja yläosan välillä ei kasva liian suureksi. Tornitaloissa voidaan käyttää jopa 10 kerroksen korkuisia vyöhykkeitä, jolloin vyöhykkeen alaosissa käyte-

tään paineenalennusventtiiliä. Tornitalon alimpaan vyöhykkeeseen ei tarvita paineenkorotusasemaa, vaan se toimii kunnallisen vesijohtoverkoston paineella.

Paineenkorotus voidaan toteuttaa rakennuksen lämmönjakohuoneessa, jolloin jokaiselle vyöhykkeelle tulee oma pystynousu lämmönjakohuoneesta vyöhykkeen ylimpään kerrokseen saakka (kuva 5) (Rajapuro 2015). Tämä ratkaisu vaatii hieman enemmän kuilutilaa usean nousulinjan vuoksi, mutta toisaalta lämmönsiirtimek sekä paineenkorotusasemat kiertopumppuineen saadaan sijoitettua rakennuksen alaosaan, joka on myyntihinnaltaan halvin kerros. Tässä ratkaisussa yhden vyöhykkeen kylmä- ja lämminvesiverkoston paineenkorotus toteutetaan yhdellä paineenkorotusasemalla. Vaihtoehtoisesti kuvassa 5 olevien kerroksien 11–30 vyöhykkeiden kylmävesilinjat voitaisiin korottaa korkeamman vyöhykkeen (kerrokset 21–30) tarvitsemaan paineeseen ja tämän jälkeen alentaa painetta ennen kylmän veden syöttämistä kerroksia 11–20 palveleville verkostoille. Tällöin kohteeseen tarvittaisiin vain yksi paineenkorotusasema palvelemaan koko rakennusta ja keskimmäisen vyöhykkeen painetta säädettäisiin paineenalennusventtiilin avulla.

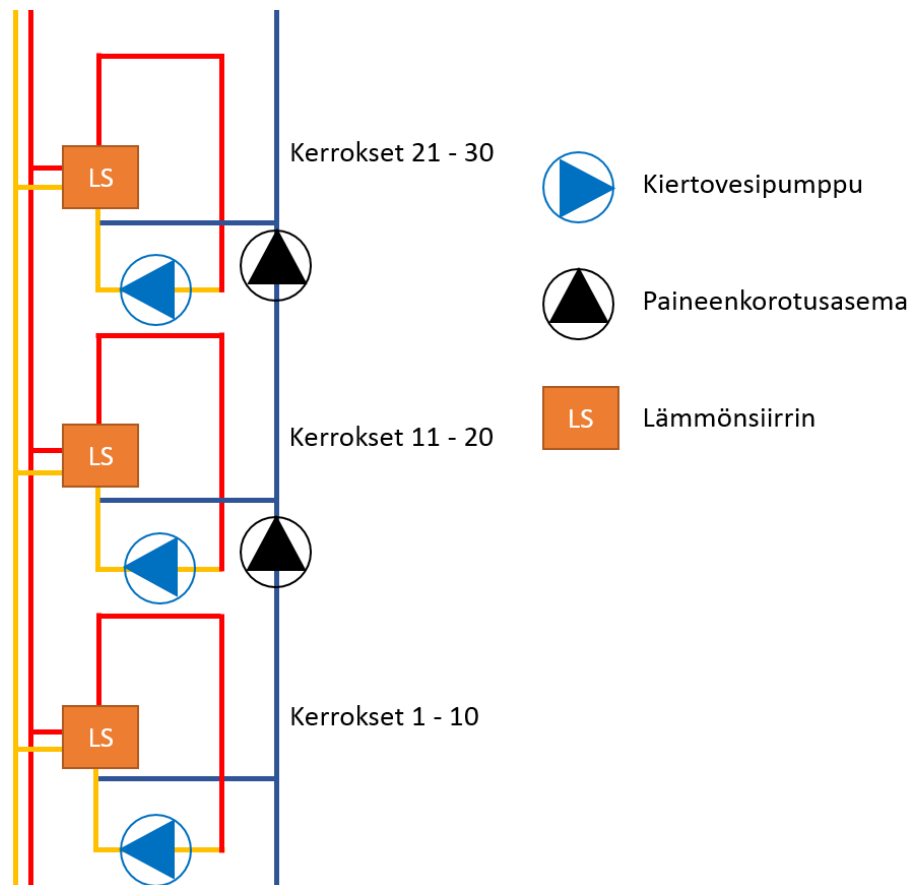


Kuva 5. Periaatepiirros ratkaisusta, jossa jokaiselle vyöhykkeelle on oma pystynousunsa lämmönjakohuoneesta.

K1/2013 ohjeistuksen mukaan toisiopuolen suurin sallittu käyttöpaine käyttövesiverkostossa on 1 MPa ja lämmitysverkostossa 0,6 MPa (Rakennusten kaukolämmitys,

määräykset ja ohjeet 2014). Mikäli paineentarve on yli 1 MPa, täytyy paine korottaa vasta lämmönsiirtimen jälkeen (LVI-kortti 10-10549 2013). Esimerkiksi suihkussa painehäviö on luokkaa 200–300 kPa (Oras Optima 7149, tekniset tiedot 2018), joten 1 MPa ylittyy noin 70–80 metrin korkeudessa. Kerroskorkeuden ollessa 3,5 metriä tämä vastaa noin 20–23-kerroksista tornitaloa, joten hyvin korkeissa rakennuksissa yllä esitetty ratkaisuvaihtoehto ei ole mahdollinen ilman kaukolämpöyhtiön lupaa.

Suuret paineentarpeet voidaan välttää sijoittamalla paineenkorotusasemat kerrokseen (kuva 6). Tällöin paineenkorotusasemat vievät arvokkaampaa tilaa, sillä ylöspäin mentäessä myytävän huonealan arvo kasvaa. Toisaalta ratkaisussa tarvitaan vain yksi pystynousu ja saadaan järjestelmälle pienempi painetaso, jolloin liitos- ja laitteistovaurioiden riski on vähäisempi (Rajapuro 2015).



Kuva 6. Käyttövesilinjaston pystynousujen toteuttaminen kerrokseen sijoitettavilla paineenkorotusasemilla.

Kuvassa 6 lämmitysverkoston nousulinja on toteutettu korkeapaineisena, jolloin vältetään kuvan 3 mukaisilta useilta lämmitysverkoston nousulinjoilta. Tällöin kuitenkin jokaiselle vyöhykkeelle tarvitaan oma lämmönsiirtimensä, jotta alemmissa vyöhykkeissä hydrostaattinen paine ei kasva liian suureksi. Lämmönsiirtimet vievät tilaa ylempien

kerrosten myytävistä neliöistä. Lisäksi käyttövesilinjaston käyttöpainetta korotettaessa täytyy huomioida, että lähellä paineenkorotusasemaa käyttövesilinjaston liikapaine voi kasvattaa vedenkulutusta. Tästä johtuen on syytä tarkastella, tarvitaanko vyöhykkeen alimpiin kerroksiin paineenalennuslaitteet. Tällaiseen tilanteeseen voidaan joutua, jos yhden vyöhykkeen kerrosmäärä on korkea tai putkistossa ei riitä väljyyttä. Esimerkiksi 6–8 kerroksen korkuisissa vyöhykkeissä paineenalennusta ei tarvita.

Huomioimalla paineenkorotusasemien tilantarve riittävän aikaisessa vaiheessa voidaan paineenkorotusasemat sijoittaa toisarvoisempiin tiloihin, jolloin niiden vaikutus myytävään huoneistoalan määrään on vähäinen. Haasteena kerroksiin sijoitettavien paineenkorotuspumppujen osalta ovat äänihaitat huoneistoihin, joten niiden sijainti ja akustiikka tulee suunnitella tarkoin.

Korkeissa rakennuksissa käytettävissä paineenkorotuspumpussa on hyvä olla vähintään kaksi pumppua toimintavarmuuden takaamiseksi. Paineenkorotuspumppujen määrään vaikuttaa myös mitoitusvirtaama, joka riippuu kohteessa olevien vesikalusteiden määrästä ja niiden normivirtaamista. Esimerkiksi kohteessa, jossa yhdessä kerroksessa on 11 huoneistoa, on kylmän veden normivirtaama noin 8,8 l/s ja lämpimän veden noin 5,5 l/s. Tällöin esimerkiksi 10 kerroksen vyöhykkeen normivirtaama on yhteensä 143 l/s, joka vastaa vesilaitteiston mitoitusohjeiden (D1/2007 Liite 2 2007) mukaan mitoitusvirtaamaa 4,5 l/s. 30 asuinkerroksen normivirtaama olisi tällöin 429 l/s ja mitoitusvirtaama 10,3 l/s. Yhden vyöhykkeen nostokorkeus on noin 30 metriä ja 30 kerroksen nostokorkeus noin 90 metriä.

Edellä esitettyjen ratkaisujen lisäksi tornitalon paineenkorotus voidaan toteuttaa yhdellä kellarikerrokseen sijoitettavalla paineenkorotusasemalla ja laittamalla alimpiin vesihuollon vyöhykkeisiin paineenalennusventtiilit. Tällöin kellarikerroksen paineenkorotusasemassa tulee olla useampia pumppuja, sillä mitoitusvirtaama ei vastaa todellista käyttöä kaikilla ajan hetkillä, jolloin pienillä virtaamilla (esim. 30 % tehontarpeella) yksi pumppu ei pysty tuottamaan tarvittavaa nostokorkeutta. Tällöin pumppuja voi olla esimerkiksi kolme, jolloin yksi pumpuista voi toimia täydellä teholla silloin, kun vedenkulutus on pientä.

Kellarikerrokseen valittavan paineenkorotusaseman täytyy pystyä nostamaan koko rakennuksen mitoitusvirtaama eli 10,3 l/s vähintään seuraavalle paineenkorotusasemalle eli noin 30 metriin. Tähän tarkoitukseen soveltuu esimerkiksi Hydro Solo E Cre



32-2-2 HQQE – 98453516, jonka tilantarve on noin  $0,3 \text{ m}^2$  (Solo E Cre -tuotekortti 2018). Tässä paineenkorotusasemassa on kuitenkin vain yksi pumppu, mikä voi aiheuttaa ongelmia häiriötilanteessa tai pienillä virtauksilla. Ylintä vyöhykettä palvelevana paineenkorotusasemana voisi toimia esimerkiksi Grundfosin Hydro Multi E -sarjan 2 Crie5-09 -paineenkorotusasema, jonka tilantarve on hieman yli  $0,6 \text{ m}^2$  (Hydro Multi E -tuotekortti 2018). Tämän lisäksi paineenkorotusasemalle kannattaa varata huoltotilaa. Mikäli paineenkorotus halutaan toteuttaa yhdellä paineenkorotusasemalla, kannattaa kellariin varata noin 1,5-kertainen tilantarve yhtä vyöhykettä palvelemaan paineenkorotusasemaan verrattuna eli arviolta  $1,5 \text{ m}^2$ .

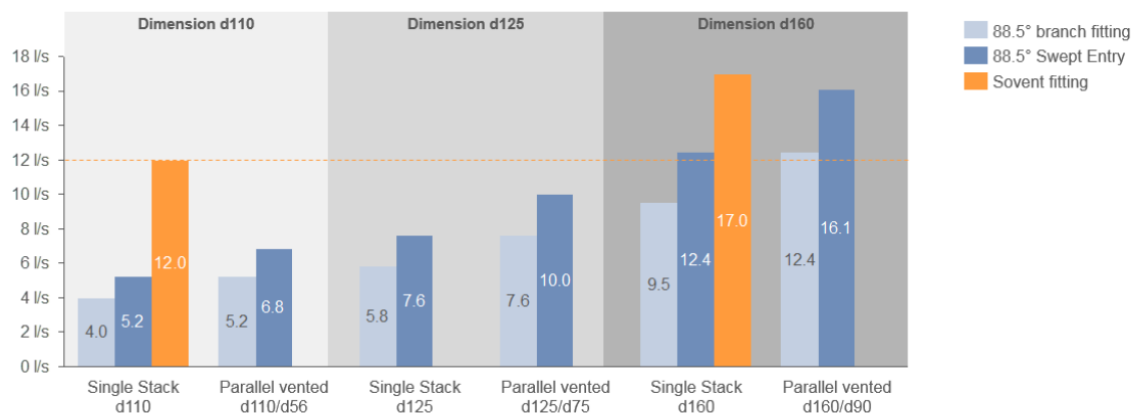
Paineenkorottaminen vaatii energiaa, joten käyttökustannusten pienentämiseksi putkistot tulisi suunnitella väljiksi, jolloin virtausnopeus pienenee ja painehäviöt vähenevät (7 Vesilaitteiston mitoitus 2018). Toinen tapa vähentää häviöitä on suunnitella putkistosta mahdollisimman suoraviivainen, jolloin suunnanmuutoksia on vähän ja näin ollen kerstavastusten määrä pienenee (Lehkonen & Harju 2011; SC-, VS- ja NC-tuoteluettelo 2015). Grundfosin mitoitusohjelman mukaan Hydro Multi E -sarjan 2 Crie5-09 -paineenkorotusaseman elinkaarikustannukset yhdelle 10-kerroksiselle vyöhykkeelle ovat 10 vuoden aikana noin 20 000 euroa ja vuotuinen energiankulutus noin 3,7 MWh. Pumpun alkuinvestointi on noin 12 000 euroa. (Hydro Multi E -tuotekortti 2018.)

Tornitalossa tarvittavien putkinousujen koot ovat suuruusluokaltaan DN50. Pystynousut toteutetaan usein kuparista, jolloin putkikoon kasvattaminen yhdellä koolla esimerkiksi putkikoosta DN54 kokoon DN64 lisää materiaalikustannuksia  $25 \text{ € / m}$ . Asuinkerrostalojen kerroskorkeus on usein noin 3,2 metriä, jolloin 30-kerroksisessa asuinkerrostalossa putkikoon kasvattaminen lisää materiaalikustannuksia noin 5 000 euroa kupariputkella ja RST:llä (DN50 -> DN65) noin  $8 \text{ €/m}$  eli 1 500 €. Energiankulutuksen osalta esimerkiksi kupariputken lämpöhäviö 40 Celsiuksen lämpötilaerolla (LKV verkosto  $60 \text{ °C}$  ja sisälämpötila  $20 \text{ °C}$ ) ja 60 mm eristyksellä putkikoolla 54 on  $8 \text{ W/m}$  ja koolla 76,1 mm lämpöhäviö on  $10 \text{ W/m}$  (Paroc Calculus 2018). Tämä tarkoittaa, että 30-kerroksisessa asuintornissa lämpöhäviötä syntyy pienemmällä putkikoolla noin 14 MWh (800 euroa) vuodessa ja suuremmalla 18 MWh (1 000 euroa) vuodessa. Kokonaisuuden kannalta energiansäästö on merkityksetön varsinkin, jos huomioidaan suuremmista putkidimensioista aiheutuvat muutokset kuilujen ja alakattojen tilavarauksiin.

## 2.2.2 Viemärijärjestelmät

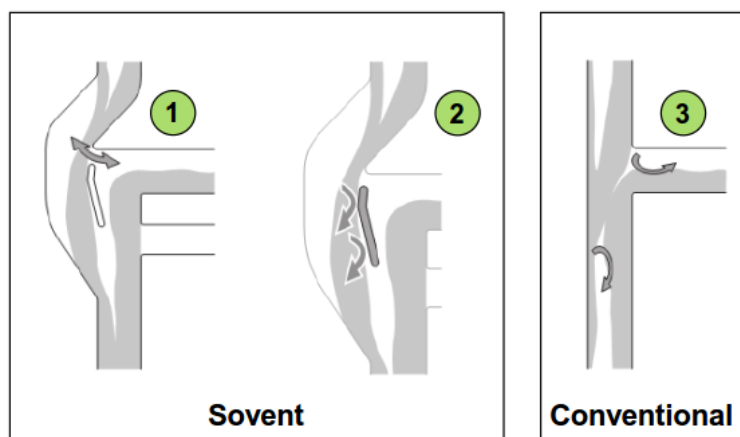
Rakennusten korkeus ei vaikuta viemärijärjestelmien runkoputkistojen suunnitteluperiaatteisiin, sillä jätevedestä noin 70–85 % virtaa kierrevirtauksena viemäriin seinämiä pitkin saavuttaen maksimaalisen nopeuden jo 3–5 metrin pudotuksessa (Takala 2014).

Haasteeksi korkeissa rakennuksissa tulevat pystyviemäreiden koot, sillä suuren kapasiteettitarpeen vuoksi niiden dimensiot voivat kasvaa hyvinkin suuriksi. Pystyviemäreiden dimensioita voidaan pienentää optimoimalla virtaustekniikkaa. Esimerkiksi Geberitillä on Sovent-niminen järjestelmä, jonka viemärointikapasiteetti on huomattavasti suurempi kuin perinteisessä ratkaisussa. Kuvan 7 mukaan perinteisellä liitännätavalla virtaamaan 12 l/s tarvitaan DN160-putkisto, mutta Sovent-järjestelmällä putkikokoa voidaan pienentää DN110:een. (Drainage in high-rise buildings 2018.)



Kuva 7. Eri viemärijärjestelmillä tarvittavia runkokokoja (Drainage in high-rise buildings 2018).

Suurin ero perinteiseen liitännään on, että Sovent-järjestelmä pitää erillään pysty- ja vaakakokoojaviemäreiden vedet. Sovent-järjestelmässä paineentasaus tapahtuu pystyviemäriin sisällä, eikä erillistä huoneisto- tai kerroskohtaista tuuletusputkea tarvita. Perinteisessä liitännässä pysty- ja vaakakokoojaviemäriin virtaukset kohtaavat, mikä aiheuttaa nopeita painevaihteluita ja johtaa pystykokoojaviemäreiden tyhjentymiseen ilman erillisiä tuuletusputkia. (Kerrostalojen taloudellinen viemärointi 2018.) Sovent-järjestelmän ja perinteisen viemäriin erot on esitetty kuvassa 8 (Drainage in high-rise buildings 2018).



Kuva 8. Sovent-viemäriiliitynnän ja perinteisen järjestelmän välinen ero. Sovent-järjestelmä jättää pysty- ja vaakakokoojaviemäriin välille ilmaa erottaen putkistojen virtaukset toisistaan. Perinteisessä järjestelmässä vesivirrat sekoittuvat ja sulkevat ilmakierron. (Drainage in high-rise buildings 2018.)

Suomessa viemärilaitteiston mitoittamiseen on annettu erilliset ohjeet (Viemärilaitteiston mitoitusohjeet 2007) ja mitoitus perustuu ohjeistuksessa annettuihin taulukoihin. Taulukkoarvoja käytettäessä päädytään erilaiseen mitoistapaan kuin Sovent-järjestelmällä, joten Sovent-järjestelmän hyötyjen saaminen vaatisi perinteisestä mitoistavasta poikkeamista. Viemäreiden tuuletus toteutetaan Suomessa yleensä väljällä putkistomitoituksella sekä katolle menevällä tuuletusputkella, jolloin erillisiä kerros- tai huoneistokohtaisia tuuletusputkia ei tarvita.

### 2.3 Ilmastointi

Asuinkerrostaloissa on pääsääntöisesti kaksi tapaa toteuttaa kohteen tulo- ja poistoilmanvaihto koneellisesti: asuntokohtaisella tai keskitetyllä ilmanvaihdolla. Ilmanvaihtojärjestelmä vaikuttaa kohteen tuloilman lämmitys- ja viilennysratkaisuun, tilajäähdytyslaitteiden valintaan, teknisten tilojen ja kanaviston tilantarpeisiin sekä energia- ja ylläpitokustannuksiin.

#### 2.3.1 Tuloilman lämmitys ja viilennys/jäähdytys

Huoneistokohtaisen ilmanvaihdon esilämmitys- ja lämmityspatterit ovat yleensä sähkölämmitteisiä. Tämä vaikuttaa huoneistokohtaisen ilmanvaihdon käyttökustannuksiin, sillä sähkölämmitys on yleensä muita lämmitystapoja kalliimpi vaihtoehto. Keskitetyn järjestelmän lämmityspatteri toteutetaan lähes aina nestekiertoisena, jolloin sen lämmitys on helppo toteuttaa millä tahansa lämmönlähteellä. (Simmonds 2015.)

Keskitettyyn järjestelmään on yksinkertaista toteuttaa tuloilman viilennys tai jäähdytys jäähdytyspatterilla, jossa kiertää esimerkiksi kaukokylmäverkolla tai vedenjäähdytysko-

neella tuotettu kylmä neste. Tuloilman viilennyksessä raitisilmaa viilennetään esimerkiksi 17 °C:een ja tuloilman jäädytyksessä raitisilma jäädytetään esimerkiksi kaukokylmän avulla noin 13 °C:een lämpötilaan. Lämpöpumppuratkaisussa tuloilmaa saadaan jäädytettyä matalampaankin lämpötilatasoon, jopa noin 10 °C:een lämpötilaan. Viilennyksen/jäädytyksen jälkeen tuloilma lämpenee kanavistossa noin yhden asteen. Näin matalissa lämpötiloissa on hyvä muistaa, että ne voivat aiheuttaa vedontunnetta, joten ratkaisu vaatii kompromissia huoneiston lämpötilan ja viihtyisyyden välillä.

Tuloilman jäädytys vaatii vähintään runkokanaviston eristämisen kondenssiveden estämiseksi. Tuloilman jäädytyksen etuna on, että tuloilman jäädytyksen lisäksi ei välttämättä tarvita erillisiä tilajäädytyslaitteita, vaan sisäilma saadaan pidettyä S2-sisäilmastoluokituksen – parhaimmillaan jopa S1-sisäilmastoluokituksen - mukaisella tasolla tuloilman jäädytyksen avulla.

Tuloilman viilennyksestä tai jäädyttämisestä saatava teho voidaan laskea kaavalla

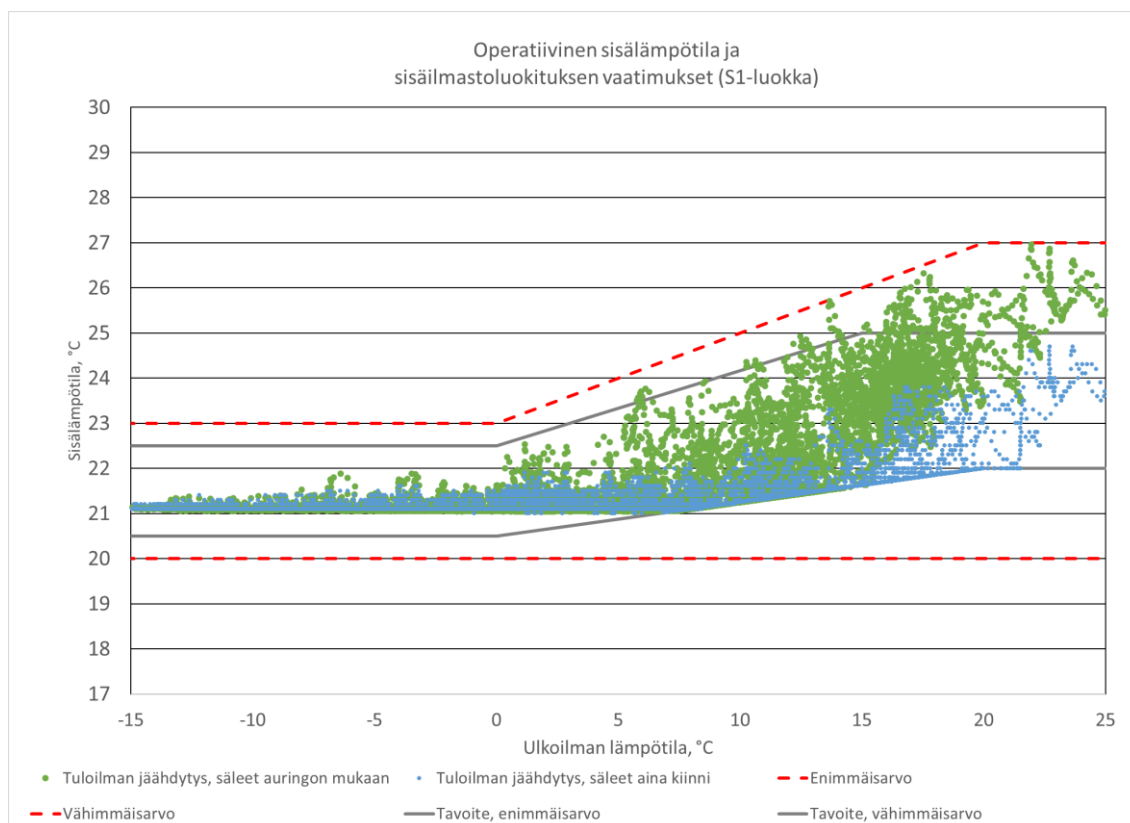
$$\Phi = \rho q_v c_p \Delta T,$$

jossa  $\Phi$  on teho (kW),  $\rho$  on tiheys (kg/m<sup>3</sup>),  $q_v$  on tuloilmavirta (m<sup>3</sup>/s),  $c_p$  on ilman ominaislämpökapasiteetti (kJ/kgK) ja  $\Delta T$  on lämpötilaero (K).

Tällöin huoneistoon, jonka koko on 60 m<sup>2</sup>, sisälämpötila 25 °C ja tuloilmavirta 30 l/s, saadaan tuloilmaa viilentämällä noin 250 W viilennysteho (25°C → 18 °C) ja tuloilmaa jäädyttämällä noin 400 W teho (25°C → 14 °C). Yhden kannettavan tietokoneen tuottama lämpöteho on noin 65 W, joten tuloilmaa viilentämällä saataisiin poistettua neljän kannettavan tietokoneen aiheuttama lämpökuorma. Tuloilman jäädytysteho vastaisi noin kuuden kannettavan tietokoneen lämpökuorman poistamista huoneistosta. Kokonaisjäädytysteho on kuitenkin tätä suurempi johtuen samaan aikaan tapahtuvasta ilman kuivauksesta.

Tuloilman jäädytyksestä saavutettavaa hyötyä on mahdollista lisätä kasvattamalla tuloilmamääriä. Tehdyn simulaation perusteella huoneistoissa riittäisi huoneiston sijainnista ja koosta riippuen 0,5..0,6 l/s,m<sup>2</sup> tuloilmamäärä, mutta erityisesti aurinkoisissa ilmansuunnissa sälekaihtimien käyttö on pakollista. Poistoilmamääriä täytyisi pystyä tehostamaan noin 30 %, jolloin ne olisivat huoneistoissa keskimäärin 0,6 l/s,m<sup>2</sup> ja suurimmillaan 0,75 l/s,m<sup>2</sup>. Tällöin pystytään täyttämään jopa S1-sisäilmastoluokituksen

vaatimukset, mutta ilman sälekaihtimia lämpötilat nousevat ympäri vuoden erittäin korkeiksi. Kuvassa 11 on esitetty etelään suunnatun tupakeittiön vuotuiset lämpötilat, kun tuloilma jäähdytetään 13 °C:een. Kuvasta 9 havaitaan, että tuloilman jäähdytys vaatii sälekaihtimien pitämisen kiinni ympäri vuoden, tai lämpötilat karkaavat yli sallittujen enimmäisarvojen. Aстетuntivaatimukset saadaan täytettyä tuloilman jäähdytyksellä, jos kohteessa on sälekaihtimet.



Kuva 9. Tuloilman jäähdytyksellä 13 °Celsiusasteeseen saavutettavat lämpötilat mallihuoneessa. S1-vaatimusten saavuttaminen vaatii sälekaihtimien pitämistä aina kiinni.

Kohteen sisäilman laatua on mahdollista parantaa nostamalla tuloilmamääriä. Tehdyn simulaation perusteella tämä vaatisi 13 °C:n tuloilmalla suurimmillaan jopa 1,6 l/s,m<sup>2</sup> ilmamääriä ja 16 °C:n tuloilmalla jopa 2,5 l/s,m<sup>2</sup> ilmamääriä. Tämä taas johtaa suurempaan ilmanvaihtokoneeseen sekä suurempiin kanaviin ja päätelaitteisiin, jotta ilmanvaihtojärjestelmästä saadaan tarvittava ilmamäärä ilman äänihaittoja. Simulaatio toteutettiin käyttäen vuoden 2012 testisäätä, joten ilmaston lämmitessä joudutaan käyttämään entistä suurempia ilmamääriä riittävän jäähdytystehon aikaansaamiseksi.

Asuntokohtaisessa ilmanvaihdossa tuloilman jäähdytys-/viilennysratkaisu on helpoin toteuttaa kanavistoon asennettavalla kanavapatterilla, jolloin kanavistoon täytyy toteuttaa kondenssiveden keräysjärjestelmä, esimerkiksi putkisto. Yksinkertaisempi vaihtoehto jäähdytyksen toteuttamiselle huoneistokohtaisessa ilmanvaihtoratkaisussa on

erilliset jäähdytyksen tilalaitteet. Useimmiten käytetään puhallinkonvektoreita, sillä ne ovat ainoa kondessivedenkeräysjärjestelmän sisältävä tilajäähdytyslaite.

### 2.3.2 Rakentaminen ja huolto

Asuntokohtaisen ilmanvaihtojärjestelmän etuna on, että koneet ovat pieniä ja tehdasvalmisteisia, jolloin niiden asentaminen ja käyttöönotto on nopeaa. Tarvittava äänen- vaimentimien määrä on suurempi kuin keskitetyissä koneissa, mutta äänihaitat naapureiden välillä ovat paremmin hallittavissa. Myös keskitettyjä ilmanvaihtokoneita on mahdollista saada tehdasvalmisteisena, mutta usein joudutaan käyttämään paikalla koottavia koneita. Tämä johtuu siitä, että keskitetty ilmanvaihtojärjestelmä palvelee useita huoneistoja, jolloin tarvittava ilmamäärä on suuri ja tämän vuoksi myös ilmanvaihtokone on suuri. Paikalla kokoaminen pidentää rakentamisaikataulua, koska monimutkaiset asennustyöt joudutaan tekemään työmaalla. Lisäksi, jos ilmanvaihtokone sijaitsee katolla, rakennetaan konehuone usein viimeisenä. Lisäksi tehdasvalmisteisen ilmanvaihtokoneen kustannukset ovat yleensä pienemmät kuin paikalla koottavan ilmanvaihtokoneen. Suuri keskitetty ilmanvaihtokone voi myös vaatia kahden kerroksen korkuisen tilan. (Simmonds 2015.)

Asuntokohtaista ja keskitettyä ilmanvaihtojärjestelmää vertailtaessa tulee muistaa, että hajautetussa järjestelmässä esimerkiksi kanavistojen asentamiseen kuluu paljon enemmän aikaa kuin keskitetyssä ratkaisussa etenkin, jos poistoilma puhalletaan julkisivusta. Koska työt tehdään jokaisessa asunnossa, tulee aikataulutuksessa huomioida ilmanvaihtojärjestelmän vaatimien töiden lisäksi myös muiden töiden (väliseinät, laatoitus, lattia, tasoitus, maalaus) vaikutus aikatauluun. Keskitetyssä ilmanvaihtojärjestelmässä työt painottuvat enemmän lämmönjakohuoneen, ilmanvaihtokoneen ja mahdollisen vesikaton asentamiseen. Hajautetun ilmanvaihtojärjestelmän vaatima työmäärä voi olla jopa kaksinkertainen keskitettyyn järjestelmään verrattuna, kun huomioidaan ilmanvaihtourakka, ilmanvaihtoon liittyvät lämmitys-, sähkö-, automaatio-, vesi- ja viemärintyöt, hormiasennukset sekä rakennustekniset työt, kuten kotelointi, tarkastusluukut, IV-konehuone ja puhallusluukut. (Magi 2016.)

Asuntokohtaisessa ilmanvaihtojärjestelmässä ilmamääriä voidaan ohjata huoneistokohtaisesti muuttamalla huoneistokohtaisen ilmanvaihtojärjestelmän puhaltimen pyörimisnopeutta. Asuntokohtaisessa IV-järjestelmässä automaatioasetukset tehdään tehtaalla, jolloin työmaalla tarvitaan ainoastaan IV-urakoitsija kytkemään kone paikalleen. Keski-

tetyssä ratkaisussa huoneistokanaviin tarvitaan ilmamääräsäätimet (IMS) sekä puhaltimen pyörimisnopeutta ohjaava säädin, jotta ilmamäärien säädössä päästään vastaavaan laatuun kuin huoneistokohtaisissa järjestelmissä. IMS:n säädinosaan voidaan ohjelmoida tehtaalla suunnittelijan ilmoittama ilmamäärä ja sitä vastaava asetusarvo eli jänniteviesti, mutta näiden toimivuus täytyy todeta laitekohtaisesti työmaalla. Keskitetyssä ratkaisussa urakkarajoja on enemmän kuin asuntokohtaisessa ilmanvaihtojärjestelmässä, sillä IV-urakoitsijan lisäksi työmaalla tarvitaan putki-, sähkö- ja automaatiourakoitsijaa. Tämä voi venyttää urakoitsijoiden aikataulua, kun tiedonvaihto urakoitsijoiden välillä jää vajaaksi ja esimerkiksi käyttöönottovaiheessa usean urakoitsijan aikataulu täytyy yhteensovittaa toimintakokeita varten. (Stam 2017.)

Aiemmin ilmamääräsäätimet olivat herkkiä likaantumaan, sillä kanaviin asennettiin eriliset anturit. Nykyisin on saatavilla ultraääniteknologiaan perustuvia ilmamääräsäätimiä, jotka eivät tarvitse fyysistä anturia kanavistoon eivätkä täten kerää pölyä, aiheuta melua tai häiritse ilman virtausta kanavistossa. Tämä vähentää ilmamääräsäätimien huoltotarvetta merkittävästi. (Ultraääni IMS 2017.)

Asuinrakennukset palo-osastoidaan huoneistoittain (YMa rakennusten paloturvallisuudesta 2017). Asuntokohtaisessa ilmanvaihtojärjestelmässä asunnot voidaan toteuttaa paloteknisesti itsenäisiksi yksiköiksi erotetuilla laitteistoilla, jolloin ne eivät muodosta yhteistä ilmanvaihtolaitteistoa eikä palopeltejä tarvita. Tällöin ulospuhallusilmakanavat johdetaan erillisinä ja asunnon ulkopuolella paloeristettyinä poistoilma-aukkoon saakka. Mikäli kanavat johdetaan esimerkiksi rakennuksen vesikatolle, riittää kanavien paloeristäminen kerroskorkeuden verran tai vähintään 2,5 metrin matkalta pystysuoralta osuudelta. (Ilmanvaihtolaitosten paloturvallisuus -opas 2018.) Ulko- ja poistoilmalaitteiden sijoittamisessa kannattaa huomioida myös tuulenpaineen vaikutus, joka on yhtä suuri molemmille laitteille, mikäli ne asennetaan samalle julkisivulle.

Keskitetyn ilmanvaihdon osalta savun leviämistä voidaan rajoittaa liittämällä pystykanaviin tilakohtaiset kuristimet, mikäli ilmanvaihtokonehuone sijaitsee palvelemissa tilojen yläpuolella. Muutoin savun leviämistä tulee rajoittaa muilla keinoilla, esimerkiksi palopelleillä. Palopeltejä tulee käyttää myös ilmanvaihtokoneen lävistäessä osastoivan rakennusosan. (Ilmanvaihtolaitosten paloturvallisuus -opas 2018.)

Suurin vuotuinen huoltokustannus hajautettujen ilmanvaihtojärjestelmien osalta on suodattimien vaihto. Sekä keskitetyssä että asuntokohtaisessa ilmanvaihtokoneessa on

kaksi suodatinta, jotka suositellaan vaihdettavan kahdesti vuodessa. Hajautetussa järjestelmässä on paljon enemmän ilmanvaihtokoneita kuin keskitetyssä järjestelmässä, joten myös vaihdettavia suodattimia on enemmän. Hajautetun järjestelmän ilmanvaihtokoneet ovat pienempiä kuin keskitetyn järjestelmän, joten niissä käytettävät suodattimet maksavat selvästi vähemmän kuin keskitettyjen koneiden. Esimerkiksi asuntokohtaisten ilmanvaihtokoneiden Swegon Casa W80 -suodattimet maksavat noin 15 € / pari (Suodattimet Swegon Casa W80 -ilmavaihtokoneeseen 2018) ja keskitettyjen ilmanvaihtokoneiden suodattimet noin 250 € / pari, joten asuntokohtaisten ilmanvaihtokoneiden halvempi suodatinhintaa ei riitä kompensoimaan suodattimien määräerosta tulevia suurempia materiaali- ja työkustannuksia.

Keskitetyn ilmanvaihtojärjestelmän osalta huoltokustannuksia voivat nostaa ilmamääräsäätimet. Yhden ilmamääräsäätimen uusiminen maksaa noin 1 500 € ja huoneisto-kohtaisessa ohjauksessa jokaiseen huoneistoon tarvitaan kaksi ilmamääräsäädintä. Tällöin ilmamääräsäätimistä aiheutuvat huoltokustannukset voivat nousta merkittäviksi, jos huoltokohteita on useita. Uusissa, ultraääneen perustuvissa ilmamääräsäätimissä huoltokohteiden määrä on merkittävästi alhaisempi. Tutkimuksen kohteena olevissa tornitaloissa ei ole käytetty ilmamääräsäätimiä, vaan ilmamäärän tehostus toteutetaan keskitetyissä järjestelmissä kaksiasentoisella tehostuspellillä (kiinni/auki) tai kolmiasentoisella palopellillä (normaali/tehostus/kiinni (palotilanne)).

### 2.3.3 Asuntokohtainen ilmanvaihto

Asuntokohtaisessa ilmanvaihtojärjestelmässä jokaisella huoneistolla on oma ilmanvaihtokoneensa, joka sijoitetaan esteettisistä syistä komeroon, yleensä kylpyhuoneeseen. Komero on erikoismitoitettu ja se pienentää ilmanvaihtokoneesta syntyvää äänikuormaa. Huoneiston raitisilma otetaan asunnon tai porrashuoneen ulkoseinästä ja kanavat kuljetetaan huoneiston läpi alakatossa. Poistoilma voidaan puhaltaa myös huoneiston ulkoseinästä, porrashuoneen ulkoseinästä tai kuljettaa vesikatolle. Vesikatolle kuljetta- min vaatii kuitenkin jokaisesta kerroksesta tilavarauksen hormielementille ja vaikuttaa myös rakentamisaikatauluun vesikatolla tehtävien eristämistöiden ja ulospuhalluspiip- pujen määrän kasvun vuoksi. Vesikaton rakentamisesta aiheutuu myös lisäkustannuk- sia. Sama pätee myös keskitetyille ilmanvaihtoratkaisulle, jos se voidaan asentaa ker- roksiin vesikaton sijasta. (Magi 2016.)

Korkeissa rakennuksissa pyritään välttämään pystykanavia muun muassa niiden ai- heuttaman hormivaikutuksen, painehäviöiden sekä tilantarpeen vuoksi. Tämän vuoksi



korkeissa rakennuksissa kerroksesta tapahtuva poistoilman ulospuhallus on suositeltavampi vaihtoehto kuin poistoilmakanavien kuljettaminen vesikatolle. Sisäilmasto ja ilmanvaihto -oppaan (2017) seinäpuhallusta voidaan käyttää asuinhuoneistoissa, mikäli taulukossa 4 esitetyt etäisyysvaatimukset täyttyvät. Taulukon 4 vaatimuksista voidaan kuitenkin poiketa, mikäli kohteeseen tehdään erillinen selvitys ehdotetusta ratkaisusta ja sen toimivuudesta esimerkiksi VTT:llä.

*Taulukko 4. Sisäilmasto ja ilmanvaihto -oppaan (2017) mukaiset vaatimukset asuinhuoneistojen seinäpuhallukselle.*

<b>Ulospuhalluslaitteen etäisyys</b>	<b>Vaatimukset asuinhuoneistolle</b>
Seinäpuhalluslaitteen etäisyys toisten huoneistojen ulkoilmalaitteista	vähintään 3 m
Seinäpuhalluslaitteen vapaan ulospuhallusaukon keskimääräinen virtausnopeus käyttäjän tehostamattomalla ilmavirralla	vähintään 5 m/s
Seinäpuhalluslaitteen etäisyys viereisistä seinistä	vähintään 3 m
Seinäpuhalluslaitteen etäisyys naapuritontista	vähintään 4 m
Seinäpuhalluslaitteen etäisyys vastapäisistä seinästä tai rakennuksesta	vähintään 15 m
Seinäpuhalluslaitteen sijoitus	ei sijoiteta umpinaisten sisäpihojen puoleisille julkisivuille
Seinäpuhalluslaitteen sijoitus	ei sijoiteta julkisivussa oleviin syvennyksiin tai nurkkauksiin
Seinäpuhalluslaitteen toimivuus	varmistettu suunnitellussa käyttötarkoituksessa

Huoneistokohtainen ilmanvaihtokone pystytään sijoittamaan huoneiston kattoon siten, että se ei periaatteessa vie myytävää huonealaa. Tämä voidaan toteuttaa asentamalla ilmanvaihtokone esimerkiksi kylpyhuoneeseen pyykkikomeron tai pesukonevarauksen päälle ja kuljettamalla kanavistot huoneiston alakatossa. Täten huoneistokohtaisessa järjestelmässä tilaa vievät ainoastaan poistoilmakanavien pystynousujen elementtihormit, mikäli poistoilmaa ei puhalleta ulos huoneiston tai kerroskäytävän ulkoseinästä. Mikäli poistoilmalaitteet sijoitetaan saman kerroksen ulkoseinämälle, voidaan poistoilmakanavat kuljettaa alakatossa ilmanvaihtokoneelle.

Hajautetun ilmanvaihdon huolto on huomattavasti työläämpää kuin keskitetyn koneen, sillä esimerkiksi 300 huoneiston tornitalossa (30 kerrosta, 10 huoneistoa / kerros) asuntokohtaisia iv-koneita on 300. Tämän lisäksi kohteessa on ilmanvaihtokone/-koneita yleisiä tiloja varten. Huoneistokohtaisten koneiden huoltaminen edellyttää usein huoltomiehen vierailua jokaisen huoneiston sisällä, sillä kerroskäytävien ja huoneistojen

väliset seinät ovat tornitaloissa yleensä kantavia, minkä vuoksi ilmanvaihtokoneen tarvitsemää huoltoluukkuja ei voida sijoittaa kerroskäytävälle.

#### 2.3.4 Keskitetty ilmanvaihto

Matalissa asuinkohteissa keskitetty ilmanvaihtoratkaisu tarkoittaa yleensä yhtä ilmanvaihtokoneetta, joka palvelee kaikkia huoneistoja. Periaatteessa yhdellä ilmanvaihtokoneella voitaisiin kattaa jopa 20–24 kerroksen ilmanvaihto, mutta tällöin tulee huomioida Sisäilmasto ja ilmanvaihto -oppaan (2017) vaatimukset hormivaikutuksen hillitsemiseen liittyen. Oppaan mukaan rakennuksen ilmanvaihto on jaettava erillisjärjestelmiin, joissa ylimmän ja alimman päätelaitteen välinen maksimikorkeusero saa olla enintään CEN/TR 1678-4:2017 -raportin mukaisesti:

$$D_{\max} = 600 / (T_a - T_{\text{out, min}}),$$

jossa  $D_{\max}$  on maksimikorkeusero (m),  $T_a$  on sisälämpötila (°C) ja  $T_{\text{out, min}}$  on ulkolämpötilan suunnittelu-arvo talvitilanteessa (°C).

Kaavan mukaan laskettuna esimerkiksi sisälämpötilalla 21 °C ja ulkolämpötilalla -32 °C, saa päätelaitteiden korkeusero olla enintään 11 metriä. Korkeuserovaatimuksesta voidaan kuitenkin poiketa, mikäli ilmanvaihtojärjestelmä varustetaan vakiovirtaussäätimillä tai muilla laitteilla, jotka automaattisesti kompensoivat hormivaikutuksen. Käytettäessä automaattisia laitteita hormivaikutuksen hallitsemiseen, täytyy tarkastella tapauskohtaisesti laitteiden toiminta-alue ja tästä aiheutuva maksimikorkeusero. (Sisäilmasto ja ilmanvaihto -opas 2017.)

Ulkomailla on mahdollista kattaa jopa 40–48-kerroksisen rakennuksen ilmanvaihto yhdellä ilmanvaihtokoneella, mikäli se pystytään sijoittamaan pystysuunnassa rakennuksen keskelle. Tämä vaatii kuitenkin merkittävän teknisen tilan yhdestä kerroksesta IV-konetta varten. (Simmonds 2015.) Lisäksi se johtaa suuriin runkokanavistoihin, jotta rakennuksessa pystytään siirtämään riittävä ilmamäärä kaikkiin tiloihin. Tämä tarkoittaa suuria kuiluvarauksia läpi rakennuksen ja toisaalta ilman tarvittavia säätölaitteita voi johtaa merkittävään hormivaikutukseen lämmityskaudella. Myös paine-erot kanavistossa kasvaisivat suuriksi korkeuserojen vuoksi, jolloin vaadittavan SFP-luvun saavuttaminen muodostuisi entistä haastavammaksi. Täten korkeissa rakennuksissa keskitet-

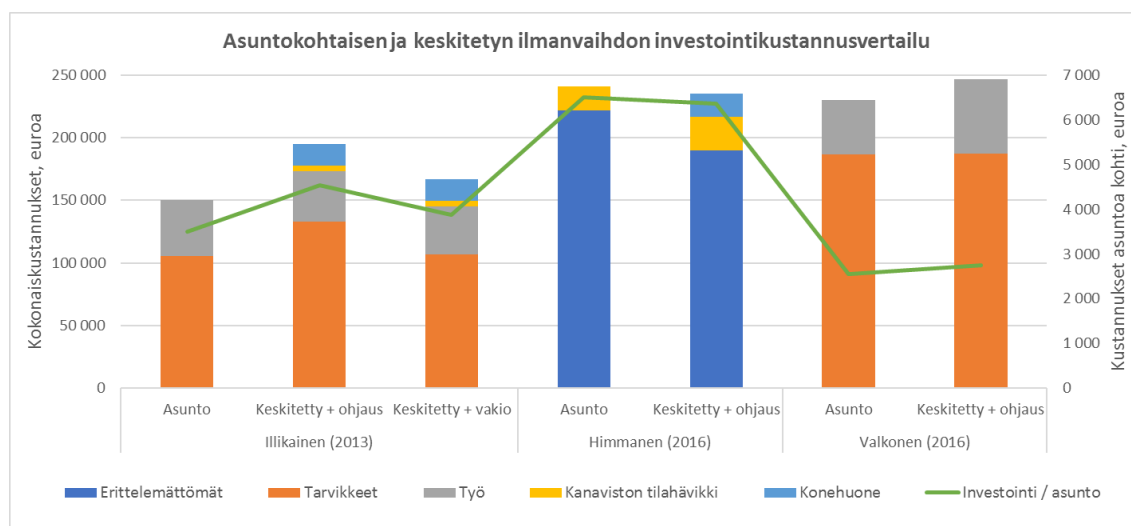
tyyn ilmanvaihtoratkaisuun kuuluu Suomen ilmastossa yleensä useampia ilmanvaihtokoneita, jotka palvelevat eri vyöhykkeitä pystysuunnassa.

Keskitetyn ilmanvaihtojärjestelmän raitisilma otetaan katolta tai kerroskäytävän ulkoseinästä ja poistoilma johdetaan katolle tai kerroskäytävän ulkoseinälle riippuen käsiteltävästä ilmanvaihtovyöhykkeestä. Poistoilma voidaan puhaltaa kerroskäytävän ulkoseinästä, mikäli noudatetaan taulukossa 4 esitettyjä etäisyysvaatimuksia ja rajoituksia (Sisäilmasto ja ilmanvaihto -opas 2017).

Keskitetyn ilmanvaihtokoneen tilantarve riippuu siitä, kuinka monta huoneistoa se palvelee. Esimerkiksi kahta 10 huoneiston kerrosta palveleva ilmanvaihtokone tarvitsee noin 7 m<sup>2</sup>:n tilan, jos ilmanvaihtokoneen huoltotilat pystytään integroimaan osaksi kerroskäytävää (Torni C: LVI-suunnitelmat 2018).

### 2.3.5 Kustannuserot

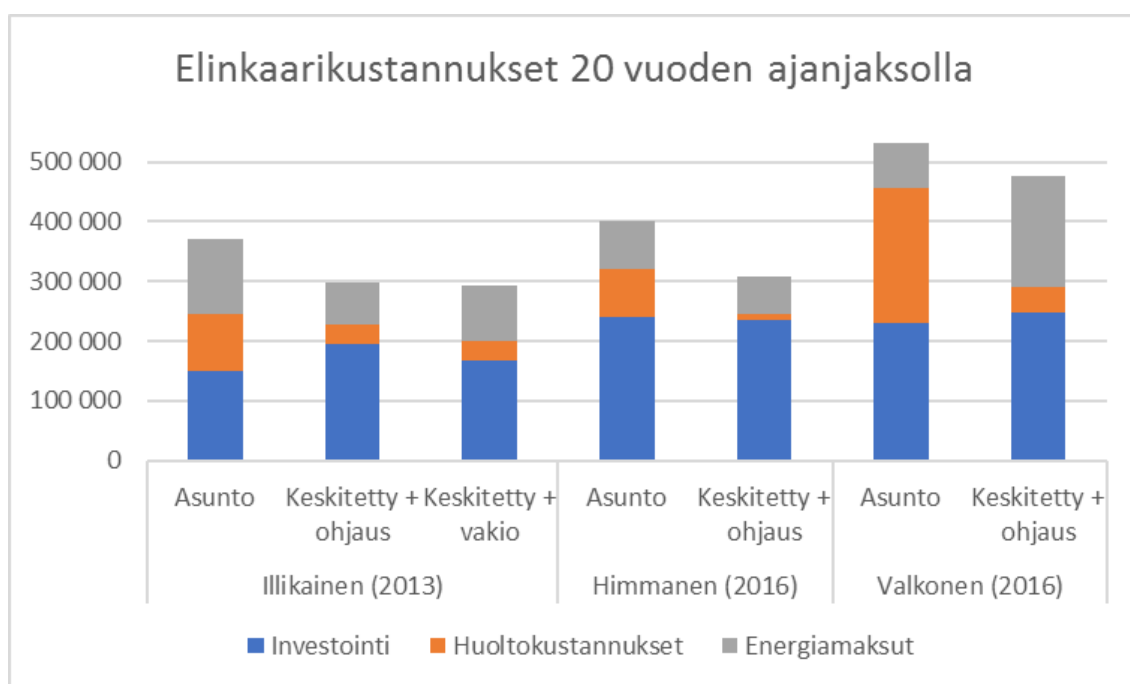
Huoneistokohtaisen ja keskitetyn ilmanvaihtojärjestelmän investointikustannuksia sekä elinkaarenaikaisia kustannuksia on vertailtu useammassa opinnäytetyössä. Kuvaajassa 1 on esitetty kolmessa amk-opinnäytetyössä saadut tulokset.



Kuvaaja 1 Uusi-Illikaisen (2013), Himmasen (2016) ja Valkosen (2016) kustannusvertailun tulokset asuntokohtaisen ja keskitetyn ilmanvaihtojärjestelmän välillä.

Kuvaajassa 1 esitetyt kustannusvertailut on tehty matalille asuinkerrostaloille: Uusi-Illikaisen (2013) tutkimassa kohteessa oli 5 kerrosta ja huoneistoja 43 kappaletta ja Himmasen (2016) kohteessa 6 kerrosta ja 37 huoneistoa. Valkosen tutkimus koostui viidestä asuinkerrostalosta, joissa oli kussakin 3 kerrosta ja yhteensä 90 huoneistoa.

Uusi-Illikaisen ja Valkosen opinnäytetöiden tulokset ovat keskenään linjassa: asunto-kohtainen ilmanvaihtojärjestelmä on rakennusinvestoinneiltaan halvempi. Himmasen työssä keskitetty ilmanvaihto on hieman halvempi, mutta eroa on vain noin 2 %. Kun tarkastelujaksoa pidennetään 20 vuoteen ja huomioidaan ilmanvaihtokoneiden vuotuiset huoltokustannukset (mm. suodattimien vaihto), energiamaksut sekä puhaltimien vaihto 10 vuoden käyttöiän jälkeen, tulee asuntokohtaisesta ilmanvaihtojärjestelmästä kaikissa tarkasteluissa kalliimpi vaihtoehto (kuvaaja 2).



Kuvaaja 2. Opinnäytetöissä lasketut matalien asuinkerrostalojen ilmanvaihtojärjestelmien elinkaarikustannukset 20 vuoden ajanjaksolla.

Opinnäytetöiden tutkimusten perusteella keskitetty ilmanvaihtojärjestelmä on matalissa kerrostaloissa hieman kalliimpi alkuinvestoinneiltaan kuin asuntokohtainen järjestelmä. Erot vaihtelevat melko paljon opinnäytetöiden välillä, sillä Uusi-Illikaisen (2013) mukaan keskitetty järjestelmä ilmavirran tehostamismahdollisuudella on noin 30 % kalliimpi ja vakioilmavirtainen järjestelmä noin 11 % kalliimpi kuin asuntokohtainen ilmanvaihto. Himmasen (2016) mukaan keskitetty järjestelmä on 2 % edullisempi kuin huoneisto-kohtainen. Valkosen (2016) tutkimuksessa keskitetty ja tarpeen mukaan ohjattu järjestelmä oli noin 7 % kalliimpi kuin asuntokohtainen järjestelmä.

Uusi-Illikaisen tutkimuksessa ilmavirran tehostamismahdollisuudella varustetussa keskitetyssä järjestelmässä huoneistokohtaisia ilmavirtoja voidaan ohjata säätöpelleillä ja taajuusmuuttajakäyttöisillä puhaltimilla, kun taas vakioilmavirtajärjestelmässä tehostuk-

sen mahdollisuus on ainoastaan keittiön liesikuvussa. Valkosen tutkimuksessa keskiteytyssä koneessa on ainoastaan liesikuvun tehostusmahdollisuus, kun taas Himmasen työssä on sekä hajautetussa että keskiteytyssä järjestelmässä poissa (40 % normaali-ilmanvaihdosta) – kotona (100 %) – tehostus (130 %) säätömahdollisuus.

Kaikissa opinnäytetyöissä keskitetty järjestelmä muodostui elinkaarikustannuksiltaan selkeästi edullisemmaksi kuin asuntokohtainen ilmanvaihtojärjestelmä. Keskitetty järjestelmä oli elinkaaren aikana Uusi-Illikaisen (2013) ja Himmasen (2016) tutkimuksessa noin 40–50 prosenttia edullisempi kuin huoneistokohtainen järjestelmä. Valkosen (2016) mukaan keskitetty järjestelmä oli 20 vuoden ajanjaksolla tarkasteltuna noin viidenneksen edullisempi kuin hajautettu järjestelmä.

### **3 Tutkimusaineisto ja tutkimusmenetelmät**

#### **3.1 Tutkimusmenetelmät ja tutkimuksen tavoitteet**

Opinnäytetyössä tutkitaan kolmen todellisen asuintornin LVIJ-suunnitteluratkaisuja. Vertailu tehdään mallintamalla kaikki ratkaisuvaihtoehdot IFC-malleiksi (Industry Foundation Classes, rakennusalan standardi oliopohjaisen tiedon siirtoon tietokonejärjestelmästä toiseen) yhden suunnitteilla olevan tornitalon pohjaan, jolloin eri ratkaisuvaihtoehtojen tilantarpeet ja järjestelmäkustannukset ovat keskenään vertailukelpoisia.

Tarkasteluun on valittu kolme kohdetta, joiden LVIJ-tekniiset järjestelmät eroavat toisistaan huomattavasti: torni A, torni B ja torni C. Tornin A on LVIJ-tekniikaltaan perinteisin asuintorni: Kohteessa on huoneistokohtainen ilmanvaihto ja rakennus on jaettu kolmeen pystysuuntaiseen vyöhykkeeseen (ks. sivut 8–9), joista jokaisella on oma pystynousunsa kellarikerroksesta. Tornin A:ssa ei ole tuloilman viilennystä eikä tilajäähdytystä.

Toinen tutkimuskohde torni B, jonka ilmanvaihto on toteutettu pääosin kahta kerrosta palvelevilla ilmanvaihtokoneilla, joissa on tuloilman lämmitys- ja jäähdytyspatteri (kombipatteri). Lämmön- ja kylmänjaon osalta rakennus on jaettu kolmeen pystysuuntaiseen vyöhykkeeseen, joista kahta ylintä palvelee korkeapainenusulinjaparit (ks. sivut 5–6). Alinta vyöhykettä palvelevat lämmönsiirtimet sekä korkeapainenusulinjapareja palvelevat lämmönsiirtimet on sijoitettu alimpaan kerrokseen. Kahta ylintä pystyvyöhykettä varten kerrokseen 15 ja 25 on sijoitettu lämmityksen ja jäähdytyksen lämmönsiirtimet ilmastoinnille, lattialämmitykselle/-jäähdytykselle, käyttövedelle ja märkätiloille.

Kolmas tutkimuskohde on torni C, jossa lämmön- ja kylmänjako toteutetaan korkeapainousulinjapareilla (ks. sivut 5–6) siten, että tarvittavat lämmönsiirtimet pystytään sijoittamaan eri kerroksiin. Tällöin lämmönsiirtimet sijaitsevat samassa kohdassa, mutta niiden käyttötapa (lattialämmitys, lattijäähdytys, käyttövesi) vaihtelee. Huoneistojen ilmanvaihto on toteutettu keskitetysti kahta kerrosta palvelevalla ilmanvaihtokoneella, joissa on tuloilman lämmitys- ja jäähdytyspatteri (kombipatteri). Ilmanvaihtokoneille on oma korkeapainelinjansa, johon syötetään tarpeen mukaan lämmitys- tai jäähdytysenergiaa. Ilmanvaihtokoneet on kytketty suoraan korkeapainousulinjaan ja niiden laitteisto on valittu 16 barin paineenkeston mukaisesti.

Kunkin kohteen tarkempi LVIJ-tekniinen ratkaisu on esitelty tarkemmin tutkimuskohteen omassa kappaleessa. Tutkittavat kohteet tulevat olemaan rakennusyhtiö SRV:n rakentamia.

### 3.2 SRV:n kustannusohjelman esittely

SRV:llä on käytössään Broker-niminen kustannuslaskentatyökalu, johon syötetään LVIJ-suunnitelmista saatavat massalistat. Massalistat voidaan hakea IFC-mallien avulla ja jakaa tarvittaessa pienempiin osiin. IFC-malleista saatavat massalistat työstetään Microsoft Excel -taulukko-ohjelmalla Broker-ohjelmaan soveltuvaan formaattiin. Broker-laskentatyökalussa voidaan huomioida rakennusten erityispiirteet esimerkiksi lisäämällä vaativiin asennuskohteisiin omat kertoimensa.

Tässä opinnäytetyössä kustannuslaskenta on suoritettu jokaisen tutkimustapauksen osalta kahdelle mallikerrokselle ja vertailu keskittyy pääasiassa kanaviston ja putkiverkostojen määräeroihin. Lisäksi kustannuslaskennassa on huomioitu ratkaisujen erilaiset IV-koneratkaisut, mutta esimerkiksi lämmönsiirtimien hintoja ei ole huomioitu vaan ne on oletettu keskenään samanhintaisiksi. Erilaiset lämmönsiirratkaisut (keskitetty vs hajautettu) on huomioitu tutkimustapausten tilantarpeiden kustannusvaikutuksissa. Kustannuslaskennan tulokset on skaalattu kohteeseen olettaen, että tornitalossa on yhteensä 30 asuinkerrosta ja neljä kellarikerrosta. Jokaisessa asuinkerroksessa on kahden mallikerroksen mukaisesti 11 huoneistoa. Saatuihin järjestelmäkustannuksiin on lisätty tämän hetkinen arvonlisävero 24 %.

### 3.3 Tilavarausten kustannusten määrittely

Rakennuksen kerrosalaan ei lasketa taloteknisten järjestelmien edellyttämiä kuiluja, hormeja tai yleisiin tiloihin avautuvia teknisiä tiloja (Laki maankäyttö- ja rakennuslain muuttamisesta 2017). Näin ollen niiden rakentaminen ei sinällään vähennä myytävän huonealan määrää, mutta heikentää tilatehokkuutta ja lisää rakentamiskustannuksia. Tästä johtuen tilavarausten kustannuksia päädyttiin vertailemaan kahdella tavalla: rakentamiskustannusten sekä rakentamiskustannusten ja menetetyn myyntitulon kautta.

Tilojen rakentamiskustannus on arvioitu tämän hetken toteutuneilla rakentamiskustannuksilla pääkaupunkiseudulla. Rakentamiskustannukset on arvioitu erikseen teknisille tiloille, parvekkeille ja vesikatolle sijoitettavalle IV-konehuoneelle. Myös alakaton rakentamiselle on arvioitu rakentamiskustannus.

Menetetty myyntitulo on laskettu erikseen kellarituloille ja muihin kerroksiin sijoitettaville teknisille tiloille. Vesikatolle asennettavalle IV-konehuoneelle ja parvekkeille ei ole laskettu menetettyä myyntituloa. Laskelmassa ei ole huomioitu parvekkeen mahdollisia muita vaikutuksia esimerkiksi huoneiston arvoon.

### 3.4 Tutkimustapaukset

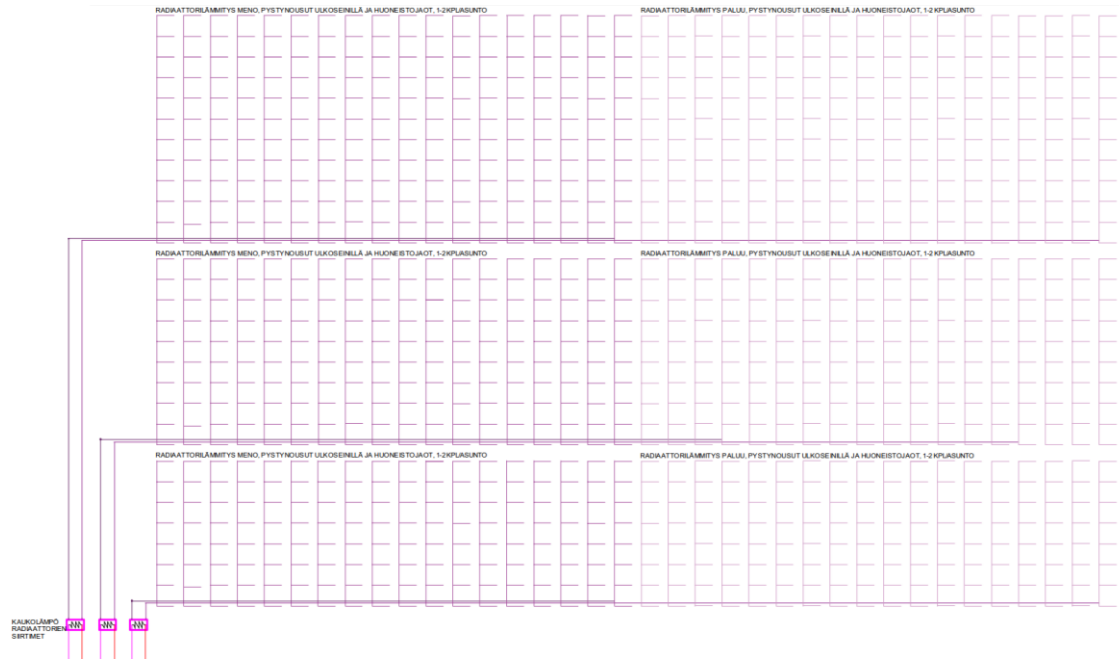
#### 3.4.1 Tornin A

Torni A on yli 20-kerroksinen asuintorni, jonka korkeus on 90 metriä. Asuinhuoneistoja on noin 200 ja niiden koot vaihtelevat välillä 30 – 127 m<sup>2</sup>. (Torni A, kohdetiedot 2017.)

LVI-tekniikaltaan torni A edustaa perinteisintä ratkaisua, jossa talotekniikka on sijoitettu pääasiassa kohteen kellarikerrokseen. Lämmönjako ja vesihuolto on toteutettu vyöhykekohtaisilla pystynousuilla, joita varten rakennus on jaettu pystysuunnassa kolmeen, 6–12 kerroksen korkeiseen vyöhykkeeseen. Pystynousut yhdistyvät yhdessä kerroksessa vaakaputkistoon, joka jakelee pienempiin osiin jaettuja vyöhykekohtaisia pystynousuja. Nämä pienemmät pystynousut kulkevat joko kylpyhuoneen seinässä tai rakennuksen ulkoseinässä riippuen siitä, palvelevatko ne huoneistojen radiaattoreita, märkätilojen lattialämmitystä vai vesihuoltoa.

Kohteen lämmitys on toteutettu huoneistoissa radiaattoreilla ja märkätiloissa nestekierroksella lattialämmityksessä. Tilalämmityksen tarvitsema lämpöenergia otetaan kellari-

kerrokseen sijoitettujen lämmönsiirtimien avulla kaukolämpöverkosta. Tilalämmitysverkoston osalta keskimmäistä ja ylintä vyöhykettä palvelevat paisuntasäiliöt on sijoitettu ylempiin kerroksiin. Muut tilalämmitysverkostoon liittyvät suuremmat laitteistot (lämmönsiirtimet, paisuntasäiliö, kiertovesipumppu) on sijoitettu kellarikerrokseen. Tilalämmityslaitteisiin liittyvien pystynousujen ja vyöhykejakojen periaatekuva on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10. Tornin A:n tilalämmityslaitteiden periaatekaavio. Kuvassa on esitetty radiaattorilämmityslaitteiden lämmönjako (meno- ja paluupuoli). Vastaavat nousut on toteutettu kylpyhuoneiden märkätilojen lämmitykselle. (Torni A, LVI-suunnitelmat 2014.)

Vesihuollon osalta kerrosten ensimmäisen vyöhykkeen vesihuolto on toteutettu kuten matalissakin kohteissa. Ylemissä kerroksissa tarvitaan suurempia painetasoja, joten näiden kerrosten käyttövesi korotetaan korkeampaan paineeseen yhdellä paineenkorotusasemalla, joka on sijoitettu kellarikerrokseen. Ylemmät kerrokset tarvitsevat korkeampaa painetta kuin keskimmäisen vyöhykkeen kerrokset, minkä vuoksi jälkimmäisiä kerroksia varten kellarikerroksessa on myös paineenalennusventtiili. Jokaisen vesihuollon pystyvyöhykkeen käyttövesi lämmitetään kellarikerrokseen sijoitetuilla lämmönsiirtimillä, josta se jaetaan ylöspäin runkopystynousulla, joka on yhdistetty kerroksessa kulkevaan vaakaputkistoon, joka jakaa sen eteenpäin pienempiin, kylpyhuoneen seinässä kulkeviin pystynousuihin. Vesihuollon periaatekaavio on esitetty kuvassa 11. (Torni A, LVI-suunnitelmat 2014.)





Kuva 11. Tornin A:n vesihuollon periaatekaavio (Torni A, LVI-suunnitelmat 2014).

Torni A:n ilmanvaihto toteutetaan asuntokohtaisilla ilmanvaihtokoneilla, jotka on liitetty kiinteistösähkөөn. Kerroskäytävien ilmanvaihto on toteutettu yhdellä koneella, joka on sijoitettu kohteen vesikatolle. Kerroskäytävien ilmanvaihtokone on jaettu kolmeen tulo-/poistokanavistoon, joista jokainen palvelee yhtä vyöhykettä. Lisäksi kohteen muille erikoistiloille, kuten kellari- ja varastotiloille, teknisille tiloille, pesula- ja saunaosastolle sekä irtaimistovarastoille on omat tulo-/poistokoneensa. Porrashuoneiden ja hissien ilmanvaihto on toteutettu omilla huippuimureillaan. (Torni A, LVI-suunnitelmat 2014.)

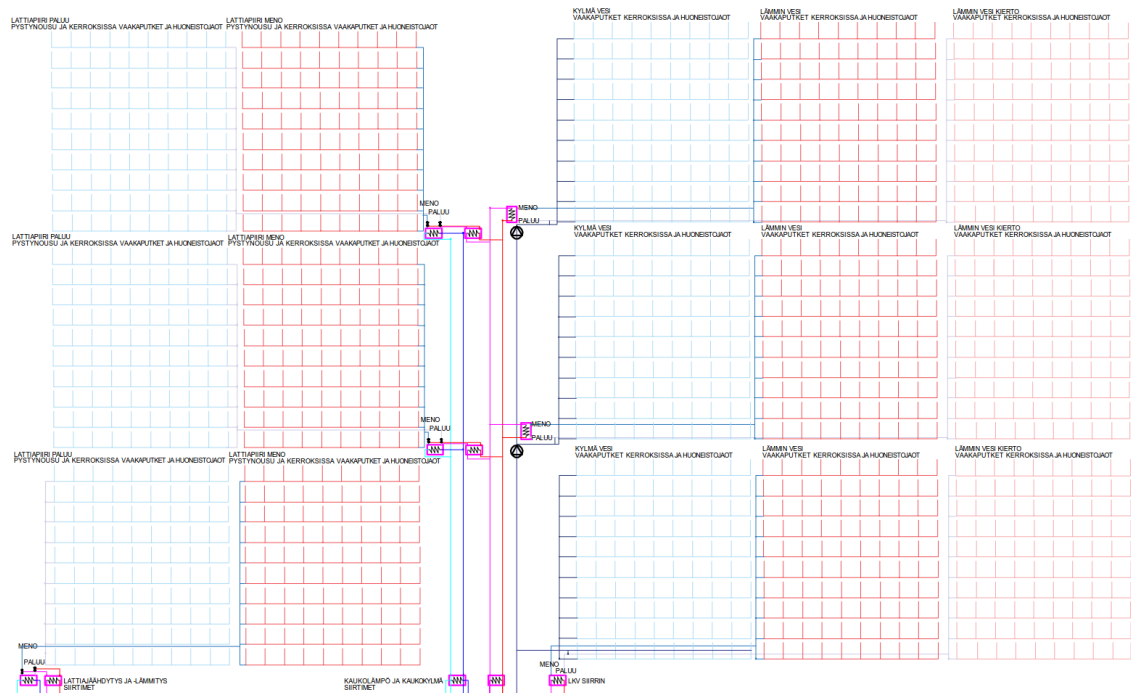
Torni A:ssa kesäajan lämpötilanhallinta on toteutettu parvekeratkaisun avulla. Kohteessa ei ole tuloilman viilennystä tai jäähdytyksen tilalaitteita.

### 3.4.2 Torni B

Torni B on yli 30-kerroksinen asuintorni ja korkeudeltaan yli 130 metriä. Huoneistoja on 282 ja niiden koot vaihtelevat välillä 36–196 m<sup>2</sup>. (Torni B, Myyntiesite 2017.)

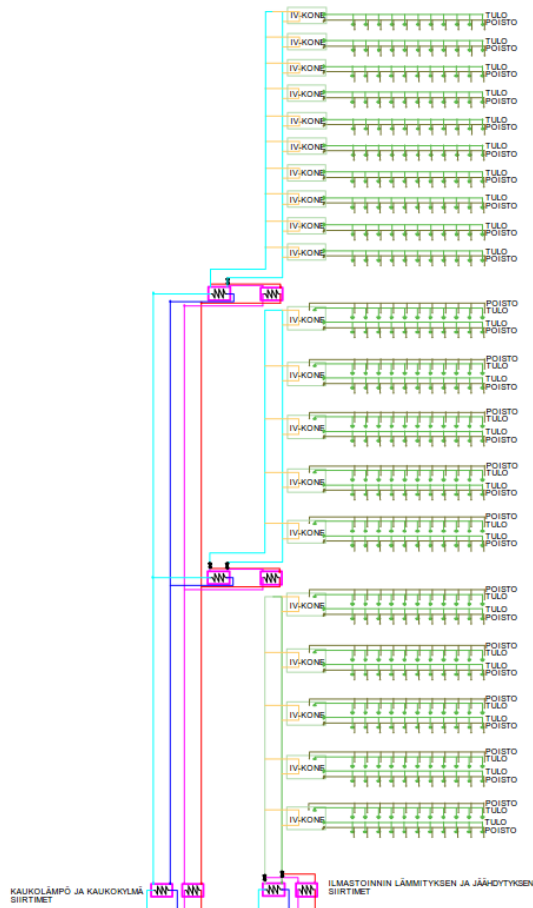
Lämmön- ja viilennysenergian jakoa varten rakennus on jaettu pystysuunnassa kolmeen, 10–11 kerroksen vyöhykkeeseen. Alinta vyöhykettä palvelevat lämmönsiirtimet on sijoitettu alimpaan kerrokseen, mutta kahta ylempää kerrosta palvelee korkeapainousulinja, joka syöttää energiaa kerroksiin 15 ja 25 sijoitettuihin, vyöhykekohtaisiin lämmönsiirtimiin. Lämmönsiirtimiltä lähtevät vyöhykekohtaiset pystynousut yhdistyvät

kerroksissa vaakasuuntaisiin putkistoihin, joiden avulla lämmitys ja kylmä vesi jaetaan huoneistoihin. Jokaisessa kerroksessa on vaakaputkistot huoneistojen lattialämmitys- ja jäähdytysjärjestelmälle, märkätilojen lattialämmitykselle, kylmälle ja lämpimälle käyttövedelle sekä käyttöveden kierrolle. Tilalämmityslaitteiden lämmönjaon, lämpimän käyttöveden sekä kylmän veden periaatekuva on esitetty kuvassa 12. Märkätilojen lattialämmitys on toteutettu samalla periaatteella kuin muiden tilojen lattialämmitys, mutta sitä ei ole kytketty jäähdytykseen. Lämmönsiirtimet on sijoitettu ratkaisussa samaan kerrokseen, ”tekniikkakerrokseen”, jolloin näihin liittyviä teknisiä tilavarauksia tarvitaan vain kahdesta huoneistokerroksesta kellarikerroksen lämmönjakuhuoneen lisäksi.



Kuva 12. Torne B:n lattialämmitys- ja jäähdytysputkiston sekä vesihuollon periaatekuva (Ramboll Finland Oy 2018).

Torne B:n ilmanvaihtojärjestelmä on toteutettu alemmissä kerroksissa kahta kerrosta palvelevilla keskitetyillä ilmanvaihtokoneilla ja ylemmissä kerroksissa yhden kerroksen keskitetyillä ilmanvaihtokoneilla. Ilmanvaihtokoneissa on tuloilman viilennys. Kerroskäytävillä on omat ilmanvaihtokoneensa, jotka palvelevat seitsemän eri kerroksen käytävien ilmanvaihtoa. Lisäksi hissikuiluilla, porrashuoneilla, hätäpoistumisportailta ja muilla yhteisillä tiloilla on omat ilmanvaihtokoneensa. Periaatepiirustus torne B:n huoneistojen ilmanvaihtojärjestelmästä on esitetty kuvassa 13. (Torne B: LVI-suunnitelmat 2018.)



Kuva 13. Tornin B:n ilmanvaihdon lämmityksen ja jäädytyksen pystynousujen periaatekaavio (Torni B: LVI-suunnitelmat 2018).

### 3.4.3 Tornin C

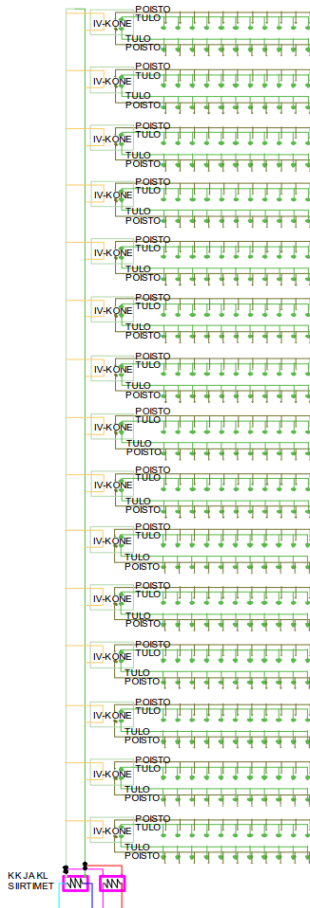
Kolmas tutkimuskohde, torni C, on yli 30-kerroksinen asuinkerrostalo, jonka huoneistokoot vaihtelevat yksiöistä neliöihin. Tornin yläkerroksissa on yhteiskäyttötiloja.

Lämmön- ja viilennysenergian jako on toteutettu rakennuksen keskellä kulkevien korkeapainenusulinjaparien avulla. Korkeapainenusulinjat on yhdistetty eri kerroksissa sijaitseviin lämmönsiirtimiin, joilta lähtevät vyöhykekohtaiset vaakaputkistot syöttävät kylpyhuone-elementtien sisällä kulkevia pystysuuntaisia linjastoja. Pystysuuntaiset linjastot kylpyhuone-elementtien sisällä palvelevat yhtä, noin 8–10 kerroksen, vyöhykettä. Lämmönsiirtimet on sijoitettu eri kerrokseen, jotta yhdessä kerroksessa tarvittavien vaakaputkistojen määrä olisi mahdollisimman vähäinen. Tilalämmityslaitteiden lämmönjaon, lämpimän käyttöveden sekä kylmän veden periaatekuva on esitetty kuvassa 14. Märkätilojen lämmitys on toteutettu sähköisellä lattialämmityksellä.



Kuva 14. Tornii C:n tilälämmityslaitteiden lämmön- ja kylmänjaon sekä vesihuollon periaatekaavio (Tornii C: LVI-suunnitelmat 2018).

Tornii C:n ilmanvaihtojärjestelmä on toteutettu huoneistojen osalta kahta kerrosta palvelevilla keskitetyillä ilmanvaihtokoneilla. Ilmanvaihtokoneissa on tuloilman viilennys ja ilmanvaihtoa voidaan ohjata huoneistokohtaisesti paikallisella ajastimella. Ilmanvaihtojärjestelmän periaatekaavio on esitetty kuvassa 15. Huoneistojen lisäksi kerrokseen sijoitetut ilmanvaihtokoneet palvelevat myös kerroskäytävien ilmanvaihtoa. Kerroskäytävien ilmanvaihtoa varten ilmanvaihtokoneesta lähtee erilliset tulo-/poistokanavat käytävien ilmanvaihtoa varten. Kanavat on eristetty ilmanvaihtokoneesta palopellein, sillä kerroskäytävät ja huoneistot ovat keskenään eri palo-osastoja.



Kuva 15. Periaatekuva torni C:n ilmanvaihtojärjestelmästä. Yksi ilmanvaihtokone palvelee keskitetysti kahta kerrosta (Torni C: LVI-suunnitelmat 2018).

#### 3.4.4 Yhteenveto tutkimustapausten teknisistä ratkaisuista

Kaikki tutkimustapaukset ovat tekniseltä ratkaisultaan erilaisia, mutta niistä löytyy myös samankaltaisuuksia. Kaikki tutkimustapaukset on jaettu korkeussuunnassa useampaan, noin 10 kerroksen vyöhykkeeseen.

Torni A:ssa ja torni C:ssä lämmönjakelu on toteutettu huoneistoissa kulkevien pystynousujen avulla, kun taas torni B:ssä jokaisessa kerroksessa on vaakaputkisto, joka jakaa tarvittavan lämmitys- tai jäähdytysenergian huoneistoihin. Toisaalta torni C:ssä on vain yksi nousulinja, jonka avulla lämmitystä/jäähdytystä syötetään ylempiin kerroksiin. Torni A:ssa jokaiselle 10 vyöhykkeen kokonaisuudelle on oma nousulinjansa kellarista saakka. Torni B:n ratkaisu sijoittuu näiden kahden välimaastoon, sillä siellä alimmille vyöhykkeille on täysin erillinen nousulinjastonsa, mutta kahden ylempien vyöhykkeen lämmitys- ja jäähdytysenergia jaetaan yhden välisiirtoverkoston/pystynousun avulla eteenpäin vyöhykekohtaisille pystynousuille.

Ilmanvaihdon osalta ainoastaan torni A:ssa on huoneistokohtaiset ilmanvaihtokoneet. Tornit C:ssä ja B:ssä on molemmissa kahta kerrosta palvelevia keskitettyjä koneita, mutta torni B:ssä on lisäksi vain yhtä kerrosta palvelevia ilmanvaihtokoneita sekä erillinen ilmanvaihtojärjestelmä kerroskäytävälle. Tornit C:ssä ilmanvaihtokoneet on kytketty suoraan korkeapainenousulinjaan ilman lämmönsiirtimiä näiden välillä toisin kuin torni B:ssä, jossa myös ilmanvaihto on jaettu noin 10 kerroksen vyöhykkeisiin lämmön ja kylmän jaon osalta. Tornit C:ssä kerroksiin sijoitetut ilmanvaihtokoneet palvelevat sekä kerroskäytävien että huoneistojen ilmanvaihtoa, mutta tilat on eriytetty toisistaan omilla kanavillaan ja palopelleillä.

## 4 Tutkimustulokset

### 4.1 Tornit A

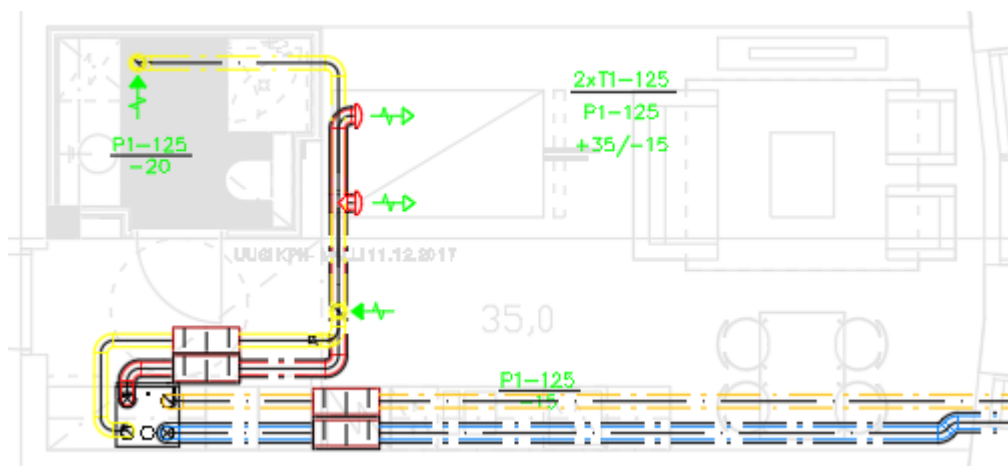
#### 4.1.1 Tilantarpeiden kustannusvaikutus

Torni A:n ratkaisussa LVI-tekniikka on sijoitettu pääosin rakennuksen kellarikerroksen lämmönjakohuoneeseen, jossa sijaitsevat kaikki järjestelmäratkaisun tarvitsemat lämmönsiirtimet. Tornit C:ssä märkätilojen lattialämmitys on toteutettu sähköisesti, joten tutkimustapausten vertailussa märkätilojen lämmitykseen liittyvät lämmönsiirtimet ja putkistot jätetään huomioimatta. Toisaalta torni A:n virallisessa ratkaisumallissa hajautetut ilmanvaihtokoneet on toteutettu sähköisesti ja ilman tuloilman jäähdytystä, joten tässä vertailussa lämmityspatterit on muutettu nestekiertoisiksi ja huomioitu tuloilman jäähdytyksen, ylimääräisten lämmönsiirtimien ja putkistojen kustannusvaikutukset. Tällöin torni A:n ratkaisussa kellaritiloihin sijoitetaan yhdeksän lämmönsiirintä, kun taas tornit C:n ratkaisussa lämmönsiirtimiä on viisi kappaletta. Tornit C:n järjestelmäratkaisun mukainen tilantarve lämmönjakohuoneelle on 30 m<sup>2</sup>, joten skaalaamalla tilantarvetta lämmönsiirtimien määrän suhteessa tarvitaan torni A:n ratkaisumallissa noin 54 m<sup>2</sup>:n suuruinen lämmönjakohuone.

Asuinkerroksissa on tekniikan osalta kerroskäytävien ja huoneistojen ilmanvaihtokanavistot, huoneistokohtaiset iv-koneet sekä lämmönsiirto- ja viemäriverkostot. Kerroskäytävien ilmanvaihtokone on sijoitettu rakennuksen katolle ja sen tilantarve on noin 10 m<sup>2</sup>. Kerroskäytävien ilmanvaihdon kanavistojen keskimääräiseksi tilantarpeeksi on arvioitu 1,6 m<sup>2</sup> / kerros, joka vastaa kahden tulo- ja poistokanaviston tilantarvetta. Tämä arvio sisältää oletuksen, että ilmanvaihdon kanaviston kuilua voidaan pienentää

alaspäin mentäessä, kun siirrytään vyöhykkeeltä seuraavalle ja osa kanavistoista päättyy.

Torni A:n alkuperäisessä ratkaisussa huoneistokohtaisten ilmanvaihtokoneiden raitisilma-aukot on sijoitettu jokaisen huoneiston omalle ulkoseinälle ja poistokanavat on kuljetettu kerroskäytävää pitkin ulkoseinälle. Torni A:n pohjaratkaisussa kerroskäytävä ulottuu ulkoseinään kahdessa päädyssä, joten poistokanavista puolet on viety toiselle ulkoseinälle ja loput toiselle. Torni C:ssä kerroskäytävä koskettaa ulkoseinää ainoastaan yhden porrashuoneen kautta, joten kaikki poistokanavat täytyisi kuljettaa samaa reittiä ulkoseinälle. Käytävän leveys muodostuu tässä rajoittavaksi tekijäksi eivätkä kanavat mahdu kulkemaan vierekkäin käytävällä. Tästä johtuen torni A:n alkuperäistä ratkaisua on jouduttu muokkaamaan torni C:n pohjapiirustukseen siten, että poistoilma puhalletaan huoneiston seinästä ulos kerroskäytävän sijaan. Yhden huoneiston (yksiö, 35 m<sup>2</sup>) ilmanvaihtoratkaisu on esitetty kuvassa 16.



Kuva 16. Torni C:n pohjaan mallinnettu hajautettu ilmanvaihtojärjestelmä (Torni C: LVI-suunnitelmat 2018).

Mallinnetussa ratkaisussa ei ole huomioitu taulukossa 4 esitettyjä etäisyysvaatimuksia ulospuhalluslaitteen sijoitukselle, joten todellisuudessa mallinnettu ratkaisu saattaa aiheuttaa muutospaineita julkisivujen aukotuksiin. Toisaalta raitis- ja poistoilma-aukkojen sijoittaminen samalle julkisivulle saattaa parantaa ilmanvaihdon toimivuutta, sillä aukkoihin kohdistuu sama tuulenpaine toisin kuin ratkaisussa, jossa aukot on sijoitettu eri ilmansuuntiin. Hajautetun ilmanvaihtojärjestelmän hyötynä on lähes olematon tilantarve, sillä tarvittava tekniikka voidaan sijoittaa alakattoon ja näin ollen se ei kuluta lattiapinta-alaa. Toisaalta alakaton tarve kasvaa, sillä keskitetyssä ratkaisussa huoneistoihin tarvitsee kuljettaa ainoastaan tulo- ja poistoilmakanavat. Raitisilma- ja poistoilmakanavat lisäävät alakaton tarvetta noin 65 m<sup>2</sup> / kerros. 30-kerroksisessa asuintornissa tämä tarkoittaa lähes 2 000 m<sup>2</sup> enemmän alakattoa.

Seinäpuhalluksen toimivuuteen tulee suhtautua pienellä varauksella, sillä seinäpuhallus tarkoittaa julkisivuvaipan reiättämistä huoneistokohtaisten raitisilma- ja jäte-ilmaukkojen vuoksi. Korkearakentamisessa tämä voi vaikuttaa merkittävästi rakennuksen paine-eroihin ja lisätä hormivaikutusta, jos vaipan ja sisä rakenteiden tiiviyyteen ei kiinnitetä riittävästi huomiota.

Radiaattoreiden lämmönjako on toteutettu pienillä, DN10-15:n suuruisilla pystynousuilla, joita on sijoitettu jokaiseen huoneistoon 1–2 kappaletta ulkoseinälle. Tornin C:n pohjassa tämä tarkoittaa 17 pystynousua. Pystynousuja syötetään noin 10 kerroksen välein sijoitettavien vaakaputkistoin, jotka kulkevat kerroskäytävän katossa. Vaakaputkistoja syötetään rakennuksen keskelle sijoitetussa kuilussa kulkevien, vyöhykekohtaisten runkopystynousujen kautta. Tämän kuilun tilantarpeeksi on arvioitu  $1 \text{ m}^2$  ja se sisältää lämmityksen pystynousujen lisäksi käyttöveden tarvitsemat pystynousut sekä kerroskäytävien ilmanvaihdon jäähdytyksen pystynousut.

Vedenjakelun osalta tornin A:n ratkaisumallissa kerroksissa tilaa vievät kylpyhuoneisiin sijoitetut kylmän veden, lämpimän veden sekä käyttöveden kierron nousut. Niiden tilantarve on noin  $0,2 \text{ m}^2$  / huoneisto eli 11 huoneistoa sisältävässä kerroksessa noin  $2,2 \text{ m}^2$  / kerros, jolloin tilantarve kokonaisuudessaan 30 asuinkerroksen tornitalossa on  $66 \text{ m}^2$ . Kylpyhuononousuja syötetään yhden kerroksen kattoon sijoitettujen vaakaputkistojen kautta, jotka on yhdistetty kellarista lähteviin runkopystynousuihin. Vesihuollon runkopystynousut on sijoitettu samaan rakennuksen keskellä sijaitsevaan kuiluun kuin radiaattoreiden runkolinjat.

Tornin A:n ratkaisumallissa asuinhuoneistojen astetuntivaatimus täytetään parvekkeiden passiivisen aurinkosuojan avulla. Tornin C:ssä parvekkeiden integroiminen osaksi arkkitehtuuria ei ole käytännössä mahdollista, mutta periaatteellisella tasolla on mahdollista laskea rakentamiskustannus jokaiselle parvekkeelle. Tornin A:n ratkaisussa parvekepinta-alaa on toteutettu  $0,25 \text{ m}^2$  /  $\text{h m}^2$ . Tornin C:ssä hyötyneliöitä on yhteensä lähes  $13\,300 \text{ m}^2$ , joten hyötyneliöiden suhteen tarkasteltuna torniin C tulisi noin  $3\,250 \text{ m}^2$  parveketta.

Yhteenveto tornin A:n ratkaisumallin mukaisessa toteutuksessa tarvittavista tilantarpeista ja arvio niiden kustannusvaikutuksista on esitetty taulukossa 5. Kustannukset on laskettu luvussa 3.3 esitetyillä hinnoilla.



Taulukko 5. Tornin A:n ratkaisun tilantarpeet eri kerroksissa tornin C:n mallipohjaan suhteutettuna sekä niiden kustannusvaikutukset.

Tilan käyttötarkoitus ja sijainti	Pinta-ala, m <sup>2</sup>	Rakentamiskustannukset, %		Menetetty myyntitulo, %
		Parvekkeella	Ilman parvekettä	
Ilmanvaihto, kellaritilat	3	0 %	1 %	0 %
Ilmanvaihto, muut kerrokset	51	1 %	17 %	32 %
Ilmanvaihto, katto	10	0 %	4 %	0 %
Lämmitys ja jäähdytys, kellaritilat	41	1 %	14 %	4 %
Lämmitys ja jäähdytys, muut tilat	67	2 %	23 %	42 %
Vesihuolto, kellaritilat	14	0 %	5 %	1 %
Vesihuolto, muut tilat	33	1 %	11 %	21 %
Parvekkeet	3 245	92 %	0 %	0 %
Lisäkotelointi asunto-iv:ssä	1 950	2 %	25 %	0 %
Yhteensä		100 %	100 %	100 %

Taulukon 5 perusteella suurin osa tornin A:n ratkaisun mukaisista kustannuksista syntyy parvekkeiden rakentamisesta. Lisäksi hajautetun IV-järjestelmän synnyttämä lisäkoteloinnin tarve aiheuttaa yllättävän paljon lisäkustannuksia, jopa 25 % kaikista huomioituista tilojen rakentamiskustannuksista, jos parvekkeen rakentamista ei huomioida. Eniten myyntituloja menetetään muihin tiloihin sijoitettavista ilmanvaihdon sekä lämmityksen ja jäähdytyksen teknisistä tiloista. Ilmanvaihdon osuus menetetyistä myyntituloista on noin kolmanneksen ja lämmityksen ja jäähdytyksen osuus yli 40 %.

#### 4.1.2 Järjestelmäkustannukset

Torni A:n ratkaisuvaihtoehdon mukaisen talotekniikkaratkaisun rakentamiskustannukset (laitteet, asennus) saatiin SRV:n tekemän kustannuslaskelman perusteella. Kustannuslaskelmassa hyödynnettiin tornin C:n pohjaan tehtyä tornin A:n ratkaisun mukaista IFC-mallia, josta laskettiin tarvittavat massat ja hinnoiteltiin materiaalit ja työkustannukset Broker-ohjelmiston avulla. IFC-mallissa huomioitiin sovitut muutokset, mm. hajautetun ilmanvaihtojärjestelmän toteuttaminen nestekiertoisilla pattereilla ja tuloilman jäähdytys.

Taulukossa 6 on esitetty tornin A:n järjestelmäratkaisun kustannusten jakaantuminen lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien, vesihuollon ja ilmanvaihdon välillä. Tornin A:n järjestelmäratkaisussa suurimman kustannuksen aiheuttavat asuntokohtaiset IV-koneet, jotka vastaavat lähes 70 prosenttia kaikista järjestelmäkustannuksista. Kerroskäytävien vaikutus järjestelmien kokonaiskustannuksiin jää hajautetussa järjestelmässä pieneksi.

Taulukko 6. Tornin A:n järjestelmäkustannusten jakaantuminen.

		Osuus järjestelmäkustannuksista, %
<b>Lämmitys ja jäähdytys</b>	Putkistot	9 %
	Tilalämmityslaitteet	7 %
<b>Vesihuolto</b>	Putkistot	11 %
<b>Ilmanvaihto</b>	Kerroskäytävät	5 %
	Huoneistot	69 %
<b>Yhteensä</b>		<b>100 %</b>

Ilmanvaihtojärjestelmän jälkeen suurimman osan järjestelmäkustannuksista aiheuttaa lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmä, joka vastaa noin 15 prosenttia kokonaisjärjestelmäkustannuksista jakaantuen puoliksi putkistomateriaalien ja puoliksi tilalämmityslaitteiden järjestelmäkustannuksiin.

## 4.2 Tornin B

### 4.2.1 Tilantarpeiden kustannusvaikutus

Tornin B:n järjestelmäratkaisussa ilmanvaihto on toteutettu keskitetyillä koneilla, joita on 1–2 kerroksen välein ja niiden tilantarve on noin 7 m<sup>2</sup>. Tila tarvitaan jokaisesta kerroksesta, jotta ilmanvaihtojärjestelmän kanavat saadaan mahdutettua rakennukseen.

Lämmönjaon osalta kellarikerrokseen on sijoitettu kahdeksan kaukolämpö- ja kaukokylmäsiirrintä, joista kuusi palvelee alimpien kerroksien ilmastoinnin lämmitystä- ja jäähdytystä, tilalaitteiden lämmitystä- ja jäähdytystä, mukavuuslattialämmitystä sekä käyttöveden lämmitystä. Loput kaksi kaukolämpö- ja kaukokylmäpakettia palvelevat kahta ylempää vyöhykettä siten, että näiltä lämmönsiirtimiltä lähtevät lämmityksen/jäähdytyksen korkeapainelinjat ylös tekniikkakerrokseen, joissa ovat lämmönsiirtimet siirtävät lämmön tai kylmän tilalämmityslaitteistoa palveleviin verkostoihin. Tekniikkakerroksia on noin 10 kerroksen välein ja niihin on sijoitettu tilalämmityksen ja tilajäähdytyksen lämmönsiirtimet sekä käyttöveden ja märkätilojen lämmönsiirrin. Lisäksi kerrokseen on sijoitettu myös ilmanvaihdon lämmityksen ja jäähdytyksen lämmönsiirtimet. Järjestelmäratkaisujen vertailukelpoisuuden vuoksi tornin B:n ratkaisussa jätetään huomioimatta märkätilojen lämmönsiirtimet. Tällöin kerrokseen on sijoitettu yhteensä 10 lämmönsiirrintä, joiden tilantarpeeksi saadaan arviolta noin 30 m<sup>2</sup>. Tornin B:n ratkaisussa ilmanvaihdon lämmönsiirtimet on sijoitettu eri kerrokseen, mutta yksinkertaistuksen vuoksi ne on ajateltu tässä työssä sijaitsevan samassa tekniikkakerroksessa kuin muutkin lämmönsiirtimet. Tällöin yhden tekniikkatilan tilantarve on 15 m<sup>2</sup>.

Torni B:ssä tilalämmityslaitteina käytetään lattialämmityspotkistoa huoneistojen lämmittämiseen ja viilentämiseen. Lattialämmityspotkistoa syötetään jokaisessa kerroksessa kulkevan vaakaputkiston avulla. Myös vedenjakelu on toteutettu vastaavasti kerroksissa kulkevien vaakaputkistojen avulla. Kerroskäytäviä kiertävät vaakaputkistot yhdistyvät huoneistoissa pystykuiluihin, jotka syöttävät tilalämmityslaitteita ja vesikalusteita. Näiden huoneistoissa olevien pystykuilujen tilantarve on noin 0,2 m<sup>2</sup> / huoneisto. Vaakaputkistoille ei tarvita erillisiä kuiluvarauksia, mutta niiden mahdollistaminen kerroskäytävien alakattoon vaatii tarkkaa sovittamista. Lämmityksen ja jäähdytyksen osalta kerroskohtaisia vaakaputkistoja syötetään tekniikkakerroksista lähtevien pystynousujen eli siirtoverkkojen avulla. Kuilujen tilantarve on noin 1,5 m<sup>2</sup> / kerros, kun huomioidaan myös käyttövesiverkostojen tilantarpeet.

Tilalaitteita palvelevat korkeapainenusulinjat kulkevat koko rakennuksen läpi kellarista kerrokseen 21 saakka. Korkeapainenusulinjat palvelevat tekniikkakerrokseen sijoitettuja lämmönsiirtimiä, jotka syöttävät tilalaitteisiin yhdistettyjä lämmitys- ja jäähdytysverkoja. Nämä verkot kulkevat vyöhykkeittäin kattaen kaikki kerrokset kulkien 30 kerroksen läpi. Korkeapainenusulinjan tilantarve on noin 0,5 m<sup>2</sup> / kerros, kun huomioidaan myös käyttövesiverkostojen tilantarpeet. Tekniikkakerroksissa verkostojen tilantarve sisältyy tekniikkatilan 15 m<sup>2</sup> tilantarpeeseen.

Yhteenveto torni B:n ratkaisumallin mukaisessa toteutuksessa tarvittavista tilantarpeista ja arvio niiden kustannusvaikutuksista on esitetty taulukossa 7.

*Taulukko 7. Torni B:n ratkaisun tilantarpeet eri kerroksissa torni C:n mallipohjaan suhteutettuna sekä niiden kustannusvaikutus.*

Tilan käyttötarkoitus ja sijainti	Pinta-ala, m <sup>2</sup>	Rakentamiskustannukset, %	Menetetty myyntitulo, %
Ilmanvaihto, kellaritilat	18	5 %	1 %
Ilmanvaihto, muut kerrokset	165	44 %	55 %
Lämmitys ja jäähdytys, kellaritilat	54	14 %	3 %
Lämmitys ja jäähdytys, muut tilat	86	23 %	29 %
Vesihuolto, kellaritilat	18	5 %	1 %
Vesihuolto, muut tilat	36	9 %	12 %
		100 %	100 %

Taulukon 7 perusteella suurin osa tilantarpeesta sekä rakentamiskustannusten että menetetyn myyntitulon näkökulmasta aiheutuu muihin kuin kellarikerrokseen sijoitettui-

ta ilmanvaihtokoneista ja runkokanavistoista. Myös lämmitykseen ja jäähdytykseen liittyvät tilat muissa kuin kellarikerroksissa lisäävät rakentamiskustannuksia noin neljänneksellä ja vähentävät myyntituloja lähes kolmanneksen verrattuna tilanteeseen, jossa näitä tiloja ei tarvitsisi rakentaa. Pienin vaikutus sekä rakentamiskustannuksiin että menetettyyn myyntituloon on vesihuoltoon liittyvillä järjestelmillä, yhteensä noin 15 %.

#### 4.2.2 Järjestelmäkustannukset

Torni B:n ratkaisuvaihtoehdon mukaisen talotekniikkaratkaisun rakentamiskustannukset (laitteet, asennus) saatiin SRV:n tekemän kustannuslaskelman perusteella. Kustannuslaskelmassa hyödynnettiin torni C:n pohjaan tehtyä torni B:n järjestelmäratkaisun mukaista IFC-mallia, josta laskettiin tarvittavat massat ja hinnoiteltiin materiaalit ja työkustannukset Broker -ohjelmiston avulla. IFC-mallista jätettiin pois märkätilojen nestekiertoinen lattialämmitys, jotta järjestelmäratkaisut olisivat keskenään mahdollisimman vertailukelpoisia.

Taulukossa 8 on esitetty torni B:n järjestelmäratkaisun kustannusten jakaantuminen lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien, vesihuollon ja ilmanvaihdon välillä. Torni B:n järjestelmäratkaisussa suurimman kustannuksen aiheuttavat huoneistojen ilmanvaihto, joka vastaa noin 55 % LVIJ-järjestelmän kokonaiskustannuksista. Seuraavaksi kallein komponentti on tilalämmityslaitteet, sillä lattialämmitys- ja -jäähdytysjärjestelmän osuus järjestelmäkustannuksista on lähes 30 %. Putkistojen osuus (lämmitys, jäähdytys ja vesihuolto) on yhteensä vain noin 16 %.

*Taulukko 8. Torni B:n järjestelmäkustannuksien jakaantuminen.*

		<b>Osuus järjestelmäkustannuksista, %</b>
<b>Lämmitys ja jäähdytys</b>	Putkistot	8 %
	Tilalämmityslaitteet	27 %
<b>Vesihuolto</b>	Putkistot	8 %
<b>Ilmanvaihto</b>	Kerroskäytävät	3 %
	Huoneistot	55 %
<b>Yhteensä</b>		<b>100 %</b>

### 4.3 Tornit

#### 4.3.1 Tilantarpeiden kustannusvaikutus

Torni C:ssä LVIJ-tekniikkaa on sijoitettu lähes jokaiseen kerrokseen, sillä ilmanvaihtokoneita on joka toisessa kerroksessa ja lämmönsiirtimiä on kolme kappaletta (tilalämmitys, tilajäähdytys, käyttöveden lämmitys) jokaisessa 8–10 kerroksen vyöhykkeessä. Ilmanvaihtokonehuone vie noin 7 m<sup>2</sup>:n tilan kahdesta kerroksesta, sillä kanavistot vievät ylemmästä kerroksesta yhtä suuren tilan. Todellisuudessa kanavistojen tilantarve 2. kerroksessa ei ole näin suuri ja tilaan voidaan sijoittaa myös muuta tekniikkaa. Tästä johtuen runkokanavien tilantarpeeksi on arvioitu 4 m<sup>2</sup>. Lämmönsiirtimille varattu tekninen tila on torni C:n kerrospohjassa 4,5 m<sup>2</sup>, mutta tilatehokkuutta voitaisiin nostaa siten, että tilavaraukseksi riittäisi lämmönsiirtimien osalta noin 3 m<sup>2</sup>.

Suurimman yksittäisen tilan vie lämmönjakohuone (noin 30 m<sup>2</sup>), joka on sijoitettu kerrokseen 2. Lämmönjakohuoneelta lähtee kaksi lämmitysverkostoa: yksi korkeapainousupari ilmanvaihtokoneille ja toinen tilalämmityslaitteita ja käyttöveden lämmitystä varten. Ilmanvaihtokoneiden korkeapainousuparia hyödynnetään vuodenaikasta riippuen lämmitys- tai jäähdytysenergian jakeluun. Tilalämmityslaitteiden jäähdytysenergia jaetaan erillisten korkeapainousulinjojen avulla. Ilmanvaihtokoneiden korkeapainelinjanousu vie jokaisesta kerroksesta noin 0,1 m<sup>2</sup>, joka sisältyy ilmanvaihtokonehuoneen tilantarpeeseen. Vastaavasti tilalämmityslaitteiden ja käyttöveden tarvitsemat nousut on sisällytetty kerrokseen sijoitettavien lämmönsiirtimien tilantarpeeseen. Kerroksissa, joissa ei tarvita lämmönsiirtimiä, joudutaan näille putkistoille varaamaan noin 0,5 m<sup>2</sup> tila.

Lämmönsiirtimiä sisältävissä kerroksissa on vaakaputkistot, jotka jakavat lämmön/kylmän jokaiseen huoneistoon. Huoneistojen kylpyhuone-elementteihin on sisällytetty pystysuuntaiset nousulinjat, jotka vastaavasti jakavat lämmön/kylmän muihin saman vyöhykkeen kerrokseen. Pystynousut vievät noin 0,2 m<sup>2</sup> / kylpyhuone. Tällöin esimerkiksi 30-kerroksinen asuintorni, jossa on 10 huoneistoa / kerros, tarvitsee 60 m<sup>2</sup> tilan pystynousuja varten.

Yhteenveto torni C:n ratkaisumallin mukaisessa toteutuksessa tarvittavista tilantarpeista ja arvio niiden kustannusvaikutuksista on esitetty taulukossa 9. Suurin teknisen tilan tarve aiheutuu ilmanvaihtokoneista ja runkokanavista, jotka sijoitetaan huoneistokerrokseen. Niiden tilantarve on yhteensä 165 m<sup>2</sup> vastaten noin 50 prosenttia rakentamiskustannuksista sekä menetetyistä myyntituloista. Seuraavaksi suurin tilantarve aiheu-

tuu lämmityksen ja jäähdytyksen (ilmanvaihto, tilalaitteet, käyttövesi) verkostoista ja lämmönsiirtimistä. Niiden osuus on yhteensä noin kolmannes rakentamiskustannuksista sekä menetetyistä myyntituloista.

*Taulukko 9. Tornin C:n tekniset tilatarpeet käyttötarkoituksen mukaan jaoteltuna sekä niiden kustannusvai-  
kutukset.*

Tilan käyttötarkoitus ja sijainti	Pinta-ala, m <sup>2</sup>	Rakentamis- kustannukset, %	Menetetty myyntitu- lo, %
Ilmanvaihto, kellaritilat	18	5 %	1 %
Ilmanvaihto, muut kerrokset	165	48 %	50 %
Lämmitys ja jäähdytys, kellaritilat	46	13 %	2 %
Lämmitys ja jäähdytys, muut tilat	70	20 %	32 %
Vesihuolto, kellaritilat	11	3 %	1 %
Vesihuolto, muut tilat	35	10 %	14 %
		100 %	100 %

Pienin tilavaikutus tornin C:n järjestelmäratkaisussa on vesihuollolla, jonka osuus rakentamiskustannuksista on vain noin 15 %.

#### 4.3.2 Järjestelmäkustannukset

Tornin C:n ratkaisuvaihtoehdon mukaisen talotekniikkaratkaisun rakentamiskustannukset (suunnittelu, laitteet, asennus) saatiin SRV:n tekemän kustannuslaskelman perusteella. Kustannuslaskelmassa hyödynnettiin tornin C:n järjestelmäratkaisun mukaista IFC-mallia, josta laskettiin tarvittavat massat ja hinnoiteltiin materiaalit ja työkustannukset Broker -ohjelmiston avulla.

Taulukossa 10 on esitetty järjestelmäkustannusten jakaantuminen. Tornin C:n ratkaisumallille laskettiin myös vaihtoehtoinen toteutustapa pattereilla ja tuloilman jäähdytyksellä huomioiden tornin A:n laskennasta saatu kustannus pattereille sekä tuloilman jäähdyttämistä varten tarvittavalle kanavistojen lisäeristykselle.

Taulukko 10. Tornin C:n järjestelmäkustannuksien jakaantuminen.

		Osuus järjestelmäkustannuksista, %	
		Lattialämmitys	Patterit ja tuloilman jäähdytys
Lämmitys ja jäähdytys	Putkistot	6 %	9 %
	Tilalämmityslaitteet	30 %	7 %
Vesihuolto	Putkistot	8 %	11 %
Ilmanvaihto	Kerroskäytävät	4 %	5 %
	Huoneistot	52 %	69 %
Yhteensä		100 %	100 %

Torni C:n ratkaisussa asuntojen ilmanvaihdon järjestelmäkustannukset vastaavat yli 50 prosenttia järjestelmäkustannuksista ja pattereilla toteutettavassa vaihtoehdossa lähes 70 % kustannuksista. Lattialämmityksen osuus on myös suuri, 30 prosenttia. Vesihuollon osuus on alle 10 % järjestelmäkustannuksista. Lämmityksen ja jäähdytyksen verkostojen sekä kerroskäytävien ilmanvaihdon järjestelmäkustannus jää pieneksi. Suurin säästöpotentiaali on tilalämmityslaitteissa sekä huoneistojen ilmanvaihtojärjestelmässä.

#### 4.4 Tutkimustapausten vertailu

##### 4.4.1 Tilantarpeet ja niiden kustannukset

Eri ratkaisuvaihtoehtojen tilantarpeet eroavat toisistaan huomattavasti erityisesti hajautetun ja keskitetyn ilmanvaihtojärjestelmän välillä. Torni B:n ja tornin C:n ratkaisussa ilmanvaihtojärjestelmä vie lähes 200 m<sup>2</sup> tilaa, kun tornin A:n hajautetun järjestelmän tilantarpeet johtuvat lähinnä lämmönsiirtimien ja kerroskäytävien ilmanvaihdon pystykanavien tilantarpeesta rajoittuen noin 60 m<sup>2</sup>:iin. Yhteenveto eri ratkaisujen tilantarpeista on esitetty taulukossa 11.

Taulukko 11. Eri järjestelmäratkaisujen tilantarpeet, m<sup>2</sup>.

LVIJ-järjestelmä ja tilantarve, m <sup>2</sup>	Torni B	Torni C	Torni A	Torni A, ei parvekkeita	Torni C, patterit ja tuloilman jäähdytys
Ilmanvaihto, kellaritilat	18	18	3	3	18
Ilmanvaihto, muut kerrokset	165	165	51	51	165
Ilmanvaihto, katto	0	0	10	10	0
Lämmitys ja jäähdytys, kellaritilat	54	46	41	41	46
Lämmitys ja jäähdytys, muut tilat	86	70	67	67	70
Vesihuolto, kellaritilat	18	11	14	14	11
Vesihuolto, muut tilat	36	35	33	33	35
<b>Yhteensä</b>	<b>377</b>	<b>346</b>	<b>217</b>	<b>217</b>	<b>346</b>
Parvekkeet			3 245		
Lisäkotelointi asunto-iv:ssä			21 450	21 450	

Torni B:n ja torni C:n järjestelmäratkaisuissa ilmanvaihtojärjestelmä vie paljon tilaa, koska IV-koneet on sijoitettu kerroksiin ja ne tarvitsevat tilaa myös runkokanavistoilleen. Torni A:n hajautettu järjestelmä on erittäin tilatehokas, sillä sen tilantarve rajoittuu käytännössä kerroskäytävien ilmanvaihtoa varten katolle tarvittavaan IV-konehuoneeseen ja sen pystykuiluihin. Huoneistoja palvelevat IV-koneet saadaan sijoitettua esimerkiksi kylpyhuoneisiin ja kanavistot alakattoon. Täten torni A:n hajautettu ilmanvaihtojärjestelmä on tilatehokkuudeltaan selvästi paras tutkituista vaihtoehdoista. Vertailussa täytyy kuitenkin muistaa keskitetyn ja hajautetun ilmanvaihtojärjestelmän erot muun muassa elinkaarikustannuksissa, ylläpidon järjestämisessä sekä rakennusaikataulussa.

Sisäilmaolosuhteiltaan vertailtavat ratkaisut eivät ole keskenään täysin vertailukelpoisia: Torni B:n ja torni C:n ratkaisussa asukas pystyy ylläpitämään miellyttävät S1-sisäilmaolosuhteet läpi vuoden ilman maiseman peittämistä sälekaihtimilla. Vertailun tasapuolisuuden vuoksi torni A:n järjestelmäratkaisuun on lisätty tuloilman jäähdytys, jonka avulla asukas pystyy ylläpitämään S2-sisäilmastoluokituksen mukaiset sisäilmaolosuhteet. Tämä ei kuitenkaan onnistu ilman parvekkeita toteutetussa ratkaisussa, mikäli sälekaihtimia ei pidetä kiinni läpi vuoden tai ilmamääriä nosteta merkittävästi. Kasvattamalla ilmamääriä voidaan torni A:n ratkaisussa päästä jopa S1-sisäilmaolosuhteisiin, mutta tämä lisää tarvittavaa koteloinnin määrää ja voi johtaa kerroskäytävän leventämiseen suurentuneiden kanavakokojen vuoksi.



Ilmanvaihdon jälkeen tilantarpeet eroavat eniten lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien osalta. Tornit A:n ja C:n mukaisessa ratkaisumallissa tilantarve on noin 40–45 m<sup>2</sup> kellaritiloissa ja noin 70 m<sup>2</sup> muissa kerroksissa. Tornit B:ssä tilantarve painottuu enemmän muihin kuin kellarikerrokseen ollen noin 54 m<sup>2</sup> kellarissa ja muissa tiloissa yhteensä lähes 90 m<sup>2</sup>. Ero lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien tilantarpeessa aiheutuu erityisesti tornin B:n lämmönsiirtimien suuremmasta määrästä. Lisäksi tornin C:ssä yhdellä korkeapainenusulla on korvattu tornin A:n useat perinteiset pystynousut, mikä kompensoi osan tornin C:n lämmönsiirtimien tilantarpeesta muissa kuin kellarikerroksessa. Käytännössä erot tornin A:n ja C:n lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien välillä ovat hyvin pienet ja jakautuvat myös hyvin samalla tavalla kellaritiloihin ja muihin tiloihin. Tornin B:n ratkaisussa tilaa otetaan enemmän muista kuin kellarikerroksista ja myös kellarista tarvittava tila on suurempi kuin muissa ratkaisuisissa.

Vesihuollon osalta tornin A:n ja C:n järjestelmäratkaisut vievät käytännössä yhtä paljon tilaa sekä kellarikerroksista että muista tiloista. Tornin B:n järjestelmäratkaisun mukainen tilantarve on kuitenkin melkein kaksinkertainen kellaritilassa tornin C:n ratkaisuun verrattuna ja noin kolmanneksen suurempi muissa kerroksissa. Tornin A:n järjestelmäratkaisua rasittavat eniten parvekkeet ja lisäkoteloinnintarve huoneistoissa.

Tilantarpeet aiheuttavat tornitalossa kustannuksia, jotka vaihtelevat riippuen tilantarpeen sijainnista. Luvussa 3.3 on esitetty tässä tutkimuksessa käytetyt neliömääräiset hinnat eri tilatyyppien rakentamiselle sekä niiden rakentamisesta aiheutuville myyntitulojen menetykselle. Taulukossa 12 on esitetty kunkin ratkaisun rakentamiskustannukset verrattuna tornin C:n järjestelmäratkaisun mukaiseen vaihtoehtoon. Rakentamiskustannuksissa on huomioitu ainoastaan tilojen rakentamiskustannus, ei mahdollisia vaikutuksia myyntituloihin eikä LVIJ-komponenttien kustannusta.

*Taulukko 12. Tilojen rakentamiskustannukset eri ratkaisumalleissa tornin C:n malliin verrattuna.*

	Torni B	Torni C	Torni A	Torni A, ei parveketta	Torni C, patterit ja tuloilman jäähdytys
<b>Ilmanvaihto</b>	1,00	1,00	0,77	0,77	1,00
<b>Lämmitys ja jäähdytys</b>	1,21	1,00	28,92	0,92	1,00
<b>Vesihuolto</b>	1,15	1,00	1,01	1,01	1,00
<b>Yhteensä</b>	<b>1,09</b>	<b>1,00</b>	<b>10,24</b>	<b>0,85</b>	<b>1,00</b>

Taulukon 12 perusteella ilmanvaihtojärjestelmien tilakustannukset ovat tornin A:n ratkaisumallissa noin neljänneksen pienemmät kuin muissa ratkaisuvaihtoehtoisissa, mutta

lämmitys- ja jäähdytysratkaisun toteutus on torni A:ssa moninkertainen rakentamiskustannuksiltaan verrattuna torni B:n ja torni C:n ratkaisumalliin. Mikäli sisäilmaluokitustasosta ollaan valmiita tinkimään, voidaan torni A:n ratkaisumalli toteuttaa ilman parvekkeita pelkällä tuloilman jäähdytyksellä. Tällöin torni A:n lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmä on halvempi kuin muissa vaihtoehdoissa, mutta tämä näkyy suoraan huoneistojen sisäilman laadussa. Torni B:n lämmitys- ja jäähdytysratkaisun tilantarve aiheuttaa suurimmat kustannukset torni A:n parvekkeellisen ratkaisun jälkeen johtuen lähinnä suuremmasta lämmönsiirtimien määrästä.

Vesihuollon osalta torni C:n ja torni A:n ratkaisumallit ovat käytännössä yhtä tilatehokkaita. Torni B:n malli on noin 15 % kalliimpi rakentamiskustannuksiltaan kuin kahden muun ratkaisuvaihtoehdon mukainen vesihuoltojärjestelmä.

Kokonaisuudessaan torni C:n ratkaisumalli on edullisin rakentaa toteutetuista ratkaisuvaihtoehdoista. Torni A:n ratkaisumallista saadaan kuitenkin rakentamiskustannuksiltaan edullisin, mikäli sisäilmaolosuhteista ollaan valmiita joustamaan jättämällä parvekeratkaisut pois. Tällöin torni A:n ratkaisu on noin 15 % edullisempi kuin torni C:n tilakustannusten näkökulmasta.

Rakentamiskustannusten lisäksi joissain tapauksissa voi olla oleellista tarkastella myös menetettyä myyntituottoa. Tällainen tilanne voi syntyä esimerkiksi tapauksessa, jossa teknisiä tiloja ei saada sijoiteltua oikein ja ne vähentävät myytävien neliöiden määrää. Tästä johtuen taulukossa 13 on esitetty jokaisen järjestelmäratkaisun tilojen rakentamiskustannus ja tilan käytöstä aiheutuva myyntitulon menetys. Toisin sanoen taulukon 13 vertailussa on oletettu, että teknisten tilojen rakentaminen vähentää myytävää huonealaa ja täten aiheuttaa myyntitulon menetyksiä. Taulukossa 13 esitetyt kustannukset on laskettu luvussa 3.3 esitettyjä hintoja käyttäen ja ne on suhteutettu torni C:n ratkaisumalliin siten, että torni C:n ratkaisulle on annettu suhdeluku 1,00 ja muita ratkaisuja on verrattu torni C:n kustannuksiin.

Taulukko 13. Tilojen rakentamiskustannukset ja myyntitulon menetys eri ratkaisumalleissa torni C:n malliin verrattuna.

	Torni B	Torni C	Torni A	Torni A, ei parveketta	Torni C, patterit ja tuloilman jäähdytys
<b>Ilmanvaihto</b>	1,00	1,00	0,39	0,39	1,00
<b>Lämmitys ja jäähdytys</b>	1,22	1,00	7,74	0,94	1,00
<b>Vesihuolto</b>	1,06	1,00	0,97	0,97	1,00
<b>Yhteensä</b>	<b>1,07</b>	<b>1,00</b>	<b>2,57</b>	<b>0,62</b>	<b>1,00</b>

Taulukkoa 12 ja 13 vertaamalla havaitaan, että myyntitulojen huomiointi tai huomioimatta jättäminen muuttaa tutkimustulosta huomattavasti parantaen torni A:n ratkaisumallin mukaista järjestelmävaihtoehtoa kaikilla osa-alueilla paitsi lämmityksen ja jäähdytyksen osalta. Tarkastelun perusteella kerroksiin sijoitettavat ilmanvaihtokoneet nostavat tornitalojen ilmanvaihtojärjestelmän hintaa ja saattavat jopa yli kaksinkertaistaa ilmanvaihtojärjestelmän tilakustannuksen, jos ilmanvaihtokoneiden sijoituspaikka aiheuttaa myyntitulon menetystä. Myyntitulon menetyksen huomioivassa laskennassa eri ratkaisuvaihtoehtojen lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmät sekä vesihuollon toteutustavat ovat kaikissa ratkaisumalleissa suurin piirtein samanhintaisia tilakustannuksiltaan lukuun ottamatta torni B:n lämmitys- ja jäähdytysratkaisua sekä parvekkeisiin perustuvaa passiivista jäähdytysratkaisua.

#### 4.4.2 Järjestelmäkustannukset

Taulukossa 14 on esitetty yhteenveto eri ratkaisuvaihtoehtojen LVIJ-komponenttien rakentamiskustannuksista (laitteet ja asennustyö). Kustannukset on laskettu luvussa 3.2 esitetyllä tavalla ja skaalattu suhdeluvuiksi torni C:n kustannuksiin peilaten.

Taulukko 14. Tilojen järjestelmäkustannukset eri ratkaisumalleissa torni C:n malliin verrattuna.

	Torni B	Torni C	Torni A	Torni A, ei parveketta	Torni C, patterit ja tuloilman jäähdytys
<b>Ilmanvaihto</b>	1,17	1,00	1,10	1,10	1,00
<b>Lämmitys ja jäähdytys</b>	1,08	1,00	0,36	0,36	0,32
<b>Vesihuolto</b>	1,22	1,00	1,18	1,18	1,00
<b>Yhteensä</b>	<b>1,14</b>	<b>1,00</b>	<b>0,84</b>	<b>0,84</b>	<b>0,75</b>

Kuten taulukosta 14 havaitaan, torni B:n ratkaisumalli on järjestelmäkustannuksiltaan kallein toteuttaa kaikkien LVIJ-järjestelmien osalta. Suurin ero eri ratkaisuvaihtoehtojen välillä syntyy lämmitys- ja jäähdytysratkaisussa, jossa torni A:n ratkaisu on lähes 280 %

halvempi kuin torni C:n ratkaisu ja jopa 300 % halvempi kuin torni B:n ratkaisu. Tämä johtuu tilalämmityslaitteistosta, sillä lattialämmitys on yli viisi kertaa kalliimpi järjestelmäkustannuksiltaan kuin patterilämmitys. Toisaalta täytyy muistaa, että torni C:ssä ja torni B:ssä lattialämmityslaitteistoa hyödynnetään myös huoneiston viilentämiseen, joten torni A:n ratkaisumalli on laatutasoltaan heikompi kuin muiden vaihtoehtojen. Jos torni C:n ratkaisu muutetaan vastaamaan laatutasoltaan torni A:ta, havaitaan, että torni C:n ratkaisumallista saadaan lähes 15 % torni A:ta edullisempi vaihtoehto järjestelmäkustannuksiltaan (Torni C, patterit ja tuloilman jäähdytys -ratkaisu).

Seuraavaksi suurin ero perusratkaisujen välillä syntyy vesihuollon osalta, jossa järjestelmäkustannukset ovat torni B:n ratkaisumallissa 22 % suuremmat ja torni A:n mallissa 18 % suuremmat kuin torni C:n toteutusmallissa. Järjestelmäkustannusten perusteella torni C:n ratkaisumalli on edullisin toteuttaa myös ilmanvaihdon osalta, sillä torni A:n malli on 10 % ja torni B:n malli jopa 17 % kalliimpi kuin torni C:n ratkaisumalli. Ero torni C:n ja torni B:n mallin välillä johtuu erityisesti torni B:ssä tarvittavista kanttikanaavista, sillä putkiverkostojen kerroskohtaisten vaakaputkistojen takia ilmanvaihtokanavistossa joudutaan käyttämään kalliita erikoisosia.

Taulukon 14 perusteella voidaan todeta, että tavoiteltaessa korkeimman sisäilmaluokan laatutasoa, on torni C:n ratkaisumalli järjestelmäkustannuksiltaan edullisin. Mikäli sisäilmastoluokasta ollaan valmiita tinkimään, saadaan halvimmaksi ratkaisumalliksi torni C:n riisutumpi vaihtoehto, jossa lattialämmitys on korvattu radiaattorilämmityksellä ja tuloilman viilennystä kasvatettu lisäämällä huoneistojen kanaviin lämmöneristys ja laskemalla tuloilman sisäänpuhalluslämpötilaa.

#### 4.4.3 Tila- ja järjestelmäkustannusten yhdistäminen

Tutkittavien järjestelmävaihtoehtojen kustannustehokkuuden selvittämiseksi tarkasteluun otetaan vielä tila- ja järjestelmäkustannukset yhdistämällä saatavat vertailuluvut jokaiselle järjestelmälle. Kustannukset on laskettu luvuissa 3.2 ja 3.3 esitetyin perustein ja suhteutettu torni C:n kokonaiskustannuksiin. Taulukossa 15 on esitetty järjestelmäkustannukset ja tilojen rakentamiskustannukset, mutta ei myyntitulojen menetyksestä aiheutuvia kustannuksia.

Taulukko 15. Tilojen rakentamis- ja järjestelmäkustannukset eri ratkaisumalleissa torni C:n malliin verrattuna.

	Torni B	Torni C	Torni A	Torni A, ei parveketta	Torni C, patterit ja tuloilman jäähdytys
<b>Ilmanvaihto</b>	1,15	1,00	1,05	1,05	1,00
<b>Lämmitys ja jäähdytys</b>	1,10	1,00	4,57	0,44	0,42
<b>Vesihuolto</b>	1,20	1,00	1,14	1,14	1,00
<b>Yhteensä</b>	<b>1,13</b>	<b>1,00</b>	<b>2,31</b>	<b>0,84</b>	<b>0,79</b>

Taulukko 15 ei juuri muuta aiemmista vertailuista saatuja johtopäätöksiä torni B:n osalta: Torni B:n ratkaisu on kaikkien LVIJ-järjestelmien osalta kokonaiskustannuksiltaan kallein, jos parvekkeiden rakentamiskustannusta ei huomioida. Rakentamis- ja järjestelmäkustannusten yhdistäminen tuo kuitenkin uuden näkökulman torni C:n ja torni A:n vertailuun: Ilmanvaihtojärjestelmien ero kaventuu vain viiteen prosenttiin ja toisaalta lämmitys- ja jäähdytyspuolella torni C:n ratkaisumalli on edullisin, mikäli se toteutetaan samassa sisäilmastotasossa kuin torni A ilman parveketta. Kokonaisuudessaan torni A:n versio ilman parveketta on noin 15 % edullisempi tila- ja järjestelmäkustannukset yhdistettynä torni C:n perusratkaisuun verrattuna, mutta muuttamalla torni C:n tilalämmityslaitteisto ja lisäämällä tuloilman jäähdytystä saadaan kaikkein edullisin toteutusmuoto tornitalon LVIJ-järjestelmälle. Tämä muutos vähentää torni C:n ratkaisumallin mukaisia kokonaiskustannuksia yli 20 %. Lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmän osalta tilalaitteiston muuttaminen lattialämmityksestä radiaattoreihin ja tuloilman jäähdytyksen lisääminen pienentää kustannuksia lähes 60 %.

Tilatehokkuuden tärkeyden korostamiseksi vertailuun voidaan ottaa vielä menetetty myyntituotto, jolloin kustannusoptimaalisimman järjestelmäratkaisun valinta muuttuu jälleen. Taulukossa 16 on esitetty yhteenlaskettuna tilojen rakentamiskustannus, menetetty myyntituotto sekä LVIJ-järjestelmäkustannukset (komponentit ja asennus).

Taulukko 16. Tilojen rakentamis- ja järjestelmäkustannukset sekä menetetty myyntituotto eri ratkaisumalleissa torni C:n malliin verrattuna.

	Torni B	Torni C	Torni A	Torni A, ei parveketta	Torni C, patterit ja tuloilman jäähdytys
<b>Ilmanvaihto</b>	1,09	1,00	0,76	0,76	1,00
<b>Lämmitys ja jäähdytys</b>	1,14	1,00	3,43	0,60	0,60
<b>Vesihuolto</b>	1,12	1,00	1,05	1,05	1,00
<b>Yhteensä</b>	<b>1,11</b>	<b>1,00</b>	<b>1,66</b>	<b>0,74</b>	<b>0,87</b>

Taulukon 16 perusteella torni B:n ratkaisumalli säilyy edelleen kalleimpana toteutustapana kaikkien LVIJ-järjestelmien näkökulmasta, jos torni A:n järjestelmäratkaisun kustannuksissa ei huomioida parvekkeen rakentamiskustannusta. Muussa tapauksessa parvekkeet sisältävä ratkaisu on lähes 70 % kalliimpi kuin torni C:n ratkaisu ja noin 50 % kalliimpi kuin torni B:n ratkaisu.

Jos parvekekustannuksia ei huomioida, on taulukon 16 mukaisessa vertailussa torni A noin 15 % edullisempi kuin torni C:n riisuttu versio. Ero tulee ilmanvaihtojärjestelmästä, sillä lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmä on torni A:n (ilman parvekettä) ja torni C:n (patterit ja tuloilman jäähdytys) versioissa saman hintaiset. Vesihuolto on torni A:n ratkaisussa hieman kalliimpi kuin torni C:n versiossa, mutta hintaero ei riitä kompensoimaan ilmanvaihtokoneiden tilantarpeesta aiheutunutta kustannusta.

#### 4.4.4 Eri järjestelmävaihtoehtojen toimivuus

Torni B:n ja torni C:n järjestelmäratkaisut perustuvat ilmanvaihdon osalta keskitettyyn IV-koneeseen, jonka selkeänä etuna hajautettuun järjestelmään nähden voidaan mainita toimintavarmuus ja huollon järjestämisen helppous. Hajautetussa järjestelmässä jokainen kone täytyy huoltaa erikseen huoneiston sisäpuolelta, mikä voi aiheuttaa aikataulutushaasteita satoja huoneistoja – ja ilmanvaihtokoneita – sisältävissä asuintorneissa. Lisäksi asukkaan pitäisi pystyä itse ohjaamaan ja valvomaan oman ilmanvaihtokoneensa toimintaa, mikä voi aiheuttaa omat riskinsä, sillä asukkailla ei välttämättä ole riittävästi tietoa ilmanvaihtokoneen toiminnasta. Toisaalta hajautetussa järjestelmässä ilmanvaihtoa voidaan ohjata jokaisen yksittäisen huoneiston tarpeiden mukaan, kun taas keskitetyssä järjestelmässä esimerkiksi tuloilman lämpötiloja ohjataan useamman huoneiston tarpeiden pohjalta. Molemmissa järjestelmissä asukas pystyy ohjaamaan huoneistonsa tuloilmamääriä, jos keskitettyyn järjestelmään sisältyy huoneistokohtainen ohjausjärjestelmä.

Tutkimuksessa torni A:n hajautetun järjestelmän tulo- ja poistoilmakanavia jouduttiin muokkaamaan siten, että huoneistojen tulo- että poistoilmakanavat johdetaan huoneiston ulkoseinälle. Tämä täytyy huomioida erikseen arkkitehtuurisuunnittelussa Sisäilmasto ja ilmanvaihto -oppaassa (2017) esitettyjen vaatimusten osalta. Lisäksi ulkovaipan rei'ittäminen vaikuttaa julkisivun arkkitehtuurin lisäksi tornitaloissa myös hormivaikutuksen syntymiseen, sillä ulkovaipan tiiviys on ensisijaisen tärkeää hormivaikutuksen hallinnan kannalta. Hormivaikutus täytyy huomioida myös torni A:n ja torni B:n ratkaisumallien mukaisessa kerroskäytävien ilmanvaihtoratkaisussa, sillä uudet määräykset

vaativat ilmanvaihtojärjestelmän jakamista noin 4–5 kerroksen osiin tai hormivaikutuksen kompensointia laitteiden avulla.

Lämmitysverkoston osalta torni C:n ja torni A:n putkistoratkaisut mahdollistavat sektori-kohtaisen lämmityksen, sillä molemmissa ratkaisuissa lämmitys jaetaan useaan sektoriin jaettujen pystynousujen avulla. Tornin C:ssä tämä pätee myös jäähdytykseen, joka jaetaan pystynousujen avulla niihin ilmansuuntiin, joissa jäähdytystä tarvitaan. Sektori-kohtaisen jaottelun ansiosta toisia ilmansuuntia pystytään tornin C:n ratkaisussa lämmitämään samalla, kun toisia ilmansuuntia jäähdytetään. Tornin A:n mallissa on tarkasteltu jäähdytyksen toteuttamista tuloilman avulla, jolloin jokainen huoneisto voi säätää tuloilmavirtaansa suuremmalle jäähdytystehon kasvattamiseksi. Tornin B:n mallissa lämmitys ja jäähdytys jaetaan kerroskohtaisesti, jolloin eri ilmansuuntiin perustuva sektori-kohtainen lämmitys tai jäähdytys ei ole mahdollista. Tämä johtaa tornin B:n järjestelmä-ratkaisussa siihen, että huoneistoja ohjataan kerroksittain kylmimmän huoneiston mukaan, jolloin myös aurinkoiseihin ilmansuuntiin olevissa huoneistoissa lämmitys voi olla päällä, vaikka huoneisto saisi paljon auringon lämpösäteilyä ja tarvitsisi todellisuudessa jäähdytystä lämmityksen sijaan. Tutkimustuloksia tarkasteltaessa onkin hyvä muistaa, että vertailtavat järjestelmä-ratkaisut eivät täysin vastaa toisiaan sisäilmaolosuhteiltaan.

## 5 Yhteenveto

Korkearakentaminen on arkipäivää useissa ulkomaalaisissa suurkaupungeissa, mutta Suomessa niiden rakentaminen on vasta alkutaipaleilla. Muutamia vanhoja esimerkkejä yli 16-kerroksisista rakennuksista on jo vuosikymmenten takaa, mutta nyt korkeita rakennuksia suunnitellaan Suomessa enemmän kuin koskaan aiemmin. Espooseen on viime vuonna valmistunut Niittyhuippu, ja useita muita tornitaloja on suunnitteilla uusien metroasemien läheisyyteen. Helsingissä on myös useita korkearakentamisen hankkeita, joista ehkä tunnetuin tällä hetkellä on Kalasatamaan rakentuva REDI-kompleksi, johon kuuluu yhteensä kahdeksan tornitaloa. Myös pääkaupunkiseudun ulkopuolelle on rakennettu ja rakenteilla korkeita rakennuksia.

Tornitalojen rakentaminen on lähtökohtaisesti kalliimpaa kuin vastaavan määrän huoneistoja sisältävien useamman matalan asuinrakennuksen rakentaminen, sillä rakennuksen korkeuden kasvaessa vaatimukset esimerkiksi paloturvallisuuteen liittyen kasvavat. Korkeissa rakennuksissa talotekniikkasuunnittelua ohjaavat erityisesti painerot, sillä putkiverkostot täytyy jakaa useaan vyöhykkeeseen staattisen paine-eron hal-

litsemiseksi. Ilmanvaihtopuolella haasteeksi tulevat suuret ilmamäärät, jotka johtavat rakennuksen jakamiseen useaan eri palvelualueeseen, jotta kanavistojen koot pysyvät maltillisina. Useat putkiverkostojen vyöhykkeet ja ilmanvaihdon palvelualueet tarkoittavat tornitaloissa kasvavia tilatarpeita, vaikka kustannuspaineet yrittävät pakottaa tilatarpeiden minimointiin.

Opinnäytetyössä tutkittiin kolmen eri case-kohteen avulla erilaisten LVIJ-järjestelmäratkaisujen rakentamiskustannuksia sekä tilantarpeita ja niistä aiheutuvia kustannuksia. Case-kohteiden järjestelmäratkaisuista laadittiin IFC-mallit samaan kerros pohjaan, jotta kustannuslaskennan tiedot olisivat keskenään vertailukelpoisia. Case-kohteiden suurimpina eroina olivat lämmitys- ja jäähdytysenergian siirtomenetelmät (täysin erilliset nousulinjat vyöhykkeittäin vs yhteiset korkeapainenusulinjat vyöhykkeittäin), tilalämmityslaitteisto (radiaattorit vs lattialämmitys/-viilennys) sekä ilmanvaihtojärjestelmä (keskitetty vs hajautettu).

Tutkimuksen perusteella edullisimman ilmanvaihtojärjestelmän valitseminen riippuu siitä, kuinka paljon tilakustannuksia arvioidaan. Mikäli tilakustannuksissa huomioidaan ainoastaan tilojen rakentamiskustannukset, mutta ei mahdollista myyntitulojen menetyksiä, on keskitetty ilmanvaihto torni C:n ratkaisumallin mukaisesti korkeapainenusulinjoja hyödyntäen noin 5 % edullisempi ratkaisu kuin torni A:n ratkaisumalli. Torni B:n ratkaisumalli on noin 15 % kalliimpi kuin torni C:n, vaikka sekin pohjautuu korkeapainenusulinjoihin. Ero johtuu pääosin siitä, että torni B:n mallissa kerrokseen sijoitetut vaakaputkistot vievät paljon tilaa käytäviltä, mikä pakottaa ilmanvaihtojärjestelmässä käyttämään paljon kalliita kanttikanavia. Tutkimustulos kuitenkin muuttuu, mikäli järjestelmä- ja tilakustannusten lisäksi huomioidaan myös menetetty myyntitulo. Tällöin torni B:n ratkaisu on edelleen kallein, sillä sen ilmanvaihtojärjestelmän tilantarpeet ovat samat kuin torni C:n ratkaisussa. Torni A:n hajautetun järjestelmän tilantarve on kuitenkin erittäin pieni, vain noin 35 % torni C:n ja torni B:n ilmanvaihtojärjestelmän tilantarpeesta, minkä vuoksi myyntitulot huomioituna torni A on noin 30 % edullisempi toteuttaa kuin torni C:n ratkaisu.

Tilalämmityslaitteiden osalta lattialämmitysverkoston käyttäminen on merkittävästi kalliimpaa kuin radiaattoreiden, joten lattialämmitysverkostoa käytettäessä täytyy pystyä osoittamaan myös muita hyötyjä, esimerkiksi esteettisyys, parempi akustiikka sekä saman laitteiston hyödyntäminen jäähdyttämiseen. Mikäli kohteessa on ainoastaan tilalämmityslaitteisto ja jäähdytystarve toteutetaan tuloilman jäähdyttämällä, on kor-



keapainenousulinjoihin ja kerroksiin sijoitettaviin lämmönsiirtimiin perustuva ratkaisu tila- ja rakentamiskustannuksiltaan saman hintainen kuin perinteisempi ratkaisu, jossa kellarikerrokseen sijoitetaan jokaiselle vyöhykkeelle oma lämmönsiirrin ja verkostot kulkevat läpi rakennuksen palvellen aina noin 10 kerroksen vyöhykettä. Myös vesihuollon osalta tulos oli hyvin samansuuntainen: kerroksiin sijoitetut lämmönsiirtimet korkeapainenousulinjoihin ovat kustannuksiltaan jopa edullisemmat kuin kellarikerroksesta läpi talon kulkevat useamman vyöhykkeen vesiverkostot riippumatta siitä, huomioidaanko tilakustannusten osalta ainoastaan rakentamiskustannus vai myös menetetty myyntitulo. Suurimmat erot löytyivät torni B:n ratkaisusta, jossa huoneistoihin sijoitettavien pystynousujen sijaan lämmön ja veden jakaminen toteutetaan kerroskohtaisilla vaakaputkistoilla. Tämä ratkaisu on vesihuollon osalta noin 10–20 % kalliimpi kuin torni C:n ratkaisu ja noin 5 % kalliimpi kuin torni A:n ilman parveketta toteutettu ratkaisu riippuen siitä, huomioidaanko menetetty myyntitulo vai ei. Lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmän osalta torni B:n ratkaisu on noin 10–15 % torni C:n ratkaisua kalliimpi ja noin 1,9–2,5 kertaa kalliimpi kuin torni A:n ratkaisu riippuen tilakustannusten laskentatavasta. Torni C:n riisuttuun, pattereilla ja tuloilman jäähdytyksellä toteutettuun, ratkaisuun verrattuna torni B:n ratkaisu on 1,9–2,6 kertaa kalliimpi.

Tutkimuksen suurimmat kustannuserot syntyivät sisäilmaston laatutasosta. Torni A:n alkuperäisessä ratkaisuvaihtoehdossa Suomen Rakentamismääräysten mukainen asetusvaatimus on täytetty varjostavilla parvekkeilla, joiden rakentaminen on erittäin kallista ja joissain kohteissa jopa mahdotonta. Tämä vastanee suurin piirtein sisäilmastoluokitusta S3, kun taas torni B:n ja torni C:n ratkaisuissa sisäilmasto on lähempänä luokitusta S1. Erojen tasaamiseksi torni A:n alkuperäiseen ratkaisuun lisättiin tuloilman jäähdytys, jolloin sisäilmastoluokitus lienee lähempänä luokkaa S2 ja sälekaihtimet suljettuna vastaa jopa sisäilmastoluokitusta S1. Ratkaisujen sisäilmastoluokituksia on tutkittu vuoden 2012 testisäällä, joten ilmaston lämmitessä vaihtoehtojen erot jäähdytyksen laatutasossa tulevat korostumaan. Näin ollen tulevaisuudessa sisäilmastoluokituksen saatetaan päästä ainoastaan tilajäähdytyslaitteistojen avulla.

## 6 Johtopäätökset

Tornitalojen optimaalisimman LVIJ-järjestelmäratkaisun valitseminen rakennuskustannukset ja tilavaraukset huomioiden riippuu ennen kaikkea teknisten tilavarausten arvon määrittelystä. Parvekkeiden rakentaminen lisää rakentamiskustannuksia merkittävästi, mutta niistä saatava hyöty ei välttämättä rajoitu ainoastaan Suomen rakentamismää-

räysten astetuntivaatimusten täyttymiseen vaan voi nopeuttaa myyntiä ja nostaa rakennuksen myyntihintaa. Parvekeratkaisulla ei kuitenkaan päästä sisäilmaolosuhteitaan yhtä miellyttävään tasoon kuin aktiivisella jäähdytyksellä. Tilajäähdytyslaitteilla, kuten lattiaviilennyksellä, lämpötila pystytään pitämään läpi vuoden alle 25 Celsiusasteissa. Tuloilman jäähdytyksellä päästään lähes yhtä hyviin tuloksiin, mutta tämä vaatii sälekaihtimien kiinni pitämistä. Lisäksi tehdyt simulaatiot on laadittu vuoden 2012 testisäällä, joka ei huomioi tulevaa ilmaston lämpenemistä. Tulevaisuudessa riittävä jäähdytysteho voitaneen saavuttaa ainoastaan tilajäähdytyslaitteiston avulla, joten järjestelmäratkaisun valinnassa on annettava teknisen ratkaisun laadulle riittävä painoarvo.

Asuintorneissa kerroskäytävien alakaton tila on rajallinen, minkä vuoksi vaakaputkistojen määrä kannattaa minimoida ja hyödyntää niiden sijaan huoneistoissa kulkevia pienempiä pystynousuja. Lämmitys- ja jäähdytysenergian jakaminen huoneistoihin kerroskohtaisesti johtaa suureen vaakaputkistojen määrään kerroskäytävillä, mikä näkyy myös keskitetyissä ilmanvaihtojärjestelmässä kanttikanavien määrän kasvuna. Tämä kasvattaa kustannuksia ilmastointikanaviston rakentamisessa, mutta myös putkiverkostoissa, sillä niiden määrä vaakaputkistoihin perustuvassa ratkaisussa on suurempi kuin huoneistokohtaisissa pystynousuissa. Tästä johtuen erityisesti tornitaloissa, joissa putkistot täytyy jakaa useampiin vyöhykkeisiin, kannattaa hyödyntää runkopystynousujen lisäksi myös pienempiä pystynousuja, jotka sijoitetaan esimerkiksi kylpyhuoneen seinään tai ulkoseinälle. Tämä pätee sekä lämmitys- ja jäähdytysverkostoihin että vesihuollon verkostoihin.

Ilmanvaihtojärjestelmän osalta tutkimuksessa havaittiin, että tilakustannusten arvotaso määrittää kannattavimman järjestelmävaihtoehdon. Nykyisen MRL:n mukaan tekniset tilat ja kuilut eivät vähennä rakennusoikeutta, joten olisi perusteltua huomioida ainoastaan teknisten tilojen rakentamiskustannus, ei niiden aiheuttamaa vähäisempää myytävän huonealan määrää. Tällöin keskitetty ilmanvaihtokone tulee tornitalossa edullisemmaksi toteuttaa järjestelmä- ja tilakustannuksiltaan. Mikäli teknisille tiloille laskeaan rakentamiskustannusten lisäksi tulon menetykseen perustuva hinta, tulee hajautettu ilmanvaihtojärjestelmä selvästi edullisimmaksi toteutustavaksi.

Hajautetun järjestelmän haittana voidaan tornitalossa pitää ilmanvaihtokoneiden määrää, sillä elinkaarikustannuksia ja huollon toimivuutta tarkasteltaessa hajautetun järjestelmän ylläpito on selvästi kalliimpaa kuin keskitetyn järjestelmän. Lisäksi keskitetyn järjestelmän ammattimainen käyttö ja ylläpito on helpompi toteuttaa kuin huoneistokoh-

taisten laitteiden, joiden huoltoon tarvitaan asukkaan lupa huoneistossa käymiseen ja toisaalta asukkaalla on myös mahdollisuus itse säätää huoneistokohtaista ilmanvaihtokonettaan.

Tutkimustyössä ei tarkasteltu eri järjestelmäratkaisujen vaikutusta tornitalojen rakentamisaikoihin ja tätä kautta mahdollisiin rahoituskustannuksiin eikä esimerkiksi eri sisäilmastoluokitusten tai parvekeratkaisun vaikutusta huoneistojen myyntiaikoihin. Jatkotutkimuksessa olisi hyvä selvittää, nopeuttavatko parvekkeet, hyvät sisäilmaolosuhteet tai huoneistokohtaiset ratkaisut asuntojen myyntiä tai nostavat nämä myytävien huoneistojen hintoja. Lisäksi jatkotutkimuksessa voisi tarkastella, saadaanko teknisiä tilavarauksia pienennettyä moduulirakentamisen avulla.

Tutkimuksessa tarkasteltiin ainoastaan asuintornin kustannusoptimaalisinta ratkaisua. Vastaavan tutkimuksen voisi toteuttaa toimisto- ja hotellitorneihin ja verrata näistä saatuja tietoja asuintorniin: onko kustannusoptimaalisin LVIJ-järjestelmä kaikissa rakennustyypeissä sama vai löytyykö niiden väliltä eroja. Lisäksi voisi tehdä maantieteellistä vertailua erityisesti menetetyn myyntitulon neliöhintaa muuttamalla, sillä tässä tutkimuksessa käytetty myyntitulon menetys vastaa PK-seudun keskineliöhintaa tornitaloissa, jolloin tulokset voivat olla erilaisia muualla Suomessa.

## Lähteet

7 Vesilaitteiston mitoitus. 2018. Verkkoaineisto. Talotekniikkainfo. <<https://www.talotekniikkainfo.fi/vesi-ja-viemarilaitteistot-opas/luku-2-rakennuksen-vesilaitteisto/7>>. Luettu 07.07.2018.

Copper Tubes – Insulation and Heat Loss. 2018. Verkkoaineisto. Engineering Toolbox. <[https://www.engineeringtoolbox.com/copper-pipes-insulation-heat-loss-d\\_52.html](https://www.engineeringtoolbox.com/copper-pipes-insulation-heat-loss-d_52.html)>. Luettu 22.02.2018.

Drainage in high-rise buildings. 2018. Luentomoniste 5.6.2018. Sveitsi: Geberit. Himmanen. 2016. Asuntokohtaisen ja keskitetyn ilmanvaihdon kustannusvertailu asuinkerrostalokohteessa. Espoo: Metropolia Ammattikorkeakoulu.

HYDRO MULTI-E 2 CRIE5-09 – 98486772 -tuotekortti. 2018. Verkkoaineisto. Grundfoss. <[https://product-selection.grundfos.com/product-detail.sizing-re-sult.html?from\\_suid=153484214860307460511993447028&pumpsystemid=419186142&qcid=419186536](https://product-selection.grundfos.com/product-detail.sizing-re-sult.html?from_suid=153484214860307460511993447028&pumpsystemid=419186142&qcid=419186536)>. Luettu 31.07.2018.

Hydro Solo E CRE 32-2-2 HQQE – 98453516 -tuotekortti. 2018. Verkkoaineisto. Grundfoss. <[https://product-selection.grundfos.com/product-detail.sizing-re-sult.html?from\\_suid=153484229004706905594552830454&pumpsystemid=419206171&qcid=419208404](https://product-selection.grundfos.com/product-detail.sizing-re-sult.html?from_suid=153484229004706905594552830454&pumpsystemid=419206171&qcid=419208404)>. Luettu 31.07.2018.

Hydrostatic pressure. 2018. Verkkoaineisto. Engineering Toolbox. <[https://www.engineeringtoolbox.com/hydrostatic-pressure-water-d\\_1632.html](https://www.engineeringtoolbox.com/hydrostatic-pressure-water-d_1632.html)>. Luettu 24.07.2018.

Ilmanvaihtolaitosten paloturvallisuus -opas. 2018. Verkkoaineisto. Talotekniikkainfo. <<https://www.talotekniikkainfo.fi/ilmanvaihtolaitosten-paloturvallisuus-opas/9-1>>. Luettu 22.07.2018.

Kattolämmityksen opas. 2001. Verkkoaineisto. Lindab Climate. <<http://www.lindab.com/fi/Documents/Ilmastointi/esitteet%20ja%20dokumentit/Kattol%C3%A4mmitys.pdf>>. Luettu 03.06.2018.

Kerrostalojen taloudellinen viemäröinti. 2018. Verkkoaineisto. Geberit. <<https://www.geberit.fi/geberit-tuotteet/viemaerijaerjestelmaet/geberit-sovent/>>. Luettu 05.06.2018.

Koivuranta. 2017. Espooseen valmistui kaikessa hiljaisuudessa tornitalo, joka saattaa olla jopa Suomen korkein – suurempiakin tekeillä jo nyt. Verkkoaineisto. YLE uutiset. <<https://yle.fi/uutiset/3-9988687>>. Luettu 21.05.2018.

Korkean rakentamisen rakentamistapaohje. 2012. Verkkoaineisto. Helsingin kaupunki. <[https://www.hel.fi/static/rakvv/ohjeet/KORKEAN\\_RAKENTAMISEN\\_RAKENTAMISTA\\_PAOHJE\\_OHJEKORTIT.pdf](https://www.hel.fi/static/rakvv/ohjeet/KORKEAN_RAKENTAMISEN_RAKENTAMISTA_PAOHJE_OHJEKORTIT.pdf)>. Luettu 23.11.2017.

Kuusinen, Teemu. 2017. Terveellinen ja miellyttävä sisäilma energiatehokkaasti. Enervent. Luentomoniste 14. 11 2017.

Laki maankäyttö- ja rakennuslain muuttamisesta. 2017. Verkkoaineisto. Oikeusministeriö. Helsinki. <<https://www.edilex.fi/saaduskokoelma/20170812.pdf>>. Luettu 08.08.2018.

Lattialämmitys- ja viilennysratkaisut kerrostaloissa. 2017. Verkkoaineisto. Uponor. <<https://www.uponor.fi/UponorInternet/DirectDownload?did=0C7B392F39224963BE3DEC5923B919FB>>. Luettu 20.08.2018.

Lehkonen & Harju. 2011. LVI-mitoituksen oppikirja. Kouvola: Penan tieto-opus ky.

LVI-kortti 10-10549: Rakennusten kaukolämmitys. 2013. Rakennustieto. Helsinki.

LVI-kortti 11-10472: Paisuntajärjestelmän valinta ja mitoitus. 2011. Rakennustieto. Helsinki.

LVISK kalenteri. 2018. Helsinki: Suomen Kalenterit.

Magi. 2016. Hajautetun ja keskitetyn ilmanvaihtojärjestelmän kustannus- ja aikatauluvertailu asuinrakentamisessa. Opinnäytetyö. Espoo: Metropolia Ammattikorkeakoulu.

Nousiainen. 2017. RIL / Korkea rakentaminen 2017. Luentomoniste: Korkearakentamisen seminaari 31.08.2017. Helsinki.

Nyberg. 2016. Hormivaikutuksen hallinta korkeissa asuinkerrosrakennuksissa. Diplomityö. Espoo: Aalto-yliopisto.

Oras Optima 7149, tekniset tiedot. 2018. Verkkoaineisto. Oras. <<https://www.oras.com/fi/tuotteet/oras-optima/product/7149/>>. Luettu 02.02.2018.

Paroc Calculus. 2018. Verkkoaineisto. Paroc. <[http://calculus.paroc.com/paroc-calculus/index\\_fi.html#](http://calculus.paroc.com/paroc-calculus/index_fi.html#/)>. Luettu 20.08.2018.

Purmo: Paneeliradiaattorit - PURMO Compact [C]. 2018. Verkkoaineisto. Purmo. <<http://www.purmo.com/fi/tuotteet/vesikiertoiset-radiaattorit/paneeliradiaattorit/purmo-compact.htm>>. Luettu 19.01.2018.

Rajapuro. 2015. Korkean asuinkerrostalon LVI-suunnittelu. Opinnäytetyö. Espoo: Metropolia Ammattikorkeakoulu.

Rakennusten kaukolämmitys, määräykset ja ohjeet. Julkaisu K1/2013. 9.5.2014. Verkkoaineisto. Energiateollisuus. <[https://energia.fi/files/502/JulkaistuK1\\_2013\\_20140509.pdf](https://energia.fi/files/502/JulkaistuK1_2013_20140509.pdf)>. Luettu 20.1.2018

Rakennusten kaukolämmitys. 2013. Rakennustieto. Helsinki.

Sandberg. 2014. Ilmastointilaitoksen mitoitus. Tampere: Talotekniikka-Julkaisut Oy.

SC-, VS- ja NC-tuoteluettelo. 2015. Verkkoaineisto. Kolmeks Oy. <[http://www.kolmeks.fi/Download/22585/Tuoteluettelo2016\\_SC%20ja%20VS%20ja%20NC\\_fin.pdf](http://www.kolmeks.fi/Download/22585/Tuoteluettelo2016_SC%20ja%20VS%20ja%20NC_fin.pdf)>. Luettu 31.01.2018.

Seppänen. 2001. Rakennusten lämmitys. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.

Simmonds. 2015. ASHRAE Design Guide for Tall, Supertall, and Megatall Building Systems. Atlanta: ASHRAE.

Sisäilmasto ja ilmanvaihto -opas. 2017. Verkkoaineisto. Talotekniikkainfo. <<https://www.talotekniikkainfo.fi/sisailmasto-ja-ilmanvaihto-opas>>. Luettu 05.06.2018.

Stravent radiaattorit: Modul 4. 2018. Verkkoaineisto. Stravent. <[https://www.stravent.fi/uploads/file/radiaattorit/radiaattoriesitteet/Stravent\\_Modul4.pdf](https://www.stravent.fi/uploads/file/radiaattorit/radiaattoriesitteet/Stravent_Modul4.pdf)>. Luettu 19.01.2018.

Suodattimet Swegon Casa W80 -ilmavaihtokoneeseen. 2018. Verkkoaineisto. Suodatintekeskus. <<https://www.suodatintekeskus.com/swegon-casa-w80--suodattimet#desc2>>. Luettu 31.01.2018.

Suunnitteluohje. 2018. Verkkoaineisto. LK Lattialämmitys. <[https://www.lksystems.se/globalassets/inriver/resources/fi.33.b.1\\_suunnitteluohje.pdf](https://www.lksystems.se/globalassets/inriver/resources/fi.33.b.1_suunnitteluohje.pdf)>. Luettu 20.08.2018.

Takala. 2014. Korkeiden rakennusten käyttövesi- ja viemärijärjestelmät. Opinnäytetyö. Pori: Satakunnan Ammattikorkeakoulu.

Torni A, kohdetiedot. 2017. Verkkoaineisto. SRV. <salattu>. Luettu 22.10.2017.

Torni A, LVI-suunnitelmat. 2014. EnTalCon Oy. Espoo.

Torni B, huoneistoluettelo, kerroslohjat, rakennustapaseloste. 2017. Verkkoaineisto. SRV. <salattu> Luettu 22.10.2017.

Torni B, Myyntiesite. 2017. Verkkoaineisto. SRV. <salattu>. Luettu 22.10.2017.

Torni B: LVI-suunnitelmat. 2018. Ramboll Finland Oy. Espoo.

Torni C: LVI-suunnitelmat. 2018. Sweco Finland Oy. Helsinki.

Ultraääni IMS – mullistaa ilman hallinnan!. 2017. Verkkoaineisto. FläktsWoods. <<http://www.flaktwoods.fi/globalassets/local-website-specific-images/finland/documents/optivent-ultra-flyer-fi.pdf>>. Luettu 05.08.2018.

Uusi-Ilkainen. 2013. Asuinkerrostalon asuntokohtaisen ja keskitetyn ilmanvaihtojärjestelmän vertailu. Opinnäytetyö. Oulu: Oulun seudun Ammattikorkeakoulu.

Valkonen. 2016. Keskitetyn ja hajautetun ilmanvaihtojärjestelmän vertailu. Opinnäytetyö. Mikkeli: Mikkelin Ammattikorkeakoulu.

WehoFloor-käsikirja/asennusohje: asennusohjeen sisällysluettelo, järjestelmän tekniset tiedot ja mitoitusperiaatteet. 2018. Verkkoaineisto. Uponor Suomi Oy. <<https://www.wehopex.fi/documents/155143/221843/Asennusohjeen+sis%C3%A4llysluette-lo%2C+j%C3%A4rjestelm%C3%A4n+tekniset+tiedot+ja+mitoituseriaatteet.pdf/c1e2df8f-4ec5-438d-bdab-efc6248de709>>. Luettu 21.05.2018.

Vesilaitteiston mitoitusohjeet (D1/2007 Liite 2). 2007. Verkkoaineisto. Talotekniikkainfo. <[https://www.talotekniikkainfo.fi/sites/default/files/d1\\_2007\\_liite\\_2.pdf](https://www.talotekniikkainfo.fi/sites/default/files/d1_2007_liite_2.pdf)>. Luettu 06.07.2018.

Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta. 2017. Verkkoaineisto. Ympäristöministeriö. <<http://www.ym.fi/download/noname/%7B9B4E97FA-3286-4BC6-86B5-85F0386156F4%7D/123505>>. Luettu 22.07.2018.

Ympäristöministeriön asetus rakennusten vesi- ja viemärlaitteistoista. 2017. Verkkoaineisto. Ympäristöministeriö. <<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171047>>. Luettu 22.07.2018.

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta (luonnos). 2017. Verkkoaineisto. Ympäristöministeriö. <<http://www.ym.fi/download/noname/%7B4C0E513E-7596-473A-BE75-04DA10181A23%7D/125734>>. Luettu 10.10.2017.

Yrjänä Haahtela. 2012. Talonrakennuksen kustannustieto. Haahtela Oy.