

Käyttövesijärjestelmät ja niiden elinkaarikustannukset korkeassa rakennuksessa

Jere Stenhammar

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2020

LVI-talotekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Talotekniikan tutkinto-ohjelma
LVI-talotekniikka

STENHAMMAR, JERE:

Käyttövesijärjestelmät ja niiden elinkaarikustannukset korkeassa rakennuksessa

Opinnäytetyö 72 sivua, joista liitteitä 0 sivua
Toukokuu 2020

Korkean rakentamisen yleistyessä Suomessa lisääntyy myös tarve tutkittuun tietoon perustuville standardisoiduille ratkaisumalleille LVI-tekniikan osalta. Rakennushankkeet tulisi yhtä aikaa suorittaa tehokkaasti sekä kustannusten että energiankulutuksen kannalta, mikä edellyttää toimintatapojen ja suunnitteluratkaisujen vakiintumista ja ratkaisujen tarkastelua koko elinkaaren ajalta.

Tässä opinnäytetyössä keskitytään korkeiden rakennusten käyttövesijärjestelmien erityispiirteisiin. Työn alussa käsitellään kylmän veden järjestelmiä ja erilaisia tapoja hallita verkoston painetasoja. Kylmän veden järjestelmien jälkeen työssä esitellään erilaiset lämpimän käyttöveden tuotantotavat sekä kiertovesijärjestelmät ja niiden vaihtoehtoiset ratkaisut, joilla varmistetaan riittävän lämpötilan säilyminen verkostossa. Käyttövesijärjestelmien toteutustapojen lisäksi työssä käsitellään korotetun paineen käyttövesijärjestelmille tyypillisiä riskejä ja kuinka niitä voidaan ehkäistä järjestelmien suunnitteluvaiheessa.

Lisäksi työssä tutkittiin rakennuksen käyttövesijärjestelmän vyöhykejaon vaikutuksia järjestelmän energiankulutukseen ja elinkaarikustannuksiin. Vyöhykejako on keskeinen keino hallita käyttövesijärjestelmien painetasoja rakennuksen korkeuden kasvaessa, joten järjestelmiä suunnitellessa on oleellista tiedostaa erilaisten ratkaisujen vaikutukset järjestelmän elinkaareen.

Tutkimus toteutettiin Helsingissä sijaitsevassa 35-kerroksisessa asuinkerrosta-
lossa. Tutkittavaksi järjestelmäksi valittiin rinnan kytketty vyöhykejakoisen paineenkorotusjärjestelmä, jossa on keskitetty lämpimän käyttöveden tuotanto ja lämpimän veden kierto. Tutkimuksen toteuttamiseksi työssä arvioitiin paineenkorotusasemilta vaadittavat paineenkorotukset, käyttöveden kulutusprofiili sekä järjestelmän investointi-, käyttö- ja huoltokustannukset eri tilanteissa.

Työn tuloksena saatiin selville, että käyttövesijärjestelmien energiankulutus pienenee jaettaessa rakennus useampaan käyttövesivyöhykkeeseen, mutta samalla elinkaarikustannukset kuitenkin kasvavat. Tutkimuksen tuloksien pohjalta työssä arvioitiin käytettyjen muuttujien ja lähtöarvojen luotettavuutta ja niiden vaikutuksia tutkimuksen tuloksiin.

korkea rakentaminen, käyttövesi, elinkaarikustannus, paineenkorotus

ABSTRACT

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

STENHAMMAR, JERE:
Domestic Water Systems and Lifecycle Costs in High-Rise Construction

Bachelor's thesis 72 pages, appendices 0 pages
May 2020

As high-rise construction becomes more common in Finland, the need for standardized design guidelines and regulations based on research data is increasing. Currently there is a lack of research regarding high-rise domestic water systems and the effects they have on the lifecycle costs of the building in Finland. In order to increase the efficiency of high-rise construction projects, it is necessary to form standard solutions for basic scenarios.

The purpose of this thesis is to provide the reader with a comprehensive understanding of the specific features of high-rise domestic water systems and study how different pressure-zone divisions affect the systems energy consumption and lifecycle costs.

The research was conducted on a 31-storey residential building located in Helsinki, Finland. The selected system for the research was a zone-divided booster system with centralized domestic hot water production with a hot water recirculation. The research methods included estimating the pressure boost needed from the booster stations, the load profile of the pressure booster units, investment and maintenance costs and the energy consumption of the system in different scenarios.

The results suggest that by increasing the amount of pressure zones it is possible to decrease the energy consumption of the system, but the lifecycle costs increase significantly.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
1.1	Tutkimuksen tausta ja tutkimusongelma	6
1.2	Tutkimuksen tavoite ja rajaus	6
2	KYLMÄN VEDEN JÄRJESTELMÄT	8
2.1	Yhden paineenkorotusaseman järjestelmä	8
2.2	Hydropneumaattisia tankkeja hyödyntävät järjestelmät	10
2.3	Kattotankkijärjestelmä	12
2.4	Rinnan kytketty vyöhykejakoinen järjestelmä	14
2.5	Sarjaan kytketty järjestelmä katkaisutankeilla	19
2.6	Sarjaan kytketty järjestelmä ilman katkaisutankkeja	22
2.7	Affiniteettilait	24
2.8	Paineenalennusventtiilit	24
3	LÄMPIMÄN KÄYTTÖVEDEN JÄRJESTELMÄT	27
3.1	Lämpimän käyttöveden tuotanto	27
3.1.1	Hajautettu järjestelmä	28
3.1.2	Keskitetty järjestelmä	29
3.2	Kiertovesijärjestelmät	30
3.2.1	Yhden painevyöhykkeen järjestelmät	30
3.2.2	Usean painevyöhykkeen järjestelmät	34
3.3	Sähköinen saattolämmitys	36
4	KÄYTTÖVESIJÄRJESTELMIEN RISKIT	37
4.1	Materiaalien paineluokat	37
4.2	Takaisinvirtaus	38
4.3	Tyhjiön muodostuminen putkistoon	40
4.4	Kuolleet haarat ja legionellariski	40
4.5	Pumpun kavitointi	41
5	TUTKIMUSMENETELMÄT	43
5.1	Tutkittava rakennus	43
5.2	Tutkimukseen valittu kylmävesijärjestelmä	45
5.3	Käyttökustannukset	45
5.3.1	Vedenkulutus ja kuormitusprofiili	45
5.3.2	Mitoitusvirtaamat vyöhykkeissä	47
5.3.3	Tarjittavat paineenkorotukset vyöhykkeissä	50
5.3.4	Paineenkorotusasemien energiankulutus	54
5.4	Investointikustannukset	57
5.4.1	Paineenkorotusasemat	57

5.4.2 Lämmönsiirtimet	57
5.4.3 Teknisen tilan tarve	57
5.4.4 Paineenalennusventtiilit.....	58
5.4.5 Putkisto.....	59
5.5 Huoltokustannukset.....	60
5.6 Elinkaarikustannuslaskenta.....	61
5.6.1 Laskennassa käytetyt arvot	61
5.6.2 Laskentamenetelmät	62
6 TULOKSET	65
6.1 Energiankulutus ja elinkaarikustannukset	65
6.2 Herkkyystarkastelut.....	67
7 POHDINTA	68
LÄHTEET.....	69

1 JOHDANTO

Korkea rakentamisen yleistymien Suomessa näkyy myös tämän opinnäytetyön toimeksiantajan, Rambollin Finland Oy:n, hankkeissa. Yhä useammin rakennusten suunnittelu edellyttää suunnittelijoilta erityisosaamista korkean rakentamisen alalta, esimerkiksi käyttövesijärjestelmien osalta.

1.1 Tutkimuksen tausta ja tutkimusongelma

Korkeiden rakennusten käyttövesijärjestelmien suunnittelun haasteisiin kuuluu ensisijaisesti verkoston painesuhteiden hallinta. Yleisimmät keinot ratkaista painesuhteiden hallintaan liittyviä ongelmia ovat järjestelmän jakaminen vyöhykkeisiin ja paineenalennusventtiilien käyttö, mutta niiden vaikutuksista rakennuksen käyttövesijärjestelmän energiankulutukseen ja elinkaarikustannuksiin on saatavilla niukasti tietoa.

Työn toimeksiantajan Ramboll Finland Oy:n arvoihin kuuluu näkemyksellisyys ja laadukkuus, joihin kuuluu yrityksen osaamisen ja asiantuntemuksen kautta tarjotut ratkaisut asiakkaille. Tarjotakseen kestäviä ja samalla kustannustehokkaita ratkaisuja asiakkailleen, tulee suunnittelijoilla olla kokonaisvaltainen käsitys ehdottamiensa ratkaisujen vaikutuksista rakennuksien energiankulutukseen ja elinkaarikustannuksiin. Tämän kautta määriteltiin työn tutkimusongelma: millä tavoilla korkeiden rakennusten käyttövesijärjestelmiä toteutetaan kansainvälisesti, mitä riskejä niihin kuuluu ja mitkä ovat niiden vaikutukset järjestelmän energiankulutukseen ja elinkaarikustannuksiin?

1.2 Tutkimuksen tavoite ja rajaus

Tutkimuksen tavoitteena on luoda kirjallisuuden perusteella kattava selvitys korkeiden rakennusten käyttövesijärjestelmien toteutustavoista, Suomen määräysten asettamista rajoista niiden toteutukselle, sekä keskeisistä riskitekijöistä. Li-

säksi tutkimuksessa on tavoitteena luoda elinkaarilaskennan avulla selvitys käyttövesijärjestelmien suunnittelussa tehtävien valintojen vaikutuksista järjestelmän energiankulutukseen ja elinkaarikustannuksiin.

Korkeaksi rakennukseksi määritellään yleisesti rakennus, jossa on yksi tai useampi asuinkerros yli 22,86 metrin korkeudessa alimmasta palokunnan käyntitasosta (Thornburg ym. 2018). Tässä työssä käsitellään korkeita rakennuksia käyttövesijärjestelmien näkökulmasta, jolloin korkeaksi rakennukseksi voidaan määritellä rakennus, joka vaatii käyttöveden paineenkorotuksen lisäksi työssä käsiteltyjä menetelmiä liian korkeiden paineiden välttämiseksi. Näin työstä rajataan pois rakennukset, joissa käyttövesiverkoston painetta korotetaan matalan kunnallisen verkostopaineen vuoksi.

Työn kirjallisuuteen perustuva selvitysosa rajattiin käsittelemään eri käyttövesijärjestelmiä periaatetasolla, eikä työssä näin ollen käsitelty kaikkien eri ratkaisutapojen tarkkoja mitoituksellisia seikkoja. Energiankulutus- ja elinkaarilaskentaan liittyvä osuus rajattiin koskemaan rinnan kytkettyä vyöhykejakoista kylmävesijärjestelmää, jossa lämmin käyttövesi tuotetaan keskitetysti kaukolämmöllä ja varustetaan kiertovesijärjestelmällä.

2 KYLMÄN VEDEN JÄRJESTELMÄT

Korkean rakennuksen käyttövesijärjestelmiin liittyy ensisijaisesti kaksi haastetta, joista molemmat liittyvät verkoston painetasoihin. Ensimmäinen haaste on varmistua riittävästä painetasosta jokaisella rakennuksen vesikalusteella ja toinen on varmistua, että vesikalusteet ja muut verkoston osat eivät altistu liian suurelle paineelle. (Simmonds 2015, 143)

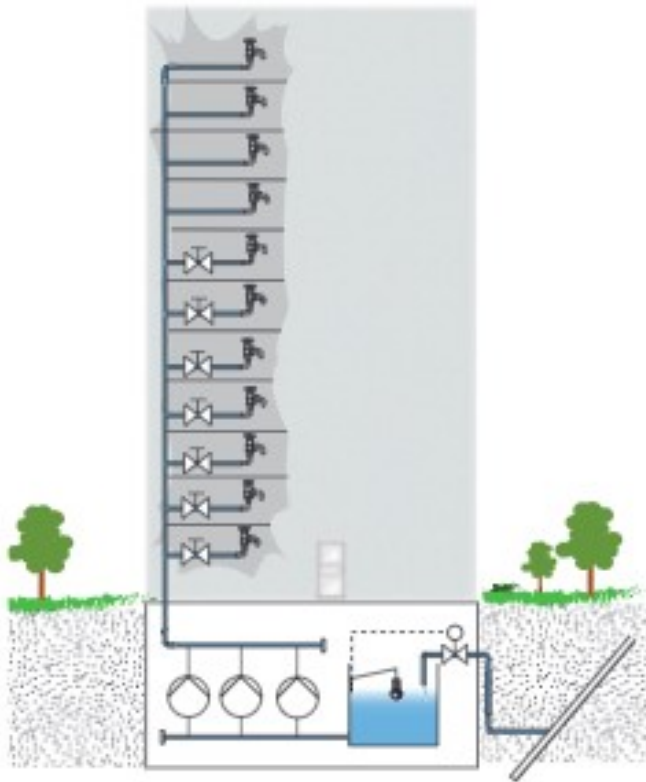
Paineen riittävydestä on Suomessa asetettu, että painetason ollessa liian matala mitoitusvirtaamien saavuttamiseksi, tulee järjestelmä varustaa paineenkorotuslaitteistolla (Asetus 1047/2017). Paineenkorotuksen toteutustapoihin ei oteta kantaa, joten parhaan ratkaisun valinta jää suunnittelijoiden tietotaidon varaan.

Liiallisen paineen välttämisen suhteen asetus on suoraviivaisempi. Jos paine jakojohdossa ylittää 500 kPa, on siihen asennettava paineenalennusventtiili (Asetus 1047/2017). Vaihtoehtoisin liiallisen paineen välttämisen keinoihin asetus tai suunnittelua koskevat ohjeistukset Suomessa eivät ota kantaa.

Seuraavat kappaleet pyrkivät esittämään monipuolisia ratkaisuvaihtoehtoja korkean rakennuksen käyttövesiverkon toteuttamiseksi niin, että asetusten vaatimukset toteutuvat ja lopputulos on paras mahdollinen loppukäyttäjän, eli asukkaan kannalta. Kylmän käyttöveden järjestelmät on jaettu kuuteen pääluokkaan Grundfosin (n.d., 15–19) mukaisesti.

2.1 Yhden paineenkorotusaseman järjestelmä

Yhden paineenkorotusaseman järjestelmässä koko rakennuksen käyttövesiverkoston paine korotetaan yhdellä paineenkorotusasemalla. Järjestelmä voidaan toteuttaa asentamalla katkaisutankki tonttijohdon ja paineenkorotusaseman väliin, tai korottamalla paine suoraan tonttijohdosta ilman katkaisutankkia (Nielsen 2016, 15)



KUVA 1. Yhden paineenkorotusaseman järjestelmä (Nielsen 2016, 15)

Kuvassa 1 on esitetty kerrosten osalta tyypillinen yhden paineenkorotusaseman järjestelmä. Kellarikerrokseen sijoitettu paineenkorotusasema syöttää koko rakennuksen käyttöveden varmistaen mitoitusvirtaamien saavuttamisen myös rakennuksen ylimmässä kerroksessa. Tämä aiheuttaa sen, että alimmissa kerroksissa jakojohdon paine ylittää asetuksen 1047/2017 mukaisen 500 kPa, jolloin kyseisiin jakojohdoin tulee asentaa paineenalennusventtiilit.

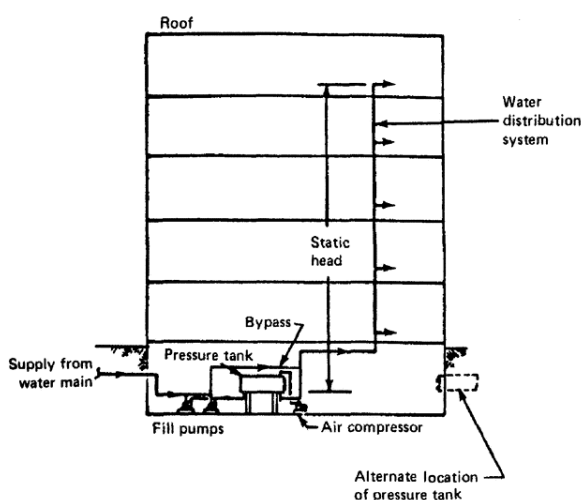
Kuvasta poiketen yhden paineenkorotusaseman järjestelmä toteutetaan yleensä korottamalla paine suoraan vesijohtoverkosta ilman katkaisutankkia. Taulukkoon 1 on koottu ratkaisun edut ja heikkoudet.

TAULUKKO 1. Yhden paineenkorotusaseman järjestelmän edut ja heikkoudet (Nielsen 2016, 15)

Edut
<ul style="list-style-type: none"> • Voidaan toteuttaa yhdellä nousulinjalla • Järjestelmä ei vaadi tilaa ylemmistä kerroksista, joten neliöt saadaan asuinkäyttöön
Heikkoudet
<ul style="list-style-type: none"> • Liian korkea paine rakennuksen alemmissa kerroksissa • Vaatii paineenalennusventtiilejä, jotka hukkaavat energiaa ja lisäävät investointi- sekä huoltokustannuksia • Saattaa edellyttää korkeamman paineluokan putkimateriaaleja

2.2 Hydropneumaattisia tankkeja hyödyntävät järjestelmät

Hydropneumaattinen tankki on paineistettu säiliö, johon vesi pumpataan tarvittavassa paineessa. Kun paineistettuun tankkiin pumpataan vettä, puristuu tankissa oleva ilma korottaen tankin painetta. Samalla kun tankin paine nousee, nousee myös verkoston paine, koska tankki on suorassa yhteydessä verkostoon. Tankit voidaan sijoittaa mihin verkoston kohtaan tahansa. (Harris 1998, 4.15) Kuvassa 2 on esitetty hydropneumaattisella tankilla varustetun järjestelmän periaate.



KUVA 2. Kylmän käyttöveden järjestelmä hydropneumaattisella tankilla (Harris 1998, 4.15)

Hydropneumaattisia tankkeja voidaan hyödyntää käyttövesiverkostossa kahdella tavalla:

1. varaajina
2. pumppujen käyntijaksojen hallintaa helpottavina painesäiliöinä (WHO 2006, 72)

Käytettäessä hydropneumaattisia tankkeja verkoston varaajina, tarvitaan tankin yhteyteen kompressori, joka huolehtii riittävästä ilman määrästä tankissa. Osa ilmasta imeytyy veteen ajan kuluessa, jolloin kompressorin tehtävä on korvata imeytynyt ilma. Varaajana käytettävän tankin tilavuudesta usein noin puolet täytetään usein vedellä. Veden määrää ja samalla pumppujen käyntiä ohjaa uimuri. (WHO 2006, 72.)

Painesäiliöinä käytettävät hydropneumaattiset tankit ovat usein pienempiä kuin varaajina käytettävät, eivätkä ne tarvitse kompressoria, koska ilman ja veden välissä on joustava kalvo. Tankissa oleva ilma pitää verkoston paineen suunnitellussa tasossa pumppujen ollessa kiinni. Kun paine säiliössä putoaa määritettyyn tasoon, pumput käynnistyvät ja palauttavat verkoston paineen sekä täyttävät ja paineistavat tankin. Painesäiliönä käytettävän hydropneumaattisen tankin kapasiteetin tulee olla yhtä suuri kuin pumppujen ja säiliön täytyttyä huippukulutuksen hetkenä. (WHO 2006, 72–73)

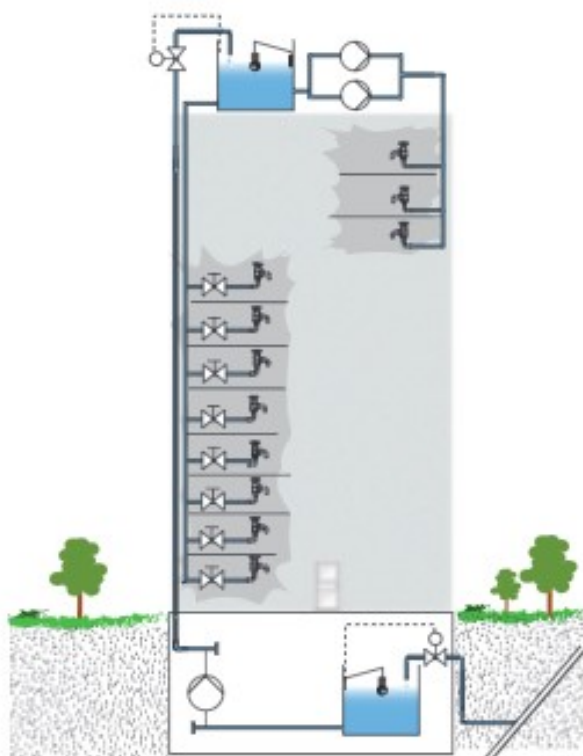
TAULUKKO 2. Hydropneumaattisten tankkien edut ja heikkoudet (Harris 1998, 4.18, muokattu)

Edut
<ul style="list-style-type: none"> • Hydropneumaattinen tankki voidaan sijoittaa minne tahansa verkoston osaan.
<ul style="list-style-type: none"> • Tilantarvetta voidaan pienentää sijoittamalla tankki perusmuurin ulkopuolelle.
<ul style="list-style-type: none"> • Hydropneumaattinen tankki voi estää verkoston vesi-iskuja.
<ul style="list-style-type: none"> • Tankki vähentää pumppujen käyntiaikoja, joka säästää energiakustannuksissa.
Heikkoudet
<ul style="list-style-type: none"> • Säiliön suuri koko, mikäli sitä käytetään myös sammutusjärjestelmän säiliönä
<ul style="list-style-type: none"> • Tankkijärjestelmän suuri tilantarve (kompressori, täyttöpumput, tankki)
<ul style="list-style-type: none"> • Täyttöpumppujen tulee toimia jatkuvasti hydropneumaattisen tankin huolto- ja puhdistusjaksojen aikana

2.3 Kattotankkijärjestelmä

Kattotankkijärjestelmässä rakennuksen vesikatolle asennetaan säiliö, joka täytetään rakennuksen kellarikerroksesta pumpuilla. Pumppuja ohjataan säiliöön asennettavalla tasokytkimellä, joka avaa venttiiliä säiliön vedenpinnan laskiessa alle asetusarvon ja sulkee venttiilin säiliön ollessa täynnä. (Nielsen 2016, 17; Larson 2007)

Järjestelmä toteutetaan usein jakamalla verkosto kattotankin jälkeen vähintään kahteen useamman kerroksen vyöhykkeeseen. Ensimmäisen vyöhykkeen muodostavat ylimmät kerrokset, joiden käyttövesi syötetään kattotankin jälkeen asennettujen pumppujen kautta, koska staattinen paine ei muuten riitä tuottamaan tarvittavaa virtaamaa kalusteille. Toiseen vyöhykkeeseen kuuluu rakennuksen loput kerrokset, joille saadaan riittävä virtaama painovoimaisesti. Jos rakennuksessa on enemmän kuin 15 kerrosta, tarvitaan jokaisen kerroksen jakojohdon paineenalennusventtiili liian suuren staattisen paineen välttämiseksi. (Nielsen 2016, 17)



KUVA 3. Kattotankkijärjestelmä kahdella vyöhykkeellä (Nielsen 2016, 17)

Kattotankkijärjestelmä on vanhimpia korkeiden rakennusten käyttövesijärjestelmissä käytettyjä tekniikoita, joten siihen liittyvät edut ja heikkoudet ovat hyvin tiedossa. Järjestelmän edut ja heikkoudet on koottu taulukkoon 3.

TAULUKKO 3. Kattotankkijärjestelmän edut ja heikkoudet (Nielsen 2016, 17; Megri 2011, 4; Harris 1998, 3.7–3.8)

Edut
<ul style="list-style-type: none"> • Kypsä tekniikka
<ul style="list-style-type: none"> • Pienitehoinen paineenkorotusasema, koska kattotankki toimii tasaus-säiliönä
<ul style="list-style-type: none"> • Kattotankin tarjoama reservi sähkökatkojen aikana
<ul style="list-style-type: none"> • Kattotankkia on mahdollista hyödyntää palosuojausjärjestelmien ve-silähteenä
<ul style="list-style-type: none"> • Järjestelmän ohjaus vaatii vähän komponentteja
<ul style="list-style-type: none"> • Pumppu voidaan valita tarkasti, koska sen toimintapisteen vaihtelu on vähäistä
Heikkoudet
<ul style="list-style-type: none"> • Korkeammat investointikustannukset kuin yhden vyöhykkeen järjestelmissä
<ul style="list-style-type: none"> • Rakennuksen korkeudesta riippuen saattaa edellyttää korkeamman paineluokan putkimateriaalien käyttöä ylimmissä kerroksissa, joka lisää investointikustannuksia
<ul style="list-style-type: none"> • Vaatii usein paineenalennusventtiilejä
<ul style="list-style-type: none"> • Säiliön pettäessä rakennukseen voi päästä suuri määrä vettä
<ul style="list-style-type: none"> • Kattotankin kuorma rakenteille on huomioitava rakennesuunnittelussa
<ul style="list-style-type: none"> • Veden jäätymisvaara kattotankissa ja tankista lähteivissä putkissa

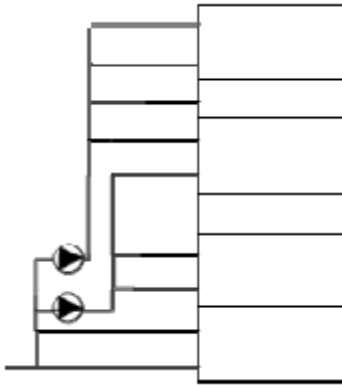
2.4 Rinnan kytketty vyöhykejakoinen järjestelmä

Rinnan kytketyksi vyöhykejakoiseksi paineenkorotusjärjestelmäksi kutsutaan järjestelmää, jossa rakennus on jaettu käyttöveden osalta painevyöhykkeisiin ja joista vyöhykettä palvelee oma paineenkorotusasema, joka sijaitsee usein rakennuksen kellarikerroksessa. (Nielsen 2016, 16) Rakennuksen alin vyöhyke voidaan usein toteuttaa ilman paineenkorotusta suoraan tonttijohdosta (Van der Schee n.d., 91–92).

Järjestelmä voidaan toteuttaa pääasiassa kolmella eri tavalla:

1. Vyöhykejako ilman paineenalennusventtiilejä (kuva 5)
 2. Vyöhykejako yksittäisillä paineenalennusventtiileillä (kuva 6)
 3. Vyöhykejako sarjaan asennetuilla paineenalennusventtiileillä (kuva 7)
- (Van der Schee n.d., 91)

Ilman paineenalennusventtiilejä toteutettavan rinnakkain kytketyn järjestelmän toimintaperiaate on esitetty kuvassa 4. Kuten edellä mainittiin, alimman vyöhykkeen käyttövesiverkosto toteutetaan ilman paineenkorotusta. Rakennuksen loput kerrokset on jaettu kahteen vyöhykkeeseen, joista molempia palvelee oma paineenkorotusasemansa.



KUVA 4. Vyöhykejako ilman paineenalennusventtiilejä (Van der Schee n.d., 92)

Van der Scheen (n.d., 95) mukaan ilman paineenalennusventtiilejä toteutettavien painevyöhykkeiden maksimikorkeus voidaan todeta laskennallisesti vesikalusteen minimi- ja maksimipaineen sekä suurimman sallitun staattisen paineen mukaan. Vyöhykkeen maksimikorkeus lasketaan kaavoilla 1 ja 2, joiden tuloksista pienempi arvo määrää vyöhykkeen korkeuden.

Kaavassa 1 lasketaan vyöhykkeen maksimikorkeutta vesikalusteen pienimmän ja suurimman sallitun dynaamisen paineen mukaan.

$$h = \frac{P_{dyn,tap,max} - P_{dyn,tap,min}}{10 + \Delta P_{dyn}} \quad (1)$$

Kaavassa 2 vyöhykkeen maksimikorkeus lasketaan vesikalusteen pienimmän sallitun dynaamisen paineen ja suurimman sallitun staattisen paineen mukaan.

$$h = \frac{P_{stat;tap;max} - P_{dyn;tap;min} - h_1 \cdot \Delta P_{dyn}}{10 + \Delta P_{dyn}} \quad (2)$$

Kaavoissa 1 ja 2 käytettävät suureet ovat:

h = Vyöhykkeen maksimikorkeus (m)

h_1 = Vyöhykkeen alimman tason korkeus (m)

$P_{dyn;tap;max}$ = Vesikalusteen suurin sallittu dynaaminen paine (kPa)

$P_{dyn;tap;min}$ = Vesikalusteen pienin sallittu dynaaminen paine (kPa)

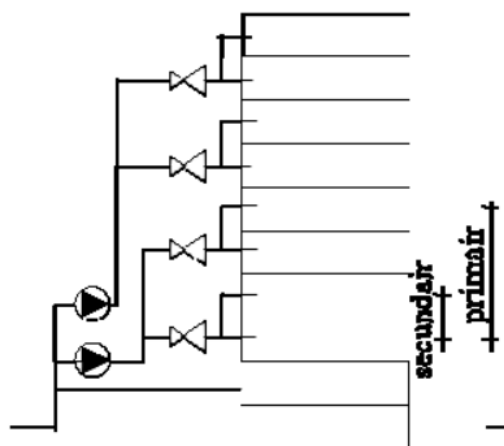
$P_{stat;tap;max}$ = Vesikalusteen suurin sallittu staattinen paine (kPa)

ΔP_{dyn} = Keskimääräinen painehäviö putkistossa (kPa/m)

Laskettaessa vyöhykkeen maksimikorkeutta järjestelmään, jossa ei käytetä paineenalennusventtiilejä, vyöhykkeen koko määräytyy useimmiten kaavan 1 mukaan (Van der Schee n.d., 96).

Paineenalennusventtiilien käyttö rinnakkain kytketyssä järjestelmässä lisää joustavuutta suunnitteluun. Painevyöhykkeistä voidaan tehdä korkeampia, joka vähentää tarvittavien paineenkorotusasemien määrää. Korotetun paineen verkostoissa tulee kuitenkin varmistua siitä, että verkosto kestää tarvittavan paineen eikä verkoston paine ei ole liian korkea kulutusasteilla. (Van der Schee n.d., 92) Yksittäisillä paineenalennusventtiileillä varustettu järjestelmä voidaan toteuttaa usealla eri tavalla.

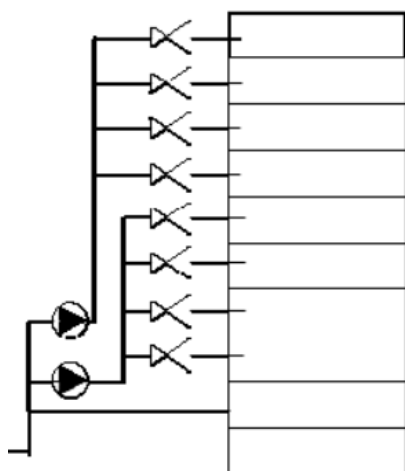
Kuvassa 5 on esitetty esimerkki paineenalennuksen toteuttamisesta vyöhykekohtaisesti, jolloin jokaista painevyöhykettä kohden asennetaan yksi paineenalennusventtiili. Näin ollen verkostoon syntyy ns. primääri- ja sekundäärivyöhykkeitä. Primäärivyöhykkeeseen kuuluu kaikki paineenkorotusaseman palveleamat kerrokset, kun taas sekundäärivyöhykkeeseen kuuluu paineenalennusventtiilin jälkeinen verkoston osa. (Van der Schee n.d., 93) Yksi paineenalennusventtiili voi palvella 2-3 kerrosta, joka rajaa sekundäärivyöhykkeen kokoa (Nielsen 2016, 13).



KUVA 5. Vyöhykekohtaiset paineenalennusventtiilit (Van der Schee n.d., 93)

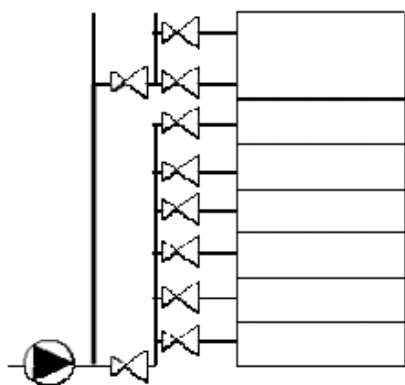
Vyöhykekohtaisilla paineenalennusventtiileillä varustetun järjestelmän suurin sallittu korkeus lasketaan vesikalusteen pienimmän ja suurimman sallitun dynaamisen paineen mukaan kaavalla 1. Paineenalennusventtiilin toisiopaineen määrittämisessä on huomioitava virtauksen painehäviöt. (Van der Schee n.d., 97)

Paineenalennusventtiilit voidaan asentaa myös kerroskohtaisesti kuvan 6 mukaisesti, jolloin yhteen painevyöhykkeeseen asennetaan useita paineenalennusventtiilejä. (Van der Schee n.d., 93) Tämä mahdollistaa suuremman vyöhykekorkeuden, joka vähentää tarvittavien paineenkorotusasemien sekä nousulinjojen määrää, mutta edellyttää suuren määrän paineenalennusventtiilejä, joka johtaa suuriin investointikustannuksiin sekä energiahäviöihin.



KUVA 6. Kerroskohtaiset paineenalennusventtiilit (Van der Schee n.d., 93)

Paineenalennusventtiilit voidaan kytkeä myös sarjaan, joka lisää edelleen verkoston suunnittelun joustavuutta yksittäisiin paineenalennusventtiileihin nähden. Tällöin verkostoon asennetaan kuvan 7 mukaisesti vyöhykekohtaiset paineenalennusventtiilit, joiden jälkeen jokaiseen kerroshaaraan asennetaan oma paineenalennusventtiilinsä. Näin ollen tarvittavien paineenkorotusasemien lukumäärä pienenee entisestään, koska painevyöhykkeistä voidaan tehdä korkeampia kuin yksittäisillä paineenalennusventtiileillä. Järjestelmän investointikustannukset ovat pienemmät kuin muilla rinnan kytketyillä paineenkorotusjärjestelmillä, mutta energiakustannukset kasvavat, koska suuri osa pumppujen tuottamasta paineesta menee paineenalennusventtiilien kautta hukkaan. (Van der Schee n.d., 93)



KUVA 7. Vyöhykejako sarjaan kytketyillä paineenalennusventtiileillä (Van der Schee n.d., 94)

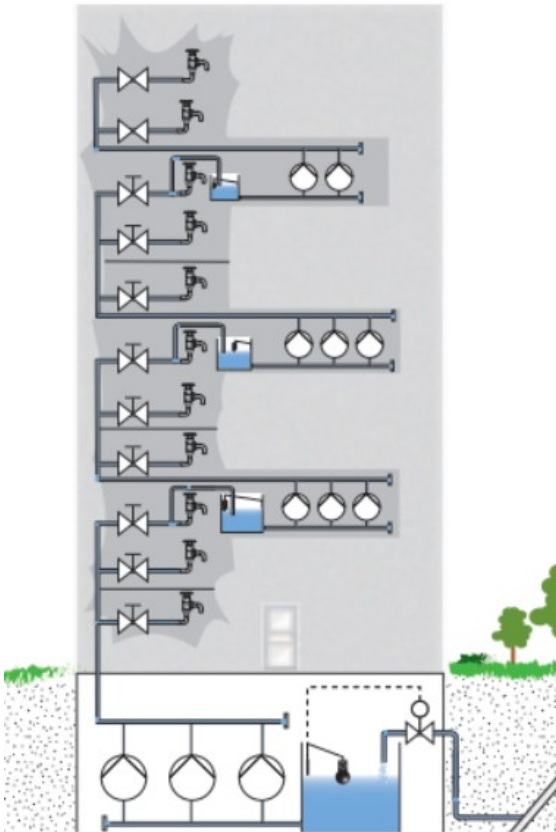
Paineenalennusventtiilien käyttö pienentää tarvittavien paineenkorotusasemien määrää sallien korkeammat painevyöhykkeet, mutta samalla niiden kautta hukataan energiaa. Hukatun energian lisäksi painetasojen hallinta paineenalennusventtiilien avulla lisää putkiston ja vesikalusteiden vaurioitumisen riskiä, sillä paineenalennusventtiilin pettäessä sen jälkeinen putkiston osa voi altistua suuremmalle paineelle, kuin sen on suunniteltu kestävän (Nielsen 2016, 13) Taulukkoon 4 on kerätty eri toteutustapojen mukaan määräytyviä sarjaan kytketyn järjestelmän etuja ja haittoja.

TAULUKKO 4. Rinnan kytketyn vyöhykejakoisen järjestelmän edut ja heikkoudet (Nielsen 2016, 16; Van der Schee n.d., 91–94)

Edut
<ul style="list-style-type: none"> • Painevyöhykkeiden hallittavuus
<ul style="list-style-type: none"> • Vyöhykejako lisää järjestelmän joustavuutta ja turvallisuutta
<ul style="list-style-type: none"> • Järjestelmä ei vaadi teknistä tilaa ylemmistä kerroksista
<ul style="list-style-type: none"> • Sopivalla vyöhykejaolla paineenalennusventtiilejä ei tarvita, jolloin säästetään energiaa
<ul style="list-style-type: none"> • Vähemmän paineenkorotusasemia, jos järjestelmä toteutetaan paineenalennusventtiileillä, jolloin säästetään huolto- ja investointikustannuksissa
<ul style="list-style-type: none"> • Järjestelmä voidaan toteuttaa pienemmällä määrällä nousulinjoja, joka pienentää tarvittavien hormien lukumäärää ja vapauttaa enemmän neliöitä asuinkäyttöön
Heikkoudet
<ul style="list-style-type: none"> • Usean paineenkorotusaseman hankinnasta aiheutuvat suuret investointikustannukset
<ul style="list-style-type: none"> • Vyöhykejaosta riippuen voi vaatia paineenalennusventtiilejä, jotka hukkaavat energiaa ja lisäävät investointi- sekä huoltokustannuksia
<ul style="list-style-type: none"> • Rakennuksen korkeudesta riippuen saattaa edellyttää korkeamman paineluokan putkimateriaalien käyttöä ylimmissä vyöhykkeissä, joka lisää investointikustannuksia

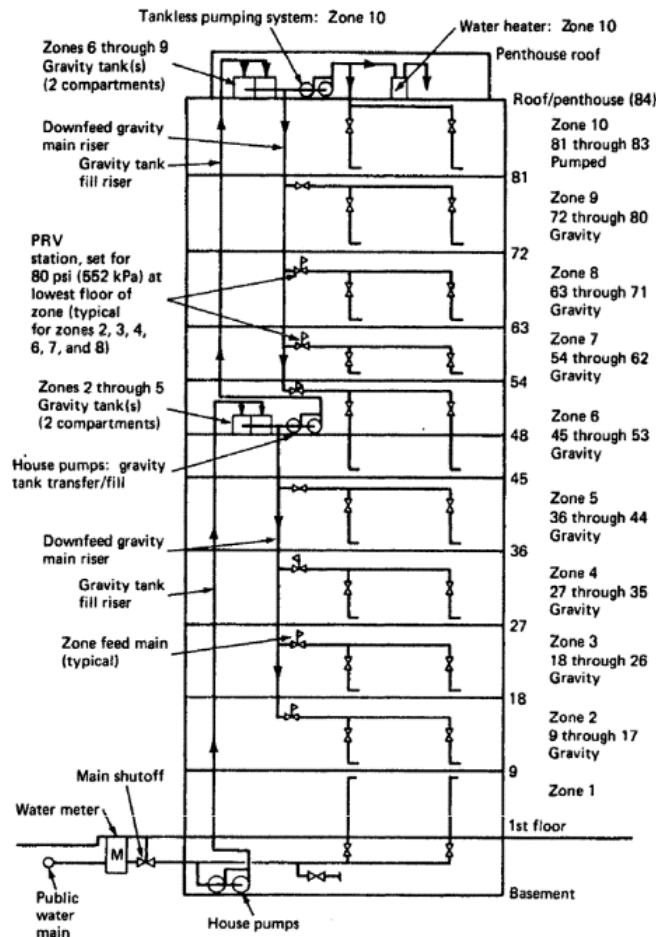
2.5 Sarjaan kytketty järjestelmä katkaisutankeilla

Katkaisutankeilla varustetussa sarjaan kytketyssä järjestelmässä paineenkorotus toteutetaan vyöhykkeissä paikallisesti. Alimman vyöhykkeen paineenkorotus- asema syöttää sekä vyöhykkeen vesikalusteet että ylemmän vyöhykkeen katkaisutankin. Seuraavan vyöhykkeen paineenkorotus- asema ottaa tarvittavan veden katkaisutankista ja syöttää jälleen palvelemaisensa vyöhykkeen vesikalusteet sekä ylemmän vyöhykkeen katkaisutankin. (Nielsen 2016, 18) Järjestelmän toiminta- periaate on esitetty kuvassa 8.



KUVA 8. Katkaisutankeilla varustettu sarjaan kytketty paineenkorotusjärjestelmä (Nielsen 2016, 18)

Sarjaan kytketty katkaisutankeilla varustettu järjestelmä voidaan toteuttaa myös ylhäältäpäin syötettävänä, jolloin järjestelmässä yhdistyy kattotankkijärjestelmä sekä sarjaan kytketty paineenkorotusjärjestelmä. Kuvassa 9 on havainnollistettu sarjaan kytketyn katkaisutankeilla varustetun järjestelmän toteutusperiaate ylhäältäpäin syötettävänä 83-kerroksiseen rakennukseen.



KUVA 9. Ylhäältä syötettävä sarjaan kytketty järjestelmä katkaisutankeilla (Harris 1998, 3.9)

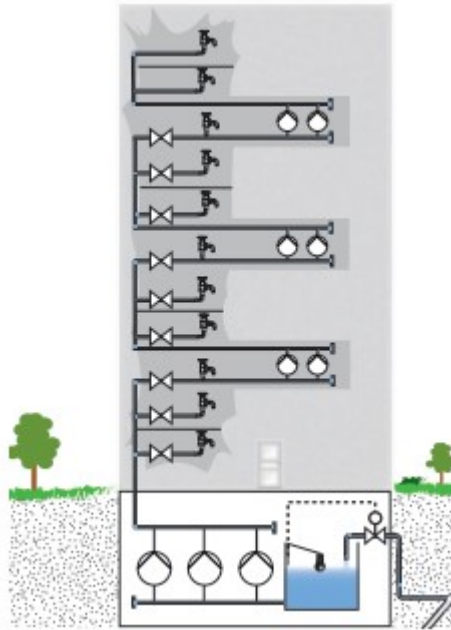
Harrisin (1998, 3.9) mukaisessa järjestelmässä (kuva 6) ensimmäinen vyöhyke on toteutettu ilman paineenkorotusta. Vyöhykkeet 2-6 ja 7-10 on toteutettu kuten kattotankkijärjestelmän periaatekuvassa (kuva 3) paineenalennusventtiilien sijoittelua lukuun ottamatta. Harris on esittänyt paineenalennusventtiilien sijoituksen vyöhykekohtaisesti, kun kuvassa 3 ne on esitetty asennettavaksi kerroskohtaisesti. Taulukkoon 5 on koottu katkaisutankeilla varustetun sarjaan kytketyn järjestelmän etuja ja haittoja.

TAULUKKO 5. Katkaisutankeilla varustetun sarjaan kytketyn järjestelmän edut ja heikkoudet (Nielsen 2016, 18; Van der Schee n.d., 94)

Edut
<ul style="list-style-type: none"> • Matala paine kaikissa vyöhykkeissä, joten paineenalennusventtiilejä ei tarvita, joka säästää huolto- ja investointikustannuksissa
<ul style="list-style-type: none"> • Painevyöhykkeiden hallittavuus
<ul style="list-style-type: none"> • Mitoitus on helppoa, koska jokaista vyöhykettä palvelee oma syöttötankkinsa
<ul style="list-style-type: none"> • Ylhäältä päin syöttävä järjestelmä vähentää pumppujen käyntiaikoja
Heikkoudet
<ul style="list-style-type: none"> • Paineenkorotusasemat ja säiliöt vaativat tilaa kerroksista
<ul style="list-style-type: none"> • Veden saastumisriski, koska tankin vesi on suodattimen välityksellä kosketuksissa ympäröivään ilmaan
<ul style="list-style-type: none"> • Seistessään pitkiä aikoja katkaisutankissa, on mahdollista, että vesi lämpenee yli sallittujen raja-arvojen
<ul style="list-style-type: none"> • Ylhäältä päin syötettävässä järjestelmässä tulee huolehtia ylimpien kerroksien paineen riittävydestä

2.6 Sarjaan kytketty järjestelmä ilman katkaisutankkeja

Sarjaan kytketty järjestelmä ilman katkaisutankkeja toimii kuten alhaalta päin syötettävä sarjaan kytketty järjestelmä katkaisutankeilla. Alimman vyöhykkeen paineenkorotusasema syöttää oman vyöhykkeensä vesikalusteet sekä seuraavan vyöhykkeen paineenkorotusaseman kuvan 10 mukaisesti. Sarjaan kytketty paineenkorotusjärjestelmä toimii energiatehokkaasti, koska vesi pumpataan ainoastaan niille vyöhykkeille asti, joissa on kullakin hetkellä kulutusta. (Nielsen 2016, 19)



KUVA 10. Sarjaan kytketty järjestelmä ilman katkaisutankkeja (Nielsen 2016, 19)

Sarjaan kytketyn ilman katkaisutankkeja toteutetun järjestelmän edut ja heikkoudet on koottu taulukkoon 6.

TAULUKKO 6. Sarjaan kytketyn ilman katkaisutankkeja toteutetun järjestelmän edut ja heikkoudet (Nielsen 2016, 19)

Edut
<ul style="list-style-type: none"> • Matalat paineet vyöhykkeissä, joten paineenalennusventtiilejä ei tarvita ja käyttö- sekä huoltokustannukset pienenevät
<ul style="list-style-type: none"> • Ei vaadi välttämättä korkean paineluokan putkimateriaaleja, jolloin investointikustannukset ovat pienemmät
<ul style="list-style-type: none"> • Kerroksissa ei tarvita tilaa katkaisutankeille
Heikkoudet
<ul style="list-style-type: none"> • Sarjaan kytkentä vaatii riittävästi takaiskuventtiilejä, jotta ylemmän vyöhykkeen vesipatsas ei pääse kuormittamaan alempi vyöhykkeitä
<ul style="list-style-type: none"> • Paineenkorotusasemat vaativat tilaa kerroksista
<ul style="list-style-type: none"> • Järjestelmän ohjaus on monimutkaista

2.7 Affiniteettilait

Paineenkorotusasemissa usein käytettyjen keskipakopumppujen toimintaa voidaan tarkastella kaavassa 3 esitettyjen affiniteetti yhtälöiden avulla (Grundfos E-pumput n.d., 8). Ne osoittavat pumpun ominaisuuksien välisiä riippuvuussuhteita.

$$\frac{Q_n}{Q_x} = \frac{n_n}{n_x} \qquad \frac{H_n}{H_x} = \left(\frac{n_n}{n_x}\right)^2 \qquad \frac{P_n}{P_x} = \left(\frac{n_n}{n_x}\right)^3 \qquad (3)$$

joissa:

Q = tilavuusvirta (m³/h)

n = kierrosnopeus (rpm)

H = nostokorkeus (m)

P = ottoteho (kW)

Yhtälöistä käy ilmi, että pumpun tuottama tilavuusvirta on suoraan verrannollinen kierrosnopeuteen. Nostokorkeus on verrannollinen kierrosnopeuden neliöön ja ottoteho kierrosnopeuden kolmanteen potenssiin. Ottotehon ja kierrosnopeuden verrannollisuutta kuvaava yhtälö olettaa, ettei pumpun hyötysuhde ole erilainen kahdella eri kierrosnopeudella, joka ei todellisuudessa toteudu

2.8 Paineenalennusventtiilit

Ympäristöministeriön asetuksen mukaan (Asetus 1047/2017) paineenalennusventtiili on asennettava jakojohdossa, mikäli vedenpaine ylittää 500 kPa. Paineenalennusventtiilit asennetaan usein kylmälle vedelle kerroskohtaisesti ja lämpimälle vedelle huoneistokohtaisesti, joka mahdollistaa lämpimän veden kierron.

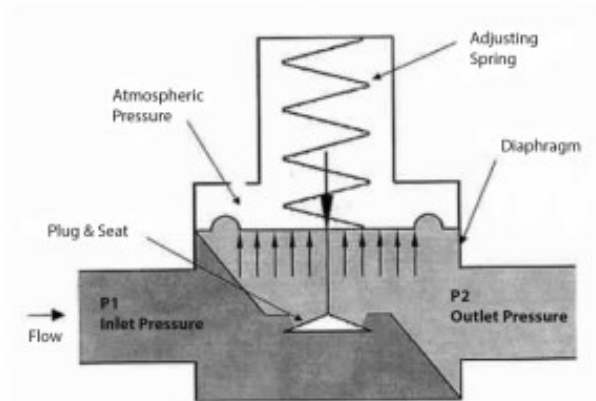
Paineenalennusventtiilin tarkoitus on pienentää runkojohdon suurempi paine vesikalusteille sopivalle tasolle. Paineenalennusventtiilit jaetaan kahteen pääluokkaan:

1. Istukkaventtiilit, jotka voivat olla suora- tai pilottiohjattuja

2. Kaksoisistukkaventtiilit, jotka voivat olla suora- tai pilottiohjattuja (ASPE 2014, 73)

Istukkamallisia paineenalennusventtiilejä käytetään verkostoissa, joissa ei ole jatkuvaa virtausta, kuten käyttövesiverkostoissa. Tällaisissa verkostoissa venttiilin täytyy sulkeutua tiiviisti, kun kulutusta ei ole. Kaksoisistukkaventtiilejä käytetään verkostoissa, joissa virtaus on jatkuvaa, esimerkiksi lämmitysverkostoissa. (ASPE 2014, 73–74)

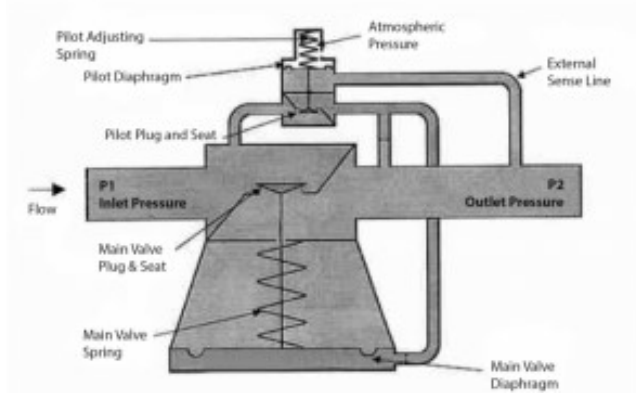
Suoraohjatussa venttiilissä säätö tapahtuu jouseen asennetun istukan avulla (kuva 11). Toisiopaine vastustaa jousen voimaa määrittäen jousen asennon, toimien näin ollen venttiilin kuormitusvoimana. Suoraohjattu venttiili reagoi suoraan toisiopaineen muutoksiin. Toisiopaineen kasvaessa, istukka nousee ylöspäin rajoittaen virtausta. (McMurry 2015) Painehäviö minimi- ja maksimivirtaamilla voi vaihdella jopa 345 kPa (50 psi), joten ne eivät sovi suurien virtaamien verkostoihin (PMEngineer 2004).



KUVA 11. Suoraohjattu paineenalennusventtiili (McMurry 2015)

Kuten suoraohjatussa venttiilissä, myös pilottiohjatussa venttiilissä on jousen päähän asennettu istukka, joka säätää virtausta (kuva 12). Suoraohjatussa venttiilistä poiketen pilottiohjatussa venttiilissä pilotti erottelee toisiopaineen ja kuormitusvoiman. Näin ollen kuormitusvoimaa pystytään ohjaamaan toisiopaineen muutoksien mukaan, joka tarkoittaa sitä, että kuormitusvoima voi olla suurempi kuin toisiopaine. (McMurry 2015) Pilottiohjattu venttiili sopii suurien virtaamien

verkostoihin paremmin kuin suoraohjattu venttiili, koska venttiilin painehäviö vaihtelee ainoastaan 20-35 kPa (3-5 psi) minimi- ja maksimivirtaamilla (PMEngineer 2004).



KUVA 12. Pilottiohjattu paineenalennusventtiilit (McMurry 2015)

Paineenalennusventtiilin valitsemiseksi ja mitoittamiseksi tarvitaan paineenalennusventtiilin ensiö- ja toisiopaineet sekä virtaama. Ensiöpaine on verkoston arvioitu maksimipaine ennen paineenalennusventtiiliä. Toisiopaine on paineenalennusventtiilin jälkeen tarvittava paine. (ASPE 2014, 74)

Toisiopainetta määritettäessä on huomioitava paineenalennusventtiilistä aiheutuva painehäviö maksimivirtaamalla, joka vähennetään asetuspainesta. Tätä kutsutaan myös pudotuspaineeksi (engl. falloff pressure). Jos tavoiteltava toimintapiste on esimerkiksi 0,063 l/s (100 gpm) ja paine 410 kPa (60 psi) ja venttiilin painehäviö mitoitusvirtaamalla on 140 kPa (20 psi), valitaan asetuspaineksi 550 kPa (80 psi). (ASPE 2014, 74)

3 LÄMPIMÄN KÄYTTÖVEDEN JÄRJESTELMÄT

Kuten matalissakin rakennuksissa, myös korkeissa rakennuksissa lämpimän käyttöveden järjestelmä toteutettava siten, että määräyksissä esitetyt vaatimukset järjestelmälle toteutuvat.

Asetus 1047/2017 määrää, että lämpimän veden lämpötilan tulee olla vähintään +55 °C ja korkeintaan +65 °C. Lisäksi lämpimän veden odotusajan tulee olla alle 20 sekuntia. Nämä vaatimukset aiheuttavat sen, että rakennuksien käyttövesijärjestelmiin asennetaan usein lämpimän käyttöveden kierto, jolloin lämmin vesi kiertää verkostossa kiertovesipumpun huolehtien riittävän lämpötilan säilymisestä ja asetetun maksimiodotusajan alittamisesta. Kiertovesijärjestelmien suunnittelu on usein haasteellista korkeissa rakennuksissa sen heikon joustavuuden myötä (Larkin 2012, 108). Kiertovesijärjestelmä on mahdollista korvata sähköisellä saattolämmitysjärjestelmällä.

Korkeassa rakennuksessa, joka on jaettu käyttövesijärjestelmien osalta vyöhykkeisiin, on jokaista lämpimän käyttöveden vyöhykettä käsiteltävä omana järjestelmänään, jolloin jokaiselle vyöhykkeelle tulee olla omat kiertovesipumput, vaihtimet ja varaajat valitun järjestelmän mukaisesti. (Van der Schee n.d., 103; Steele 2003, 28)

3.1 Lämpimän käyttöveden tuotanto

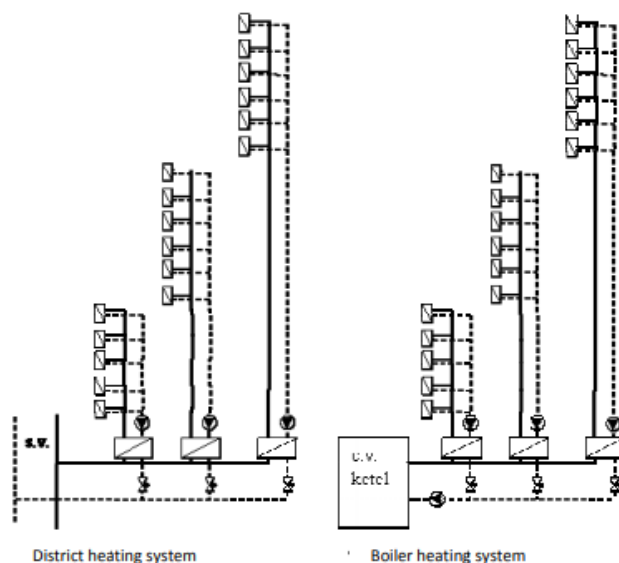
Lämpimän käyttöveden tuotantomenetelmät voidaan jakaa kahteen pääluokkaan; keskitettyihin- ja hajautettuihin järjestelmiin. (Van der Schee n.d., 101–102; Larkin 2012, 108) Keskitetyssä järjestelmässä lämmin käyttövesi tuotetaan vyöhykkeissä, kun taas hajautetussa järjestelmässä se tuotetaan vaiheittain useilla siirtimillä.

3.1.1 Hajautettu järjestelmä

Korkeassa rakennuksessa staattinen paine tulee usein ongelmaksi myös lämpimän käyttöveden tuotannossa. Staattisen paineen pienentämiseksi järjestelmä kannattaa usein toteuttaa hajautettuna.

Hajautettu järjestelmä voidaan toteuttaa huoneistokohtaisilla vedenlämmittimillä, kuten lämpöpumpuilla, sähkölämmittimillä tai kattiloilla. Huonekohtaisten vedenlämmittimien yhteydessä tulee varmistua rakenteiden kestävydestä, koska jokaiseen huoneistoon sijoitettava käyttövesivaraaja lisää rakenteiden kuormitusta. (Van der Schee n.d., 101)

Vaihtoehtoisesti hajautettu järjestelmä voidaan toteuttaa vyöhykekohtaisilla lämmönvaihtimilla. Kaukolämpökohteessa energialaitoksen kaukolämpöputket tuodaan rakennuksen alaosaan sijaitsevaan tekniseen tilaan, johon sijoitetaan vyöhykkeiden lämmönvaihtimet. Vyöhykkeiden lämmönvaihtimilta vesi johdetaan kerroskohtaisille lämmönvaihtimille. Kerroskohtaisten vaihtimien avulla lämpimän käyttövesiverkoston lämpöhäviöitä saadaan pienennettyä, koska vaihdin sijaitsee lähellä kulutusposteja. (Van der Schee n.d., 101) Hajautetun järjestelmän toimintaperiaate kerroskohtaisilla lämmönvaihtimilla on esitetty kuvassa 13.



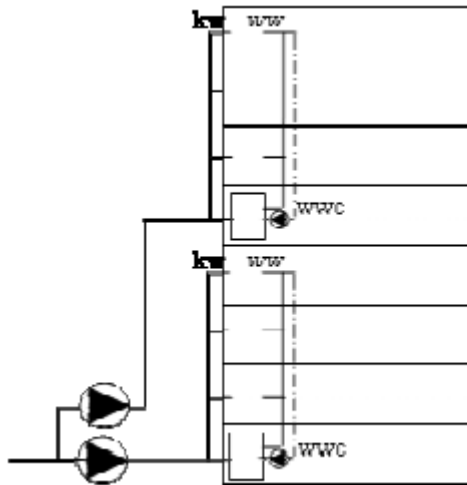
KUVA 13. Lämmin käyttövesijärjestelmä hajautettuna kerroskohtaisilla vaihtimilla (Van der Schee n.d., 102)

Hajautetun järjestelmän etuja on järjestelmän yksinkertaisuus sekä vyöhykekohtainen kulutuksen mittaus. Kerroskohtaisia vaihtimia käytettäessä järjestelmän lämpöhäviöt jäävät pieniksi.

Suurimpana heikkoutena kerroskohtaisilla vaihtimilla varustetussa hajautetussa järjestelmässä on nousujen korkeat lämpötilat, jolloin samassa hormissa kulkevan kylmävesijohdon lämpötila voi nousta, jos asiaan ei kiinnitetä erityistä huomiota. Kylmän veden lämpötila ei saa ylittää $+20\text{ °C}$ (Asetus 1047/2017). Ongelma voidaan ratkaista esimerkiksi sijoittamalla kylmän ja lämpimän veden nousut omiin hormoneihinsa (Van der Schee n.d., 101) tai kylmän veden kierrolla.

3.1.2 Keskitetty järjestelmä

Keskitetyssä järjestelmässä jokaisella vyöhykkeellä on oma vedenlämmittimensä, esimerkiksi lämmönsiirrin, ilman välisiirtimiä (Van der Schee n.d., 102). Lämmönsiirtimet voidaan sijoittaa rakennuksen kellarikerrokseen tai vyöhykkeisiin. Keskitetyn järjestelmän toimintaperiaate on esitetty kuvassa 14.



KUVA 14. Keskitetty lämpimän käyttöveden järjestelmä (Van der Schee n.d., 103)

Keskitetyn järjestelmän suunnittelussa tulee huomioida, että kaukolämpölaitteiden toisioverkoston suunnittelu-, eli maksimipaine on 10 baria (Määräykset ja ohjeet K1/2013, 3). Näin ollen yli 10 barin verkostoissa lämpimän käyttöveden paine

tulee korottaa vasta vaihtimen jälkeen, joka lisää järjestelmän investointi- ja huoltokustannuksia, sekä tilantarvetta.

Lisäksi keskitettyä järjestelmää harkittaessa on huomioitava, että kaukolämpöyhtiö ei välttämättä anna viedä siirtimiä ylempiin kerroksiin. Esimerkiksi Tampereen sähkölaitos ei anna viedä ensiöpuolen putkia ylempiin kerroksiin niissä kulkevan korkealämpöisen nesteen aiheuttaman turvallisuusriskin vuoksi (Manner 2020), joten vaihtimet on sijoitettava kellarikerrokseen tai vaihtoehtoisesti varustaa järjestelmä välisiirtimillä, jolloin puhutaan taas hajautetusta järjestelmästä.

3.2 Kiertovesijärjestelmät

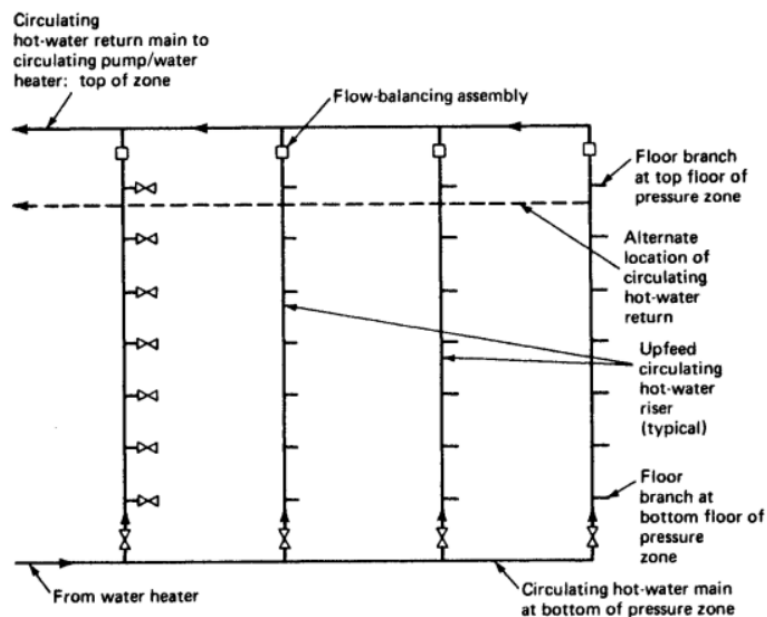
Lämpimän käyttöveden kiertovesijärjestelmillä tarkoitetaan verkostoja, joissa vesikalusteita syöttävään lämpimän käyttöveden putkeen (meno) on kytketty lämpimän veden kiertoputki (paluu), joka kuljettaa lämpimän käyttöveden takaisin vedenlämmittimelle. Paluu- eli kiertojohdossa on kiertovesipumppu, joka kierrättää vettä verkostossa jatkuvasti. Lämpimän käyttöveden kierto voidaan toteuttaa yhdellä kiertopiirillä tai useilla kiertopiireillä, jos lämmin käyttövesi on jaettu usealle nousulle. Lisäksi lämpimän käyttöveden kiertovesijärjestelmä voidaan toteuttaa alhaalta tai ylhäältä päin syötettävänä, tai näiden yhdistelmänä. (Harris 1998, 3.8–3.9)

3.2.1 Yhden painevyöhykkeen järjestelmät

Yhtä painevyöhykettä palveleva lämpimän käyttöveden kiertovesijärjestelmä voidaan toteuttaa alhaalta syötettävänä (kuva 15), ylhäältä syötettävänä (kuva 17) tai näiden yhdistelmänä (kuva 18). Kaikki vaihtoehdot voidaan toteuttaa useammalla nousulla, kuten kuvissa.

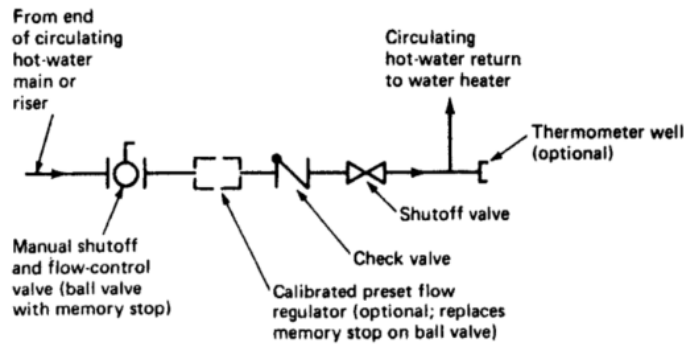
Alhaalta syötettävänä lämminvesiputki kulkee vyöhykkeen alimman kerroksen alla, josta otetaan nousut ylempiin kerroksiin. Nousujen yläpään asennetaan kuvan 15 mukainen virtauksensäätöryhmä. Lämpimän käyttöveden kiertojohto

asennetaan vyöhykkeen ylimpään kerrokseen, josta se palaa vedenlämmittimelle. Kiertojohto voidaan vaihtoehtoisesti asentaa myös vyöhykkeen toiseksi ylimpään kerrokseen, jolloin kiertojohtosta otetaan ainoastaan lyhyet nousut ylimpään kerrokseen. Sijoittamalla kiertojohto näin, tulee verkostosta itseään ilmaava. Vedenlämmitin, esimerkiksi lämmönvaihdin voidaan sijoittaa vyöhykkeen ylimpään tai alimpaan kerrokseen. (Harris 1998, 3.11–3.12)



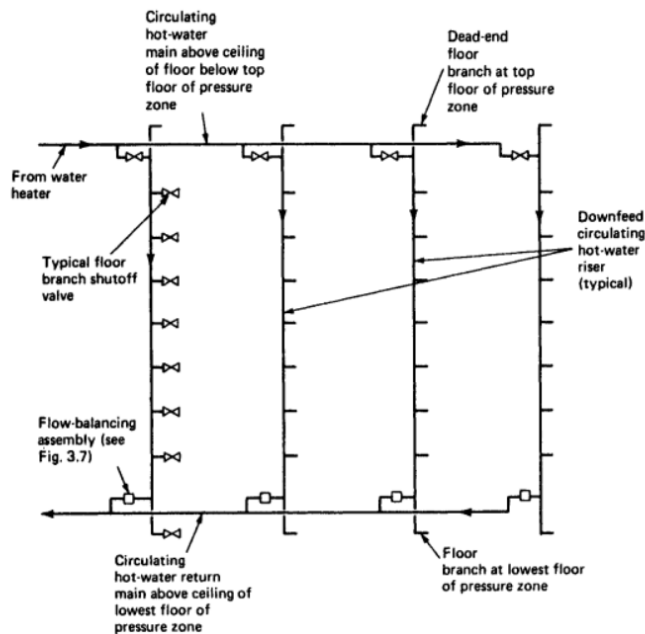
KUVA 15. Alhaalta syötettävä yhden painevyöhykkeen kiertovesijärjestelmä (Harris 1998, 3.11)

Nousujen yläpäähän asennettavat virtauksensäätöryhmät koostuvat säätöventtiilistä, takaiskuventtiilistä ja sulkuventtiilistä. Virtauksen säätö voidaan toteuttaa esiasetetulla virtauksensäätimellä tai käsikäyttöisellä palloventtiilillä. Esiasetetun virtauksen säätimen käyttö on suositeltavaa, koska silloin huoltohenkilökunnan toimenpiteet eivät vaikuta venttiilin toimintaan. (Harris 1998, 3.12)



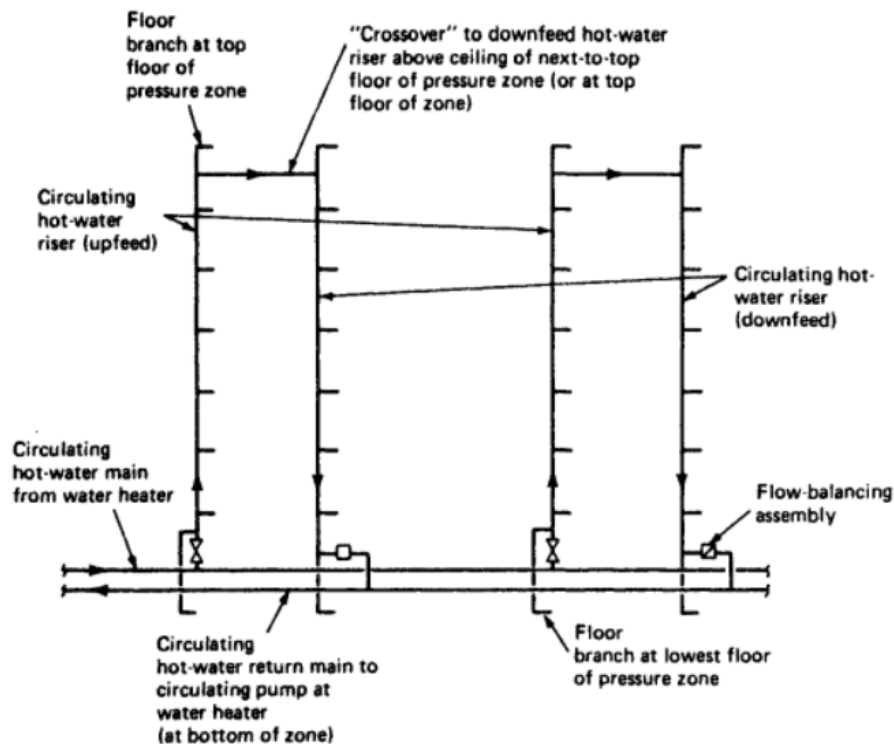
KUVA 16. Lämpimän käyttöveden kiertovesijärjestelmän virtauksensäätyryhmä (Harris 1998, 3.12)

Ylhäältä syötettävänä yhden painevyöhykkeen kiertovesijärjestelmän lämminvesiputki asennetaan vyöhykkeen toiseksi ylimpään kerrokseen, josta otetaan lyhyet nousut ylimmän kerroksen vesikalusteille. Lämpimän käyttöveden kiertojohto asennetaan vyöhykkeen alimman kerroksen kattoon. Ylhäältä syötettävässä järjestelmässä vedenlämmitin voidaan sijoittaa mihin tahansa kerrokseen vyöhykkeessä. Suositeltavaa on kuitenkin asentaa se vyöhykkeen ylimpään kerrokseen, jolloin siihen kohdistuva paine ei ole niin suuri kuin alemmissa kerroksissa, joka mahdollisesti pidentää vedenlämmittimen elinikää. Virtauksensäätyryhmät asennetaan nousujen alapäähän. (Harris 1998, 3.12–3.13)



KUVA 17. Ylhäältä syötettävä yhden painevyöhykkeen kiertovesijärjestelmä (Harris 1998, 3.13)

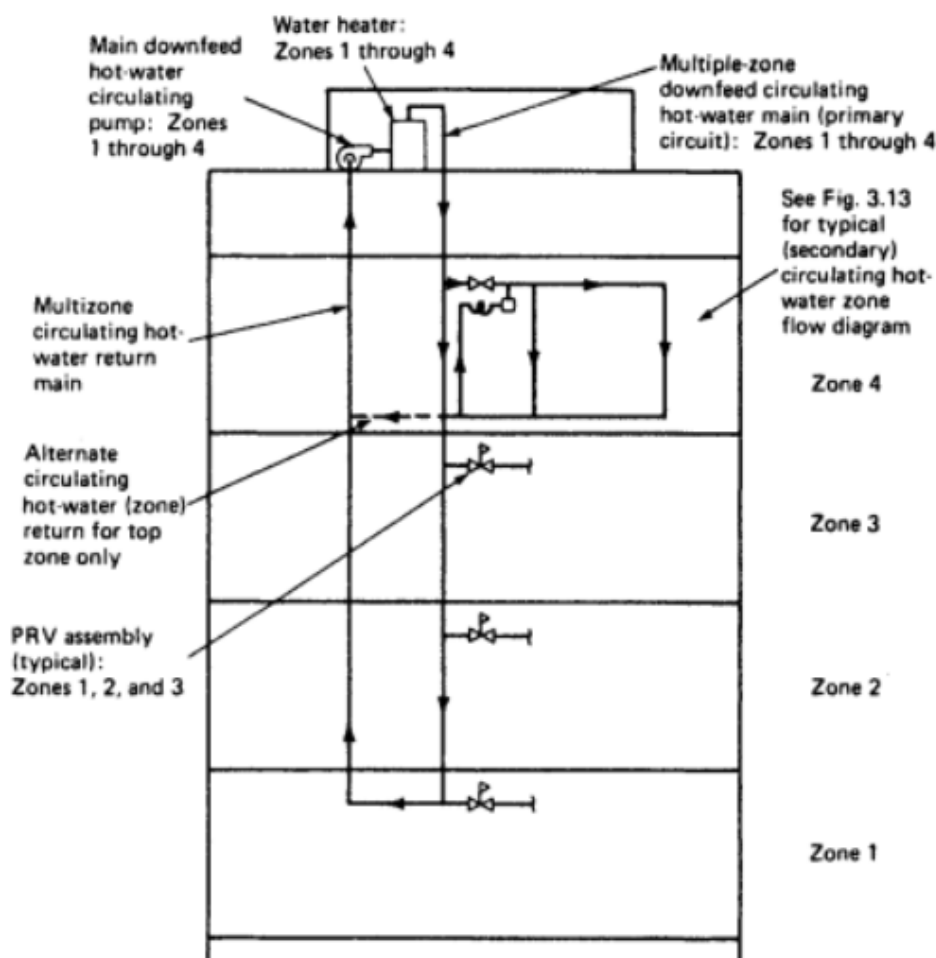
Yhden painevyöhykkeen lämpimän käyttöveden kiertovesijärjestelmä voidaan toteuttaa myös edellä mainittujen alhaalta ja ylhäältä syöttävien järjestelmien yhdistelmänä. Ylhäältä ja alhaalta syötettävien järjestelmien yhdistelmää kannattaa harkita, jos kohteessa on useita lämpimän käyttöveden nousuja lähellä toisiaan. Kuvassa 18 on esitetty yksi esimerkki yhdistetystä järjestelmästä. Sekä lämpimän käyttöveden että kierron rungot on sijoitettu vyöhykkeen toiseksi alimpaan kerrokseen. Lämpimän käyttöveden rungosta otetaan nousu alhaalta syöttävänä ja sen alaosaan asennetaan sulkuventtiili. Kiertojohto palaa runkoon ylhäältä syöttävänä ja sen alaosaan, samaan kerrokseen kuin lämpimän käyttövesinousun sulkuventtiili, asennetaan virtauksensäätöryhmä. Vyöhykkeen alimman kerroksen vesikalusteet syötetään lyhyillä haaroilla ylemmän kerroksen rungoista. Yhdistelmä voidaan toteuttaa myös peilikuvana, jolloin rungot kulkevat vyöhykkeen ylimmässä kerroksessa, jolloin myös nousujen sulkuventtiilit ja virtauksensäätöryhmät sijoitetaan ylimpään kerrokseen. Runkojen sijoitus riippuu vedenlämmittimien sijainnista vyöhykkeessä. (Harris 1998, 3.13–3.14)



KUVA 18. Ylhäältä ja alhaalta syötettävä yhden painevyöhykkeen kiertovesijärjestelmä (Harris 1998, 3.14)

3.2.2 Usean painevyöhykkeen järjestelmät

Lähtökohtaisesti lämpimän käyttöveden järjestelmät pyritään suunnittelemaan vyöhykekohtaisesti, jolloin yhtä vyöhykettä palvelee yksi vedenlämmitin, eikä vyöhykkeiden välillä ole ristiin kytkentöjä. Jos tämä ei ole mahdollista, voidaan kiertovesijärjestelmä toteuttaa usealle painevyöhykkeelle jakamalla se ensiö- ja toisioverkostoihin. Ensiöverkoston kuuluu lämpimän käyttöveden ja kiertojohdon nousut ja toisioverkoston vyöhykkeen sisäinen verkosto nousuista eteenpäin. (Harris 1998, 3.14–3.15)

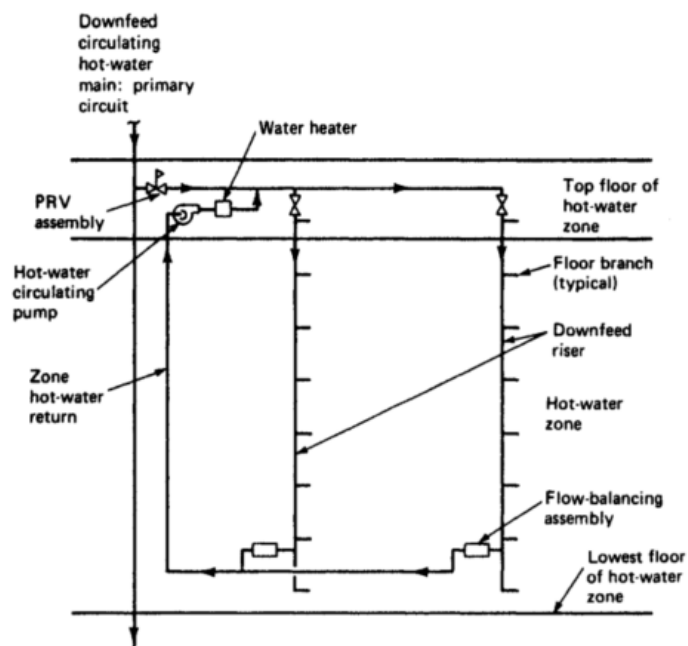


KUVA 19. Ylhäältä syöttävä usean painevyöhykkeen kiertovesijärjestelmä (Harris 1998, 3.16)

Kuvassa 19 on esitetty esimerkki usean painevyöhykkeen ylhäältä syötettävästä järjestelmästä, jossa ylintä vyöhykettä lukuun ottamatta kaikkiin vyöhykkeiden

haaroihin on asennettu paineenalennusventtiilit. Ylimmän vyöhykkeen kierto voidaan toteuttaa suljettuna tai kytkemällä vyöhyke kiertovesirunkoon. Paineenalennusventtiililliset vyöhykkeet ovat suljettuja kiertoja (kuva 20), koska veden kiertäminen takaisin korkeamman paineen kiertovesirunkoon aiheuttaa tasapainotusongelmia verkostoon. Päävedenlämmitin on sijoitettu kaikkien sen palvelevien vyöhykkeiden ylimpään kerrokseen. Lämpimän käyttöveden nousu tuodaan alimman vyöhykkeen ylimpään kerrokseen ja kiertojohto palaa vedenlämmittimelle alhaalta päin syöttävänä. Jokainen toisioverkosto (vyöhyke) on varustettu omalla, usein sähköisellä, vedenlämmittimellään, joka kattaa lämpimän veden kierron lämpöhäviöt järjestelmässä. Vyöhykkeissä, joissa kylmän veden painetta joudutaan alentamaan, tulee myös lämpimään käyttöveteen asentaa paineenalennusventtiili. Niiden toisiopaine asetetaan 34 kPa (5 psig) alemmas kuin kylmän veden paine, jolla estetään lämpimän veden joutuminen kylmän veden verkostoon. (Harris 1998, 3.15–3.16)

Kuvassa 20 on esitetty esimerkki tyypillisestä paineenalennusventtiilillä varustetusta vyöhykkeestä usean vyöhykkeen lämpimän käyttöveden kiertovesijärjestelmässä. Nousut vyöhykkeen sisällä varustetaan sulkuventtiileillä (ylös) ja virtausensäätöryhmillä (alas). Jokaista vyöhykettä palvelee oma kiertovesipumppunsa ja vedenlämmittimensä.



KUVA 20. Usean vyöhykkeen lämpimän käyttöveden kiertovesijärjestelmän vyöhyke (Harris 1998, 3.17)

3.3 Sähköinen saattolämmitys

Sähköistä saattolämmitystä käytetään usein putkien sulanapitoon, mutta sitä voidaan hyödyntää myös pitämään lämpimän käyttöveden lämpötila riittävän korkealla. Järjestelmä toteutetaan itserajoittuvan lämmityskaapelin sekä ACS-30 ohjaus- ja valvontajärjestelmän avulla. Kaapeli asennetaan putken pintaan eristeen alle. (Larkin 2012, 108)

Itserajoittuva lämmityskaapeli säätyy lämmityksen kohteen pintalämpötilan mukaan. Kohteen lämpötilan noustessa kaapeli tuottaa vähemmän lämpöä, ja lämpötilan laskiessa taas enemmän. Kaapelin tehtävänä on korvata lämpimän käyttöveden lämpöhäviöt. (ASPE 2014, 116)

Etuina lämpimän käyttövesijärjestelmän toteuttamisessa on asennuksen ja suunnittelun yksinkertaisuus. Verkostoon ei tarvita kiertopumppuja tai säätöventtiilejä, joka säästää sekä energia- että huoltokustannuksissa. Toisin kuin kiertovesijärjestelmissä, lämmin käyttövesi voidaan pitää koko verkostossa juuri halutussa lämpötilassa sen sijaan, että se lämmitettäisiin verkoston alkupäässä yllilämpöiseksi, jotta lämpötila ei laske alle sallitun verkoston loppupäässäkään. Lisäksi järjestelmässä ei tarvita kiertojohtoa, joten putkistoa joudutaan rakentamaan vähemmän. (Larkin 2012, 110)

4 KÄYTTÖVESIJÄRJESTELMIEN RISKIT

Korkeiden rakennusten käyttövesijärjestelmien suunnittelussa tärkein tavoite on tuottaa kaikille verkoston vesikalusteille riittävät virtaamat sopivalla paineella energia- ja kustannustehokkaasti. Suurimpana haasteena verkoston suunnittelussa on liiallinen paine, joka aiheuttaa mm:

- Putkiston ja varusteiden kulumista
- Vesi-iskuja verkostossa
- Vahingoittaa vesikalusteita
- Ylimääräistä vedenkulutusta
- Veden roiskumista hallitsemattomasti kulutuspisteillä
- Järjestelmän eliniän lyhenemistä (Steele 2015, 147)

Steele (2015, 147–148) mainitsee vyöhykejaon sekä paineenalennusventtiilien asentamisen järjestelmään keskeisenä tapana ratkaista liialliseen paineeseen liittyviä riskejä.

4.1 Materiaalien paineluokat

Suomessa voimassa olevien käyttövesijärjestelmiä koskevien määräysten mukaan vesilaitteiston on kestävä sisäistä painetta vähintään 1000 kPa (Asetus 1047/2017).

Käyttövesijärjestelmissä tyypillisesti käytettävät materiaalit jaetaan kolmeen paineluokkaan, PN10, PN16 ja PN25 (Van der Schee n.d., 89). Käyttövesiverkoston runkolinjojen putkimateriaalina yleensä käytettävä kupari kestää painetta 27-104 baria +20 °C lämpötilassa riippuen putken koosta (Cupori Oy 2013, 3), joten paineluokkien tarkastelu koskee ensisijaisesti muita järjestelmän osia, kuten paineenkorotusasemia, venttiilejä ja lämmönsiirtimiä.

Georgen (2014) mukaan verkostoissa, joissa käytetään paineenalennusventtiilejä, on tavanomaista suunnitella nousulinja korkeamman paineluokan materiaa-

lista kuin paineenalennusventtiilin jälkeinen osa. Hän esittääkin ratkaisuksi ensisijaisesti paineenalennusventtiilien välttämistä, joka tarkoittaa rakennuksen jakamista riittävän moneen vyöhykkeeseen. Toinen vaihtoehto Georgen (2014) mukaan on asentaa paineenalennusventtiilejä sarjaan, jolloin yksittäisen venttiilin yli paine-ero on pienempi ja näin ollen sen pettämisen riski pienenee.

4.2 Takaisinvirtaus

Takaisinvirtaus on käyttövesiverkostossa tapahtuvaa virtausta väärään suuntaan. Takaisinvirtaus on erityisen haitallista silloin, kun virtaava vesi sisältää esimerkiksi kemikaaleja tai bakteereja. (Waters 2018)

Ympäristöministeriön asetus rakennuksen vesi- ja viemärlaitteistoista (Asetus 1047/2017) määrää, että: ”Vesilaitteiston on oltava sellainen, että torjutaan veden takaisinimeytymisestä sekä nesteiden ja kaasujen sisään tunkeutumisesta johtuva pilaantumisvaara.” Siihen, kuinka tällainen vesilaitteisto toteutetaan, asetus ei ota kantaa.

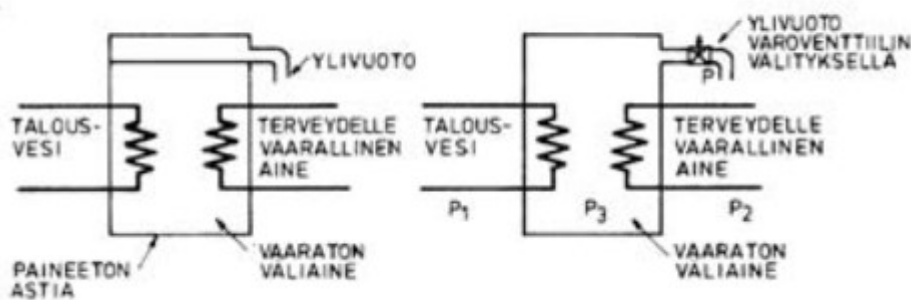
Takaisinvirtausta voi tapahtua kahdesta eri syystä: lappovaikutuksesta tai vastapaineesta. Vastapaineen aiheuttama takaisinvirtaus voi syntyä, jos käyttövesiverkosto on alhaisemmassa paineessa kuin siihen liitetty laite, jolloin korkeammassa paineessa oleva laite työntää vettä käyttövesiverkostoon, jossa on pienempi paine. Korkeissa rakennuksissa vastapaineen aiheuttamaa takaisinvirtausta esiintyy useimmiten paineenkorotusasemien ja kattiloiden liitoksissa. (Waters 2018)

Lappovaikutuksen aiheuttama takaisinvirtaus syntyy käyttövesiverkoston paineen äkillisestä alentumisesta. Verkoston paineen alentuminen voi johtua esimerkiksi kaupungin runkojohtojen korjauksista ja vioista tai noussesta kulutuksesta kaupungin verkostossa. Lappovaikutus voi johtua myös verkoston alimitoitamisesta, jolloin verkoston korkeat virtausnopeudet alentavat paineenkorotusaseaman imupuolen painetta. (Waters 2018)

Saastuneen veden takaisinvirtaus käyttövesijärjestelmään edellyttää käyttövesijärjestelmän liitosta johonkin toiseen järjestelmään. Näitä ovat esimerkiksi kattiloiden ja jäähdytyskoneiden liitokset. (Waters 2018)

Suomen määräysten mukaan vesilaitoksen verkostoon liitetty vesilaitteisto ei saa olla suorassa yhteydessä muusta vesilähteestä vetensä saavaan laitteistoon tai viemärijärjestelmiin (Asetus 1047/2017).

Käyttövesiverkosto voidaan erottaa muista järjestelmistä ilmavälillä tai erottamalla vesipiirit esimerkiksi kierukoiden avulla, kuten kuvassa 21 (Talotekniikkainfo 2019)



KUVA 21. Lämmöntalteenottolaitteen vesipiirien erottamistapoja (Talotekniikkainfo 2019)

Ilmaväli estää saastuneen nesteen virtauksen käyttövesiverkostoon. Ilmaväli on yleisin tapa erottaa käyttövesiverkosto muista järjestelmistä ja sitä käytetäänkin aina kun mahdollista. Pienin sallittu ilmaväli on 20 mm (SFS-EN 1717 2008, 28). Jos kyseessä on loiskiva ja epävakaata vedenpinta, tulee ilmavälin olla vähintään 50 mm. Säiliöissä, joissa on ylivuotoaukko veden pinnankorkeuden rajoittamiseksi, lasketaan ilmaväli ylivuotoaukon yläreunaan. Jos ylivuotoaukko ei ole riittävä tai siinä katsotaan olevan tukkeutumisvaara, lasketaan ilmaväli säiliön yläreunaan saakka. (Talotekniikkainfo 2019)

Jos verkostojen erottaminen ei ole mahdollista, kuten pyykinpesukoneen yhteydessä tapahtuu käyttövesivesi- ja viemäriverkostoille, käytetään tyhjiöventtiilejä (Waters 2018).

4.3 Tyhjiön muodostuminen putkistoon

Korotetun paineen käyttövesiverkostoissa on mahdollista, että järjestelmän toiminnan keskeytymisestä johtuen nousulinjan yläosaan syntyy osittainen tyhjiö. Yleisimpiä järjestelmän toiminnan keskeytyksen aiheuttavia tekijöitä ovat paineenkorotusaseman ohjauslaitteiden sähkövika, keskeytys säiliön vedensyötössä (mikäli paineenkorotusaseman yhteydessä on säiliö) tai paineenkorotusaseman imupuolelle syntyneestä ilmalukosta, jolloin paineenkorotusasema ei toimi suunnitellusti. (Aviva n.d.)

Paineenkorotusjärjestelmän toiminnan palautuessa, virtaama nousujohdossa kasvaa äkillisesti törmäten nousun yläosaan syntyneeseen osittaiseen tyhjiöön. Tämä aiheuttaa virtauksen äkillisen pysähtymisen ja takaisinvirtauksen. Äkillisestä pysähtymisestä aiheutuva paineisku voi aiheuttaa putkiyhteiden murtumista. (Aviva n.d.) Putkiyhteiden murtuminen voi aiheuttaa huomattavia vesivahinkoja rakennuksessa.

Ongelman ehkäisemiseksi suunnittelijan tulee määrittää nousulinjojen yläpäihin tyhjiöventtiilit, jotka estävät osittaisen tyhjiön muodostumisen. Järjestelmäkatkot johtuvat usein paineenkorotusaseman sähköviasta, joten asemat tulisi tarkistaa ja tarvittaessa huoltaa vuosittain, jolloin katkoksia ei pääse syntymään. (Aviva n.d.)

4.4 Kuolleet haarat ja legionellariski

Kuolleella haaralla viitataan vesijohtoverkoston osaan, joka johtaa toiseen osaan verkostoa, kuten vesikalusteelle, mutta jonka vesikaluste on poistettu tai sen käyttö on harvinaista. Kuolleita haaroja syntyy usein verkostoon tehtävien muutosten johdosta, jolloin vesikaluste poistetaan, mutta vesikalusteen kytkentäjohto jätetään kuitenkin paikalleen. (Brodex 2016) Legionella

Tarpeetonta putkistoa tai sen osaa pidetään kriittisenä riskinä lämminvesijärjestelmissä. Veden seisoessa ilman virtausta kuolleessa haarassa, syntyy Legionella-bakteerin kehittymiselle otolliset olosuhteet. (Brodex 2016) Legionella-

bakteeri aiheuttaa hengityselinsairautta, jota kutsutaan legionelloosiksi. Bakteerien optimaalinen elinlämpötila vaihtelee lähteestä riippuen 20°C:n ja 50°C:n välillä, mutta ASPE:n (2014, 109) mukaan kaikki tutkimukset osoittavat bakteerien kuolevan yli 54 °C:n lämpötilassa. Normaaliolosuhteissa bakteerien syntymistä verkostoon ehkäistään kappaleissa 3.1 ja 3.2 esitetyillä järjestelmillä, mutta kuolleiden haarojen aiheuttamaa riskiä ne eivät poista.

Kuolleiden haarojen aiheuttama Legionellariski voidaan luonnollisesti poistaa katkaisemalla kuolleet haarat verkostosta. Jos haaran poistaminen kokonaan ei ole mahdollista, on riskiä mahdollista pienentää katkaisemalla haara niin läheltä jakojohtoa, kuin mahdollista. (Brodex 2016)

4.5 Pumpun kavitointi

Kavitaatiolla tarkoitetaan ilmiötä, jossa liian alhainen nesteen paine pumpun imupuolella aiheuttaa sen höyrystymistä. Imupuolen paine voi pudota esimerkiksi pumpun kierrosnopeuden kasvaessa, jolloin nesteen paine laskee hetkellisesti, ennen virtausnopeuden kasvamista. Neste höyrystyy, jos sen paine putoaa alle höyrystymispaineen. Tällöin nesteeseen syntyy pieniä ilmakuplia, jotka aiheuttavat paineiskuja puhjetessaan. (Tobias 2017)

Puhjetessaan ilmakuplat vahingoittavat pumpun juoksupyörää, joka lyhentää sen käyttöikää. Lisäksi pumpun kavitaatio voi aiheuttaa värähtelyä koko pumpun akselissa, joka vahingoittaa muita järjestelmän komponentteja, ensisijaisesti tiivisteitä ja laakereita. Kavitaatio heikentää myös pumpun toimintaa, jolloin tuotettu paine ja virtaama voivat jäädä suunniteltuja pienemmiksi. Ilmakuplien puhkeaminen voi lisäksi aiheuttaa häiritsevää ääntä ympäristöön. (Tobias 2017)

Pumppujen laitevalmistajat tarjoavat teknisissä tiedoissaan pumpeille NPSH-käyrät. NPSH (Net Positive Suction Head) on pumpun imupuolen vähimmäispaine, jolla vältetään kavitaatio. NPSH-arvo riippuu virtausnopeudesta. Virtauksen kasvaessa NPSH-arvo kasvaa. (Asiaa pumppukäyristä n.d.)

Pumpun kavitointi voidaan estää nostamalla nesteen painetta pumpun imupuolella tai pienentämällä nesteen virtausnopeutta pumpun juoksupyörän läpi, pienentämällä pumpun pyörimisnopeutta, asentamalla pumppu matalammalle tasolle, jolloin korkeampi staattinen paine ehkäisee kavitaatiota tai alentamalla nesteen lämpötilaa, esimerkiksi asentamalla pumppu ennen vedenlämmittintä. Ensimmäinen keino kavitaation ehkäisemiseen on kuitenkin oikeanlaisen pumpun valinta. (Tobias, 2017)

5 TUTKIMUSMENETELMÄT

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää korkean rakennuksen käyttövesijärjestelmien energiankulutusta ja elinkaarikustannuksia sekä vyöhykejaon vaikutusta niihin. Tutkimuksen toteuttamiseksi työssä laskettiin manuaalisesti verkostojen painehäviöt paineenkorotusasemien mitoittamiseksi sekä arvioitiin paineenkorotusasemien kuormitusprofiili, joiden avulla laskettiin järjestelmän energiankulutus ja käyttökustannukset. Investointikustannuksissa huomioitiin järjestelmän sekä tilantarve että laitteiden hankintakustannukset hyödyntäen laitevalmistajien tilavausohjeita ja listahintoja. Huoltokustannukset arvioitiin järjestelmiin liittyvien lähteiden ja samansuuntaisten tutkimuksien pohjalta.

5.1 Tutkittava rakennus

Tutkimus toteutettiin Rambollin suunnittelemaan kohteeseen. Kohde on As Oy Helsingin Redin Majakka/T2, joka on Helsingin keskustaan rakennettava 35 kerroksinen asuintornitalo. Rakennuksen jalustakerroksissa on kauppakeskuksen ja paikoitushallin tiloja, joihin asuintornitalo on yhteydessä hissiaulan ja portaan välityksellä.

Tutkimuksen osalta rakennuksesta tarkastellaan ainoastaan asuinkerrosten kylmävesijärjestelmää. Asuinkerroksia rakennuksessa on 31, joista alimpaan (5.) kerrokseen kuuluu ainoastaan yhteisiä tiloja. Asuinkerroksissa on asuntoja keskimäärin 10/kerros. Kerroskohtaiseksi asukasmääräksi oletettiin 20 tyyppikerroksen (26) huoneistojen kokojen mukaan. Taulukkoon 6 on koottu kohteen tiedot.

TAULUKKO 6. Tutkittavan rakennuksen tiedot

Korkeus	129,7 m
Kerroskorkeus asuinkerroksissa	3,3 m
Kerroksien lkm yht.	35
Järjestelmään kytketyt kerrokset	31
Kerroksen huoneistomäärä	10
Kerroksen asukasmäärä	20
Neliöhinta	7000 €/m

Kuvassa 22 on etualalla tutkimuksessa käytetty Helsingin Redin Majakka ja taustalla toinen Redin torneista, joka on vielä rakennusvaiheessa.



KUVA 22. As Oy Helsingin Redin Majakka (Sairanen 2020)

5.2 Tutkimukseen valittu kylmävesijärjestelmä

Tutkimuksen kylmävesijärjestelmäksi valittiin rinnakkain kytketty vyöhykejakoisen järjestelmä, jonka toimintaperiaate on esitelty kappaleessa 2.4. Tutkimuksessa tarkastellaan kohteen käyttövesijärjestelmän energiankulutusta ja elinkaarikustannuksia jakamalla rakennus kahdesta viiteentoista samankokoiseen vyöhykkeeseen.

Rinnan kytketyssä vyöhykejakoisessa kylmävesijärjestelmässä optimoitavia suureita ovat paineenkorotusasemien lukumäärän ja tilantarpeen lisäksi nousulinjojen vaatima tila ja putkiston investointikustannukset asennuksineen, paineenkorotusasemien energiankulutus, joka riippuu vyöhykejaon mukaisesta toimintapistteestä ja paineenkorotusasemien kuormitusprofiilista, paineenalennusventtiilien hankintakustannus sekä järjestelmän laitteiden huoltokustannukset.

5.3 Käyttökustannukset

Käyttövesijärjestelmän käyttökustannukset muodostuvat pumppujen kuluttamasta sähköenergiasta. Sähköenergiankulutukseen vaikuttaa pumpulta vaadittava nostokorkeus, sähkömoottorin, säätötavan ja pumpun hyötysuhteet sekä kuormitusprofiilin mukaiset käyntitunnit.

5.3.1 Vedenkulutus ja kuormitusprofiili

Paineenkorotusasemien energiankulutuksen laskemiseksi tutkimuksessa määritettiin niiden käyntiajat kuormitusprofiiliin ja Suomen keskimääräisen vedenkulutuksen mukaan.

Suomessa kerrostaloyhtiössä asuvan ihmisen keskimääräinen vedenkulutus on noin 155 litraa päivässä, josta noin 40% eli 62 litraa on lämmintä käyttövettä (Motiva n.d.). Kertomalla keskimääräinen asukasluvumäärä kerroksessa vyöhykkeeseen kuuluvien kerrosten määrällä, saatiin vyöhykkeen päivittäinen vedenkulutus.

Paineenkorotusasemien käyntitunnit jaettiin eri pyörimisnopeuksille Grundfosin laitevalintaohjelman vakiokuormitusprofiilin mukaisilla suhteilla. Suhteet on esitetty taulukossa 7.

TAULUKKO 7. Paineenkorotusasemien pyörimisnopeuksien suhteelliset käyntitunnit (Grundfos laitevalintaohjelma n.d.)

Pumpun nopeus	Osuus kokonaistunneista
100%	5%
75%	9%
55%	14%
35%	27%
12%	45%

Ahmedin, Pylsyn & Kurnitskin (2016, 525–526) tekemän tutkimuksen mukaan suuremman ihmismäärän lämpimän veden kulutusprofiili on tasaisempi kuin pienen, jossa taas yksittäiset huippukulutuksen piikit ovat suhteellisesti suurempia. Tutkimuksen tulos oletettiin tässä työssä päteväksi myös kylmän veden kulutukselle, koska useimmat vesikalusteet käyttävät sekä kylmää että lämmintä vettä.

Näin ollen vyöhykekoon kasvaessa paineenkorotusasemien käyntituntien oletettiin myös kasvavan, joten eri vyöhykejaoille määritettiin eri käyntitunnit Grundfosin vakiokuormitusprofiilin, vyöhykkeen päivittäisen vedenkulutuksen ja mitoitusvirtaaman avulla. Affiniteetilakien mukaan (kaava 3) pumpun tuottama virtaama muuttuu samassa suhteessa pumpun kierrosnopeuden kanssa, jonka kautta tutkimuksessa määritettiin osatehojen tuottamat virtaamat. Käyntituntien laskemiseksi muuttujat koottiin yhteen kaavaan 4.

$$t_p = \frac{n_k \cdot n_{as} \cdot Q \cdot f_{tp} \cdot 365}{q_v \cdot r_p \cdot 3600} \quad (4)$$

jossa:

n_k = vyöhykkeen kerroksien lukumäärä

n_{as} = asukkaiden määrä kerroksessa

Q = vedenkulutus päivässä (l/hlö)

F_{tp} = pumpun kierrosnopeuden osuus kokonaiskäyntitunneista (%/100)

q_v = vyöhykkeen mitoitusvirtaama (l/s)

r_p = pumpun pyörimisnopeus (%/100)

Esimerkiksi kahden vyöhykkeen ratkaisussa, jossa paine jouduttiin korottamaan erikseen lämpimälle ja kylmälle vedelle, alemman vyöhykkeen kylmän veden paineenkorotusasema käy täydellä pyörimisnopeudella kaavan neljä mukaisesti

$$t_p = \frac{16 \text{ krs} \cdot 20 \text{ hlö/krs} \cdot 93 \text{ l/hlö} \cdot 0,05 \cdot 365}{4,66 \text{ l/s} \cdot 1 \cdot 3600} = 32,4 \text{ h/a}$$

5.3.2 Mitoitusvirtaamat vyöhykkeissä

Rakennuksen mitoitusvirtaamat määritetään tutkimuksessa kerroskohtaisesti Rakennusmääräyskokoelman osan D1 mukaisesti. Mitoitusvirtaaman määrittämiseksi vesikalusteiden normivirtaamat (taulukko 8) summataan.

TAULUKKO 8. Vesikalusteiden normivirtaamat (RakMK D1 2007, 35)

Vesipiste ¹⁾	Normivirtaama q_n , dm ³ /s	
	Kylmä vesi	Lämmin vesi
Astianpesuallas	0,2	0,2
Astianpesukone kotitaloudessa	0,2	(0,2)
Pesuallas	0,1	0,1
Suihku	0,2	0,2
Kylpyamme	0,3	0,3
WC-istuin	0,1	-
Pesukone kotitaloudessa	0,2	-
Pesukone talopesulassa tai vastaavassa	0,4	-
Vesiposti pientalossa, DN 15	0,2	-
Vesiposti kerrostalossa, DN 20	0,4	-
Laskuhana, tasapohja-allas	0,2	0,2
Pesuistuin	0,1	0,1
Urinaalin huuhteluventtiili	0,4	-
Urinaalin huuhteluhana	0,2	-
Ryhmäpesuallas (n kpl)	0,07 + 0,03 n	0,07 + 0,03 n
Sarjaan kytketyt urinaalit (n kpl)	0,14 + 0,06 n	-
Ryhmäsuihku (n kpl)	0,14 n	0,14 n
Teollisuus ym. laitteet	Lask erikseen	-

Tutkimuksessa käytettiin kohteen suunnittelijan, Jussilan (2016) laskemia kerroskohtaisia normivirtaamien summia. Jussilan laskelmien ajantasaisuus tarkistettiin pistotarkastuksin kohteen suunnitelmista ennen käyttöä. Normivirtaamien summat on esitetty taulukossa 9.

TAULUKKO 9. Referenssikohteen kerroskohtaiset normivirtaamien summat (Jussila 2016, muokattu)

Kerros	Kerrostyyppi	q_{N1} (dm ³ /s)		
		KV	LV	YHT
35	Asunnot	3,8	2,9	6,7
34	Asunnot	4,2	3,3	7,5
33	Yhteistilat	5,2	3,9	9,1
32	Asunnot	9,4	6,3	15,7
31	Asunnot	9,4	6,3	15,7
30.-6.	Asunnot	10,0	6,5	16,5
5.	Yhteistilat	6,2	5,5	11,7

Vyöhykkeiden mitoitusvirtaamat laskettiin rakennusmääräyskokoelman osan D1 (2007, 36) mukaisella kaavalla (5).

$$q = q_{N1} + \Theta(Q - q_{N1}) + A(q_m \cdot \Theta)^{0,5} \cdot (Q - q_{N1})^{0,5} \quad (5)$$

jossa:

q = jakojohdon mitoitusvirtaama (dm³/s)

q_{N1} = suurin normivirtaama mitoitettavassa putkessa (dm³/s)

q_m = kyseessä olevan venttiin keskimääräinen virtaama (dm³/s)

Θ = todennäköisyys, että normivirtaama q_{N1} on vesikalusteella käytössä huippukulutuksen aikana

Q = liitettyjen vesipisteiden normivirtaamien summa (dm³/s)

A = kerroin, joka ottaa huomioon, kuinka usein mitoitusvirtaama ylitetään (RakMK D1 2007)

Asuin-, toimisto-, koulu-, hotelli- sekä sairaalarakennuksissa ja vastaavissa rakennuksissa laskennassa ohjeistetaan käytettäväksi taulukon 10 mukaisia arvoja.

TAULUKKO 10. Laskennassa käytettävät arvot (RakMk D1 2007, 36)

q_{N1}	0,2 dm ³ /s (ei kylpyammetta) / 0,3 dm ³ /s (kylpyamme)
q_m	0,2 dm ³ /s
Θ	0,015
A	3,1

Kahden vyöhykkeen jaossa alemman vyöhykkeen paineenkorotus toteutettiin erikseen kylmälle ja lämpimälle vedelle, joten kylmän veden mitoitusvirtaamaksi saatiin kaavalla 5

$$q = 0,2 \frac{\text{dm}^3}{\text{s}} + 0,015 \cdot \left(156,2 \frac{\text{dm}^3}{\text{s}} - 0,2 \frac{\text{dm}^3}{\text{s}} \right) + 3,1 \cdot \left(0,2 \frac{\text{dm}^3}{\text{s}} \cdot 0,015 \right)^{0,5} \cdot \left(156,2 \frac{\text{dm}^3}{\text{s}} - 0,2 \frac{\text{dm}^3}{\text{s}} \right)^{0,5} = 4,66 \frac{\text{dm}^3}{\text{s}}$$

5.3.3 Tarvittavat paineenkorotukset vyöhykkeissä

Sopivan paineenkorotusaseman valintaan vaikuttaa mitoitusvirtaaman lisäksi tarvittava paineenkorotus. Robinsonin (2017) mukaan tarvittavan paineenkorotuksen määrittäminen voidaan jakaa seuraaviin vaiheisiin:

1. Määritetään verkoston korkeus (m) ja hydrostaattinen paine (kPa)
2. Määritetään verkoston painehäviöt (kPa)
3. Määritetään kauimmaisen vesikalusteen pienin sallittu paine (kPa)
4. Määritetään pienin kunnan verkostosta saatava paine (kPa)

Tutkimuksen kohteessa verkoston keskimääräinen painehäviö, kauimmaisen vesikalusteen pienin sallittu paine, pisin vaakasiirto ja kunnan verkoston pienin paine ovat vakioita ja ne on esitetty kappaleen lopussa taulukossa 11.

Painehäviöiden määrittämiseksi ensin on laskettava kohdan 1 mukaisesti verkoston hydrostaattinen paine. Hydraulikan perusteet (2002, 8) joka voidaan laskea verkoston korkeuden avulla kaavalla:

$$p_h = \rho \cdot g \cdot h \quad (6)$$

jossa:

p_h = hydrostaattinen paine (kPa)

ρ = nesteen tiheys (kg/m³)

g = putoamiskiikkyvyys (9,81 m/s²)

h = verkoston korkeus (m)

Kahden vyöhykkeen jaon tilanteessa alemman vyöhykkeen hydrostaattiseksi paineeksi laskettiin kaavalla 6

$$p_h = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 51,2\text{m} = 502272 \text{ Pa} = 502,3 \text{ kPa}$$

Hydrostaattisen paineen laskemisen jälkeen paineenkorotusaseman mitoittamiseksi tulee Robinsonin (2017) mukaan laskea verkoston painehäviöt. Kertavastuksien, kuten venttiilien ja putkiyhteiden painehäviöiden ekvivalentiksi putkipituudeksi voidaan olettaa 5% putkilinjan pituudesta, joka voidaan laskea kaavalla 7.

$$L_{ekv,\lambda} = (L_V + L_H) \cdot 0,05 \quad (7)$$

jossa:

$L_{ekv,\lambda}$ = kertavastuksien painehäviöiden ekvivalentti putkipituus (m)

L_V = nousulinjan pituus (m)

L_H = pisin vaakalinja noususta (m)

Tutkimuksessa kaikkien kerroksien pisimpänä vaakasiirtona käytettiin tyypikerroksen (26) pisintä vaakasiirtoa, joka oli 33 metriä. Kahden vyöhykkeen jaossa alemman vyöhykkeen verkoston kertavastuksien painehäviöiden ekvivalentiksi putkipituudeksi saadaan kaavaan 7 sijoitettuna

$$L_{ekv,\lambda} = (51,2 \text{ m} + 33 \text{ m}) \cdot 0,05 = 4,21 \text{ m}$$

Suoran putken kitkapainehäviöihin vaikuttaa Robinsonin (2017) mukaan putken pituus, halkaisija ja virtaama. Useimmiten kitkapainehäviöt käyttövesiputkistoissa ovat 0,4-1,0 kPa/m, joka tarkoittaa ekvivalenttina putkipituutena noin 4-10 metriä 100 metrin linjassa. Kaavalla 8 saadaan verkoston kertavastuksien ja kitkapainehäviöiden yhteinen painehäviö metreinä.

$$L_{ekv,fr} = \frac{(L_{ekv,\lambda} + L_V + L_H) * L_{ekv,R}}{L_H} \quad (8)$$

jossa:

$L_{ekv,fr}$ = kertavastuksien ja kitkapainehäviöiden ekvivalentti putkipituus (m)

$L_{ekv,R}$ = kitkapainehäviöiden ekvivalentti putkipituus sadalla metrillä (m)

Sijoittamalla kaavaan 8 kahden vyöhykkeen jaolla alemman vyöhykkeen putkipituudet, kaavalla 7 laskettu kertavastuksien ekvivalentti putkipituus ja keskimääräinen painehäviö putkistossa (taulukko 11) ekvivalenttina putkipituutena sadalle metrille, saadaan kertavastuksien ja kitkapainehäviöiden yhteiseksi ekvivalentiksi putkipituudeksi

$$L_{ekv,fr} = \frac{(4,21 \text{ m} + 51,2 \text{ m} + 33 \text{ m}) * 6 \text{ m}}{33 \text{ m}} = 16,07 \text{ m}$$

Metrit voidaan muuntaa kilopascaliksi sijoittamalla putkiston painehäviö metreinä korkeuden tilalle kaavaan 6. Muunnettaessa ekvivalentteja putkipituuksia kilopascaliksi, vaihdetaan tässä työssä alaindeksiksi selkeyden vuoksi *fr*.

$$p_{fr} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 16,07 \text{ m} = 157647 \text{ Pa} = 157,6 \text{ kPa}$$

Painehäviöiden määrittämisen jälkeen on selvitettävä kauimmaisen vesikalusteen pienin sallittu paine sekä pienin kunnan verkostosta saatava paine. Robinsonin (2017) mukaan pienin sallittu paine vesikalusteella on useimmiten 135-275 kPa (20-40 psi).

Robinsonin (2017) mukaa verkoston painehäviöiden määrittämisen jälkeen tarvittava paineenkorotus voidaan laskea lisäämällä painehäviöihin vesikalusteen minimipaine ja vähentämällä summasta pienin kunnan verkostopaine. Kaava X on muokattu versio tästä, jossa huomioidaan lisäksi lämmönsiirtimen sekä pää- ja huoneistovesimittarin painehäviö.

$$p_{PKA} = p_{st} + p_{fr} + p_{vk,min} + p_{pvm} + p_{hvm} + p_{ls} - p_{vl,min} \quad (9)$$

jossa:

p_{PKA} = paineenkorotusaseman paineenkorotus (kPa)

p_{st} = hydrostaattinen paine (kPa)

p_{fr} = verkoston painehäviöt (kPa)

$p_{vk,min}$ = vesikalusteen pienin sallittu paine (kPa)

p_{pvm} = päävesimittarin painehäviö (kPa)

p_{hvm} = huoneistokohtaisen vesimittarin painehäviö (kPa)

p_{ls} = lämmönsiirtimen painehäviö (kPa)

$p_{vl,min}$ = kunnan verkoston alin paine (kPa)

Päävesimittarin painehäviöksi valittiin laskelmiin 25 kPa, joka on referenssikohteeseen sopivan noin 40 m³/h jatkuvan virtaaman DN50 vesimittarin painehäviö (Koka.fi n.d.) ja huoneistokohtaisen vesimittarin painehäviöksi 15 kPa, joka on DN15 vesimittarin painehäviö huoneiston tyypillisellä mitoitusvirtaamalla 1,22 l/s (GSD-RFM tekniset tiedot n.d.) Lämmönsiirtimien toisiopuolen painehäviönä käytetään kaukolämmitystä koskevien määräyksien mukaista maksimia, joka on 50 kPa (Määräykset ja ohjeet K1/2013, 9). Kunnan verkoston minimipaineena käytettiin vesilaitoksen kohteelle ilmoittamaa painetta, joka on 350 kPa. Tutkimuksessa käytetyt arvot on koottu taulukkoon 11.

TAULUKKO 11. Paineenkorotuksen laskennassa käytettävät vakiot

Keskimääräinen kitkapainehäviö putkistossa	0,6 kPa/m
Vesikalusteen pienin sallittu paine	200 kPa
Verkoston pisin vaakasiirto	33 m
Kunnan verkoston pienin paine	350 kPa
Päävesimittarin painehäviö	25 kPa
Huoneistokohtaisen vesimittarin painehäviö	15 kPa
Lämmönsiirtimen painehäviö	50 kPa

Sijoittamalla kaavaan 9 kahden vyöhykkeen jaon alemman vyöhykkeen lasketut arvot ja taulukosta 11 tarvittavat vakiot, saadaan vyöhykkeen lämpimän veden paineenkorotusaseman paineenkorotukseksi:

$$p_{PKA} = 502,3 \text{ kPa} + 157,6 \text{ kPa} + 200 \text{ kPa} + 25 \text{ kPa} + 15 \text{ kPa} \\ + 50 \text{ kPa} - 350 \text{ kPa} = 600 \text{ kPa}$$

5.3.4 Paineenkorotusasemien energiankulutus

Pumpun energiankulutukseen vaikuttaa tuotettava tilavuusvirta ja paineenkorotus, nesteen tiheys, pumpun hyötysuhde ja pumpun käyntiaika. (Motiva 2011, 14) Kaavassa 10 on esitetty kaava pumpun tarvitseman tehon laskemiseksi.

$$P_2 = \frac{\rho \cdot g \cdot q_v \cdot h}{\eta_p} \quad (10)$$

jossa:

P_2 = pumpun akseliteho	(W)
ρ = pumpattavan nesteen tiheys	(kg/m ³)
g = putoamiskiihtyvyys	(m/s ²)
q_v = tilavuusvirta	(m ³ /s)
h = nostokorkeus	(m)
η_p = pumpun hyötysuhde	(%/100)

Pumpun ottama sähköteho voidaan taas laskea kaavan 11 avulla

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta_m \cdot \eta_s} \quad (11)$$

jossa:

P_1 = pumpun ottama sähköteho (W)

P_2 = pumpun akseliteho (W)

η_m = sähkömoottorin hyötysuhde (%/100)

η_s = säädön hyötysuhde (%/100)

Tutkimuksessa Motivan (2011, 14) mukaiset kaavat yhdistettiin ja erilliset hyötysuhteet korvattiin paineenkorotusaseman kokonaishyötysuhteilla (taulukko 12). Näin ollen pumpun ottaman sähkötehon kaavaksi muodostui

$$P_1 = \frac{\rho \cdot g \cdot q_v \cdot h}{\eta_{kok}} \quad (12)$$

jossa:

η_{kok} = paineenkorotusaseman kokonaishyötysuhde

Tutkimuksessa laskettiin paineenkorotusasemien energiankulutus viidelle eri osateholle. Hyötysuhteina käytettiin Grundfosin valintaohjelmalla tehtyjen laitevalintojen mukaisten kokonaishyötysuhteiden keskiarvoja Hydro Multi-E -paineenkorotusasemille. Käytetyt hyötysuhteet on esitetty taulukossa 12.

TAULUKKO 12. Laskennassa käytetyt paineenkorotusasemien kokonaishyötysuhteet (Grundfos laitevalintaohjelma n.d.)

Pumpun pyörimisnopeus (%)	Kokonaishyötysuhde (%)
100	48
75	46
55	50
35	44
12	25

Sijoittamalla kaavaan 12 kahden vyöhykkeen jaon alemman vyöhykkeen kylmän veden paineenkorotusaseman muuttujat, saadaan pumpun ottamaksi sähkötehoaksi täydellä nopeudella:

$$P_1 = \frac{1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 4,66 \frac{l}{s} \cdot 61,1 m}{0,48} = 5819 W$$

Pumpun vuosittainen energiankulutus saadaan kertomalla kaavalla 12 laskettu sähköteho pumpun vuotuisilla käyntitunneilla kaavan 13 mukaisesti

$$E_p = \frac{P_1 * t_p}{1000} \quad (13)$$

jossa:

E_p = pumpun kuluttama energia vuodessa (kWh)

P_1 = pumpun ottama sähköteho (W)

t_p = pumpun vuosittaiset käyntitunnit (h)

Sijoittamalla kaavaan 13 kaavoilla 4 ja 12 lasketut käyntitunnit ja pumpun ottama sähköteho saatiin kahden vyöhykkeen jaon alemman vyöhykkeen kylmän veden paineenkorotusaseman täyden pyörimisnopeuden vuotuisiksi energiankulutukseksi:

$$E_p = \frac{5819 \text{ W} * 32,4 \frac{\text{h}}{\text{a}}}{1000} = 188,5 \text{ kWh/a}$$

5.4 Investointikustannukset

Käyttövesijärjestelmän investointikustannukset muodostuvat paineenkorotus- asemista, lämmönsiirtimistä, paineenalennusventtiileistä sekä putkistosta ja sen varusteista. Lisäksi järjestelmän investointikustannuksissa huomioidaan sen tilantarve.

5.4.1 Paineenkorotusasemat

Paineenkorotusasemien hankintahinnaksi arvioitiin 10 000€ Grundfosin laitevalintaohjelman avulla eri toimintapisteille sopivien Hydro Multi-E paineenkorotus- asemien listahintojen keskiarvona.

5.4.2 Lämmönsiirtimet

Lämmönsiirtimien investointikustannuksiksi arvioitiin asennuksineen 1500€ per siirrin. Arviointi perustuu suurimman yksittäisen lämmönsiirtimen hankintahintaan, joka oli teholtaan 730 kW. Hinta haettiin Danfossin XB59M-1 80 lämmönsiirtimelle, jonka verollinen hinta on noin 960€ (Sanel.lv n.d.) Pienemmissä vyöhykkeissä yksittäisten lämmönsiirtimien hinta on pienempi kuin vertailuarvo, mutta sen ei oleteta vaikuttavan oleellisesti tutkimuksen lopputulokseen. Hinnassa on huomioitu, että lämmönjakokeskuksiin tulee 2-3 siirrintä.

5.4.3 Teknisen tilan tarve

Tutkimuksessa järjestelmän teknisen tilan tarve huomioitiin investointikustannuksena. Jokainen painevyöhyke vaatii oman 1-2 paineenkorotusasemaa, yhden nousulinjan sekä oman lämmönsiirtimen.

Teknisen tilan tarpeen luoma kustannus arvioitiin kertomalla järjestelmän vaatimat neliöt taulukossa 6 esitetyn referenssikohteen keskimääräisen neliöhinnan mukaan. Paineenkorotusasemille, lämmönsiirtimille ja nousulinjoille arvioitiin tarvittavat tilat osakohtaisesti. Paineenkorotusasemat ja lämmönsiirtimet tarvitsevat tilaa ainoastaan yhdessä kerroksessa rinnan kytketyssä järjestelmässä, mutta nousulinjojen tilantarve kerrottiin vyöhykkeittäin siihen kuuluvien kerroksien määrällä.

Hankintahinnan tavoin myös paineenkorotusaseman koko ja näin ollen tilantarve vaihtelee sen mitoittavan toimintapisteen mukaan. Grundfosin laitevalintaohjelmasta haettujen paineenkorotusasemien koot vaihtelevat 0,6 m² ja 0,8 m² välillä (Grundfos Product Center n.d.), joten tutkimuksen yksinkertaistamisen vuoksi laskennallisena kokona käytettiin 0,7 m². Lisäksi paineenkorotusasema tarvitsee eteen ja sivuille metrin vapaata huoltotilaa (Hydro Multi-E Asennus- ja käyttöohjeet 2015, 5). Lämmönjakokeskusten tilantarve arvioitiin siirrinkohtaisesti jakamalla rakennuksen kaukolämmitystä koskevien määräysten ja ohjeiden (K1/2013, 4) mukainen kolmen siirtimen keskuksen 2,5 m² tilantarve tasan siirtimille. Taulukossa 13 on esitetty laitteiden tilantarpeet.

TAULUKKO 13. Järjestelmän osien tilantarpeet

Järjestelmän osa	A (m ² /yksikkö)
Paineenkorotusasema	0,7
Paineenkorotusaseman huoltotila	2,5
Lämmönsiirtimet	0,8
Nousulinja	0,1

5.4.4 Paineenalennusventtiilit

Tutkimuksessa paineenalennusventtiilit suunniteltiin asennettaviksi Ympäristöministeriön asetuksen (Asetus 1047/2017) mukaisesti jakojohtoihin, joissa paine on ylittää 500 kPa. Kylmään veteen paineenalennusventtiilit asennetaan kerroskohtaisesti ja lämpimään veteen huoneistokohtaisesti.

Paineenalennusventtiileiden hintatietoina käytettiin LVI-Dahlin hinnaston mukaisia Oraksen 4330 DN20 vakiopaineventtiilin hintaa.

TAULUKKO 14. Paineenalennusventtiilien hinta (Oras n.d., Dahl n.d.)

Malli	DN	Maksimivirtaama (l/s)	Hinta €/kpl (ALV 24%)
Oras 4330	20	0,8	218

5.4.5 Putkisto

Tutkimuksessa putkiston asennuksen hinta arvioitiin talotekniikka-alan työehtosopimuksessa esitettyjen juotosliitoksilla tehtävien kupariputkien metriasennushintojen keskiarvona (taulukko 15). Tutkimuksessa ei huomitu kerroksien hajotuksia, koska ne eivät riipu vyöhykejaosta.

TAULUKKO 15. Kupariputkien asennushinnat (LVI-TU ry & Rakennusliitto ry 2018, 106, muokattu)

Ulkohalkaisija Du (mm)	Kupariputket sisälle (NH/m)
-22	0,38
-35	0,43
-54	0,50
Keskiarvo	0,44

Putkistojen hankintahintana tutkimuksessa käytettiin Dahlin hinnaston mukaisien hintojen keskiarvoja. Keskiarvot laskettiin nousulinjoissa käytettävien putkikokojen mukaan, koska kerroksien hajotuksia ei tutkimuksessa huomioida.

TAULUKKO 16. Cupori L3M kovien kupariputkien hinnat ALV 24% (Dahl n.d., muokattu)

Ulkohalkaisija Du (mm)	Hinta (€/m)
54	67,50
42	52,70
35	42,70
28	26,50
22	17,10
Keskiarvo	41,30

Tutkimuksessa käytettävä putkiston hinta on asennuksen ja putkien keskiarvojen summa. Putkiston hankintakustannus koostuu näin ollen lämmin-, kylmä- ja kiertovesijohtojen nousujen asennus- ja materiaalikustannuksista.

5.5 Huoltokustannukset

Lämmönjakokeskusten huoltokustannuksiksi arvioitiin jokaista lämmönsiirrintä kohden 12,5€ vuodessa. Lämmönsiirtimien säännölliset huoltokustannukset muodostuvat määräaikaishuolloista, joihin kuuluu:

- Lianerottimen puhdistus tarvittaessa
- Tulo- ja menolämpötilojen suunnitelmienmukaisuuden tarkistus
- Säätlaitteen viritys
- Jäähtymän vaatimustenmukaisuuden tarkistus
- Paisunta-astian esipaineen tarkistus
- Pumpun toimintapisteen tarkistus (Gebwell n.d., 5)

Tutkimuksessa oletettiin, että lämmönjakokeskusten määräaikaishuolto suoritetaan kerran kahdessa vuodessa ja työn suorittaja veloittaa tunnin kahden siirtimen lämmönjakokeskuksen tarkistuksesta.

Paineenkorotusasemien huoltokustannuksiksi arvioitiin elinkaaren ajalle 50% paineenkorotusaseman investointikustannuksista. Putkiston ja paineenalennusventtiilien elinkaaren huoltokustannuksiksi arvioitiin 5% niiden investointikustannuksista. (Nørgaard & Nielsen n.d., 6)

5.6 Elinkaarikustannuslaskenta

Hara-Lindströmin (2001, 57) mukaan elinkaarikustannuslaskelmat, eli LCC-laskelmat (Life Cycle Cost) tarkastelevat laitteen tai järjestelmän koko elinkaaren aikaisia kustannuksia valmistuksesta käytön poistamiseen. Laskelmien avulla vertaillaan kahta tai useampaa vaihtoehtoa.

5.6.1 Laskennassa käytetyt arvot

Elinkaarilaskelmien toteuttamiseksi tutkimuksessa selvitettiin sähkön hinta, odotettavissa oleva sähkön hinnan nousu, nimelliskorko sekä inflaatio. Euroopan keskuspankin (2016) nimelliskorko on se korko, joka merkitään lainasopimukseen. Koska nimelliskorko ei huomioi ostovoiman heikentymistä, käytettiin tutkimuksessa reaalikorkoa, joka voidaan laskea Valtiokonttorin (2020) mukaan kaavalla 14.

$$r_f = \frac{i - f}{1 + \frac{f}{100}} \quad (14)$$

jossa:

r_f = reaalikorko inflaation suhteen (%)

i = nimelliskorko (%)

f = inflaatio (%)

Sijoittamalla kaavaan 14 tutkimuksessa käytetyt inflaation ja nimelliskoron arvot, saadaan reaalikoroksi inflaation suhteen

$$r_f = \frac{2\% - 1\%}{1 + \frac{1\%}{100}} = 0,99 \%$$

Sijoittamalla kaavaan inflaation tilalle odotettavissa oleva energian hinnan nousu, voidaan kaavalla 14 laskea reaalikorko energian hinnan nousun suhteen.

Sähkön hinta muodostuu sen siirrosta, kulutuksesta ja veroista. Sähkön kokonaishinnaksi tutkimukseen arvioitiin 11,84 snt/kWh, josta siirron osuus on 4,07 snt/kWh (Helen Sähköverkko Oy 2018), käytön osuus 4,98 snt/kWh (Helen Oy n.d.) ja verojen osuus 2,79 snt/kWh (Helen Sähköverkko Oy 2018). Tutkimuksessa käytetty sähkön pyöristetty hinta on esitetty taulukossa 17.

Inflaationa käytettiin vuoden 2019 keskimääräistä inflaatiota, joka on 1,0 % (Danske Bank 2020).

Energian hinnan nousu arvioitiin Suomen Tuulivoimayhdistyksen (2016, 27) nykypolitiikalla simuloiman sähkön hintakehityksen mukaan tutkimusvuodesta (2020) elinkaarikustannusten laskentajakson loppuun (2040).

Järjestelmien elinkaarikustannusten laskenta-ajaksi valittiin paineenkorotusasemien keskimääräisen käyttöiän perusteella 20 vuotta, joka on RT-kortin 18-10922 (2008, 20) mukaan paineenkorotusaseman yläraja rasisluokassa 1 ja alaraja rasisluokassa 2.

TAULUKKO 17. Elinkaarilaskennassa käytetyt arvot

Energian hinta	12 snt/kWh
Energian hinnan nousu	3,14 %
Inflaatio	1,0 %
Nimelliskorko	2,0 %
Reaalikorko r_r	0,99 %
Reaalikorko r_e	-1,1 %
Laskenta-ajanjakso	20 vuotta

5.6.2 Laskentamenetelmät

LCC-laskennassa huomioidaan järjestelmän investointi-, energia-, huolto- sekä jäännösarvokustannukset. Investointikustannuksissa huomioidaan järjestelmään kuuluvien laitteiden hinnat asennuskuluineen. Lisäksi investointikustannuksissa huomioidaan mahdolliset kuljetuskulut. (Hara-Lindström 2001, 58–60)

Energia- eli käyttökustannukset ovat järjestelmän käytöstä aiheutuvia kuluja. Käyttövesijärjestelmän vyöhykejaon optimoinnin kannalta käyttökustannukset muodostuvat paineenkorotusasemien sähkönkulutuksesta. Vuosittain toistuvien käyttökustannusten nykyarvo voidaan Sirenin (2015, 7) mukaan laskea kaavalla 15.

$$K_{NA} = K \cdot \frac{(1+r)^n - 1}{r \cdot (1+r)^n} \quad (15)$$

jossa:

K_{NA} = Kustannuksen nykyarvo (€)

K = Vuosittain toistuva kustannus (€)

r = reaalikorkokanta (%/100)

n = laskentajakson pituus (a)

Sijoittamalla kaavaan 15 kahden vyöhykkeen jaon alemman vyöhykkeen energiankulutus sekä taulukon 17 arvot, saadaan järjestelmän energiakustannusten nykyarvoksi kaavalla 15

$$Q_{NA} = 8741 \text{ kWh} \cdot 0,12 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \cdot \frac{(1 - 0,011)^{20} - 1}{-0,0011 \cdot (1 - 0,011)^{20}} = 23610 \text{ €}$$

Huoltokustannukset koostuvat järjestelmän ylläpitokustannuksista, joihin sisältyy kuluvien osien vaihdot ja korjaukset (Hara-Lindström 2001, 58–59). Huoltokustannusten nykyarvo voidaan laskea energiakustannusten nykyarvon tavoin kaavalla 15, jolloin kahden vyöhykkeen jaon alemman vyöhykkeen

Sijoittamalla kaavaan 16 kahden vyöhykkeen jaon alemman vyöhykkeen vuosittain toistuvat huoltokustannukset saadaan huoltokustannusten nykyarvoksi

$$HK_{NA} = 676 \frac{\text{€}}{\text{a}} \cdot \frac{(1 + 0,0099)^{20} - 1}{0,0099 \cdot (1 + 0,0099)^{20}} = 12\,211 \text{ €}$$

Hara-Lindströmin (2001, 58) mukaan järjestelmän kokonaisenergiakustannukset muodostuvat investointikustannusten, energiakustannusten nykyarvon, huoltokustannusten nykyarvon ja jäännösarvokustannuksen nykyarvon summasta. Tutkimuksessa jätetään huomioimatta järjestelmien jäännösarvokustannukset, koska niiden määrittäminen on epävarmaa, eikä niiden huomioiminen näin ollen lisää tutkimuksen arvoa. Ilman jäännösarvokustannuksia elinkaarikustannukset voidaan laskea kaavalla 17.

$$LCC_{tot} = I + Q_{NA} + HK_{NA} \quad (17)$$

jossa:

I = investointikustannus (€)

Q_{NA} = energiakustannusten nykyarvo (€)

HK_{NA} = huoltokustannusten nykyarvo (€)

6 TULOKSET

Työssä tutkittiin korkean rakennuksen käyttövesijärjestelmän vyöhykejaon vaikutusta järjestelmän energiankulutukseen ja elinkaarikustannuksiin. Kappaleessa 6.1 on esitetty tutkimuksen tulokset ja kappaleessa 6.2 herkkyystarkastelujen tuloksia.

6.1 Energiankulutus ja elinkaarikustannukset

Tutkimuksen tulokset ”Tutkimusmenetelmät” -kappaleessa esitellyillä arvoilla on esitetty taulukoissa 18 ja 19 sekä kuviossa 1.

TAULUKKO 18. Elinkaarilaskennan tulokset

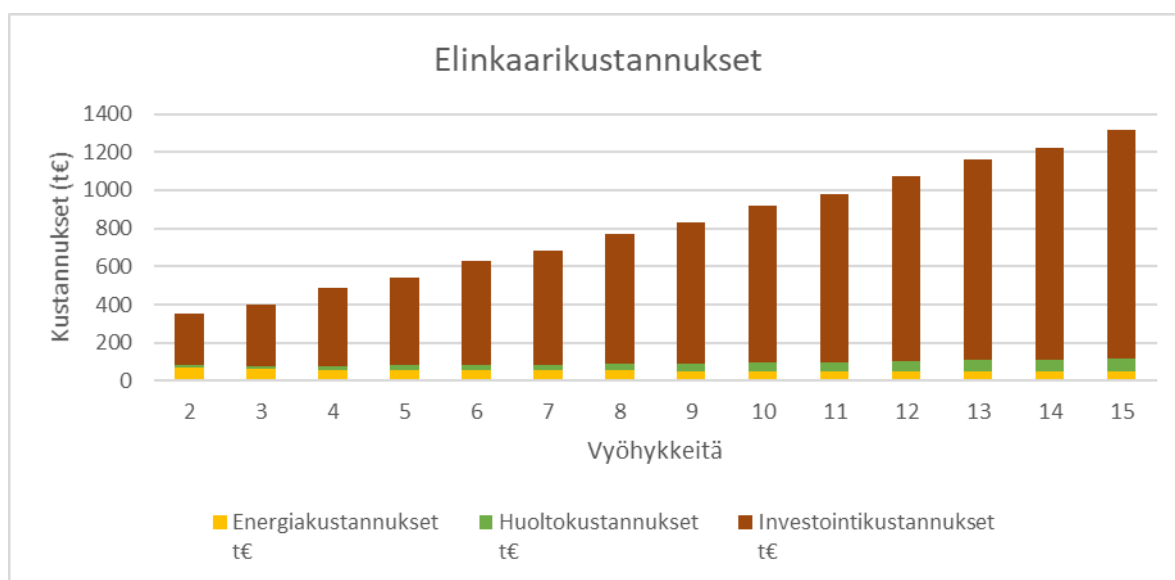
Vyöhykkeitä	Energiankulutus kWh/a	Energiakustannukset t€	Huoltokustannukset t€	Investointikustannukset t€	LCC t€
2	26197	71	13	269	353
3	23292	63	15	322	400
4	21839	59	20	407	487
5	20968	57	23	460	540
6	20387	55	28	546	629
7	19972	54	31	598	683
8	19661	53	36	684	773
9	19418	52	39	738	829
10	19225	52	44	825	921
11	19066	52	47	880	978
12	18934	51	52	967	1070
13	18823	51	57	1055	1163
14	18727	51	60	1111	1222
15	18644	50	65	1200	1315

Taulukossa 18 on esitetty käyttövesijärjestelmän vuotuinen energiankulutus, elinkaarikustannusten osatekijät sekä elinkaarikustannukset tutkituilla vyöhykejaoilla. Tuloksista nähdään, että suurimmalla tutkitulla vyöhykekoolla, eli kahden vyöhykkeen jaolla, energiakustannusten osuus järjestelmän elinkaarikustannuksista on noin 20%. Vyöhykekoon pienentyessä energiakustannusten osuus järjestelmän elinkaarikustannuksista pienenee ja investointikustannuksien osuus kasvaa. Huoltokustannuksien osuus ei muutu merkittävästi.

TAULUKKO 19. Elinkaarikustannusten kehitys

Vyöhykkeitä	Energiakustannukset	Huoltokustannukset	Investointikustannukset	LCC
	%	%	%	%
2	100	100	100	100
3	89	121	120	114
4	83	163	151	138
5	80	184	171	153
6	78	225	203	178
7	76	246	222	194
8	75	288	254	219
9	74	309	274	235
10	73	351	306	261
11	73	373	327	277
12	72	414	359	304
13	72	456	392	330
14	71	478	413	347
15	71	520	446	373

Taulukossa 19 on esitetty elinkaarikustannusten osatekijöiden ja kokonaiskustannuksien kehitys vyöhykejaon muuttuessa. Taulukosta nähdään, että pienimmilläänkin energiakustannukset ovat pudonneet 29%, kun taas huolto- ja investointikustannuksien muutos on satoja prosentteja, jonka seurauksena kokonaiskustannukset lähes nelinkertaistuvat vyöhykejaon muuttuessa kahdesta viiteentoista.



KUVIO 1. Vyöhykejaon vaikutus käyttövesijärjestelmän elinkaarikustannuksiin

Kuviossa 1 on esitetty taulukon 18 mukaiset elinkaarilaskennan tulokset energia-, huolto-, investointi-, ja kokonaiskustannusten osalta.

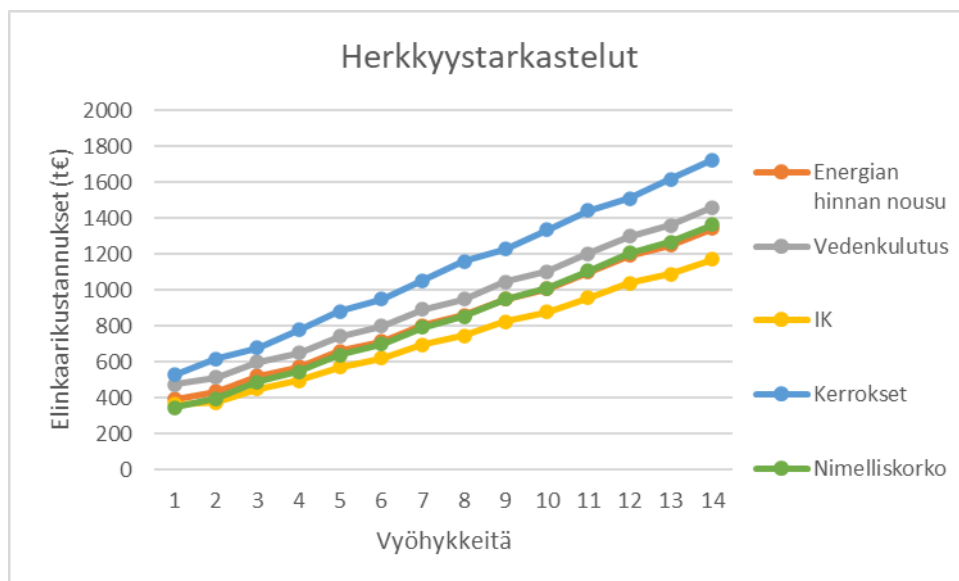
6.2 Herkkyystarkastelut

Tutkimuksessa tehtiin herkkyystarkasteluja elinkaarikustannuksien kannalta keskeisten arvojen muutoksien vaikutuksien tunnistamiseksi. Herkkyystarkasteluja tehtiin veden kulutuksen, paineenkorotusaseman hankintakustannuksen, nimelliskoron, energian hinnan muutoksen ja kerroskorkeuden suhteen. Taulukkoon 20 on koottu herkkyystarkastellut muuttujat ja niiden arvot.

TAULUKKO 20. Herkkyystarkastelujen arvot

Muuttuja	Lähtöarvo	Herkkyystarkasteluarvo
Energian hinnan nousu	3,14 %	6,00 %
Nimelliskorko	2,00 %	6,00 %
Vedenkulutus	155 l/hlö/d	755 l/hlö/d
Investointikustannus (IK)	10 000 €	5 000 €
Kerrokset	31	45

Kuviossa 2 on esitetty herkkyystarkastelujen tuloksena saadut elinkaarikustannukset eri vyöhykejaoilla. Kuvioista nähdään, että herkkyystarkastelujen perusteella yksittäisten arvojen muutokset eivät vaikuta tutkimuksen tuloksiin, joiden mukaan vyöhykekoon pienentyessä järjestelmän elinkaarikustannukset kasvavat.



KUVIO 2. Elinkaarikustannusten herkkyystarkastelut

7 POHDINTA

Tutkimuksen tavoitteena oli luoda kirjallisuuden perusteella kattava selvitys korkeiden rakennusten käyttövesijärjestelmien toteutustavoista ja niihin liittyvistä riskeistä sekä tutkia vyöhykejaon vaikutusta järjestelmän energiankulutukseen ja elinkaarikustannuksiin.

Tutkimuksen tulosten perusteella vyöhykekoon pienentäminen ei kannata rinnakkain kytketyssä vyöhykejakoisessa käyttövesijärjestelmässä elinkaarikustannusten näkökulmasta. Tuloksien perusteella järjestelmän vuotuinen energiankulutus pienenee, mutta ei riittävästi kattaakseen uusien vyöhykkeiden laitteiden hankintakustannuksien ja tilantarpeen seurauksena kasvavia investointikustannuksia.

Vaikka vyöhykekoon pienentäminen ei tutkimuksen tuloksien perusteella elinkaarikustannuksia tarkastellessa kannata, se voi olla energiatehokkuuden parantamisen ja korkeisiin verkostopaineisiin liittyvien riskien ehkäisemisen kannalta perusteltua.

Työn luotettavuutta arvioitiin suorittamalla herkkyystarkasteluja tutkimuksen kannalta olennaisille arvoille. Kaikkien herkkyystarkastelujen perusteella järjestelmän elinkaarikustannukset kasvavat vyöhykkeiden määrän lisääntyessä, joka tukee tutkimuksen tuloksia.

Työssä saavutettiin sille asetetut tavoitteet. Työssä tuotiin esille tavoitteisiin asetetusti erilaisia ratkaisuja korkeiden rakennusten käyttövesijärjestelmien toteuttamiseen sekä niihin liittyviä riskejä ja kuinka niitä voidaan ehkäistä. Lisäksi työssä onnistuttiin laskemaan vyöhykejaon vaikutuksesta rakennuksen energiankulutukseen ja elinkaarikustannuksiin tavoitteenasettelun mukaisesti.

Koska tutkimuksen tuloksien perusteella vyöhykekoon pienentämisellä ei saada laskettua käyttövesijärjestelmän elinkaarikustannuksia, voisi jatkotutkimuksena vertailla eri järjestelmiä elinkaarikustannuksien suhteen edullisimman järjestelmän selvittämiseksi.

LÄHTEET

Ahmed, K., Pylsy, P. & Kurnitski, J. 2016. Hourly consumption profiles of domestic hot water for different occupant groups in dwellings. Solar Energy, volume 137. 2016.

Asetus 1047/2017. Ympäristöministeriön asetus rakennusten vesi- ja viemärlaitteistoista. Luettu 13.1.2020. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171047>

ASPE. 2014. Plumbing Engineering Design Handbook - A Plumbing Engineer's Guide to System Design and Specifications, Volume 2 - Plumbing Systems. Yhdysvallat: American Society of Plumbing Engineers ASPE.

Aviva. n.d. Boosted Water Supplies [Hardfacts]. Luettu 21.1.2020. <https://www.aviva.co.uk/riskolutions/knowledgestore/answer/1764/>

Asiaa pumppukäyristä. n.d. Grundfos. Luettu 27.01.2020. <https://fi.grundfos.com/training-events/ecademy/all-topics/basic-principles-and-pump-types/about-pump-curves.html>

Brodex. 2016. Tackling dead legs in your piping and water system. BrodexTrident Blog. Julkaistu 1.4.2016. Luettu 18.2.2020. <http://www.brodextrident.com/blog/tackling-dead-legs-piping-water-system>

Cupori Oy. 2013. RT 38465. Kupariputket käyttövesi-, lämmitys-, aurinkolämpö-, jäähdytys-, ja kaasuputkistoihin. Luettu 21.2.2020. <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/Tarviketieto/pdf/38465.pdf>

Dahl. n.d. Hinta- ja tuotetiedot excel-tiedostoina (alv 0%). Päivitetty 3.2.2020. Luettu 21.2.2020. <https://www.dahl.fi/palvelut/hinnastot/>

Danske Bank. 2020. Vuoden 2019 inflaatio jäi yhteen prosenttiin. Artikkelit. 14.1.2020. Luettu 27.3.2020. <https://danskebank.fi/sinulle/artikkelit/2020/01/vuoden-2019-inflaatio-jai-yhteen-prosenttiin>

Euroopan keskuspankki. 2016. Mikä on nimelliskoron ja reaalikoron ero? Luettu 10.4.2020. <https://www.ecb.europa.eu/explainers/tell-me/html/nominal-and-real-interest-rates.fi.html>

Gebwell. n.d. G-Power kaukolämmönjakokeskus. Asennus- käyttö- ja huolto-ohje. Luettu 3.4.2020. <https://gebwell.fi/wp-content/uploads/2019/08/G-Power-kaukolammonjakokeskus-Asennus-kaytto-ja-huolto-ohje.pdf>

George, R. 2014. High-rise plumbing design and plumbing codes. Julkaistu 14.3.2014. Luettu 7.1.2020. <https://www.phcpropros.com/articles/1899-high-rise-plumbing-design-and-plumbing-codes>

Grundfos E-pumput. n.d. Grundfos datakirja. Luettu 19.3.2020.

Grundfos laitevalintaohjelma n.d. Käytetty 9.4.2020. <https://product-selection.grundfos.com/front-page.html?pumpsyste-mid=865527477&qcid=865541526>

GSD-RFM tekniset tiedot. n.d. Koka Oy. Huoneistokohtaiset vesimittarit. Luettu 13.3.2020. <https://koka.fi/tuotekategoria/huoneistokohtaiset-vesimittarit/>

Hara-Lindström, E. 2001. Talotekniikan elinkaaritarkastelut. Elinkaarikustannuslaskenta – LCC. Helsinki.

Harris, M. 1998. Practical Plumbing Engineering. American Society of Plumbing Engineers.

Helen Oy. n.d. Sähkösojimus. Luettu 26.3.2020. <https://www.helen.fi/sahko/sahkosojimus>

Helen Sähköverkko Oy. 2018. Sähkön siirtohinasto. Luettu 26.3.2020. <https://www.helensahkoverkko.fi/globalassets/hinnastot-ja-sojimuseh-dot/hsv/sahkon-siirtohinasto.pdf>

Hydrauliikan perusteet. 2002. Fluid Finland. Luettu 10.3.2020. <https://www.sahydro.fi/files/PDF/8.hydrauliikan-perusteet.pdf>

Hydro Multi-E Asennus ja käyttöohjeet. 2015. Grundfos. Luettu 13.3.2020.

Johnson, J & Kalkowski, K. 2018. Eight steps to determine plumbing system requirements. Specifying engineer. Luettu 3.3.2020. <https://www.csemaq.com/articles/eight-steps-to-determine-plumbing-system-requirements/>

Jussila, S. 2016. As Oy Helsingin Redin Majakka/T2. Kerroskohtaiset virtaamat. Ramboll Finland Oy. Viitattu 1.3.2020.

Larkin, B. 2012. Electric Heat Tracing. Plumbing Engineer 08/2012. Luettu 17.1.2020. https://www.phcpropros.com/ext/resources/documents/p/e/1/0/pe10_2012.pdf

Larson, P. 2007. How to Properly Size a Domestic Water Pressure Boosting System. Luettu 13.1.2020. <https://www.pmengineer.com/articles/86275-how-to-properly-size-a-domestic-water-pressure-booster-system>

LVI-TU ry & Rakennusliitto ry. 2018. LVI-toimialan työehtosojimus työntekijöille. Luettu 27.2.2020. <https://rakennusliitto.fi/wp-content/uploads/2018/06/Talotekniikka-alan-ty%C3%B6ehtosojimus-1.5.2018%E2%80%9330.4.2020.pdf>

Manner, P. Asiakaslaitepäällikkö. 2020. Tampereen Sähkölaitos. Haastattelu 22.01.2020. Haastattelija Stenhammar, J. Tampere.

McMurry, K. 2015. Difference Between Direct & Pilot Operated Regulating Valves (Part 2). Julkaistu 16.12.2015. Luettu 15.1.2020. <https://www.jordan-valve.com/differences-direct-pilot-operated-regulating-valves-part-2/>

Megri, A. 2011. Teaching high-rise plumbing design for engineers. Konferenssi-julkaisu. ASEE vuotuinen konferenssi 2011.

Motiva. 2011. Energiatehokkaat pumput. Luettu 27.01.2020. https://www.motiva.fi/ajankohtaista/julkaisut/hankinnat/energiatehokkaat_pumput.10735.shtml

Motiva. n.d. Vedenkulutus taloyhtiössä. Päivitetty 26.2.2019. Luettu 13.2.2020. https://www.motiva.fi/koti_ ja_ asuminen/taloyhtiot/energiaeksperttitoiminta/tieto_ energian- ja_ vedenkulutuksesta/vedenkulutus_ taloyhtiossa

Määräykset ja ohjeet K1/2013. 2013. Rakennusten kaukolämmitys. Energiatieteollisuus. Päivitetty 9.5.2014. Luettu 14.3.2020. https://energia.fi/files/502/JulkaisuK1_2013_20140509.pdf

Nielsen, A. 2016. Water boosting in commercial buildings. Application guide. Luettu 7.1.2020. <https://www.grundfos.com/grundfos-for-engineers/featured-themes/intelligent-pump-solutions-in-commercial-buildings/single-booster-vs-zone-divided-booster-systems/download-application-guide.html>

Nørgaard, J. & Nielsen, A. n.d. Water supply in tall buildings: roof tanks vs. pressurized systems.

Oras. n.d. Tuotelehti. Oras 4330 vakiopaineventtiili. Luettu 21.2.2020. https://www.oras.com/fileadmin/resources/15823_4330_Vakiopaineventtiili.pdf

PMEngineer. 2004. Design Considerations for Pressure Reducing Valve Stations In Domestic Water Systems. Julkaistu 4.8.2004. Luettu 15.1.2020. <https://www.pmengineer.com/articles/87969-design-considerations-for-pressure-reducing-valve-stations-in-domestic-water-systems>

RakMK D1. 2007. Kiinteistöjen vesi- ja viemärlaitteistot. Määräykset ja ohjeet 2007. Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto. Kumottu. Luettu 18.1.2020.

Robinson, R. 2017. Pressure Booster System Basics. PHCP Pros. Luettu 13.2.2020. <https://www.phcppros.com/articles/3007-pressure-booster-system-basics>

RT 18-10922. 2008. Kiinteistön tekniset käyttöiät ja kunnossapitojaksot. Luettu 27.3.2020. <https://kortistot.rakennustieto.fi/kortit/RT%2018-10922>

Sairanen, P. graafinen suunnittelija. 2020. Helsingin Redin Majakan valokuva. Sähköpostiviesti. Luettu 9.4.2020.

Sanel.lv. n.d. Danfoss heat exchanger XB59M-1 80, PN25 G 2 A x52mm. Luettu 5.4.2020. <https://www.sanel.lv/en/heat-exchangers/danfoss-heat-exchanger-xb59m-1-80-pn25-g-2-a-x52mm>

SFS-EN 1717. 2008. Vesilaitteistoissa olevan talousveden suojaaminen saastumiselta ja laitteille asetetut yleiset vaatimukset takaisinvirtauksen aiheuttaman saastumisen ehkäisemiseksi. Luettu 9.4.2020.

Simmonds, P. 2015. ASHRAE Design Guide for Tall, Supertall, and Megatall Building Systems. Yhdysvallat: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.

Siren, K. 2015. Rakennusten energiainvestointien kannattavuuden laskenta. Aalto yliopisto. https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/153118/mod_resource/content/1/Rakennusten%20energiainvestointien%20kannattavuus_2015_highlighted.pdf

Steele, A. 2003. High-Rise Domestic Water Systems. Uudelleen tulostettu teoksesta: Steele, A. 1984. Advanced Plumbing Technology. Luettu 7.1.2020.

Steele, A. 2015. Advanced Plumbing Technology II. Yhdysvallat: American Society of Plumbing Engineers ASPE.

Suomen Tuulivoimayhdistys ry. 2016. Energiamarkkinaskenaariot vuosille 2020-2050. Luettu 27.3.2020. [https://www.tuulivoimayhdistys.fi/filebank/909-Final_Energiamarkkinaskenaariot_vuosille_2020-2050_\(loppuraportti_20161014\).pdf](https://www.tuulivoimayhdistys.fi/filebank/909-Final_Energiamarkkinaskenaariot_vuosille_2020-2050_(loppuraportti_20161014).pdf)

Talotekniikkainfo. n.d. Vesi- ja viemärlaitteistot, opas. Päivitetty 11.6.2019. Luettu 21.1.2020. <https://www.talotekniikkainfo.fi/vesi-ja-viemarilaitteistot-opas/5-vvl-suojaaminen-terveydellisilta-vaaroilta-ja-muilta-haitoilta>

Thornburg, D., Kimball, C. & Bracken, W. 2018. International Building Code Illustrated Handbook. McGraw-Hill Professional.

Tobias, M. n.d. Protecting Water Booster Pumps from Cavitation. Nearby Engineers. Luettu 27.01.2020. <https://www.ny-engineers.com/blog/protecting-water-booster-pumps-from-cavitation>

Valtiokonttori. 2020. Vuoden 2020 laskelmissa käytettäväksi tarkoitettu korkokustannus. Luettu 10.4.2020. <https://www.valtiokonttori.fi/maaraykset-ja-ohjeet/vuoden-2020-laskelmissa-kaytettavaksi-tarkoitettu-korkokustannus/>

Van der Schee, W. n.d. Water systems in high rise residential buildings, guide lines for design and construction. Luettu 7.1.2020. <https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB17170.pdf>

Waters, R. 2018. Backflow prevention: Protecting our water supply. Julkaistu 6.3.2018. Luettu 21.1.2020. <https://www.hpacmag.com/features/backflow-prevention/#>

WDE-K50 tekniset tiedot. n.d. Koka Oy. Kunnalliset vesimittarit. Luettu 13.3.2020. <https://koka.fi/wp-content/uploads/2019/08/T14-FI-Tekniset-tiedot-WDE-K50.pdf>

WHO. 2006. Health aspects of plumbing. Design of plumbing systems for multi-storey buildings. Luettu 24.01.2020. https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/43423/9241563184_eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y