

Antti Mikkonen

**LÄMPÖPUMPPULAITOKSEN JA KAUKOJÄÄHDYTYSKUN MITOITUS JA SI-
JOITUS KAUKOJÄÄHDYTYKSEN TUOTANNOSSA**

LÄMPÖPUMPPULAITOKSEN JA KAUKOJÄÄHDYTYSKUN MITOITUS JA SI- JOITUS KAUKOJÄÄHDYTYKSEN TUOTANNOSSA

Antti Mikkonen
Opinnäytetyö
Kevät 2022
Energiatekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Energiatekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä: Antti Mikkonen

Opinnäytetyön nimi: Lämpöpumppulaitoksen ja kaukojäähdytysakun mitoitus ja sijoitus kaukojäähdytyksen tuotannossa

Opinnäytetyön englanninkielinen nimi: Design and Location of Heat Pump Plant and Thermal Energy Storage in District Cooling Production

Työn ohjaaja: Veli-Matti Mäkelä

Työn valmistuslukupäivä ja -vuosi: Kevät 2022

Sivumäärä: 63

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää edellytyksiä lisätä kaukojäähdytyksen tuotantokapasiteettia lämpöpumppulaitoksella sekä kaukojäähdytysakulla Tampereen Sähkölaitoksen kaukojäähdytysverkoston alueella. Nykyisen kaukojäähdytyksen päätuotantolaitoksen jäähdytyskapasiteetti Kaupinjoella ei tulevaisuudessa kykene yksistään vastaamaan kasvavaan jäähdytystarpeeseen. Rinalle tarvitaan uutta tuotantokapasiteettia ja toisaalta varatehoa.

Työn aikana luotiin laskennalliselle mallintamiselle pohjaa arvioimalla kaukojäähdytystoiminnan kehittymistä tulevaisuudessa. Toimeksiantajan tuottaman materiaalin perusteella arvioitiin tulevaisuuden jäähdytystarpeen huipputehon kasvavan 50 MW:iin nykyisestä 18 MW:sta. Tampereen kaupunki on laatinut strategisen osayleiskaavan vuodelle 2040, minkä perusteella oli mahdollista arvioida kaupungin rakennuskannan kehittymistä. Merkittävin kasvu tulee tapahtumaan ydinkeskustan alueella, mikä tarjoaa potentiaalisia kaukojäähdytysasiakkaita. Lämpöpumppulaitoksen sekä kaukojäähdytysakun sijaintivaihtoehtoja on arvioitu verkostolaskennan, Tampereen kaupungin kaavoituksen sekä paikan päällä tehtyjen arvioiden perusteella.

Työn lopputuloksena löydettiin toimeksiantajalle sijaintivaihtoehtoja uuden tuotantokapasiteetin lisäämiseksi. Kaukojäähdytysakun purkutehon tarkasteluväliksi määriteltiin 20–25 MW, joka on riittävä vastamaan päivittäisen jäähdytystarpeen kysynnän vaihteluun ja toimimaan merkittävänä varatehona päätuotantolaitoksen häiriöiden aikana. Lämpöpumppulaitoksen jäähdytystehoksi määriteltiin 16,5 MW, mikä riittää kattamaan kasvavan jäähdytystarpeen ja toimimaan osaksi varakapasiteettina. Lämpöpumppulaitoksen osalta tarkasteltiin potentiaalisia lämpöpumppuja. Jäähdytystehon tarve on merkittävä, ja lämpötilatasot asettavat laitteistolle haasteita. Tämä edellyttää lämpöpumppujen sarjaan kytkemistä, ja pienemmillä laitetuottajilla lämpöpumppuyksiköiden määrä nousee hyvin suureksi.

Asiasanat: energiatehokkuus, kaukojäähdytys, kaukojäähdytysakku, lämpöpumppu

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	KAUKOJÄÄHDYTYS	8
3	KAUKOJÄÄHDYTYKSEN TUOTANTOTAVAT	10
3.1	Vapaajäähdytys	11
3.2	Kompressorijäähdytys	12
3.3	Absorptiojäähdytys	12
3.4	Lämpöpumppu	14
4	KAUKOJÄÄHDYTYSENERGIAN JAKELU	16
4.1	Johtojen mitoitus	16
4.2	Johtotyypit	17
5	KAUKOJÄÄHDYTYSENERGIAN VARASTOINTI	18
6	LÄMPÖPUMPPULAITOKSIA SUOMESSA	21
6.1	Katri Valan lämpöpumppulaitos	21
6.2	Turun Kakolan lämpöpumppulaitos	22
7	TAMPEREEN SÄHKÖLAITOS OY JA KAUKOJÄÄHDYTYS	24
7.1	Konserni ja talous	24
7.2	Tampereen Sähkölaitoksen kaukojäähdytys	25
8	LÄMPÖPUMPPULAITOKSEN JA KAUKOJÄÄHDYTYSKUN MITOITUS JA SIJOITUS ...	27
8.1	Kaukojäähdytysverkoston kapasiteetti	27
8.2	Kaukojäähdytysverkoston painehäviölaskenta	29
8.3	Kaukojäähdytystoiminnan kehittyminen nykyisen kaukojäähdytysverkon alueella ...	34
8.4	Jäähdytstarpeen kasvun jakautuminen tasaisesti kaukojäähdytysverkossa	34
8.5	Jäähdytstarpeen kasvu lopullisen laskentamallin mukaisesti	35
9	POTENTIAALISIA LÄMPÖPUMPPUJEN VALMISTAJIA	37
10	LÄMPÖPUMPPULAITOKSEN SIJAINIVAIHTOEHDOT	39
10.1	P-Hämppi ja Tampereen maanalainen asemakaava	41
10.2	Tampereen yliopiston ympäristö	44
10.3	Tietotalon ja Monetran ympäristö	44
10.4	Ratinalan lämpökeskus	45
11	KAUKOJÄÄHDYTYSKUN	46
11.1	Käyttömahdollisuudet	46

11.2	Tuotantovaje Kaupinojan jäähdytyslaitoksen toiminnan aikana.....	46
11.3	Kaupinojan jäähdytyslaitoksen tuotantohäiriön kompensointi.....	48
11.4	Kaupinojan tuotantohäiriön sekä päivittäisen kulutuksen vaihtelun kompensointi	52
12	KAUKOJÄÄHDYTYSKUN SIJAINVAIHTOEHDOT	53
12.1	Emil Aaltosen puisto	54
12.2	Tammelan stadion.....	54
12.3	Ilves- ja Liisanpuisto	55
12.4	Kiovanpuisto.....	55
13	YHTEENVETO	56

1 JOHDANTO

Kuluttajien vaatimukset ovat viime vuosina tiukentuneet koskien sisäilman laatua ja lämpötilaa. Kohonneet vaatimukset koskevat sekä asuinrakennuksia että liike- ja toimistorakennuksia. Tämä on johtanut lisääntyneeseen jäähdytyksen tarpeeseen sekä uusissa että peruskorjausta vaativissa rakennuksissa. Päästöjen sekä energiakulutuksen vähentämistavoitteet ovat velvoittaneet tuottamaan jäähdytystä yhä tehokkaammin ja ympäristöystävällisemmin.

Kaukojäähdytys tarjoaa asiakkailleen vaivatonta jäähdytystä ympäristöystävällisesti, mikä osaltaan selittää sen suosion kasvua. Kaukojäähdytykselle potentiaalisimmat kohteet ovat asuinkerrostalot, liike- ja toimistorakennukset sekä julkiset rakennukset, jotka sijoittuvat kaupungin tiheimmin rakennetuille alueille tai muodostavat muutoin rakennuskeskittymän. Kaukojäähdytykselle on kysyntää, ja se herättää yhä enemmän kiinnostusta. VTT:n raportin mukaan jäähdytystarpeen vuosittainen kasvu suotuisassa talousympäristössä voisi olla noin 1,5 % vuoteen 2030 asti. (1.)

Euroopan unioni on asettanut kunnianhimoiset päästötavoitteet, joiden päätarkoituksena on päästä eroon kasvihuonekaasujen nettopäästöistä vuoteen 2050 mennessä. Välitavoitteena on vähentää kasvihuonepäästöjä 55 %:lla vuoteen 2030 mennessä vuoden 1990 vertailutasosta. Näitä tavoitteita edistetään muun muassa Fit for 55 -valmiuspaketilla. Valmiuspaketin ilmastotavoitteet myötäilevät Pariisin ilmasopimusta, jolla pyritään rajoittamaan ilmaston lämpeneminen kriittisenä pidettyyn 1,5 °C:seen. Euroopan unionin päästöistä jopa 75 % muodostuu energiasektorista. Päästöjen vähentämistä ja ilmastotavoitteita edistetään muun muassa lisäämällä uusiutuvan energian osuutta. Vuonna 2030 uusiutuvien energianlähteiden osuuden odotetaan olevan 32 % unionin energiakulutuksesta. (2; 3.)

Euroopan unionin energiapolitiikan yksi tärkeimpiä ohjaavia periaatteita on ”energiatehokkuus etusijalle”. Energiatehokkuus on tunnistettu keskeiseksi ja välttämättömäksi toiminta-alaksi, joka edistää Euroopan unionin tavoitteita irtautua hiilestä. Lisäksi energiaterhokkuuden edistäminen varmistaa esimerkiksi kestäväen energiahuollon ja vähentää kasvihuonepäästöjä. Energiaterhokkuutta edistetään energiaterhokkuusdirektiivillä, joka ajaa politiikkaa löytämään ja hyödyntämään energiansäästämahdollisuuksia kustannustehokkaasti. Vuoteen 2030 on asetettu tavoite vähentää energiankulutusta 32,5 % vuoden 2007 vertailutasosta. (3.)

Lämmityksen ja jäähdytyksen osuus unionin energian loppukulutuksesta on puolet. Tämä tekee siitä suurimman energian loppukäytön alan. Alalta löytyy vielä paljon mahdollisuuksia vähentää energian käyttöä ja silti saavuttaa asiakkaita tyydyttävät lämpötilat. Lämmitys ja jäähdytys ovat ratkaisevassa asemassa Euroopan unionin tavoitteessa olla puhdas ja toteuttaa hiilineutraalia taloutta vuonna 2050. (3.)

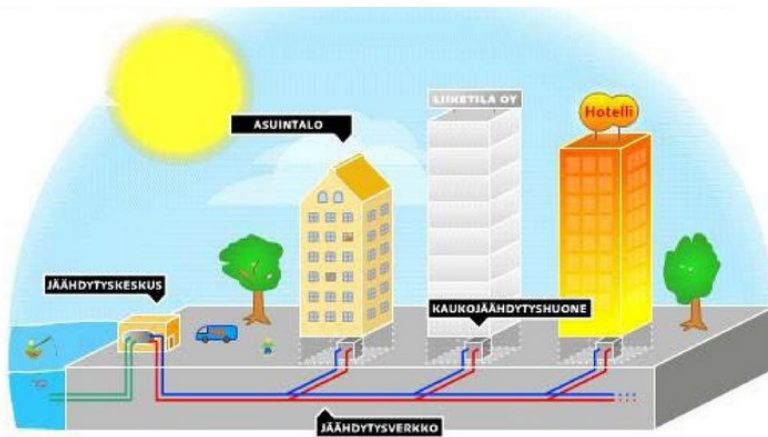
Unionin tavoitteet sitovat jäsenvaltioita raportoimaan ja luomaan kolmen vuoden välein toimintasuunnitelmia, minkä avulla kansalliset sekä unioninlaajuiset ilmastotavoitteet täyttyvät. Suomen vuotuinen energiansäästövelvoite on noin 1,9–2,36 TWh/a vuosille 2021–2030. Suomi on kansallisella tasolla linjannut tavoitteekseen saavuttaa hiilineutraalius vuoteen 2035 mennessä ja pian tämän jälkeen kehittyä hiilinegatiiviseksi. Suomessa energiatehokkuuden parantamistoimet ovat olleet hyvällä tasolla, mutta tehostamisen tarvetta on edelleen. (4.)

Energiatehokkuustyöryhmä on nostanut Suomessa erityisesti kiinnostavaksi ylijäämälämmön tehokkaamman hyödyntämisen. VTT:n mukaan energiateollisuuden merkittävimpiä hyödynnettäviä ylijäämälämmönlähteitä ovat yhteistuotanto- ja kattilalaitosten savukaasujen lämmöntalteenotto ja kaukojäähdytyksen sekä sähköasemien lämpöhäviöiden talteenotto. Ylijäämälämmönlähteiden hyödyntäminen on tullut kannattavammaksi teknologisen kehityksen ja yleistymisen vuoksi. Sähkön hinta ja verotus ovat huomattavassa roolissa teknillistaloudellisen kannattavuuden kanssa. (5; 6.)

Opinnäytetyössä tutkitaan Tampereen Sähkölaitoksen pitkäntähtäimen vaihtoehtoja kaukojäähdytyksen tuotantokapasiteetin lisäämiseksi lämpöpumppulaitoksella sekä kaukojäähdytysakulla. Tavoitteena on selvittää sekä lämpöpumppulaitoksen että kaukojäähdytysakun suuruusluokka. Tämän perusteella tarkastellaan mahdollisia sijoituskohteita huomioiden, että lämpöpumppulaitoksen lämmönlähteenä tulee toimimaan kaukojäähdytyksen paluuvesi. Lisäksi työssä arvioidaan tulevaisuuden kasvuennusteita kaukojäähdytystoiminnassa ja sitä, miten kasvu tulee kaukojäähdytysverkon alueella tapahtumaan.

2 KAUKOJÄÄHDYTYS

Kaukojäähdytys tarkoittaa energiayhtiön keskitetyssä tuotantolaitoksessa tuotettua jäähdytettyä vettä ja sen jakelua jakeluverkon avulla useille rakennuksille tyypillisesti ilmastoinnin kaukojäähdytykseen. Peruseriaatteeltaan kaukojäähdytys on kaukolämmön kaltaista, paitsi että asiakkaan ylimääräinen lämpö kaukojäähdytyksessä siirretään kaukojäähdytyksen paluuveteen, kun kaukolämmityksessä lämpöenergia siirretään asiakkaalle lämmitykseen. Kuvassa 1 on esitetty kaukojäähdytyksen peruseriaate. Tässä tapauksessa vesistön jäähdytyspotentiaalia käytetään hyödyksi jäähdytysenergia tuottamiseen jäähdytyskeskuksessa. (7.)

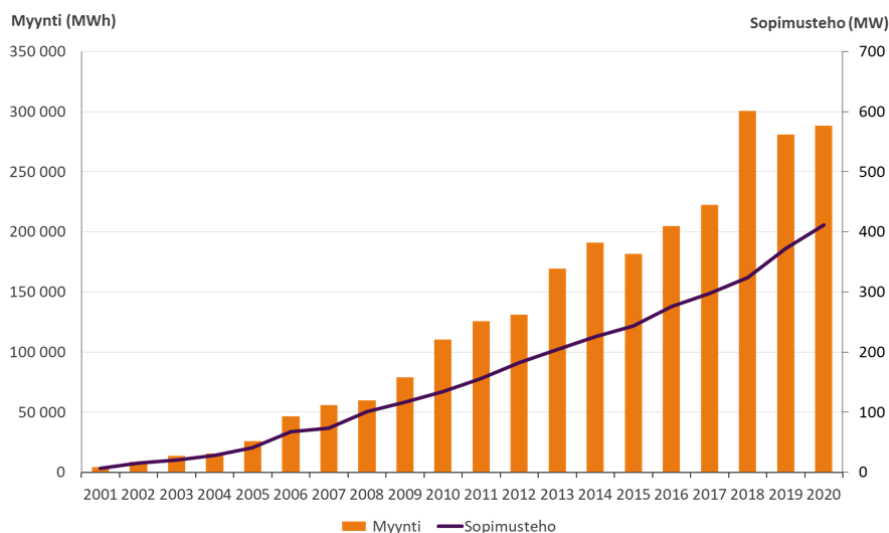


KUVA 1. Kaukojäähdytyksen peruseriaate (8)

Kaukojäähdytyksessä pyritään käyttämään paikallisia energialähteitä, jotka muutoin menisivät hukkaan tai jäisivät kokonaan käyttämättä. Kaukojäähdytyksen energiatehokkuuden ydin piileekin siinä, että sen avulla pystytään tarjoamaan käyttökelpoinen tuote asiakkaille myös hukkalämmöstä, kuten yhdyskuntien jätevedestä. Kaukojäähdytystuotannon ohessa on usein lisäksi käytössä kaukojäähdytysakkuja, jotka parantavat systeemin tehokkuutta. (9.)

Rakennuskohtaiseen jäähdytykseen verrattuna kaukojäähdytys on vaivattomampi, luotettavampi ja ympäristöystävällisempi vaihtoehto. Kaukojäähdytysjärjestelmissä on suuremmat yksikkökoot, jolloin jäähdytysenergiaa voidaan tuottaa kustannus- ja energiatehokkaasti. Kaukojäähdytys on vaivattomampi ja luotettavampi muun muassa sen vuoksi, että asiakkaan tiloissa ei tarvita erillistä jäähdytyslaitteistoa tai kylmäkoneita eikä myöskään kylmäaineita. Kaukojäähdytysasiakkaan ei itse tarvitse huolehtia laitteiston huolloista tai hankinnoista. (9.)

Kaukojäähdytyksen kysyntä on kasvanut 2010-luvulla paljon. Vuoteen 2020 mennessä sopimusteho on kolminkertaistunut. Kuvassa 2 on esitetty energiateollisuuden tilasto kaukojäähdytyksen myynnin sekä sopimustehon kehityksestä. Viime vuosien kehityksen perusteella voisi tulevaisuuden kasvunäkymien olettaa olevan nousujohteisia. (10.)



KUVA 2. Kaukojäähdytyksen myynnin ja sopimustehon kehitys (10)

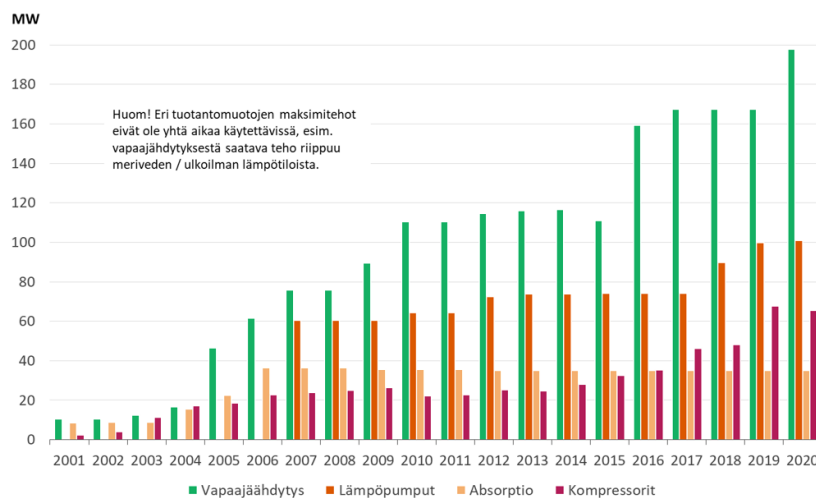
Kuva 2 havainnollistaa kaukojäähdytyksen myynnin sekä sopimustehon kasvun kehitystä 2000-luvun alusta. Vuonna 2020 sopimustehon kasvu vuoteen 2019 on ollut 11 %, ja 2010-luvulla sopimusteho on kolminkertaistunut. Myynti kasvoi vajaa 3 % ja on 2,5-kertaistunut 2010-luvun aikana. Taulukossa 1 on aakkosjärjestyksessä 11 energiayhtiötä, jotka ovat vuonna 2020 myyneet kaukojäähdytystä Suomessa.

TAULUKKO 1. Kaukojäähdytystä vuonna 2020 myyneet energiayhtiöt (10)

Energiayhtiö	Kaukojäähdytystoiminnan aloittamisvuosi
Etelä-Savon Energia Oy	2018
Fortum Power and Heat Oy	2012
Helen Oy	1998
Jyväskylän Energia Oy	2016
Kuopion Energia Oy	2017
Lahti Energia Oy	2000
Lempäälän Lämpö Oy	2008
Pori Energia Oy	2012
Tampereen Sähkölaitos Oy	2012
Turku Energia Oy	2000
Vierumäen Infra Oy	2002

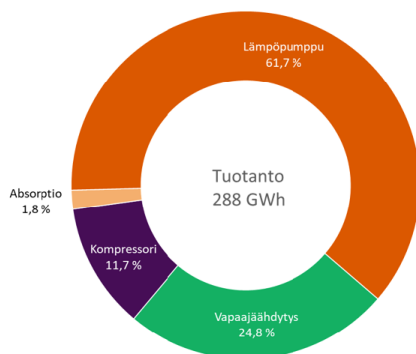
3 KAUKOJÄÄHDYTYKSEN TUOTANTOTAVAT

Kaukojäähdytyksen tuotantokapasiteetti on ollut kasvussa viime vuosina, kuten kuvasta 3 voi huomata. Tuotantokapasiteetiltaan selvästi suurin on vapaajäähdytys ja seuraavana ovat lämpöpumput sekä kompressori- ja absorptiolaitokset. Huomioitavaa on, ettei absorptiotekniikkaan ole viimeiseen 15 vuoteen investoitu ja tuotantokapasiteetti on säilynyt muuttumattomana vuodesta 2006 saakka.



KUVA 3. Kaukojäähdytyksen tuotantokapasiteetin kehitys (10)

Kuvassa 4 on eritelty kaukojäähdytysenergian tuotannon jakauma eri tuotantomenetelmille, kun tuotanto vuonna 2020 on ollut 288 GWh. Kaukojäähdytystä on tuotettu lähes 90 % energialähteillä, jotka olisivat menneet muuten hukkaan. Eniten kaukojäähdytystä tuotettiin lämpöpumpuilla 61,7 % ja seuraavaksi eniten vapaajäähdytyksellä 24,3 %. (10.)

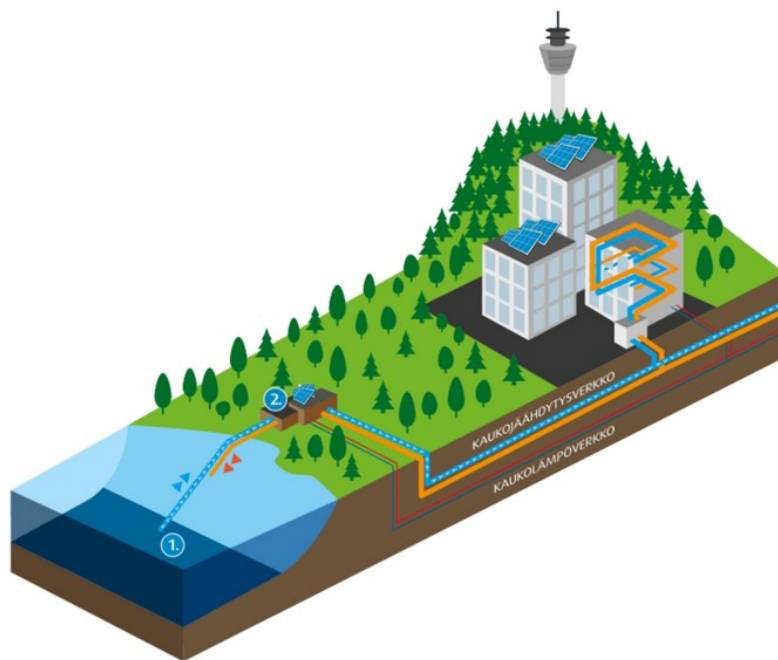


KUVA 4. Jäähdytysenergian tuotanto vuonna 2020 (10)

3.1 Vapaajäähdytys

Vapaajäähdytyksellä tarkoitetaan luonnon omien energiavarojen hyödyntämistä jäähdytysenergian tuotannossa. Luonnon energiavaroja ovat vesistöt, kuten meret, järvet sekä ulkoilma. Vapaajäähdytyksen hyödyntämisellä on mahdollista saada katettua suuri osa tarvittavasta jäähdytysenergiasta ja merkittävä osa jäähdytystehosta. (7.)

Vapaajäähdytys on hyvin yksinkertainen prosessi, jossa ei lämmönsiirtimien ja pumppujen lisäksi tarvita muita laitteita. Kuvassa 5 havainnollistetaan vapaajäähdytyksen toimintaperiaatetta. Vesistöä pumpataan syvältä viileintä vettä jäähdytyslaitoksen lämmönsiirtimelle, jossa kaukojäähdytyksen lämmennyt paluuvesi luovuttaa asiakkaiden kiinteistöistä keräämänsä lämmön lämmönsiirtimeen toisella puolella kiertävään jäähdytysveteen. Näin ollen kaukojäähdytysvesi jäähtyy 16 °C:sta 8 °C:seen, ja jäähtynyt menovesi lähtee uudelle kierrokselle asiakkaille. (7.)

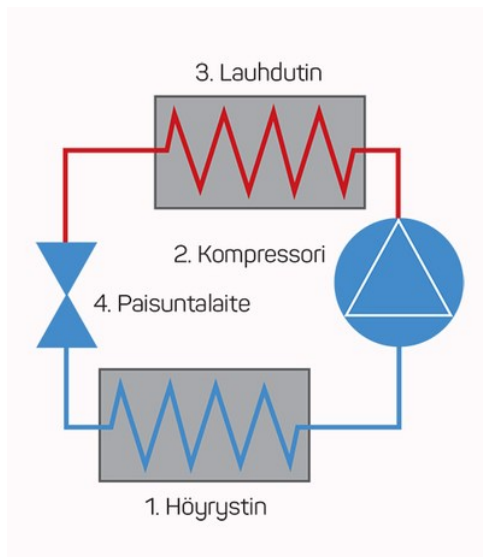


KUVA 5: Vapaajäähdytyksen toimintaperiaate (11)

Vapaajäähdytyksen huomattavana etuna on energialähteen edullisuus sekä ympäristöystävällisyys. Suomessa kesäisin heikkoutena on ilman sekä vesistöjen lämpötilan nousu korkeammaksi kuin jäähdytysverkkoon ajettavan veden lämpötila. Tällöin tarvitaan rinnalle muita jäähdytyksen tuotantomuotoja. (7.)

3.2 Kompressorijäähdytys

Kompressorijäähdytyksessä lämpöenergiaa siirretään höyrystimeltä useimmiten sähkötoimisen kompressorin ja kylmäaineen avulla lauhduttimelle. Kuvassa 6 on havainnollistettu kompressorikylmäkoneen toimintaa. Jäähdytettävä neste saapuu höyrystimelle, jossa se siirtää lämpöenergiansa kylmäaineeseen höyrystäen sen. Höyrystynyt kylmäaine siirtyy kompressorille, joka puristaa kylmäainetta nostamalla sen painetta ja sen sisältämää energian määrää kasvattamalla lämpötilaa. Paineistettu kylmäainehöyry kulkeutuu lauhduttimelle, jossa se lauhdetaan luovuttaen sisältämänsä energian lauhduttimessa kiertävälle nesteelle, ja nostaa sen lämpötilaa. Lauhtuneen kylmäaineen painetta lasketaan paisuntaventtiilissä, ja neste virtaa takaisin uuteen kiertoon höyrystimelle. (7; 12.)



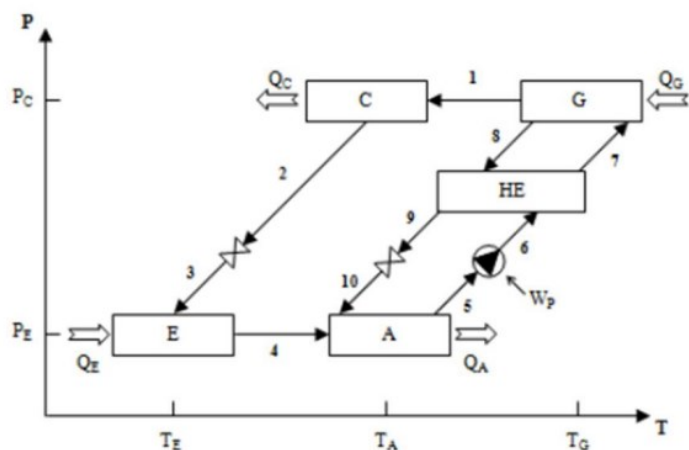
KUVA 6. Kompressorikylmäkoneen toimintaperiaate (13)

3.3 Absorptiojäähdytys

Absorptiojäähdytysprosessi perustuu liuenneen aineen eli liuottimen tai kylmäaineen eli absorberin ominaisuuksiin ja kyseisen aineparin käyttäytymiseen liuksena. Yleisimmät aineparit ovat vesi/litiumbromidi ($\text{H}_2\text{O}-\text{LiBr}$) sekä ammoniakki/vesi ($\text{NH}_3-\text{H}_2\text{O}$). Ensimmäisessä vesi on kylmäaine ja toisessa liuotin. Pääsääntöisesti käytössä on $\text{H}_2\text{O}-\text{LiBr}$ -aine pari, kun jäähdytyslämpötila on korkeampi kuin $0\text{ }^\circ\text{C}$, ja $\text{NH}_3-\text{H}_2\text{O}$ -aine pari, kun jäähdytyslämpötila on alle $0\text{ }^\circ\text{C}$. (7; 14; 15.)

Absorptiojäähdytyksessä lämpöpumpun korvaa höyrystिन ja lauhdutin. Kuva 7 esittää absorptiojäähdytyksen toimintaperiaatetta. Kylmäaine virtaa lauhduttimelta C paisuntaventtiilin läpi höyrystimmelle E, ja paine laskee. Höyry absorboidaan imeytimessä A liuottimeen ja liuoksen paine nostetaan takaisin lauhtumispaineeseen P_c . Tämä prosessi vastaa lämpövoimakoneen tekemää työtä ja korvaa siten mekaanisen kompressorin. Keittimessä G kylmäaine vapautetaan ja väkevöity liuos palautuu imeyttimeen A lämmönsiirtimeen HE ja paisuntaventtiilin läpi.

Höyrystimen lämpö saadaan jäähdytettävästä nestevirrasta Q_E . Käyttöenergiansa prosessi saa keittimelle tuodusta lämmöstä Q_G , joka voi olla esimerkiksi teollisuuden hukkalämpöä tai CHP-tuotannon ylijäämälämpöä. Imeytintä ja lauhdutinta jäähdytetään useimmiten jäähdytysvedellä, joka syötetään yleensä jäähdytystornista. Q_C ja Q_A kuvaavat poistettavaa lämpöä lauhduttimesta ja imeytimestä. (14.)



KUVA 7. Absorptioprosessi: A on imeytin, HE on lämmönsiirrin, G on keitin, C on lauhdutin ja E on höyrystिन (14)

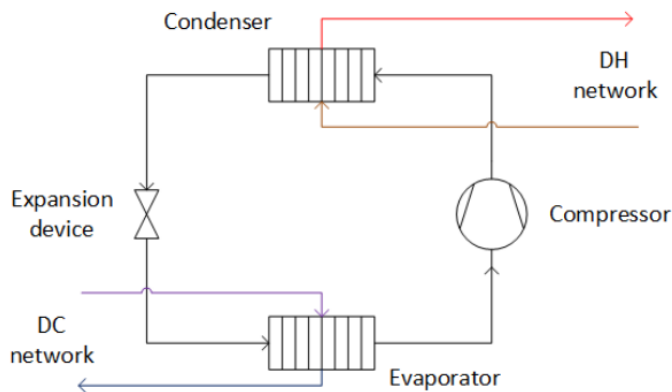
Vesivirtauksen lämpötilan tulee olla H_2O -LiBr-prosessissa olla yli $80\text{ }^\circ\text{C}$. Tätä matalammissa lämpötiloissa kylmäkerroin (COP) laskee nopeasti. COP:ta voidaan kasvattaa lisäämällä paine- ja lämpötilatasoja, mutta toisaalta vaatimus tuodun lämmön lämpötilalle kasvaa. Lisäksi investoinnin määrä kasvaa. (7; 14; 15.)

NH_3 - H_2O -ainepari vaatii jo yli $100\text{ }^\circ\text{C}$ energialähteen toimiakseen. Tämän lisäksi aineparin kiehumispisteet ovat lähellä toisiaan. Tämä johtaa siihen, että keittimessä höyrystyy mukaan liuotinta

(H₂O), mikä lauhtuttimeen joutuessaan nostaisi lauhtumislämpötilaa. Tätä varten NH₃-H₂O-jäähdytyskone on varustettava rektifikaatiolaitteistolla eli toisin sanoen tislauslaitteilla. Tämä pienentää laitteen COP:ta ja nostaa investointi- ja käyttökustannuksia. (14; 15.)

3.4 Lämpöpumppu

Lämpöpumpulla on mahdollista tuottaa kaukojäähdytyksen lisäksi kaukolämpöä. Investoinnin kannattavuus paranee nämä kaksi prosessia yhdistämällä. Lämpöpumpun lämmönlähteenä voi olla esimerkiksi jätevesi, kaukojäähdytyksen paluuvesi tai savukaasut. Kuvassa 8 on esitetty lämpöpumpun toimintaperiaate, kun käytettävä lämmönlähde on kaukojäähdytyksen paluuvesi. (7; 16.)



KUVA 8. Toimintaperiaate lämpöpumpusta, jossa lämmönlähteenä kaukojäähdytyksen paluuvesi (17)

Lämpöpumppu koostuu kolmesta pääkomponentista: kompressorista, lauhtutimesta ja höyrystimestä. Venttiilit säätelevät kylmäaineen virtausta. Lauhtutimen jälkeen tai höyrystintä ennen voi olla nestevaraaja, johon nestemäinen kylmäaine varastoituu. Tällä voidaan tasata energiantarpeen vaihteluita ja kompressorin käyntiä sekä edesauttaa faasimuutoksen täydellistä tapahtumista lämmönsiirtimessä. (7.)

Kompressorin tehtävänä lämpöpumpussa on nostaa höyrystimeltä saapuvan kaasumaisen kylmäaineen lämpötilaa ja painetta eli siirtää siihen energiaa. Kompressorin imee matalapaineista kylmäainehöyryä, puristaa sen korkeampaan paineeseen ja nostaa kylmäaineen lämpötilaa. (7; 12.)

Tulistunut kylmäaine siirtyy seuraavaksi lauhduttimeen. Lauhduttimelle saapuessaan kylmäaine on aluksi korkeassa lämpötilassa ja kaasumaisessa olomuodossa. Lauhduttimessa ensiksi kylmäainehöyrystä poistuu tulistus, minkä jälkeen lauhtumislämpötilan saavuttaessaan höyry alkaa lauhduttaa. Lauhduttimeen on kytketty lämmitettävä kohde eli kaukolämmön paluuvesi, joka on matalamassa lämpötilassa kuin kylmäaine. Kylmäaine lauhtuessaan luovuttaa sisältämänsä lämpöenergian kaukolämmön paluuveteen samalla lauhtuen nestemäiseksi. (7; 12.)

Lauhduttimen jälkeen lauhtunut kylmäaine paisuu paisuntaventtiin läpi, jolloin sen paine ja lämpötila laskevat. Tämän jälkeen neste-höyryseos kulkeutuu höyrystimelle. Jäähdytettävä kohde on kytketty höyrystimeen, jossa kylmäaine höyrystyy ja sitoo itseensä energiaa samalla jäähdyttäen kaukojäähdytyksen paluuvettä. Höyrystyminen perustuu siihen, että kylmäaine tuodaan höyrystimeen väliainetta alhaisemmassa lämpötilassa matalassa paineessa. (7; 12.)

4 KAUKOJÄÄHDYTYSENERGIAN JAKELU

Kaukojäähdytysenergia toimitetaan asiakkaille jäähdytetyn veden avulla menoputkea pitkin. Asiakkaan lämmönsiirtimessä jäähdytysvesi jäähdyttää asiakkaan kiinteistön puolella kiertävää vettä. Kylmää vettä käytetään sisäilman jäähdyttämiseen kierrättämällä sitä esimerkiksi ilmastointikoneiden jäähdytyspattereissa. Kylmä vesi kerää itseensä lämpöä kiinteistöstä ja luovuttaa lämmönsiirtimessä lämpöenergian kaukojäähdytyksen paluuveteen, joka johdetaan paluuputkea pitkin takaisin jäähdytyslaitokselle, jossa sama vesi jäähdytetään uudelleen ja kierto toistuu. (7; 14.)

Jäähdytysveden lämpötila vaihtelee kaukojäähdytysjärjestelmistä riippuen. Vapaajäähdytyksellä ja absorptiotekniikalla jäähdytysveden lämpötila on 8 °C. ja kompressorijäähdytyskoneilla voidaan laskea veden lämpötilaa 6 °C:seen. Minimi meno- ja paluupuolen välinen lämpötilaero vaihtelee toimituslämpötilasta riippuen 10–4 °C. Mitoitustilanteessa meno- ja paluuvien lämpötilaerona käytetään 8–10 °C. (7; 18.)

4.1 Johtojen mitoitus

Kaukojäähdytyksen merkittävin ero kaukolämmitykseen verrattuna on meno- ja paluuvien lämpötilaero, joka kaukojäähdytyksessä on noin viidenneksen kaukolämmityksen lämpötilaerosta. Kylmävesi myös aiheuttaa eroosiovaaraa teräsputkissa, mistä johtuen virtausnopeus tulisi rajoittaa 1–2 m:iin/s. Kaukolämpöputkessa nopeus voi olla jopa kaksi kertaa suurempi. (7.)

Tehonsiirtokyvyssä on huomattavia eroja kaukolämmityksen ja -jäähdytyksen välillä. Esimerkiksi halkaisijaltaan DN 100 -kokoisella kiinnivaahdotetulla johdolla voidaan siirtää kaukojäähdytystehoa noin 370 kW ja kaukolämmitystehoa noin 3200 kW, kun kaukojäähdytyksen lämpötilaero on 8 °C ja kaukolämmityksen 70 °C sekä putken painehäviönä on 1 bar/km. Vastaavasti suuremmalla putkikokoolla DN 400 kaukojäähdytystehoa siirtyy noin 10,2 MW ja kaukolämmitystehoa noin 90 MW. Taulukossa 2 on esitetty kaukojäähdytysputkien maksimivirtauksia ja sitä vastaavia teholumkia, kun sallittu painehäviö on 100 Pa/m ja lämpötilaero on 8 °C. (7; 18.)

TAULUKKO 2. Kaukojäähdytysputkien maksimivirtauksia ja -tehoja (18)

DN	Maksimi massavirta (kg/s)	Teho (kW)
100	11	370
200	61	2040
300	172	5760
400	306	10200
500	583	19500
600	917	30650

4.2 Johtotyypit

Kaukojäähdytysputkina on mahdollista käyttää erilaisia putkityyppejä ja materiaaleja, kuten terästä, muovia ja lasikuitua. Mikäli putki eristetään, villaa ei tule käyttää kostumisvaaran vuoksi.

Maan alle rakennettavissa johdoissa käytetään usein perinteistä kiinnivaahdotettua kaukolämpöjohtorakennetta, mutta johtuen maan ja putken välisestä pienestä lämpötilaerosta voidaan käyttää pienempää eristepaksuutta kuin kaukolämpöputkissa. (7; 16.)

Ulkoilmassa vapaana sijaitseva kaukojäähdytysputki on suojattava kosteudelta ja lämpöeristettävä. Rakennusten sisätiloihin sijoitettavien runkoputkien materiaaleiksi soveltuvat niin sanotut spiro-putket, joissa teräsputken ympärillä on polyuretaanilla kiinnivaahdotettu kierrepelti. Maanalaisissa tiloissa, kuten parkkihalleissa, rakennettavat putket voivat olla maakaasuputkea eli eristämätöntä teräsputkea, jonka pinnassa on 10–20 mm:n muovikerros. (7; 18.)

5 KAUKOJÄÄHDYTYSENERGIAN VARASTOINTI

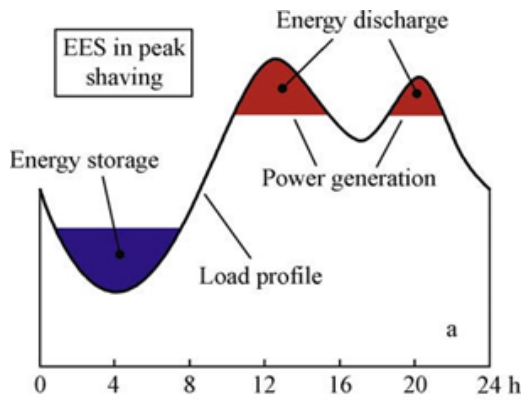
Jäähdytysenergian tarve vaihtelee merkittävästi riippuen vuodenajasta, säästä ja vuorokauden ajasta. Suomessa tavallisena kesäpäivänä esiintyy noin 4–8 h kulutushuippuja noin 2–4 päivänä kesässä. Jäähdytysenergiaa varastoivilla akuilla/varastoilla (englanniksi Thermal Energy Storage, TES) pyritään tasaamaan tuotantoa, kun jäähdytystarpeen kysyntä vaihtelee eri aikoina. Jäähdytysakku myös vähentää tarvittavaa jäähdytyksen tuotantokapasiteettia, ja samalla pidentää tuotantolaitosten vuotuista käyttöaikaa. Akun suuntaa antavana mitoitusperiaatteena voi käyttää 1/3 tuotantotehosta ja kylmäkoneen 2/3. Kaukojäähdytysakun käyttötarkoitusta Tampereen Sähkölaitokselle tullaan käsittelemään vielä tarkemmin. (7; 16.)

Varastot voidaan jakaa kahteen eri luokkaan, kausivarastoon sekä lyhytaikaiseen varastoon. Kausivarastoissa pyritään keräämään jäähdytysenergiaa myöhempää käyttöä varten kaudella, jolloin jäähdytystarvetta ei esiinny. Toisaalta investoinnin kannattavuutta voidaan parantaa suunnitelmalla varasto sekä jäähdytys- että lämmityskäyttöön. Jäähdytyksen ja lämmityksen eriaikaisuus usein mahdollistaa varaston vuorottaisen käytön. (7; 16.)

Lyhytaikaisilla varastoilla pyritään tasaamaan vaihteluita kysynnässä vuorokausi- ja viikkotasolla ja varmistamaan tuotantokapasiteetin riittävyys. Yksinkertaisesti jäähdytysakkuun pystytään lataamaan jäähdytysenergiaa aikana, jolloin kysyntä ei ole suurta ja tuotantokapasiteetti riittää tuottamaan ylimääräistä jäähdytysenergiaa myöhemmin käytettäväksi. (16.)

Jäähdytysenergian kysynnän vaihtelu voi olla nopeaa, jolloin jäähdytysakkuun varastoidulla energialla voidaan tuottaa kysyntä, johon tuotantolaitteisto ei kenties muutoin pystyisi, ja myös välttää tarpeettomia laitteiston alas- ja ylösajoa. Tilastoimalla ja seuraamalla toteutunutta tuotantoa huomataan, että kysyntäpiikit osuvat tietyille ajanhetkille, jolloin tarpeen ennustaminen helpottuu. Toisaalta myös kysyntäpiikkiin suuruuteen vaikuttavia olosuhteita, kuten ulkolämpötilaa, on mahdollista seurata, jolloin ennustaminen on entistä tarkempaa. (7; 16.)

Kuva 9 havainnollistaa hyvin, kuinka päivän aikana tapahtuvia suurempia kysyntäpiikkejä voidaan leikata aiemmin vähäisen kysynnän aikana varastoidulla jäähdytysenergialla. Kuvassa sinisellä tarkoitetaan varastoitua energiaa, joka hyödynnetään punaisten kysyntäpiikkien leikkaamiseen.



KUVA 9. Jäähdytysakun käyttäminen kulutushuippujen leikkaamiseksi (19)

Yksinkertaisimmillaan kylmävarastona voi toimia terässäiliö, kuten kuvassa 10, tai kallioon louhittu allas kuvassa 11. Varaston koko määritellään siten, että se voidaan ladata edellisen puolen vuorokauden aikana. Varaston purkuteho ja kylmäntuotantoteho yhdessä riittävät tuottamaan mitoitustilanteen kylmätehon. (7.)



KUVA 10. Tårnbyn kunnan 2000 m³ jäähdytysvesivarasto (20)

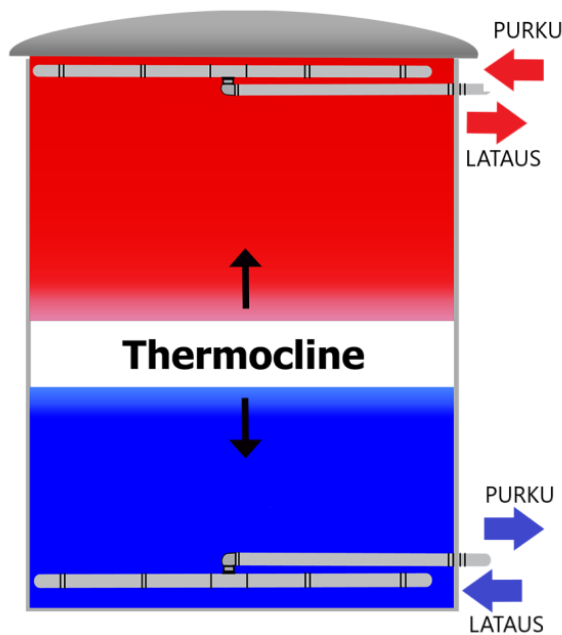
Kuvan 10 terässäiliö sijaitsee Tanskassa Tårnbyn kunnassa. Jäähdytysakun avulla Tårnby Utility voi reagoida sähkömarkkinoiden vaihteluun ja tuottaa jäähdytystä silloin, kun sähkön hinta on alhainen. Lisäksi jäähdytysakulla voi tuottaa huipputehoa ja vakauttaa lämpöpumppujen toimintaa. (20.)



KUVA 11. Helenin Esplanadin jäähdytysvesivarasto kallioon louhittuna (21)

Vesi on yleinen ja hyväksi todettu lämpö- ja jäähdytysenergian varastointimuoto. Vedelle on kuitenkin ominaista kerrostuminen. Thermocline eli suomeksi termokliini tarkoittaa harppauskerrosta. Kuvan 12 varastossa on kolme kerrosta, joista ylin kerros koostuu lämpimästä vedestä, joka on kylmää vettä kevyempää. Pohjalla on kylmän veden kerros, ja näitä kahta kerrosta erottaa termokliinikerros, joka niin sanotusti elää varaston mukana. Latausvaiheessa, kun varastoon lisätään pohjasta kylmää vettä, termokliinikerros nousee. Vastaavasti kerros purkuvaiheessa laskee, kun varastoon lisätään lämmintä vettä yläkautta. (16; 22.)

Termokliinikerroksen paksuuden tulisi olla optimaalisessa tilanteessa mahdollisimman pieni, jotta voidaan saavuttaa maksimaalinen varastointikapasiteetti. Toisaalta kerroksien sekoittumista on vältettävä, jotta energiasisältö säilyy. Kerrosten välistä sekoittumista pyritään välttämään diffuusoreilla ja pitämään varaston sisällä laminaarista virtausta yllä. Laminaarinen virtaus on välttämätöntä ja edistää kerrostumista. (23.)



KUVA 12. Jäähdytysvaraston lämpötilakerrostuminen (23)

6 LÄMPÖPUMPPULAITOKSIA SUOMESSA

6.1 Katri Valan lämpöpumppulaitos

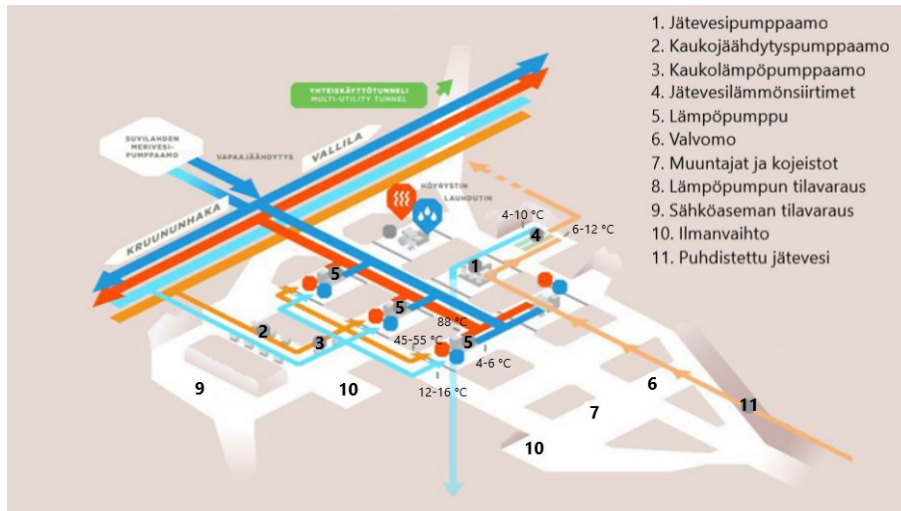
Helenin Katri Valan lämpöpumppulaitos aloitti tuotantonsa vuonna 2006 ja on kokoluokassaan maailman suurin kaukolämpöä ja -jäähdytystä tuottava lämpöpumppulaitos. Laitos on sijoitettu maan alle ja koostuu tällä hetkellä kuudesta lämpöpumpusta, josta viimeisin valmistui kesällä 2021. Helen on tehnyt investointipäätöksen lämpöpumppulaitoksen laajentamisesta vielä seitsemännellä isolla lämpöpumpulla. Taulukossa 3 on koostettu Friothermin Unitop 50FY -lämpöpumpun teknisiä tietoja. Kyseisiä lämpöpumppuja on Helenillä käytössä Katri Valan lämpöpumppulaitoksella. (24; 25.)

TAULUKKO 3. Katri Valan lämpöpumppujen teknisiä tietoja (26)

Tekniset tiedot:		
5 Heat Pump Unitop 50FY		
Talvikäyttö		
Lämmityskapasiteetti	16770	kW
Lämmitysveden virtaus	1221	m ³ /h
Paluu-/ menoveden lämpötila	50/62	°C
Absorboitu teho	4770	kW
Sähkömoottori	6500	kW
Jännite	11	kV
Lämmönlähteen jäähdytysteho	12000	kW
Jäteveden tulo-/menolämpötila	10/4	°C
Kesäkäyttö		
Lämmityskapasiteetti	18113	kW
Lämmitysveden virtaus	370	m ³ /h
Paluu-/ menoveden lämpötila	45/88	°C
Absorboitu teho	6113	kW
Sähkömoottori	6500	kW
Jännite	11	kV
Lämmönlähteen jäähdytysteho	12000	kW
Kaukojäähdytyksen paluu-/menolämpötila	20/4	°C

Yhden lämpöpumpun kaukojäähdytysteho on 12 MW ja kaukolämpöteho 18 MW. Tulevan seitsemannen lämpöpumpun on määrä aloittaa tuotanto vuonna 2023. Kaukolämpötehoa tulevilla lämpöpumpulla pystytään tuottamaan 32 MW ja kaukojäähdytystehoa 21,5 MW. Vuosien aikana nykyisten lämpöpumppujen tuotantokapasiteettia on voitu kasvattaa, ja tulevien investointien jälkeen lämpöpumppulaitokselta saatava kaukolämpöteho on 155 MW ja kaukojäähdytysteho 103,5 MW. Tuleva investointi antaa kuvaa lämpöpumppujen suuresta tilantarvevaatimuksesta, sillä Helenin seitsemäs lämpöpumppu on mitoiltaan 22,5 x 11 x 7 m. Kyseessä ovat valtavat laitteistot, jotka vaativat suuria tiloja ja sijoittaminen vaatii ennakkosuunnittelua. (24.)

Energianlähteenä lämpöpumpplaitoksella on jäteveden ylijäämlämpö sekä kesäaikana kaukojäähdytyksen paluuvesi. Ylijäämlämmön talteenotolla kaukolämpöveden menolämpötila voidaan nostaa noin 90 °C:seen. Talvella menoveden lämpötilaa priimataan noin 115 °C:seen lämpökeskuksessa. Kaukojäähdytyksen paluuvesi saadaan jäähtymään 12–16 °C:sta noin 4 °C:seen, ennen kuin se lähtee uudelle kierrokselle kaukojäähdytysverkkoon. Laitoksella tapahtuvaa kiertoa on havainnollistettu kuvassa 13. (27.)



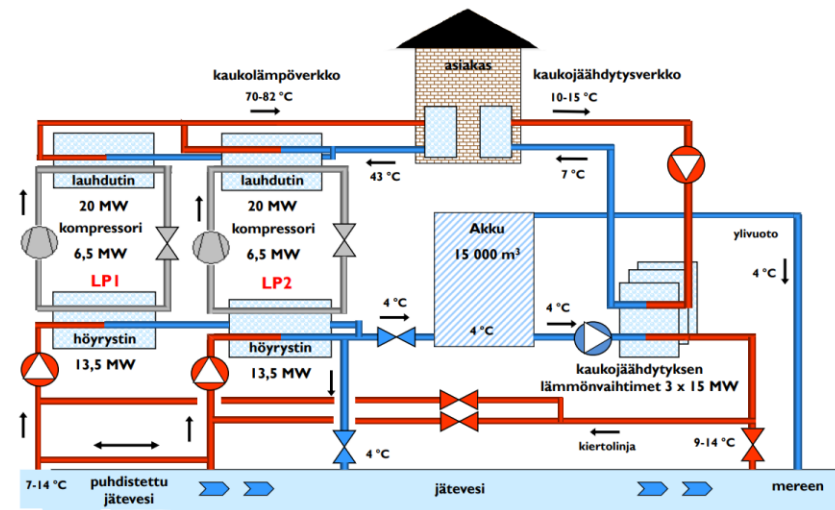
KUVA 13. Katri Valan lämpöpumpplaitoksen toimintaperiaate (28)

Katri Valan laitoksen yhteydessä ei ole omaa kaukojäähdytysakkuja, mutta Helenillä on Helsingissä Esplanadilla sekä Pasilassa maanalaisia kaukojäähdytysakkuja. Esplanadin alla sijaitseva kaukojäähdytysakku esimerkiksi on tilavuudeltaan noin 35 000 m³. (21.)

6.2 Turun Kakolan lämpöpumpplaitos

Turun Kakolan lämpöpumpplaitos valmistui vuonna 2009. Lämpöpumpplaitos on rakennettu Kakolan jätevedenpuhdistamon luolaston yhteyteen. Lämpöenergiansa lämpöpumpplaitos saa jätevedenpuhdistamolta tulevasta jätevedestä. Lämpöpumput keräävät jäteveden ylijäämlämmön talteen, minkä seurauksena laitokselta lähtevän jäteveden lämpötila on 4 °C höyrystimen jälkeen. Talteen otettu lämpö siirretään lauhdutinpuolella kiertävään kaukolämmön paluuveteen, minkä jälkeen menovettä syötetään kaukolämpöverkkoon yli 80 °C:n lämpötilassa.

Jäähdytetty jätevesi varastoidaan kaukojäähdytysakkuun, josta sitä voidaan hyödyntää kaukojäähdytysverkon menoveden jäähdyttämiseen, kuten kuvassa 14 on havainnollistettu. Lämpöpumppulaitoksella oli valmistuessaan yksi Friothermin toimittama Unitop 50FY -lämpöpumppu. Nykyään tuotannosta vastaa kaksi kyseistä lämpöpumppua. Lämpöpumppulaitoksen yhteyteen rakennettu kaukojäähdytysakku on tilavuudeltaan 15 000 m³. Kaukojäähdytysakun tarkoituksena on tasata vuorokautista jäähdytystarpeen vaihtelua. (29; 30.)



KUVA 14. Turun Kakolan lämpöpumppulaitoksen toimintaperiaate (31)

Taulukossa 4 on Kakolan lämpöpumppulaitoksen lämpöpumpun teknisiä tietoja. Lämpöpumput ovat malliltaan vastaavia kuin Katri Valassa eli Friothermin Unitop 50FY. Verrattuna Katri Valan vastaaviin lämpöpumppuihin huomataan, että lämmitys- ja jäähdytyskapasiteeteissa on poikkeavuutta. Tätä selittää muun muassa lämmönlähteen eri lämpötilatasot.

TAULUKKO 4. Kakolan lämpöpumpun teknisiä tietoja (29)

Toimintakaudet	Kesä	Talvi
Lämmityskapasiteetti	21200 kW	17800 kW
Jäähdytyskapasiteetti	15300 kW	13035 kW
Lauhduttimen paluu- /menoveden lämpötila	50/75 °C	40/82 °C
Höyrystimen paluu- /menoveden lämpötila	18/4 °C	12/4 °C
COP	3,6	3,8

Kakolan lämpöpumppulaitoksen sijainti on valittu hyvin, sillä se on lähellä sekä kaukolämpö- että kaukojäähdytyskuormia. Kakolan etuna on myös se, että menovettä ei tarvitse talvisinkaan priimata, koska se menee suoraan kaukolämmön lähijakeluverkkoon. Lisäksi sähköverkko alueella oli riittävän järeä, eikä sitä tarvinnut lämpöpumppujen vuoksi vahvistaa. (27.)

7 TAMPEREEN SÄHKÖLAITOS OY JA KAUKOJÄÄHDYTYS

7.1 Konserni ja talous

Tampereen Sähkölaitos on vuonna 1888 toimintansa aloittanut energiayhtiö, joka toimii Pirkanmaan alueella. Sähkölaitos jakelee alueella maakaasua ja tuottaa kaukolämpöä, kaukojäähdytystä sekä sähköä. Tampereen kaupunki omistaa kokonaisuudessaan Tampereen Sähkölaitos Oy:n. Tampereen Sähkölaitos Oy toimii emoyhtiönä Tammervoima Oy:lle, Tampereen Vera Oy:lle sekä Tampereen Sähköverkko Oy:lle. (32.)

Konsernin liikevaihto vuonna 2020 oli noin 265 miljoonaa euroa, eli laskua oli edellisvuoteen verrattuna 8 %. Lasku johtui pääosin lämpimästä säätilasta, joka pienensi lämmön ja sähkön myyntiä. Vaikutuksensa teki myös matala markkinahinta. Liiketulos vuonna 2020 oli 44,5 miljoonaa euroa, ja on siten edellisvuoteen verrattuna pysynyt lähes samalla tasolla. Kannattavuuteen ovat vaikuttaneet investoinnit biolaitoksiin, laitosten hyvä käytettävyyys sekä tuotannon optimointi. (32.)

Kuvassa 15 on nähtävissä liikevaihdon jakautuminen eri toiminta-alueiden välillä. Noin puolet liikevaihdosta koostuu kaukolämmön ja -jäähdytyksen myynnistä ja neljännes sähkön myynnistä. Kaukolämmön ja -jäähdytyksen osuus on merkittävä, ja siksi lämpimällä säätilalla on ollut vaikutusta liikevaihdon supistumisessa. (32.)



KUVA 15. Tampereen Sähkölaitoksen liikevaihdon jakautuminen toiminta-alueittain (32)

7.2 Tampereen Sähkölaitoksen kaukojäähdytys

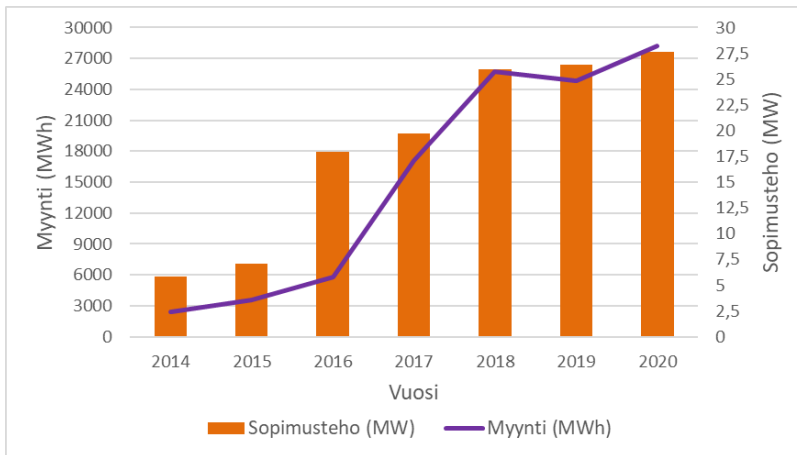
Tampereen Sähkölaitos aloitti kaukojäähdytyksen tuottamisen vuonna 2012. Aluksi kaukojäähdytystä tuotettiin siirrettävillä jäähdytyskonteilla yksittäisille asiakkaille. Kuvassa 16 näkyy 4 kappaletta 1,5 MW:n jäähdytyskontteja, joilla kaukojäähdytystoimintaa on aloitettu Tampereella.



KUVA 16: Tampereen Sähkölaitoksen jäähdytyskontit (Antti Mikkonen)

Vuonna 2016 valmistui Kaupinojan vapaajäähdytyslaitos, jonka maksimi jäähdytysteho on 40 MW. Vapaajäähdytyksen todelliseen huipputehoon vaikuttaa kuitenkin vuodenaika ja järviveden lämpötila. Jäähdytysenergiansa vapaajäähdytyslaitos saa viereisen Näsijärven syvänteestä. Kaupinojan jäähdytyslaitokselle on lisätty kompressorijäähdytyksen tuotantokapasiteettia, joka vuonna 2020 on ollut noin 23 MW. Lopullisessa vaiheessa kompressorijäähdytyksen tuotantokapasiteetti tulee Kaupinojalla olemaan 40 MW. Tällä hetkellä kaukojäähdytys tuotetaan pääosin Kaupinojalla, ja jäähdytyskontit toimivat varakapasiteettina häiriötilanteita varten.

Vuonna 2020 kaukojäähdytysasiakkaita on ollut 30 ja liitettyjä rakennuksia 52. Kaukojäähdytysverkon pituus on 16,7 km ja myydyn jäähdytysenergian määrä on ollut noin 28,2 GWh. Kuvassa 17 on esitetty kaukojäähdytystoiminnan kehitystä vuodesta 2014 alkaen vuoteen 2020 asti. Kolmena viime vuonna kasvu on kaukojäähdytystoiminnan alkuvuosiin verrattuna hidastunut. Sopimusteho on lisääntynyt vuodesta 2018 vuoteen 2020 noin 1,7 MW. Esimerkiksi vuodesta 2014 vuoteen 2016 sopimusteho kasvoi noin 12 MW. Tätä kehitystä osaltaan selittää alkuvuosien pieni jäähdytyskapasiteetti. Vuonna 2016 jäähdytyskapasiteetti lisääntyi merkittävästi, jolloin suurempaa asiakas-kuntaa on voitu alkaa palvella.



KUVA 17. Kaukojäähdytyksen myynnin ja sopimustehon kehittyminen Tampereen Sähkölaitoksella

8 LÄMPÖPUMPPULAITOKSEN JA KAUKOJÄÄHDYTYSKUN MITOITUS JA SIIJOITUS

Työn aiheena on ollut löytää teknisesti mahdollisia sijaintivaihtoehtoja lämpöpumppulaitokselle sekä kaukojäähdytyskulle nykyisen kaukojäähdytysverkon alueelta. Nykyisellään Tampereen kaukojäähdytyskunnan tuotanto on keskittynyt Kaupinojan jäähdytyslaitokselle. Varatuotantolaitoksina toimii tällä hetkellä 4 kappaletta 1,5 MW:n kaukojäähdytyskontteja Jokikadun ja Viinikanlahden jätevedenpuhdistamon yhteydessä. Lisäksi Kalevan uintikeskuksella on mahdollista tuottaa 0,5 MW kaukojäähdytystä lämpöpumpulla. Työstä on rajattu pois kustannuslaskelmat ja lämpöpumppulaitoksen toiminnan kannalta kaukolämpöverkkoa ajatellaan ikään kuin äärettömänä, minne kaikki lämpöpumppulaitokselta ajettava lauhde tulee mahtumaan.

Tampereen nykyisen kaukojäähdytysverkon jäähdytystehon tarve on ollut suurimmillaan 18 MW vuonna 2021. Tulevaisuudessa jäähdytystehon kysynnän todettiin kasvavan 50 MW:iin asti, ja tähän jäähdytystehon tarpeeseen on pystyttävä vastaamaan. Tätä tarvetta varten tullaan arvioimaan lämpöpumppulaitoksen sekä kaukojäähdytyskunnan suuruusluokkaa sekä mahdollisia sijaintivaihtoehtoja.

8.1 Kaukojäähdytysverkoston kapasiteetti

Tampereen kaukojäähdytysverkoston mitoitusperiaatteina ovat 8 °C:n lämpötilaero meno- ja paluuvien välillä sekä painehäviö 50 Pa/m kaukojäähdytysputkelle. Tiukalla mitoituspainehäviöllä on ajateltu tulevaisuutta jättäen tilaa laajennuksille. Sallittava painehäviö vaikuttaa putkessa siirrettävän nesteen määrään. Mitä suurempi painehäviö sallitaan, sitä enemmän nestettä putken on mahdollista siirtää. Tämä kuitenkin lisää pumppauksen tarvetta ja kustannuksia. Jos esimerkiksi veden virtaus putkessa halutaan kaksinkertaistaa, on luotava nelinkertainen paine-ero putken tulo- ja lähtöaukon välille. Tämä voidaan todeta kaavoista 1 ja 2. (16.)

KAAVA 1. Painehäviön laskentakaava

$$\Delta p = \lambda * \frac{L}{d} * \rho * v^2 * \frac{1}{2}$$

Δp = painehäviö (Pa)

λ = kitkakerroin

L= putkipituus (m)

d= putken sisähalkaisija (m)

ρ = veden tiheys (1000 kg/m³)

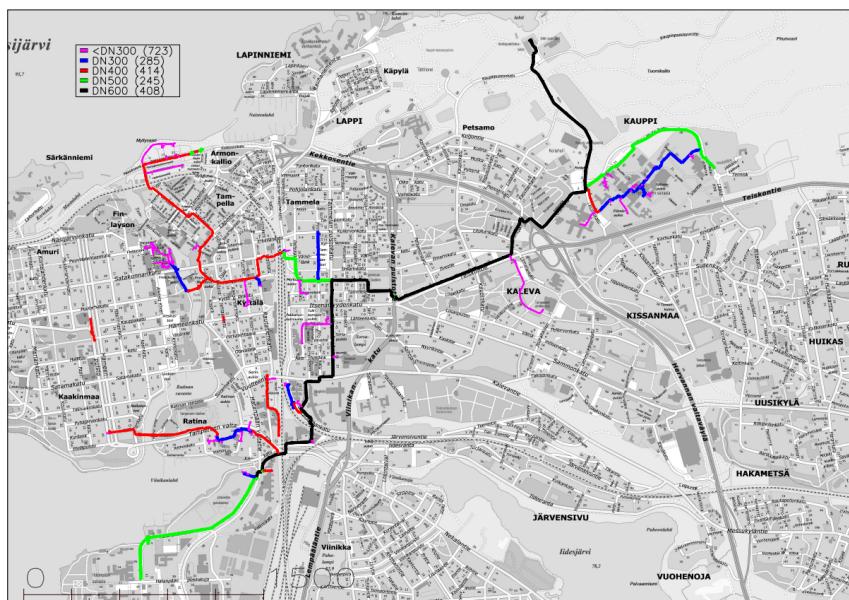
v= virtausnopeus (m/s)

KAAVA 2. Painehäviön laskentakaava

$$\Delta p = \left(\frac{8 * \lambda * L}{d^5 * \pi^2 * \rho} \right) * qm^2$$

qm= massavirta (kg/s)

Lämpöpumpulaitoksen sekä jäähdytysakun sijaintivaihtoehtojen tutkimisen kannalta kaukojäähdytysverkoston kapasiteetti on selvitettävä. Kuvassa 18 on Tampereen Sähkölaitoksen nykyinen kaukojäähdytysverkosto putkikokoineen.



KUVA 18. Tampereen Sähkölaitoksen kaukojäähdytysverkko

Kaukojäähdytysverkoston tilannetta arvioidaan toimeksiantajan tuottaman PTS-suunnitelman avulla. PTS-suunnitelmasta on nähtävissä kaukojäähdytyksen kulutuspisteet sekä kasvuodotukset

viiden vuoden kuluttua. Tulevaisuuden kasvun odotetaan tapahtuvan nykyisen kaukojäähdytysverkon alueella ja kasvuennusteet tullaan tekemään PTS-suunnitelman kulutuspiisteiden jäähdytystarpeita kasvattamalla. Kaupinojan jäähdytyslaitos toimii päätuotantolaitoksena, mistä jäähdytysteho toimitetaan kulutuskohteisiinsa koko jäähdytysverkon alueelle. Jäähdytystehon tarpeen yhä kasvaessa tämä on ongelmallinen tilanne, sillä kaukojäähdytysputkien tehonsiirtokyky on rajallinen.

8.2 Kaukojäähdytysverkon painehäviölaskenta

Painehäviölaskenta on aloitettu viimeisestä kulutuspiisteestä ja edetty asiakas ja haara kerrallaan kohti Kaupinojan jäähdytyslaitosta. Kaukojäähdytysverkko on jaettu yhteensä kolmeen osaan. Ensimmäinen osuus on Kaupinoja–Hatanpää, joka on varsinainen siirtojohto. Toisena osuutena on ajateltu siirtojohtosta Vellamonkadulla erkaantuva haara kohti Ranta-Tampellaa. Viimeinen erillinen haara on Jokikatu–Särkänniemi, josta suuri osa on vielä rakentamatta.

Kaupinojalta lähtevän kaukojäähdytysputken on kyettävä siirtämään koko verkon jäähdytysteho ennen ensimmäistä kuluttajaa, minkä jälkeen seuraavassa putkiosuudessa siirrettävän jäähdytysenergian määrä on ensimmäisen kuluttajan verran pienempi. Kaukojäähdytysputkessa siirtyvä jäähdytysteho on mahdollista laskea kaavan 3 avulla. (7.)

KAAVA 3. Kaukojäähdytystehon laskentakaava

$$\Phi = C_p * \rho * qv * \Delta T$$

Φ = kaukojäähdytysteho (kW)

C_p = ominaislämpökapasiteetti (4,18 kJ/kgK)

ΔT = meno- ja paluueden lämpötilaero (8 °C)

Toisaalta,

KAAVA 4. Tilavuusvirtauksen laskentakaava

$$qv = \frac{\Phi}{C_p * \rho * qv * \Delta T}$$

Tilavuusvirtaus voidaan muuttaa massavirtaukseksi kaavan 5 avulla, kun tunnetaan tiheys. (33.)

KAAVA 5. Massavirran laskentakaava

$$qm = qv * \rho$$

Kaukojäähdytysverkoston kartasta kuvassa 18 on nähtävissä eri osuuksien putkikoot. Taulukon 5 avulla pystyy määrittämään putkien sisähalkaisijat.

TAULUKKO 5. DN putkikoko taulukko (34)

DN	ds (mm)	D (mm)	L (m)	Paino (kg/m)	Vesitilavuus (l/m)
20	26,9*2,3	125	6	3,4	0,4
20	26,9*2,6	125	12	3,6	0,4
25	33,7*2,6	125	12	4,0	0,6
32	42,4*2,6	140	12	4,9	1,1
40	48,3*2,6	140	12	5,3	1,5
50	60,3*2,9	160	12	6,9	2,3
65	76,1*2,9	180	12	8,6	3,9
80	88,9*3,2	200	12	10,8	5,4
100	114,3*3,6	250	12,16	15,7	9,0
125	139,7*3,6	280	12,16	19,1	13,8
150	168,3*4,0	315	12,16	24,6	20,2
200	219,1*4,5	400	12,16	36,8	34,7
250	273,0*5,0	450	12,16	48,7	54,3
300	323,9*5,6	500	12,16	62,4	76,8
*350	355,6*5,6	560	12,16	71,9	93,2
400	406,4*6,3	630	12,16	91,6	121,8
500	508,0*6,3	710	12,16	111,9	192,8
600	610,0*7,1	800	12,16	145,7	278,8

Putken sisähalkaisijan d avulla on mahdollista laskea putken poikkipinta-ala A kaavan 6 avulla. (16.)

KAAVA 6. Putken poikkipinta-alan laskentakaava

$$A = \frac{\pi * d^2}{4}$$

A= putken poikkipinta-ala (m²)

Virtausnopeuden selvittämiseksi on tunnettava sekä tilavuusvirtaus että putken poikkipinta-ala. Virtausnopeudenkin avulla on mahdollista arvioida, onko putki käymässä ahtaaksi. Suuri virtausnopeus nostaa painehäviöiden määrää. Virtausnopeus lasketaan kaavan 7 mukaisesti. (16.)

KAAVA 7. Virtausnopeuden laskentakaava

$$v = \frac{qv}{A}$$

Virtausnopeuden avulla laskelmaa voidaan jatkaa ja selvittää Reynoldsin luku, jota tarvitaan kitkakertoimen laskennassa. Reynoldsin luku lasketaan kaavan 8 avulla. (7.)

KAAVA 8. Reynoldsin luvun laskentakaava

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}$$

Re= Reynoldsin luku

ν = kinemaattinen viskositeetti (m²/s)

Toinen arvo, jota kitkakertoimen laskemiseksi tarvitaan, on suhteellinen karheus ϵ . Tavallisesti kaukolämpöteräspankille karheus k on 0,04–0,1 mm. Tässä laskelmassa oletuksena on käytetty 0,045 mm:n karheutta, sillä kaukojäähdytysputken ovat käytännössä samoja putkia kuin kaukolämpöputket. Suhteellinen karheus lasketaan kaavalla 9. (7.)

KAAVA 9. Putken suhteellisen karheuden laskentakaava

$$\epsilon = \frac{k}{d}$$

ϵ = suhteellinen karheus

k = karheus (mm)

Kitkavastuskertoimen λ määrittämiseksi on mahdollista hyödyntää LVI-tekniikassa käytettyä yhtälöä. Kitkavastuskerroin lasketaan kaavan 10 mukaisesti. (33.)

KAAVA 10. Kitkavastuskertoimen laskentakaava

$$\lambda = 0,25 * \left(\log \left(\frac{\varepsilon}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right)^{-2}$$

Kitkavastuskertoimen avulla on mahdollista laskea kitkavastuksista aiheutuva painehäviö ΔP_{kitka} . Nesteen virratessa putkessa syntyy kitkan vaikutuksesta painehäviö, joka voidaan laskea aiemmin esitetyn kaavan 1 avulla.

Kitkavastusten lisäksi painehäviötä aiheutuu kertavastuksista. Kertavastukset ovat verkostossa virtausta häiritseviä tekijöitä, kuten haaroja, venttiileitä, putkihalkaisijan muutoksia tai vastaavia virtausta kertaluontoisesti häiritseviä tekijöitä. Työssä on ajateltu, että kertavastukset ovat kohtuullisen suuri lisä painehäviöihin. Kitkavastusten putkipituuden laskentaan onkin lisätty 10 % kertavastuksista aiheutuvaa häiriötä. Tällä toisaalta varmistetaan laskennan turvallisuus ja luodaan verkostoon hieman suuremmat painehäviöt. Näin voidaan korostaa verkostosta löytyviä ahtaita putki-osuuksia. (7.)

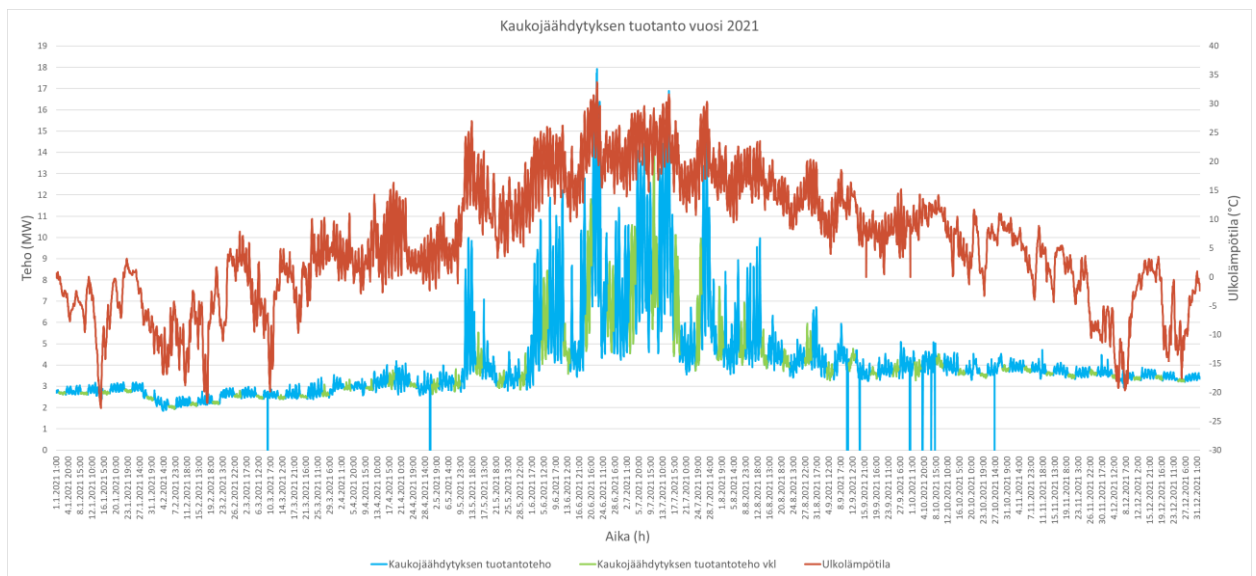
Taulukossa 6 on painehäviölaskennasta ote. Siinä on kuvattuna PTS-suunnitelman mukaisen jäähdystarpeen kasvua vastaava painehäviölaskenta. "FAIL" tarkoittaa tässä tapauksessa tilannetta, jolloin ei ole päästy painehäviössä asetettuun kriteeriin. "PASS" tarkoittaa taas tilannetta, jossa syntyvä painehäviö täyttää asetetun kriteerin.

TAULUKKO 6. Kaupinoja–Hatanpää PTS-suunnitelman mukaisella kasvulla syntyvät painehäviöt

ΔP_{kitka} (Pa)	$\Delta P_{\text{kerta}} (1,05/1,10)$ (Pa)	$\Delta P_{\text{yhteensä}}$ (Pa)	Pa/m		50Pa/m	100Pa/m	150Pa/m	200Pa/m
93085,7	9308,6	102394,2	92,9		FAIL	PASS	PASS	PASS
1630,9	163,1	1794,0	71,8		FAIL	PASS	PASS	PASS
40164,9	4016,5	44181,4	51,7		FAIL	PASS	PASS	PASS
16998,4	1699,8	18698,3	49,2		PASS	PASS	PASS	PASS
23260,5	2326,1	25586,6	48,5		PASS	PASS	PASS	PASS
15766,3	1576,6	17342,9	46,5		PASS	PASS	PASS	PASS
8524,6	852,5	9377,1	35,1		PASS	PASS	PASS	PASS
4292,2	429,2	4721,4	22,5		PASS	PASS	PASS	PASS
9953,7	995,4	10949,1	22,5		PASS	PASS	PASS	PASS
309,7	31,0	340,7	17,0		PASS	PASS	PASS	PASS
1569,7	157,0	1726,7	7,1		PASS	PASS	PASS	PASS
1666,6	166,7	1833,2	7,1		PASS	PASS	PASS	PASS
32,0	3,2	35,2	0,2		PASS	PASS	PASS	PASS
20,0	2,0	22,0	0,2		PASS	PASS	PASS	PASS
407,9	40,8	448,7	0,5		PASS	PASS	PASS	PASS
140,1	14,0	154,1	0,5		PASS	PASS	PASS	PASS

Laskennan tuloksena nähdään, että Kaupinojan siirtojohto tulee tulevaisuudessa käymään jäähdytystehon kasvaessa ahtaaksi. Tässä tilanteessa on kuitenkin huomioitava se, että kyseessä on huipputilanne, jolloin jäähdytystehon tarve on suurimmillaan, eikä kyse ole siis jatkuvasta rasitteesta.

Kuvassa 19 on vuoden 2021 kaukojäähdytyksen tuotannon kuvaaja. Sinisellä ja vihreällä viivalla kuvataan kaukojäähdytyksen tuotantotehoa. Sininen viiva kuvaa arkipäiviä ja vihreä viikonloppuja. Ulkolämpötila on kuvaajassa punaisella viivalla.



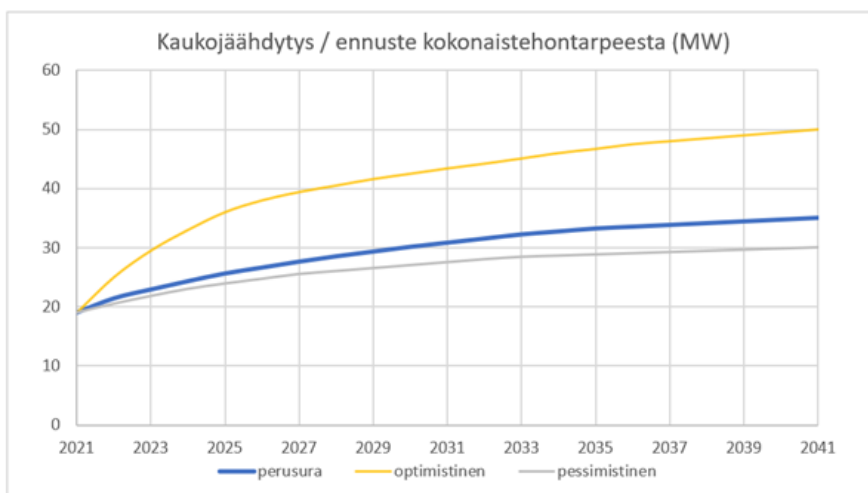
KUVA 19. Kaukojäähdytyksen tuotanto vuonna 2021

Merkittävin jäähdytystarve kohdistuu kesäajalle. Toisaalta tilanteet, jotka vaativat siirto- ja tuotantokapasiteettia ovat hetkellisiä kysyntäpiikkejä eivätkä jatkuvaa peruskuormaa. Tulevaisuudessa vuosittainen tuotantokäyrä on todennäköisesti hyvin samankaltainen, sillä jäähdytystarve seuraa kuvaajan perusteella hyvin tarkasti ulkolämpötilaa. Jäähdytystarvetta tulee olemaan enemmän, ja näin ollen peruskuorma on suurempi.

Nykyinen tuotantomalli, missä on yksi jäähdytystä tuottava päälaitos tulee kuormittamaan Kaupinojan siirtojohtoa ja tuotantokapasiteettia jäähdytystarpeen kasvaessa. Painehäviöt ja virtausnopeus siirtojohtossa kasvaa siirrettävän jäähdytystehon lisääntyessä. Ongelma voidaan ratkaista siirtojohtoa suurentamalla tai lisäämällä pumppauskapasiteettia. Toisaalta hajauttamalla jäähdytystuotantoa eri puolelle kaukojäähdytysverkkoa ei Kaupinojalla ole tarvetta tuottaa kaikkea jäähdytystehoa, ja siirtojohtoon jäähdytystehon siirtokapasiteetti riittää.

8.3 Kaukojäähdytystoiminnan kehittyminen nykyisen kaukojäähdytysverkon alueella

Tampereen Sähkölaitoksella odotetaan maltillista kaukojäähdytyksen tarpeen kasvua. Kuvassa 20 on kolme eri skenaariota kaukojäähdytyksen kehitykselle. Tällä hetkellä suurin hetkellinen jäähdytystehon tarve on ollut 18 MW. Tulevaisuuden jäähdytystarpeen oletetaan kasvavan optimistisessa skenaariossa 50 MW:iin asti. Tällä oletuksella varaudutaan siihen, ettei Kaupinojan jäähdytyslaitos enää yksistään riitä tuottamaan kaikkea jäähdytystä, vaan tarvitaan uutta tuotantokapasiteettia. Monipuolisemmat tuotantovaihtoehdot eri sijaintipaikoissa tuovat varmuutta tuotannolle.



KUVA 20. Kaukojäähdytystehon tarpeen kehittyminen Tampereella

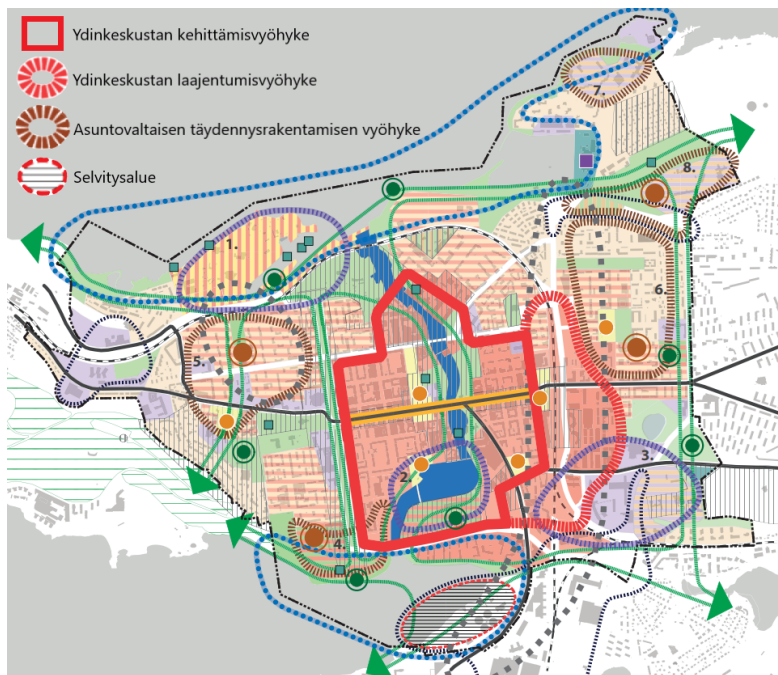
8.4 Jäähdytystarpeen kasvun jakautuminen tasaisesti kaukojäähdytysverkossa

Yksi oletus tulevalle jäähdytystarpeen kasvulle oli, että kasvu tulisi jakautumaan tasaisesti. Kysyntä kaukojäähdytysverkon alueella kasvaisi siis yhtä paljon joka puolelta siinä suhteessa kuin jäähdytystehoa tarvitaan PTS-suunnitelman mukaisesti. Ongelmaksi tässä mallissa osoittautui se, että nykyiset suuret yksittäiset kuluttajat sekä niitä ympäröivien alueiden jäähdytysteho kasvoi liian merkittävästi.

Toisaalta ongelmana ei pelkästään ollut nykyisten suurten asiakkaiden jäähdytystehon kasvu vaan kasvu verkoston alueilla, joissa ei tällä hetkellä nähdä edellytyksiä kaukojäähdytyksen tarpeen kasvulle. Esimerkiksi Ranta-Tampellan alueella on olemassa kaukojäähdytysinfrastruktuuri, mutta kysyntä alueella ei toistaiseksi ole ollut suurta, joten oletus tämän alueen suuresta kasvusta voidaan rajata pois.

8.5 Jäähdytstarpeen kasvu lopullisen laskentamallin mukaisesti

Kaukojäähdytystoiminnan kasvun kehittymistä arvioidaan ja perustellaan nykytietoon ja tulevaisuuden odotuksiin pohjautuen. Kuvassa 21 on esitetty Tampereen kaupungin keskustan strategisen osayleiskaavan maankäyttö. Osayleiskaavasta on mahdollista tarkastella tulevia kehitysnäkymiä Tampereen kaupungin alueella. Tämän perusteella voidaan arvioida, millä alueilla kaukojäähdytystoiminnalla on potentiaalia kehittyä.



KUVA 21. Strategisen osayleiskaavan maankäyttö ydinkeskustan vyöhykkeillä (35)

Kuvasta 21 kiinnostavimmat alueet ovat ydinkeskustan kehittämisvyöhyke, ydinkeskustan laajentumisvyöhyke sekä Hatanpään selvitysalue. Näillä alueilla on odotettavissa voimakasta kehittymistä, joka mahdollisesti heijastuisi myös kaukojäähdytystoiminnan kasvuna.

Ydinkeskustan kehittämisvyöhykkeellä on potentiaalia voimakkaalle kaupalliselle kehittämiselle. Tätä voidaan edistää muun muassa kehittämällä sekä korttelien että sisäpihojen liikekäyttöä ja otamalla käyttöön maanalaisia tiloja. Ydinkeskustan laajentumisvyöhyke on voimakkaan uudistumisen aluetta. Alueelle ominaisia ovat monipuoliset työpaikkojen, kauppojen, palveluiden, vapaa-ajan sekä asumisen toiminnot. Ominaista on myös keskeinen sijainti sekä rakennuskannan ja julkisten tilojen muutospotentiaali, minkä vuoksi aluetta voidaan kehittää voimakkaasti. Selvitysalueella on

Viinikanlahden jätevedenpuhdistamon alue, josta vanha puhdistamo tullaan purkamaan. Tällöin tontilta vapautuu tilaa uudisrakentamiselle. (36.)

Oletettua jäähdystarpeen kasvua PTS-suunnitelman tilanteesta tulee optimistisen kehityksen mukaan olemaan 23,85 MW. Osayleiskaavan kehitysnäkymien perusteella sekä käytyjen keskustelujen perusteella todettiin, että noin 80 % kasvusta kohdistuisi keskustan sekä Hatanpään alueelle. Tästä edelleen noin 62 % kohdistuisi ydinkeskustan alueelle ja 38 % Hatanpään alueelle.

9 POTENTIALIALISIA LÄMPÖPUMPPUJEN VALMISTAJIA

Todettiin, että lämpöpumppulaitos tulisi palvelemaan puuttuvaa 10 MW:n jäähdytystehoa, kun jäähdytystehon tarve tulee kasvamaan 50 MW:iin. Kaupinojan on mahdollista tuottaa lopullisessa vaiheessa 40 MW jäähdytystehoa. Lisäksi lämpöpumppulaitokselle tarvitaan 6,5 MW varakapasiteettia, joka vastaa jäähdytysteholtaan Kaupinojan suurinta yksittäistä kompressorijäähdytintä.

Lämpöpumppuratkaisuja varten työn aikana on otettu yhteyttä lämpöpumppuja toimittaviin yrityksiin. Helle mitoituskriteereinä on toimitettu tieto tarvittavasta jäähdytystehon tarpeesta, joka on yhteensä 16,5 MW. Käytettävä lämmönlähde on kaukojäähdytyksen paluuvesi, joka kiertää höyrystinpiirissä ja on lämpötilaltaan mitoitusilanteessa 16 °C. Kaukojäähdytyksen menoveden lämpötilana käytetään 8 °C:ta. Kaukolämmön paluueden lämpötilana lauhduttimelle on käytetty 50 °C:ta. Kaukolämmön menolämpötilana on käytetty 75–85 °C. Kyseisillä lämpötilatasoilla saadaan riittävän hyvä yleiskuva mitoitukseen.

Yksi lämpöpumppuvaihtoehto on saatu Carrier Oy:ltä. Kyseessä on malli 61XWH-ZE15. Yksittäinen lämpöpumppu on fyysisiltä mitoiltaan kohtuullisen kokoinen ja korkeudeltaan 2,3 m. Ongelmana on, että palvellakseen Tampereen tarpeita olisi lämpöpumppuja kytkettävä sarjaan 4 kappaletta, ja ne muodostaisivat yhden moduulin. Yhden moduulin jäähdytysteho on noin 3,7 MW. 16,5 MW jäähdytystarpeen täyttämiseksi tarvittaisiin viisi moduulia, eli yhteensä tarvittaisiin 20 lämpöpumppua. Pohjapinta-alan tarve tulisi olemaan yli 250 m² huomioiden 1 m:n huoltoväli lämpöpumppujen väliin. Laitoksen mahduttaminen yhteen tilaan vie paljon tilaa muulta käytöltä. Moduulit on mahdollista putkittaa eri kerroksiin esimerkiksi maan alla tai jopa eri rakennuksiin, mutta silloin rakennuskustannukset nousevat. Huoltokustannuksetkin kasvavat, kun huollettavien lämpöpumppujen määrä on suuri. (37.)

Toisena vaihtoehtona on tarkasteltu Johnson Controlsin lämpöpumppuja. Johnson Controlsilla on kokemusta suurista lämpöpumppuhankkeista. Esimerkiksi Helenillä on Esplanadin puiston alla kaksi Johnson Controlsin lämpöpumppua, jotka yhteensä tuottavat 15 MW jäähdytystehoa. Lisäksi he ovat toteuttaneet lämpöpumppuprojekteja, jossa höyrystinpiirin lämmönlähde on kaukojäähdytyksen paluuvesi. Tarkempia mitoitus tuloksia ei ollut mahdollista saada käyttöön, mutta lämpöpumppujen määrä on huomattavasti vähäisempi kuin edellisessä vaihtoehdossa.

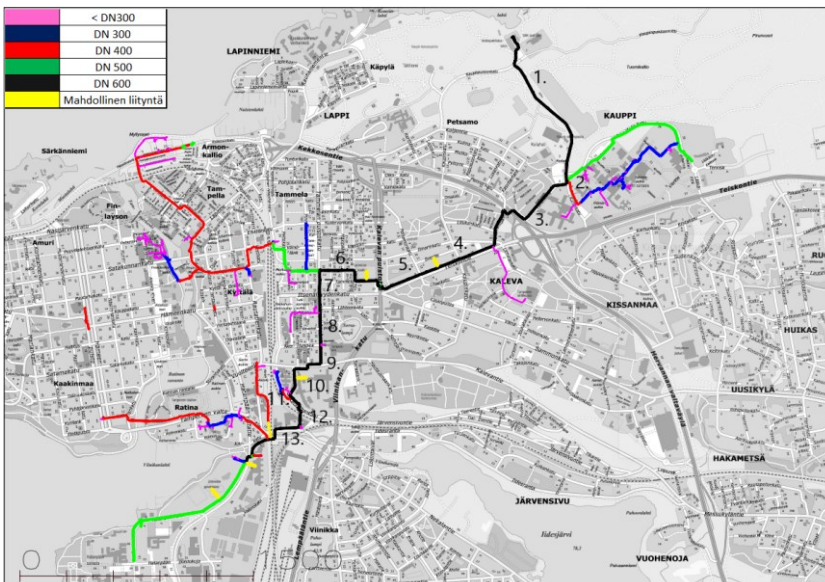
Johnson Controlsin lämpöpumput ovat kooltaan huomattavasti suurempia. Suurempaan jäähdytystehon tuottamiseen soveltuvat mallit, kuten YORK CYK -turbolämpöpumppu on mitoiltaan 5,5 x 6,5 x 6 m. Toinen soveltuva malli YORK HP YK -turbolämpöpumppu on mitoiltaan 5 x 6,5 x 3,8 m. Kolmas vaihtoehto on Sabroe HeatPAC 273S, jossa on kaksi konetta kytkettynä sarjaan, jolloin mitat ovat 4,6 x 10 x 4,6 m. Johnson Controlsin tapauksessa olisi käytännössä aina suoritettava kaksiastekytkentä, mikäli halutaan saavuttaa toivotut lämpötilatasot. (38.)

10 LÄMPÖPUMPPULAITOKSEN SIJAINIVAIHTOEHDOT

Työssä tarkasteltiin erilaisia sijaintivaihtoehtoja lämpöpumppulaitokselle, jonka jäähdytysteho on kokonaisuudessaan 16,5 MW. Aikaisemman painehäviölaskennan tuloksena saatiin aikaan laskentatyökalu, jolla voidaan arvioida putkiosuuksien kelpoisuutta lämpöpumppulaitoksen sijoittamiselle. Uusi kapasiteetti sijoitetaan laskentaan vähentämällä nykyisen putkiosuuden jäähdytystehon tarpeesta uuden tuotantolaitoksen maksimikapasiteetti.

Tällä tavoin löydetään putkiosuudet, joissa uusi tuotantolaitos vähentää eniten ylisuuria painehäviöitä. Putkiosuuksien kelpoisuutta vertaillaan ensin karkeasti sen perusteella, kuinka monta PASS-arvoa se antaa painehäviölaskentaan. Mitä useampi PASS-arvo laskentaan saadaan, sitä useamassa putkiosuudessa päästään asetettuihin painehäviöiden kriteereihin.

Laskentatyökalun perusteella kelpoisia putkiosuusia ovat osuudet 1–13 eli osuudet Kaupinojan jäähdytyslaitokselta Hatanpään valtatie ja Jokikadun risteykseen. Näille osuuksille on yhteistä suuri putkikoko DN 600 sekä suuri toimitettavan jäähdytystehon määrä. Kuvassa 22 on havainnollistettu, kuinka putkiosuudet on määritetty laskentaa varten.



KUVA 22. Kaukojäähdytysverkon putkiosuudet ja mahdolliset tulevat liityntäpisteet uusilla asiakkailla

Lämpöpumppulaitoksen sijaintivaihtoehtojen tutkimisen seuraavassa vaiheessa on tarkasteltu kelpoisten putkiosuuksien lähiympäristöä siirtojohdon molemmin puolin. Tällä tavoin saadaan varsin kattava otanta alueen rakennuskannasta ja voidaan etsiä kiinnostavia kohteita, joista voisi löytyä tilaa lämpöpumpuille. Paikkatietoaineistosta on mahdollista kerätä alueen kiinteistöjen tietoja. Tiedoista kiinnostavia ovat erityisesti rakennusnumero, tyyppi, kerrosala, kerroslukumäärä sekä rakennustilavuus.

Näiden tietojen perusteella voidaan tehdä arviointia, voisiko kiinteistöistä löytyä tiloja lämpöpumpuille. Vertaamalla kaukojäähdytysverkoston siirtojohdon sijaintia, kiinnostavia putkiosuuksia 1–13 ja ympäröiviä kiinteistöjä, on mahdollista tehdä arviointia sijaintivaihtoehdoista. Kiinteistöistä kiinnostavimpia ovat muun muassa suuret julkiset rakennukset, myymälät, teollisuusrakennukset ja varastot. Näissä mahdollisesti voisi olla tilaa teollisen kokoluokan lämpöpumpulle ja näin voitaisiin harkita kellarisijoitusta.

Taulukossa 7 on esitetty eri sijaintivaihtoehtojen kelpoisuutta lämpöpumppulaitoksen sijoittamiselle värikoodauksella. Värikoodauksessa punainen tarkoittaa, että kohde ei ole kelpoisa, keltainen kuvastaa, että kohde on mahdollinen ja vihreä kuvastaa, että kohde on hyväksyttävissä.

TAULUKKO 7. Lämpöpumppulaitoksen sijaintivaihtoehtoja

Kohde	Sijainti runkolinjaan	Mahdollinen liitettävä putkiosuus	Vaikutus verkostolle/ PASS	Tilat lämpöpumpulle
Dynamo Business Park		13.	12	-
Ratinankaari		13.	12	-
Ratinan lämpökeskus		13.	12	-
Tammelakeskuksen terveysasema		7.	6	-
Kalevan lukio		9.	8	-
Tampereen Yliopisto		12	11	-
Technopolis Yliopistonrinne		11.	10	-
Monetra Pirkanmaa Oy		13.	12	-
Tietotalo		13.	12	-
Kaupin sairaala		5./6.	6	-
MyLAB		13.	12	-
VR-CARGO		13.	12	-
P-Hämppi- optio 1		8.	7	-
P-Hämppi- optio 2		12	11	-

Teollisen kokoluokan lämpöpumput vaativat sähkötehoa jopa useita megawatteja. Lisäksi lämpöpumppujen vaatima jännitetaso tuo haasteita muuntoketjun suunnittelulle ja sen kannattavuudelle. Tilaustehon ollessa useita megawatteja tarvitaan lähtökohtaisesti oma 20 kV:n johtolähtö suoraan

sähköasemalta ja toisaalta muuntamo sähkön käyttöpaikalle. Liittyjä tulee vastaamaan 20 kV yhteyden rakentamisesta sähköasemalta lämpöpumppulaitokselle, ja muun muassa kaivuukustannukset voivat muodostua hyvin merkittäväksi liityntämaksujen lisäksi. (39.)

10.1 P-Hämppi ja Tampereen maanalainen asemakaava

P-Hämppi on maanalainen pysäköintilaitos, joka sijaitsee Tampereen pääkadun Hämeenkadun alla, Tammerkosken itäpuolella. Nykyisessä P-Hämpissä on 972 pysäköintipaikkaa ja yhteydet ydinkeskustan palveluihin. Tampereen kaupunki on hyväksynyt hankesuunnitelman, jossa P-Hämppi tulee laajentumaan kahdessa vaiheessa yhteensä 1000 autopaikalla. Laajennukset tapahtuvat vaiheissa halli 1 ja halli 2. Halli 1:n hankesuunnitelma on jo laadittu ja halli 2:sta on esitetty samaisessa suunnitelmassa pääperiaatteet.

Pysäköinti tullaan toteuttamaan molemmissa laajennuksissa kahdessa kerroksessa. Pysäköintihallin vapaa ajokorkeus pysäköinnille tulee olemaan 2,4 m. Suunnitellun 16,5 MW lämpöpumppulaitoksen sijoittaminen suoraan pysäköintihalliin ei ole mahdollista suurimmilla lämpöpumppuyksiköillä.

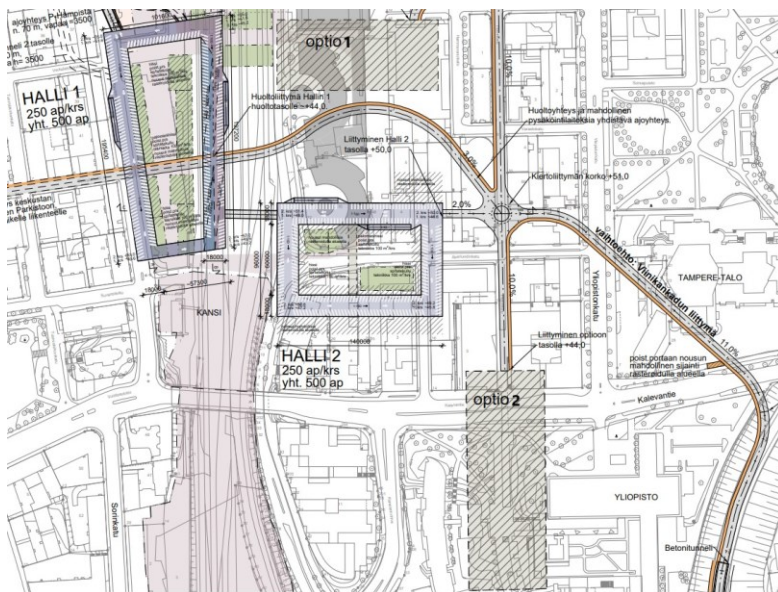
Kuvassa 23 on kuva P-Hämpin sisätiloista, ja siitä on nähtävissä parkkihallin profiili. Pysäköinti on toteutettu kahteen kerrokseen. Vapaakorkeus hallissa olisi riittävä isommillekin lämpöpumppuyksiköille, mutta tekniikalle varattu tila katon ylärajassa rajoittaa nykyisellään korkeutta reiluun 4 m:iin. Rakennusvaiheessa Tampereen Sähkölaitokselta kysyttiin heidän intressejään louhia tiloja omiin tarpeisiinsa, ja tuolloin ei tiloille ollut tarvetta.



KUVA 23. P-Hämppi pysäköintihallin profiili (Antti Mikkonen)

Tulevassa laajennushankkeessa olisi mahdollisuuksia louhia tiloja esimerkiksi hallien päätyihin. Lisäksi pysäköintitilojen alatiloihin voisi olla mahdollista sijoittaa isompiakin lämpöpumppuyksiköitä. Alatilasta osa tulee olemaan huoltoväylää varten ja osa normaaliajan varastotilaa. Kriisitilassa varastot toimivat Asemakeskuksen väestönsuojina. Hankesuunnitelman perusteella alatilan kokonaiskorkeus on 6400 mm, josta 4700 mm on vapaata tilaa. Korkeuden perusteella isomman kokoluokan lämpöpumppuyksiköiden sijoittaminen tilaan olisi mahdollista hyvällä ennakkosuunnittelulla.

Hankesuunnitelmassa on esitetty tulevien hallien lisäksi optioalueita vielä tulevaisuuden laajennuksille, kun ajotunnelit valmistuvat. Kuvassa 24 on nähtävissä optioalueet 1 ja 2. Alueet sijaitsevat hyvin keskeisillä alueilla lämpöpumppulaitoksen liittynnän kannalta. Erityisesti yliopiston suuntaan mahdollisesti laajentuva optioalue 2 on kiinnostava. Alue sijaitisi lähellä kaukojäähdytysverkostoa, ja liittyvät putkiosuudet ovat tehdyn kasvuennusteen perusteella kaukojäähdytysverkoston toiminnan kannalta hyvin kelpoisia. Hankkeet ovat aikaisessa vaiheessa, ja Tampereen Sähkölaitoksen omia intressejä ja tilavaurauksia olisi todennäköisesti mahdollista sovittaa hankkeeseen. (40; 41.)



KUVA 24. P-Hämpin laajentuminen ja optioalueet (40)

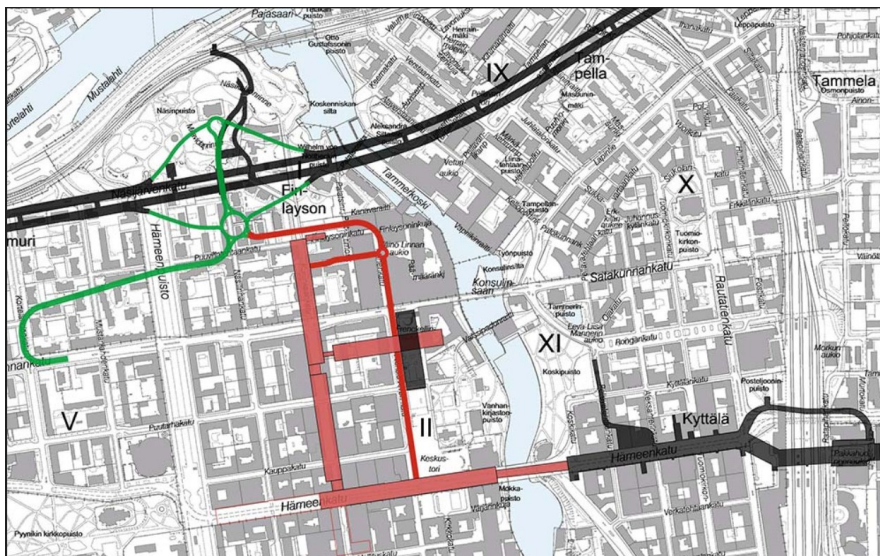
P-Hämpin lisäksi Tampereella on muitakin maanlaisia hankkeita keskustan alueella. Kärkihankkeita ovat Näsikallion eritasoliittymä, Amurintunneli sekä Kunkunparkki. Hankkeet ovat hyvin sidoksissa toisiinsa ja parantavat yhdessä toistensa kannattavuutta. Kunkunparkki tulee sijoittamaan Tammerkosken länsipuolella, josta tullaan rakennetaan liittymä itäpuolella sijaitsevaan P-Hämp-

piin, ja näin pysäköintilaitokset kytkeytyvät toisiinsa. Hankkeena Kunkunparkki on hyvin samankaltainen kuin P-Hämppi. Pysäköintihallien dimensiot, huoltotilat ja ajoväylät ovat alustavan hankesuunnitelman perusteella vastaavat kuin P-Hämpissä. (42; 43.)

Asemakaavassa Kunkunparkin alue on osoitettu yleisen pysäköinnin, liikenteen ja yhdyskuntateknistä huoltoa palvelevan maanalaisen rakentamisen alueeksi. Alustavan hankesuunnitelman perusteella huoltotunneleihin voidaan sijoittaa pysäköintilaitoksen toimintaan liittymättömiä järjestelmiä, kuten jätevedenpumppaamoita. Tiloihin voisi olla mahdollista tehdä tilavarauksia ja lisälouhintoja Tampereen Sähkölaitoksen tarpeisiin. Rakennettavan liittynnän pituus Kunkunparkista Yliopistonkadulla sijaitsevaan kaukojäähdytyksen siirtojohtoon tulisi olemaan useita satoja metrejä. (43.)

Kaukojäähdytyksen laajentuessa merkittävästi Tammerkosken itäpuolella voi Kunkunparkki tarjota hyvän sijoitusvaihtoehdon lämpöpumppulaitokselle. Tämänhetkisillä laskennan oletuksilla Kunkunparkki ei ole optimaalisin sijaintivaihtoehto lämpöpumppulaitokselle, sillä se tulee sijaitsemaan etäällä liittyvästä siirtojohtosta eikä lähialueella ole merkittävää jäähdytystarvetta.

Kuvassa 25 on esitetty Kunkunparkin sijaintia punaisella. Mustalla on kuvattu jo olemassa olevia tiloja, kuten P-Hämppiä Tammerkosken itäpuolella ja P-Frenckelliä Tammerkosken länsipuolella. Vihreällä kuvastetaan suunnitteilla olevia eritasoliittymiä ja ajotunneleita.



KUVA 25: P-Hämppi, Kunkunparkki sekä maanalaisia ajoyhteyksiä (43)

10.2 Tampereen yliopiston ympäristö

Tampereen yliopisto on hyvin keskeisellä sijainnilla uuden lämpöpumppulaitoksen sijoittelun kannalta. Mahdolliset liittynät kaukojäähdytysverkkoon tapahtuisivat putkiosuuksiin 9–12. Näistä vaihtoehdoista kiinnostavin olisi putkiosuus 12. Kaukojäähdytysverkoston DN 600 -siirtojohto kulkee yliopiston tonttia rajaavien Ratapihankadun, Kanslerinrinteen ja Kalevantien varressa. Lämpöpumppulaitokselta ei olisi tarvetta rakentaa pitkää liityntäjohtoa siirtojohtoon.

Yliopiston tontilla olisi mahdollista sijoittaa lämpöpumppulaitos myös maanpinnalle, mutta ongelmana tulisi olemaan rakennettavan uudisrakennuksen sijoittaminen ympäristöönsä. Kaupunkialue on hyvin tiivis ja kaavoitus asettaa maankäytölle rajoitteita. Uudisrakennukselle olisi mahdollista hakea asemakaavoituksen poikkeamislupaa. Tällöin edellytyksenä olisi muun muassa se, että lähiympäristöön ei kohdistu haittaa. Hankkeen estäviä haittavaikutuksia olisivat esimerkiksi melu, kaupunkikuvallinen haitta, vaikutus kulttuuriympäristöön. (44.)

Tampereen yliopiston alueella lämpöpumppulaitoksen sijoittaminen maan alle on kiinnostava ja todennäköisesti kannattavampi vaihtoehto, mikäli kaukojäähdytystoiminta tulee laajenemaan entisestään. Maanalainen sijoitus alueella on sidoksissa aiemmin esiteltyyn P-Hämpin laajenemiseen optioalueelle 2.

10.3 Tietotalon ja Monetran ympäristö

Tietotalon ja Monetran tontin alueelta liittynät tehtäisiin kaukojäähdytysverkon putkiosuuksiin 12 tai 13. Kaukojäähdytysverkon DN 600 -siirtojohto kulkee Tietotalon ja Monetran tonttien lävitse. Alueelta rakennettavan liityntäjohtoon etäisyys lämpöpumppulaitokselta siirtojohtoon olisi lyhyt ja yksinkertaisesti toteutettavissa. Kaukojäähdytysverkoston toiminnan kannalta alue olisi tehdyn laskeutuksen mukaan optimaalinen.

Tontilla olisi maanpäällistä tilaa sijoittaa uudisrakennuksia, mutta alue sijoittuu ydinkeskustan laajentumisvyöhykkeen välittömään läheisyyteen ja toisaalta kaupunkiympäristön kehittämisvyöhykkeelle, ja siten maankäytölle on muitakin intressejä. Alue myös sijaitsee Tampereen ratapihaan liittyvien riskien vaikutusalueella. Uudisrakentamisessa lämpöpumppulaitokselle edellyttäisi se riskienhallintaa kohteen haavoittuvuuden vähentämiseksi sekä torjuntavalmiuksien tehostamista ja

turvallisuutta parantavia toimenpiteitä. Toisaalta myös pelkkä rautatien suoja-alue olisi huomioitava uudisrakennuksen sijoittamisessa kyseiselle tontille. (45; 46; 47.)

10.4 Ratinan lämpökeskus

Jokikadulla sijaitseva Ratinan lämpökeskus on valmistunut vuonna 2005. Lämpökeskuksen nimellisteho on 40 MW ja pääpolttoaineena toimii maakaasu. Kaukojäähdytystoiminta Tampereella on saanut alkunsa Viinikanlahden jätevedenpuhdistamon ja Jokikadun ympäristöstä. Tästä johtuen osassa alueen kaukojäähdytysverkosta on käytössä edelleen DN 300 -kaukojäähdytysputkea. Laskennassa huomattiin, että tämä kaukojäähdytysverkon osa tulee käymään ahtaaksi Tammerkosken itäpuolen alueen kehittyessä jo PTS-suunnitelman kasvuodotuksilla.

Alueella tullaan lähitulevaisuudessa tekemään kaukojäähdytysverkon saneerausta. Kohteen haasteena lämpöpumppujen sijoittamisen kannalta on pitkä liityntä kiinnostaviin kaukojäähdytysverkon osuuksiin, jossa verkoston kapasiteetti ja kysyntä olisi riittävällä tasolla. Lähimmälle kiinnostavalle putkiosuudelle rakennettava liityntäjohto tulisi olemaan vähintään 300 m.

Toisaalta Ratinan lämpökeskuksessa olisi käytettävissä jo olemassa olevia tiloja isomman kokoluokan lämpöpumpulle nykyisen kattilayksikön vieressä. Aiemmin vapaa tila on suunniteltu käytettäväksi uudelle vastaavanlaiselle kattilayksikölle, mutta tätä laajennusta ei odoteta tapahtuvaksi. Korkeutta tilassa oli arvioituna noin 15 m, ja pohjapinta-ala on riittävä suuremmallekin lämpöpumpputyksikölle. Mikäli jäähdytystoiminta kasvaa edelleen, voisi toisen lämpöpumpun sijoittaa samaan tilaan tulevaisuudessa poistuvan nykyisen kattilayksikön tilalle. (48.)

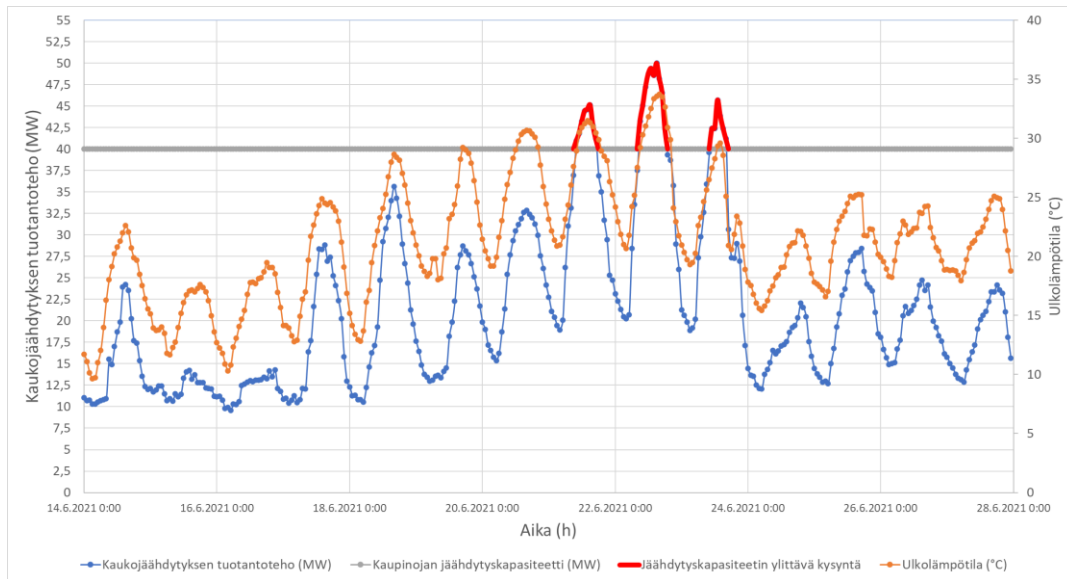
11 KAUKOJÄÄHDYTYSKAKKU

11.1 Käyttömahdollisuudet

Kaukojäähdytysakun käyttö on jaettu kahteen eri vaihtoehtoon, joissa yhdellä pyritään tasaamaan vuorokautista jäähdytyksen kysynnän vaihtelua sekä vastaamaan tuotantovajeeseen tilanteessa, jossa Kaupinojan jäähdytyslaitoksen tuottama jäähdytysteho ei ole riittävä. Toisessa vaihtoehdossa kaukojäähdytysakulla pyritään varautumaan suurempiin tuotantovajeisiin, jotka voisivat aiheutua esimerkiksi sähkökatkoista. Tämän seurauksena Kaupinojan jäähdytyslaitos ei pystyisi tuottamaan jäähdytystä ja syntyisi merkittävää tuotantovajetta häiriön aikana.

11.2 Tuotantovaje Kaupinojan jäähdytyslaitoksen toiminnan aikana

Ensimmäisessä vaihtoehdossa on tilanne, jossa Kaupinojan jäähdytyslaitoksella on mahdollisuus tuottaa 40 MW jäähdytystehoa. Tulevaisuuden jäähdytystehon tarpeen kasvaessa Kaupinojalta saatava jäähdytysteho ei kuitenkaan tule yksistään riittämään. Kuvassa 26 on nähtävillä skaalatun kaukojäähdytyksen tuotannon ääritilanteet. Huomataan, että kolmena päivänä kysyntä tulee ylittämään Kaupinojan jäähdytyskapasiteetin. Suurimmillaan jäähdytystehon tarve tulee ennusteen perusteella olemaan 22.6., jolloin tarve on ollut 50 MW. Samana päivänä tuotantovaje tulee myös energiamäärältään olemaan suurin noin 70 MWh ja tuotantovajeen kesto olisi 10 tuntia. Suurimmillaan kaukojäähdytysakun purkutehon tulisi olla 10 MW, jolloin tuotantovajeen hetkellinen suurin tehontarve saataisiin täytettyä.



KUVA 26. Kaukojäähdytyksen tuotanto skaalatussa ääritilanteessa

Oletetaan, että jäähdytysakun lämpötilaero olisi samansuuruinen kuin kaukojäähdytysverkossa eli 8 °C. Jäähdytysakun tilavuudeksi kaavan 11 avulla tulee noin 7535 m³. Tässä kokoluokassa olisi mahdollisesti kannattavaa rakentaa teräsakku. Teräsakun etuna olisi mahdollisuus liittää se suoralla kytkennällä kaukojäähdytysverkkoon eikä näin ollen lämmönsiirtimen asteisuudesta koituisi ongelmaa. (7.)

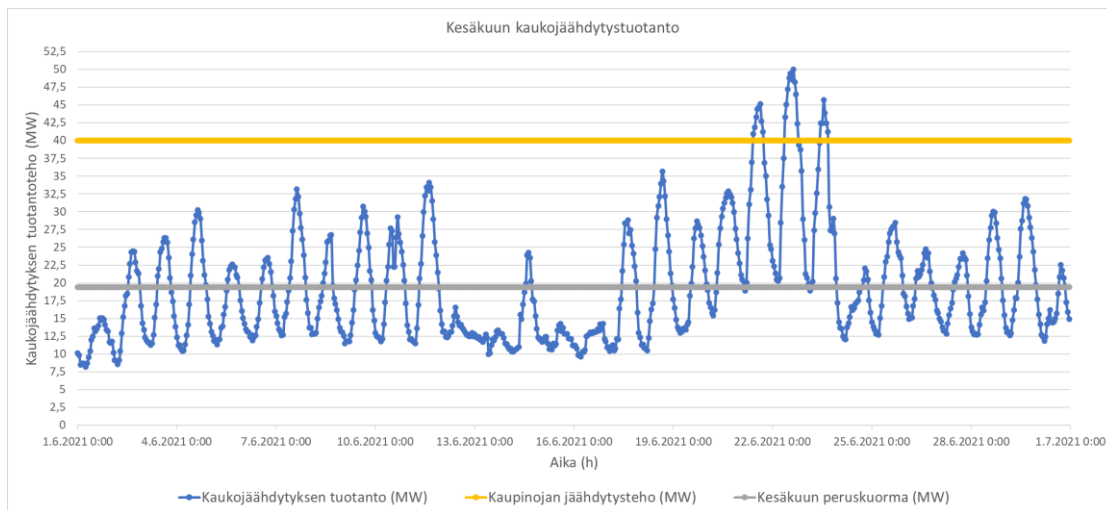
KAAVA 11. Energiamäärän laskentakaava

$$Q = \rho * C_p * V * \Delta T$$

Q= energia (kJ)

V= tilavuus (m³)

Mikäli kaukojäähdytysakun ajatellaan palvelevan kuvatus tuotantovajeen lisäksi päivittäistä kysynnän vaihtelua, 70 MWh:n kaukojäähdytysakku riittää siihen hyvin. Lisäksi 10 MW:n purkuteho kattaa useimmat jäähdytystehon tarpeen tuntiset vaihtelut peruskuorman nähden. Kuvassa 27 on esitetty kaukojäähdytyksen tuotanto kesäkuussa. Peruskuormana on kaukojäähdytyksen tuotannon keskiarvo kesäkuussa. Tähän tasoon voidaan verrata kysyntää ja nähdä, kuinka paljon kaukojäähdytysakkua täytyy purkaa, jotta saavutetaan taas perustaso.



KUVA 27. Kesäkuun kaukojäähdytyksen skaalattu tuotanto

10 MW:n purkuteholla ja 70 MWh:n energiasisällöllä ei kaikkein pisimpiä ja suurimpia kysyntäpiikkejä voida kattaa. Nykyisellä kasvuennusteella 7550 m³:n kaukojäähdytysakku 10 MW:n purkuteholla on hyvin käyttökelpoinen, mikäli Kaupinojalla ei tapahdu jäähdytystuotantoa kokonaan seisauttavaa häiriötä. Pieni lisäkapasiteetti laskennalliseen tulokseen tuo varmuutta.

Pienen kaukojäähdytysakun ongelmana on kuitenkin se, että isomman häiriön tilanteessa 10 MW:n purkuteho ja 70 MWh:n energiasisältö eivät tule helpottamaan energiantuotannon vajetta, vaikka käytössä olisikin lämpöpumppulaitos. Lisäksi teräsakun sijoittelu keskeiselle sijainnille kaupunkiympäristössä asettaa haasteita. Kannattavampi vaihtoehto voisikin olla panostaa suurempaan kaukojäähdytysakkuun ja sijoittaa se maan alle kallioon louhittuna.

11.3 Kaupinojan jäähdytyslaitoksen tuotantohäiriön kompensointi

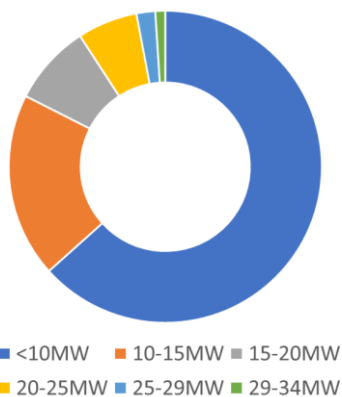
Toinen vaihtoehto kaukojäähdytysakulle on mitoittaa se helpottamaan suurempaa tuotantohäiriötä, jolloin jäähdytysakulla on kapasiteettia ja kykyä vastata jäähdytystarpeeseen suuremmissa häiriötilanteissa. Todettiin, että isot häiriöt, jotka lamauttavat koko Kaupinojan jäähdytystuotannon, eivät ole pitkäaikaisia. Näissä tilanteissa kyse on usein sähkökatkoksesta eikä vakavammista laiterikoista.

Kaukojäähdytysakulla on tämän kaltaisessa häiriötilanteessa oltava kapasiteettia, joka kattaa, jos ei kokonaan niin osittain suuremman häiriön aiheuttamaa tuotantovajetta. Laajan tuotannon lamaannuttavan häiriö arvioidaan olevan kestoltaan 4 tuntia.

Mikäli häiriötilanne tapahtuu ääritilanteessa, jolloin jäähdytystehon tarve on 50 MW, tuntinen tuotantovaje on 33 MW. Tässä huomioidaan lämpöpumppulaitoksen 16,5 MW:n jäähdytysteho sekä Kalevan uintikeskuksen 0,5 MW:n lämpöpumppu. 4 tunnin aikana tuotantovajetta tämän perusteella olisi 132 MWh. Kaukojäähdytysakun tilavuus tällä kapasiteetilla olisi oltava 14 250 m³. Tässä kokoluokassa maanpäällinen sijoittaminen koituu haasteeksi ja kannattavampi vaihtoehto on kalioakku.

Häiriötilanteen kohdistuessa aikaan, jolloin kysyntä on suurimmillaan, olisi purkutehon oltava 33 MW, mikäli halutaan kattaa kaikki jäähdytystehon tarve. Kaukojäähdytysakun purkutehoa kuitenkin rajoittaa siirto johdon kapasiteetti. Käytännössä 33 MW:n purkuteholla kaukojäähdytysakku olisi sijoitettava Kaupinojalta lähtevään siirtojohtoon. Tämä on kuitenkin ongelmallinen ratkaisu, sillä Kaupinojan siirto johdon kapasiteetti on rajallinen ja tulevaisuudessa sen tehonsiirtokyvyssä tulee olemaan haasteita.

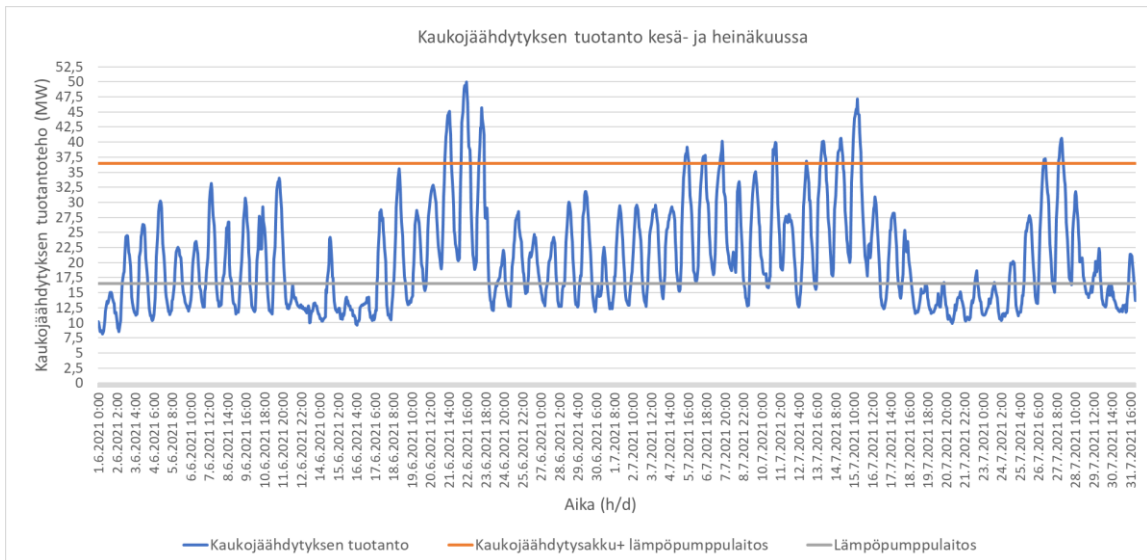
Vuoden 2021 skaalatusta tuotantotiedosta huomataan, että mikäli Kaupinojalla on laajempi häiriö ja tuleva lämpöpumppulaitos tuottaa jäähdytystehoa 16,5 MW, tuotantovajetta yhteensä vuoden aikana on ollut 982 tuntia. Kuvassa 28 on nähtävissä Kaupinojan täydellisen häiriötilanteen aiheuttaman tuotantovajeen jakauma eri teholuokissa. Huomataan, että selkeästi eniten tuntista tuotantovajetta on ollut alle 10 MW luokassa. 10 MW:n purkuteho olisi moneen tilanteeseen riittävä, mutta häiriön sattuessa suuren kysynnän aikana ei pienestä purkutehosta olisi hyötyä, sillä suuren akun kapasiteettia ei nopean häiriön aikana ehdittäisi paljoa hyödyntää.



KUVA 28. Kaupinojan häiriön aiheuttama tuotantovajeen tehojakauma

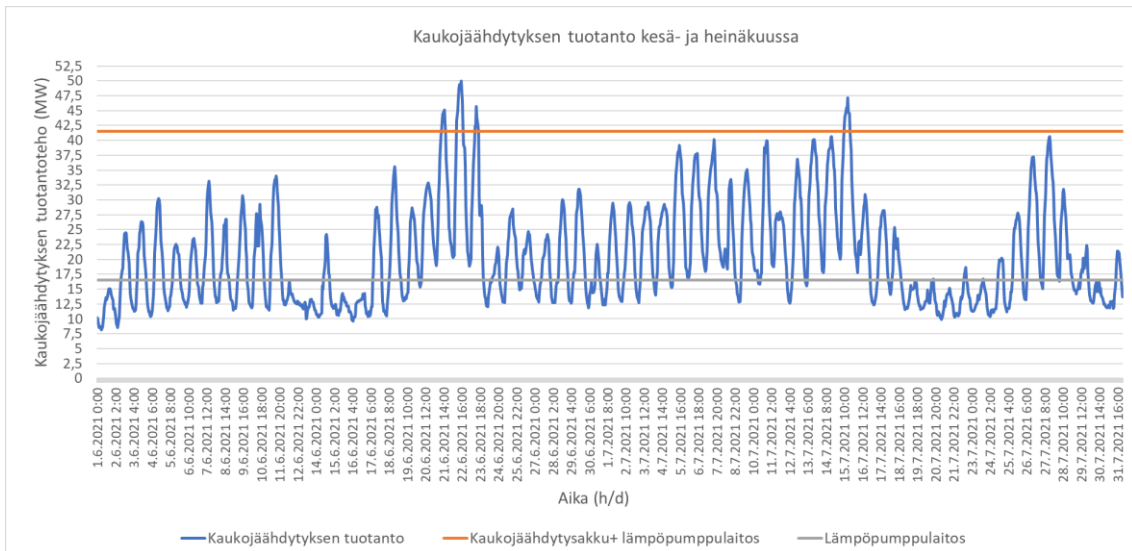
Kuvassa 29 on kuvattuna kesäkuun ja heinäkuun kaukojäähdytyksen tuotanto, jolloin jäähdytystarve on ollut suurta. Harmaalla viivalla havainnollistetaan, kuinka paljon on tuotantovajetta, mikäli

vain lämpöpumppulaitos olisi käytettävissä. Oranssi viiva havainnollistaa tilannetta, jossa kaukojäähdytysakun purkuteho on 20 MW ja lämpöpumppulaitos on käytössä. Kesäkuussa kolmena päivänä 21.6–23.6. olisi 20 MW purkuteholla syntynyt tuotantovajetta Kaupinojan häiriötilassa. Heinäkuussa ei olisi syntynyt yhtä suurta tuotantovajetta, mutta useampana päivänä olisi riski tuotantovajeelle, mikäli Kaupinojalla sattuisi häiriö.



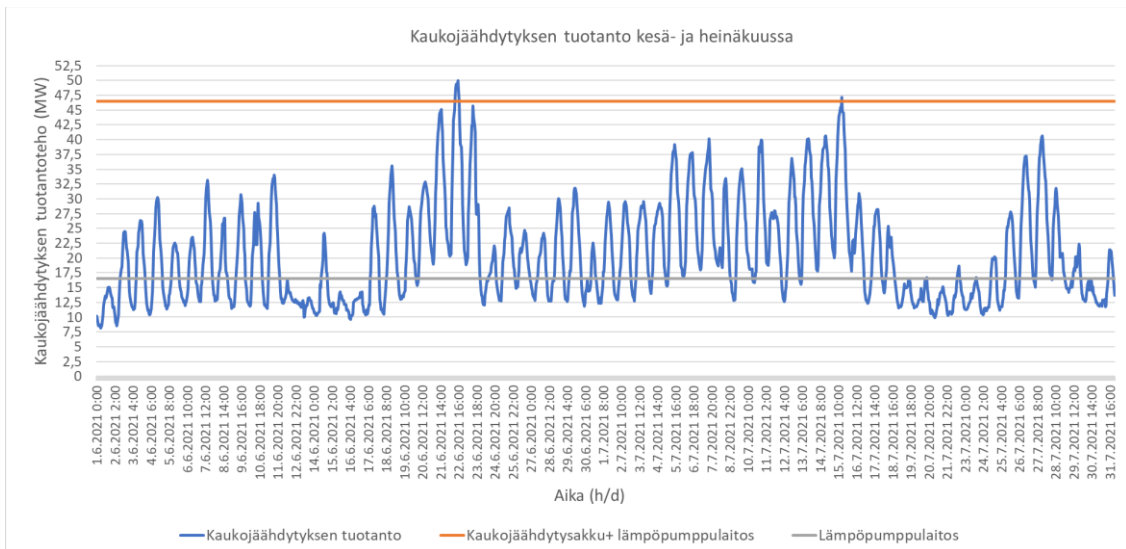
KUVA 29. Lämpöpumppulaitoksen ja kaukojäähdytysakun 20 MW:n purkutehon vaikutus

Kuvassa 30 on havainnollistettu aiemmin kuvattu tilanne, mutta jäähdytysakun purkuteho on tässä tapauksessa 25 MW. Huomataan, että kesäkuussa edelleen samoina päivinä kuin aiemmassa tapauksessa syntyisi tuotantovajetta, mikäli Kaupinojalla tapahtuisi merkittävä häiriö. Heinäkuussa tuotantovajeen riski 25 MW:n purkuteholla on huomattavasti pienempi ja päiviä, jolloin voisi tuotantovajetta syntyä on vain yksi.



KUVA 30. Lämpöpumpulaitoksen ja kaukojäähdytysakun 25 MW:n purkutehon vaikutus

Viimeisenä tarkastellaan kaukojäähdytysakun vaikutusta tilanteessa, kun purkuteho olisi 30 MW. Kuvassa 31 on kuvattu edellisten kaltainen tilanne kesä- ja heinäkuussa. Kuvaajasta voi päätellä, että kaukojäähdytysakun purkutehon ylittäessä 25 MW tämänhetkisen kaukojäähdytystarpeen kasvun odotuksilla ei saavuteta enää merkittävää etua tuotantovajeen estämiseksi Kaupinojan häiriötilanteissa. Kesäkuussa tuotantovajeen riski edelleen olisi olemassa kuten myös heinäkuussa, vaikkakin pienempänä.



KUVA 31: Lämpöpumpulaitoksen ja kaukojäähdytysakun 30 MW:n purkutehon vaikutus

Todettiin, että tarkasteluväli purkuteholle on 20–25 MW. Näillä purkutehoilla voitaisiin reagoida hyvin monipuolisesti suuremmissa häiriöissä ja tuotantovajetta ei syntyisi huomattavasti siinäkään

tapauksessa, jos häiriö tapahtuu kriittisimpänä hetkenä. Purkutehon ollessa 20–25 MW löytyy sijoitusvaihtoehtoja muualtakin kuin Kaupinojan siirtojohtojen varrelta. Suurempi purkuteho kuin 25 MW asettaa haasteita sijoitusvaihtoehdoille, ja esimerkiksi 30 MW:n purkuteho olisi sijoitettava haasteelliseen Kaupinojan siirtolinjaan nykyisessä verkossa. Kaukojäähdytysverkon putkistoa suurentamalla saataisiin monipuolisempia sijoitusvaihtoehtoja.

11.4 Kaupinojan tuotantohäiriön sekä päivittäisen kulutuksen vaihtelun kompensointi

Kolmannessa vaihtoehdossa olisi kyse edellisen kahden kaukojäähdytysakun yhdistelmästä, jossa akun kapasiteetti olisi riittävä vastaamaan sekä päivittäisiin kysynnän vaihteluihin että suuremman häiriön aiheuttamaan tuotantovajeeseen. Kaukojäähdytysakussa olisi jatkuvasti varastoituna 132 MWh energiaa, mikäli Kaupinojalla sattuu suurempi häiriö. Toisaalta kaukojäähdytysakkuun olisi varastoituna lisäksi 70 MWh energiaa, joka riittää useimpien päivittäisten kysyntäpiikkien leikkaamiseen sekä tuotantovajeen kattamiseen tilanteeseen, jossa Kaupinojalta on käytettävissä kaikki teho. Tässä tapauksessa varastoitava kapasiteetti olisi yhteensä 202 MWh. Akun tilavuuden tulisi olla 21 750 m³. Purkuteho olisi edelleen 20–25 MW, sillä akun olisi kyettävä vastaamaan suurempaan tuotantovajeeseen.

12 KAUKOJÄÄHDYTYSKUN SIJAINIVAIHTOEHDOT

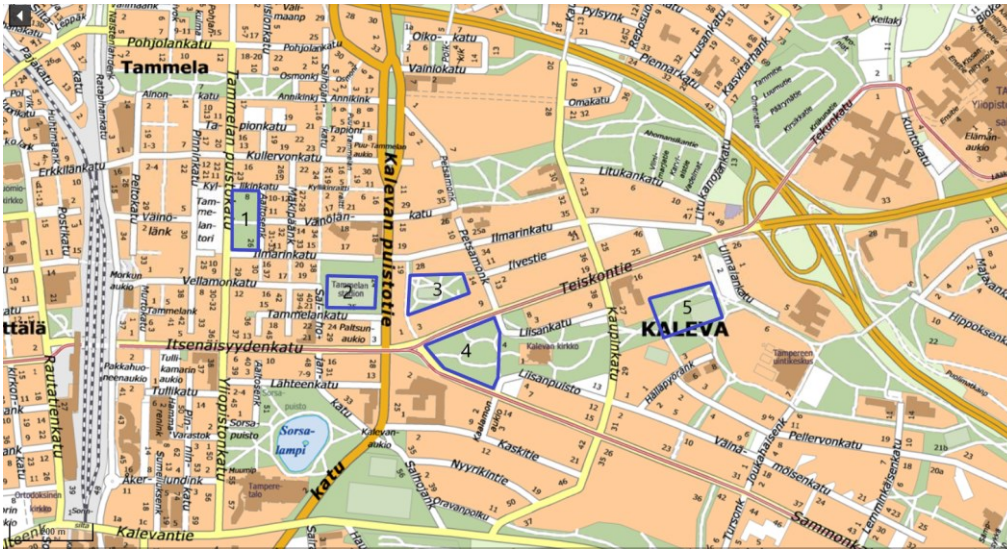
Kaukojäähdytyskulle on löydetty tehdyn laskentamallin sekä purkutehon rajauksien myötä viisi potentiaalista sijoituspaikkaa. Vaihtoehdot käsittävät louhittavat ratkaisut. Suuremman kokoluokan kaukojäähdytyskku pystyy vastaamaan tulevaisuuden kaukojäähdytystoiminnan kasvuun sen lisäksi, että se olisi suuremman purkutehonsa ansiosta käyttöalueeltaan monipuolisempi. Suuremmalla kaukojäähdytyskulla pystytään tuomaan merkittävästi varakapasiteettia Kaupinojan päätuotantolaitoksen häiriötilanteessa.

Kaupunkialueella lähellä kulutuspeiteitä suuren maanpinnalle sijoitettavan teräsakun sijoitus on käytännössä mahdotonta. Kaupunkialueella maankäytölle on kaavoituksessa rajoitteita ja muita intressejä, eikä suurta kaukojäähdytyskku saataisi istutettua kaupunkikuvaan sitä kehittäväenä osana. Taulukossa 8 on ote laskennasta, jossa tuleva lämpöpumppulaitos on jo sijoitettu kaukojäähdytysverkkoon. Potentiaalisia sijaintivaihtoehtoja laskentamallin mukaan purkuteholle 20–25 MW ovat putkiosuudet 3–6.

TAULUKKO 8. Kaukojäähdytysakun kannalta kiinnostavat putkiosuudet

KAUPINOJA-HATANPÄÄ						
Osuus	Pituus (m)	Koko	d (mm)	d (m)	A (mm ²)	ΦKJ (kW)
1.	1102	DN600	595,8	0,5958	278798,7865	33000
2.	25	DN600	595,8	0,5958	278798,7865	29200
3.	854	DN600	595,8	0,5958	278798,7865	25000
4.	380	DN600	595,8	0,5958	278798,7865	25000
5.	528	DN600	595,8	0,5958	278798,7865	24550
6.	373	DN600	595,8	0,5958	278798,7865	23900
7.	267	DN600	595,8	0,5958	278798,7865	19750

Kuvassa 32 on merkitty viisi potentiaalista kohdetta louhittavan jäähdytysakun sijainniksi. Huomioitavaa on se, että rajauksella ei havainnollisteta jäähdytysakun kokoa. Tarkasteltavat kohteet ovat merkitty numeroin 1–5. Näistä 1, 3, 4 ja 5 ovat puistokohteita. Kohde 2 on Tammelan stadion, joka on urheilustadion. Kaikki kohteet sijaitsevat lähellä kaukojäähdytysverkon DN 600 -siirtolinjaa.



KUVA 32. Louhittavan kaukojäähdytysakun potentiaaliset sijaintivaihtoehdot

12.1 Emil Aaltosen puisto

Kuvassa 32 Emil Aaltosen puisto on merkitty numerolla 1. Louhittavan kaukojäähdytysakun kannalta kohde on mielenkiintoinen. Siirtolinjan etäisyys on kohteeseen on noin 100 m maanpinnalla mitattuna. Liityntäjohtoon pituus kaukojäähdytysakun yhteydessä tarvittavaan lämmönsiirrinasemaan tulee olemaan yli 100 m. Liityttävä putkiosuus olisi 6 ja lämpöpumppulaitoksen ollessa toiminnassa on kaukojäähdytysakun mahdollinen maksimi purkuteho noin 24 MW. Alueella ei ole tehty varauksia muille maanalaisille hankkeille asemakaavan perusteella. Sijainniltaan Emil Aaltosen puisto on strategisen osayleiskaavan asuntovaltaisen täydennysrakentamisen vyöhykkeellä. Tällä olisi sijaintia puoltava etu muun muassa jäähdytstarpeen kasvaessa alueella.

12.2 Tammelan stadion

Tammelan stadion, joka on merkitty kuvassa 32 numerolla 2, sijaitsee lähellä siirtolinjaa, ja mahdollisia liityttäviä putkiosuuksia ovat 5 ja 6. Putkiosuus 5 mahdollistaisi hieman suuremman purkutehon noin, 24,5 MW. Etäisyys maanpinnalla siirtojohtoon on selvästi alle 100 m. Tammelan stadionin alle louhittavan kaukojäähdytysakun liityntä siirtojohtoon tulisi olemaan aiempaa vaihtoehtoa lyhyempi riippuen rakennettavan lämmönsiirrinaseman sijainnista maanpinnan alapuolella.

Nykyinen Tammelan stadion ei täytä nykyaikaisia lajivaatimuksia. Tästä syystä Tampereen kaupunki modernisoi stadionin nykyaikamukaisiksi. Hankkeeseen sisältyy stadionin uudistaminen, uusia asuinrakennuksia sekä stadionin alatila. Alatila on suunniteltu käytettäväksi maanalaiseen pysäköintiin ja liiketiloiksi. Tällä voi olla vaikutusta soveltavuuteen kaukojäähdytysakulle ja tarvittavien louhintatöiden suorittamiselle. Toisaalta stadion sekä ympäröiviä asuntoja tullaan liittämään kaukojäähdytysverkon asiakkaiksi ja siten jäähdytyskuorma alueella tulee lisääntymään. (49; 50.)

12.3 Ilves- ja Liisanpuisto

Ilves- ja Liisanpuiston on merkitty kuvassa 32 numeroin 3 ja 4. Mahdollinen liityttävä putkiosuus on 5. Molempien vaihtoehtojen purkuteho maksimitilanteessa olisi 24,5 MW eli vastaava kuin aiemmin esitellyssä vaihtoehdossa. Ilvespuiston liitynnän pituus maanpinnalta mitattuna on noin 100 m, mutta liityntä lämmönsiirrasemalle tulee olemaan tätä pidempi. Liisanpuiston tapauksessa rakennettava liityntäjohto voisi olla hyvinkin lyhyt, ja kaukojäähdytysakku olisi mahdollista louhia jopa suoraan siirtojohdon alle.

Ilves- ja Liisanpuistoa ensimmäiseen vaihtoehtoon puoltaa hieman suurempi purkuteho, ja Tammelan stadionin verrattuna kummassakaan vaihtoehdossa ei ole kaavoituksen perusteella tehtyjä tilavaroituksia maanalaisille hankkeille. Alueet eivät enää kuulu strategisen osayleiskaavan kehittämisvyöhykkeeseen ja alkavat etäännyä merkittävimmistä kaukojäähdytyksen kohteista keskustan alueelta.

12.4 Kiovanpuisto

Kiovanpuisto sijaitsee Kalevan alueella ja on kuvassa 32 merkitty numerolla 5. Tarkasteltavista kohteista Kiovanpuiston alueella kaukojäähdytysakun maksimi purkuteho olisi 25 MW. Liityttävä putkiosuus olisi 4. Kiovanpuisto alkaa etäännyä keskustan kaukojäähdytyksen merkittävistä asiakkaista, eikä enää sijaitse strategisen osayleiskaavan kehitysalueella. Kiovanpuistossa kaukojäähdytysakku sijaitsee kaukojäähdytysverkostossa alueella, missä merkittävin kaukojäähdytystuotanto tapahtuu. Mikäli tuotanto- ja varakapasiteetti keskitetään kaukojäähdytysverkoston yhteen osaan, tuotantovajeen riskit kasvavat, mikäli kaukojäähdytysverkosto alueella vaurioituu.

13 YHTEENVETO

Opinnäytetyön aiheena oli selvittää soveltuvia lämpöpumppulaitoksen sekä kaukojäähdytysakun sijaintivaihtoehtoja Tampereen Sähkölaitoksen kaukojäähdytysverkoston ympäristöstä. Työssä myös tutkittiin kaukojäähdytystoiminnan kasvun edellytyksiä ja mahdollisuuksia nykyisen kaukojäähdytysverkoston alueella. Todettiin, että uudet asiakkaat tulevat liittymään pääosin nykyisen kaukojäähdytysverkon alueelta. Erityisesti ydinkeskustan alue tulee tarjoamaan kaukojäähdytystoiminnalle merkittäviä kasvumahdollisuuksia.

Tampereen kaukojäähdytyksen huipputeho saavutettiin kesällä 2021, jolloin jäähdytystehon tarve oli hetkellisesti 18 MW. Tulevaisuuden jäähdytystehon tarve todettiin kasvavan 50 MW:iin, jolloin tarvitaan lisää tuotantokapasiteettia. Lämpöpumppulaitokselle arvioitiin 16,5 MW riittäväksi jäähdytystehoksi, josta 6,5 MW toimii varakapasiteettina päätuotantolaitoksen häiriöiden varalta. Kaupinajan jäähdytyslaitos tulee laajentumaan 40 MW:iin asti, ja yhdessä lämpöpumppulaitoksen kanssa pystytään vastaamaan kasvaneesta jäähdytystehon tarpeesta. Työn aikana tarkasteltiin kaukojäähdytysakun purkutehoa väliltä 20–25 MW. Purkuteho olisi riittävä kysynnän vaihtelun tasamiseen, ja kaukojäähdytysakku tulisi palvelemaan merkittävänä varakapasiteettina päätuotantolaitoksen häiriöiden varalta.

Opinnäytetyössä korostui verkostolaskenta ja tulevaisuuden jäähdytystarpeen sekä kasvuodotuksien arviointi nykyisen kaukojäähdytysverkon alueella. Verkostolaskennan avulla ja arvioidun jäähdytystehon kasvun perusteella pystyttiin löytämään potentiaalisia putkiosuuksia, joissa on riittävästi kapasiteettia lämpöpumppulaitoksen ja kaukojäähdytysakun jäähdytystehon siirtämiseksi. Toimeksiantajalle on voitu esittää laskentamallin ja jäähdytystarpeen kasvuodotuksien perusteella sijaintivaihtoehtoja sekä lämpöpumppulaitokselle että jäähdytysakulle.

Työn lopputuloksena voidaan todeta, että mielenkiintoisimmat sijoitusvaihtoehdot sekä lämpöpumppulaitokselle että kaukojäähdytysakulle tulevat löytymään maan alta. Teollisen suurusluokan lämpöpumput vaativat suuria tiloja. Erityisesti korkeus rajoittaa olemassa olevien tilojen hyödyntämistä. Uudisrakentaminen lämpöpumppulaitosta varten kaupunkialueella vie tilaa muulta maankäytöltä. Kaupunkialueella maankäytölle on muitakin intressejä muun muassa asuinrakennusten

sekä liiketilojen lisäämiseksi. Maan alla lämpöpumput on mahdollista sijoittaa lähelle kaukojäähdytyksen kulutuskohteita, ja jäähdytystarpeen kasvaessa tiloja on mahdollista louhia lisää uutta tuotantokapasiteettia varten.

Kaukojäähdytysakun sijoittaminen kaupunkialueella maanpinnalle on käytännössä mahdotonta. Kaukojäähdytysakku veisi merkittävästi tilaa, eikä sitä olisi mahdollista sulauttaa kaupunkiympäristöön. Maanalaisen kallioakun etuna on mahdollisuus tilavuuden kasvattamiseen teräsakkuun verrattuna. Tilavuuden kasvaessa myös kaukojäähdytysakun energiasisältö kasvaa. Tämän vuoksi kallioakku olisi käyttöalueeltaan monipuolisempi ja voisi toimia merkittävänä varatehona.

Kaukojäähdytystoiminnan kehitysnäkymien seuraaminen ja esisuunnittelu tulee jatkossakin olemaan tärkeää. Työssä on tarkasteltu parhaan arvion mukaista tulevaisuuden kasvuennustetta, mutta kehitysnäkymät voivat tulevaisuudessa muuttua. Kaukojäähdytystoiminta voi esimerkiksi kasvaa odotettua enemmän ja kasvu voi tapahtua eri verkoston haaroissa, mitä työssä on oletettu. Esimerkiksi kaukojäähdytystoiminnan merkittävä kasvu Tammerkosken länsipuolella voi tulla vaikuttamaan työssä esitettyjen sijaintivaihtoehtojen kelpoisuuteen.

LÄHTEET

- 1 Ala-Kotila, Paula, Airaksinen, Miimu, Vainio, Terttu. & Vesanen, Teemu 2015. Rakennusten jäähdytysmarkkinat. Hakupäivä 28.10.2021. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwil4cSmnO_zAhVDAxAlHUoaBFcQFnoE-CAkQAQ&url=https%3A%2F%2Fenergia.fi%2Ffiles%2F399%2FRakennusten_jaahdytysmarkkinat_18-12-2015.pdf&usq=AOvVaw0m4-RDHw1fMdAqL_1luYZo.
- 2 Ciucci, Matteo 2021. Uusiutuvat energialähteet. Hakupäivä 6.3.2022. <https://www.euro-parl.europa.eu/factsheets/fi/sheet/70/uusiutuvat-energiälähteet>.
- 3 Euroopan komissio 2021. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi energiatehokkuudesta. Hakupäivä 6.3.2022. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021PC0558&from=fi>.
- 4 Ympäristöministeriö 2021. Hallituksen ilmastopolitiikka: kohti hiilineutraalia Suomea 2035. Hakupäivä 7.3.2022. <https://ym.fi/hiilineutraalisuomi2035>.
- 5 Työ- ja elinkeinoministeriö 2019. Energiatehokkuustyöryhmän raportti. Hakupäivä 7.3.2022. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/161811>.
- 6 Valtiovarainministeriö 2020. Energia verotuksen uudistamista selvittävän työryhmän raportti ehdotukseksi hallitusohjelman kirjausten ja tavoitteiden toteuttamisesta sekä energiverotuksen muusta kehittämisestä. Hakupäivä 7.3.2022. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-367-299-4>.
- 7 Energiateollisuus Oy 2006. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki: Libris Oy.
- 8 Helsingin Energia 2012. Miksi kaukojäähdytystä. Hakupäivä 26.1.2022. <https://docplayer.fi/23491782-Miksi-kaukojaahdytysta-kaukojaahdytys-vaihtoehto-lammitysmarkkinoiden-muutoksessa.html>.
- 9 Calderoni, Marco, Dourlens-Qaranta, Sophie, Sreekumar, Lennard, Zia, Rämä, Miika, Klobut, Krzysztof, Wang, Zao, Duan, Xiaojian, Zhang, Yin, Nilsson, Joakim & Hargö, Lars 2019. Sustainable District Cooling Guidelines. IEA DHC/CHP Report. Hakupäivä 26.10.2021. <https://cris.vtt.fi/en/publications/sustainable-district-cooling-guidelines-iea-dhcchp-annex-xii-repo>.
- 10 Energiateollisuus Oy 2020. Kustannustehokasta ja ympäristöystävällistä kaukojäähdytystä. Hakupäivä 25.10.2021. <https://energia.fi/energiasta/energiantuotanto/kaukojaahdytys>.

- 11 Kuopion Energia 2018. Kaukojäähdytys - energiatehokasta viileyttä. Hakupäivä 25.10.2021.
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahU-KEwjy3-f_mq71AhVgSfEDHRK7AJsQFnoECBcQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.kuopi-onenergia.fi%2Fwp-content%2Fuploads%2F2018%2F10%2FKE_Kaukoja%25CC%2588a%25CC%2588hdytys_presentaatio_26102018.pdf&usg=AOv-Vaw3ko5Nc2nbP05WqL3lfpedl.
- 12 Hakala, Pertti & Kaappola, Esko 2013. Kylmälaitoksen suunnittelu. Tampere: Suomen Yliopistopaino Oy.
- 13 Kylmaextra.fi 2020. Kylmäprosessi eli miten kylmä toimii. Hakupäivä 26.1.2022.
https://www.kylmaextra.fi/lehdet/kylmaextra_2_2020/kylmaprosessi_eli_miten_kylma_syntyy.
- 14 Airaksinen, Miimu, Laitinen, Ari & Rämä, Miika 2016. Jäähdytyksen teknologiset ratkaisut. Hakupäivä 27.10.2021.
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahU-KEwjZncW-m_zAhXI-SoKHcMWA6cQFnoECAMQAQ&url=https%3A%2F%2Fenergia.fi%2Ffiles%2F1359%2FJaahdytysteknologiaselvitys_VTT_221216.pdf&usg=AOv-Vaw274ckMkPqiDOJDCndKJYqe.
- 15 Koljonen, Tiina & Sipilä, Kari 1998. Uudemman absorptiojäähdytyksen soveltaminen kaukojäähdytyksessä. Hakupäivä 27.10.2021.
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahU-KEwj6labGnO_zAhWx-yoKHW5TAR8QFnoE-CAMQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.vtt.fi%2Finf%2Fpdf%2Ftiedotteet%2F1998%2FT1926.pdf&usg=AOvVaw3Bc32M7melKhJNXkeJEnPI.
- 16 Fredriksen, Svend & Werner, Sven 2014. District heating and cooling. Lund: Studentlitteratur AB.
- 17 Pieper, Henrik 2019. Optimal Integration of District Heating, District Cooling, Heat Sources and Heat Sinks. Hakupäivä 3.12.2021. <https://orbit.dtu.dk/en/publications/optimal-integration-of-district-heating-district-cooling-heat-sources-and-heat-sinks>.
- 18 Suomen Kaukolämpö ry 2004. Kaukojäähdytys. Raportti J1/2004.
- 19 Pau Farres-Antunez. Effect of load shaving. Hakupäivä 26.1.2022. https://www.researchgate.net/figure/Energy-storage-delivering-a-peak-shaving-and-b-load-levelling-services-Reproduced_fig1_332072567.

- 20 Danfoss 2020. VLT drives run the world's smartest district energy system. Hakupäivä 6.12.2021. <https://www.danfoss.com/en/service-and-support/case-stories/dds/vlt-drives-run-the-world-s-smartest-district-energy-system/>.
- 21 Kaartokallio, Eero 2016. Lämpöpumput 50 metrin syvyyteen Espan tekojärven rannalle. Hakupäivä 6.12.2021. <https://www.helen.fi/helen-oy/vastuullisuus/ajankoh-taista/blogi/2016/lampopumput-50-metrin-syvyyteen-espan-tekojarven-rannalle>.
- 22 Dincer, Ibrahim & Rosen, Marc 2011. Thermal energy storage systems and applications 2nd edition. United Kingdom: Wiley. e-kirja. Hakupäivä 2.2.2021. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjn8K-b57P2AhU-AxAlHaRCCBIQFnoECA4QAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.re-searchgate.net%2Ffile.PostFile-Loader.html%3Fid%3D574d5d57f7b67eba9d4c929f%26asset-Key%3DAS%3A367742109667328%401464687959319&usg=AOv-Vaw0ssuw8uwLM_UDbdGpXD8EO.
- 23 Senmatic. Thermal energy storage. Hakupäivä 2.2.2021. <https://www.senmatic.com/sensors/knowledge/thermal-energy-storage>.
- 24 Uusitalo, Seija 2020. Helen jatkaa investointeja hiilineutraaliuteen. Hakupäivä 28.10.2022. <https://www.helen.fi/uutiset/2020/uusi-lampopumppu>.
- 25 Uusitalo, Seija 2018. Helsinkiin rakennetaan jälleen uusi lämpöpumppu. Hakupäivä 29.10.2021. <https://www.helen.fi/uutiset/2018/uusilampopumppu> .
- 26 FrioTherm. 5 Unitop 50FT heat pump/ chiller unit simultaneously generate 90 MW heat energy and 60 MW chilled water. Asiakasraportti. Hakupäivä 29.10.2021. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahU-KEwi60pbFoa71AhVASvEDHTDiBhcQFnoECAkQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.friotherm.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2017%2F11%2Fkatri_vala_e012_uk.pdf&usg=AOvVaw2pxg_Oyy-vBnpxgPPDDNLQS.
- 27 Valor Partners Oy 2016. Suuret lämpöpumput kaukolämpöjärjestelmässä. Loppuraportti. Hakupäivä 25.10.2021. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahU-KEWjt1bnqoK71AhXuR_EDHY57A5IQFnoECAcQAQ&url=https%3A%2F%2Fenergia.fi%2Ffiles%2F993%2FSuuret_lampopumput_kaukolampojarjestelmassa_Loppuraportti_290816_paivitetty.pdf&usg=AOvVaw2Jczf165tmGULv32entUsQ.

- 28 Helen Oy 2014. Quality of living with globally exceptional and eco-efficient district cooling. Hakupäivä 29.10.2021. <https://cstom.cvent.com/72D606C42D1D4C0B8412C4B5C43678BB/files/survey/853a05bedcd643f99fd646d49eaffa7f/a9852ee912d24e6eaab93a69034cda9atmp.pdf>
- 29 Friotherm 2017. Turku Energia - Ecological heating and cooling with 2 Unitop 50FY. Asiakasraportti. Hakupäivä 30.10.2021. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahU-KEwihtd6Po671AhVBQvEDHR6_DfIQFnoECAKQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.frio-therm.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2017%2F11%2FE11-15_Turku-Energia.pdf&usq=AOvVaw1v9TvEVsmEC5n3m9swbzCx
- 30 Turku Energia 2012. Ecologic district heating and cooling from treated wastewater. Hakupäivä 30.10.2021. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjw86K2id32AhXk_CoKH-duZDj8QFnoECAKQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.frio-therm.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2017%2F11%2FE11-15_Turku-Energia.pdf&usq=AOvVaw1v9TvEVsmEC5n3m9swbzCx
- 31 Syrjäjä, Ilkka. Lämmönhankintapäällikkö. Turku Energia. Turun Kakolan lämpöpumppulaitos. Sähköpostikeskustelu 11.02.2022.
- 32 Tampereen Sähkölaitos Oy 2020. Vuosikertomus 2020. Hakupäivä 28.02.2022. <https://www.sahkolaitos.fi/footer-sivut/vastuullisuus/vastuumme-taloudesta/vuosikertomukset-ja-tilinpaatokset/>
- 33 Ylikunnari, Jukka. T630203 Virtaustekniikka 3 op. Kurssimateriaali 2019. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.
- 34 Uponor. Wehotherm kaukolämpöputkijärjestelmä. Tuoteluettelo. Hakupäivä 3.1.2022. <https://www.uponor.com/getmedia/22c6bb01-8a2a-4537-ae8-a75fde755656/41701-Wehotherm-tuoteluettelo?sitename=Finland&disposition=attachment>
- 35 Tampereen Kaupunki 2019. Keskustan strateginen osayleiskaava. Hakupäivä 10.1.2022. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiwgZ3O0Mf2AhWDIIsKHVmhArkQFnoE-CAMQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.tampere.fi%2Ftiedos-tot%2Fk%2F5xlqz8kCZ%2FKSOYK_selustus.pdf&usq=AOvVaw3BH65di0_Bn-7eg-MipC2la

- 36 Tampereen kaupunki 2020. Kantakaupungin yleiskaava 2040. Hakupäivä 11.1.2022.
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiHzv_30Mf2AhXIIYsKHV8VCLkQFnoE-CAMQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.tampere.fi%2Ftiedos-tot%2Fy%2FDfxKZ0Se3%2FYk2040_Selostus_voimaantulo_20_1_2020.pdf&usg=AOv-Vaw2q0rcEvW3XNy-NJF9iwhOi.
- 37 Ahvenainen, Timo. Tuotepäällikkö. Carrier lämpöpumput. Sähköpostikeskustelu 26.1.2022.
- 38 Hatakka, Sami. Jäähdytys ja lämpöpumput myynti. Johnson Controls. Johnson Controls lämpöpumput. Sähköpostikeskustelu 9.3.2022.
- 39 Salonen, Anssi. Verkon suunnittelija. Tampereen Sähköverkko Oy. Sähköliittynät. Sähköpostikeskustelu 8.3.2022.
- 40 Finnpark Oy 2021. P-Hämppi laajennus hankesuunnitelma. Hakupäivä 9.3.2022.
http://www.tampere.fi/ytoteto/aka/nahtavillaolevat/8670/luonnos/8670_luonnos_alus-tava_hankesuunnitelma_20200513_tayd20210505.pdf.
- 41 Finnpark Oy 2020. P-Hämpin laajennus. Hakupäivä 09.03.2022. <https://finnpark.fi/kaupunkikehitys-toimitilat/kiinteistot-toimitilat/p-hampin-laajennus/>.
- 42 Tampereen kaupunki 2021. Kunkunparkki maanalaisen asemakaavan selostus. Hakupäivä 17.3.2022. <https://tampere.cloudnc.fi/download/noname/%7B5f55a344-0dff-43ef-915a-e27a61b79509%7D/5119173>.
- 43 Ahponen, Marjut 2020. Kunkunparkin päivitetty hankesuunnitelma. Hakupäivä 17.3.2022.
<https://tampere.cloudnc.fi/download/noname/%7B997eb97f-e262-4a24-8abc-1d0a25b7e317%7D/5119213>.
- 44 Kinos, Merja. Toimistoarkkitehti. Tampereen kaupunki. Lämpöpumppulaitoksen sijoitus kaupunkialueella. Sähköpostikeskustelu 3.3.2022.
- 45 Gaia Consluting Oy 2013. Tampereen ratapiha ja radanvarsi. Hakupäivä 14.3.2022.
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwii-xazYuMX2AhWhlosKHU_ZD7kQFnoECAMQAQ&url=https%3A%2F%2Fmaakunta-kaava2040.pirkanmaa.fi%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2FVAK_tivistelma.pdf&usg=AOv-Vaw1-EzWajEbg4T_I3PmzDMqj.
- 46 Ympäristöministeriö 2016. Suuronnettomuusriskit ja kaupunkirakenne- opas maankäytön suunnitteluun. Hakupäivä 14.3.2022. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/75146/SY_03_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

- 47 Ratalaki 110/2007. Hakupäivä 15.3.2022. <https://finlex.fi/fi/laki/ajan-tasa/2007/20070110#L4P41>.
- 48 Pirkanmaan ympäristökeskus 2005. Ympäristölupapäätös. Hakupäivä 14.3.2022. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj5-PCSyMX2AhXmllsKHVNmDLkQFnoECACQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.ymparisto.fi%2Fdownload%2Fnoname%2F%257BEF80CB7E-D112-47AD-8D5B-40F12B13E248%257D%2F79601&usg=AOvVaw13hTQOJd1eqW5NZ_vcu2yq.
- 49 Lindell, Raija 2021. Tammelan stadion -hankkeen toteutussuunnitelma ja tonttikauppoja hyväksyttiin asunto- ja kiinteistölautakunnassa. Hakupäivä 1.3.2022. https://www.tampere.fi/tampereen-kaupunki/ajankohtaista/tiedotteet/2021/06/16062021_4.html.
- 50 Viljakka, Jarmo 2020. Hankesuunnitelma Tammelan Stadion uudisrakennus. Hakupäivä 1.3.2022. <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj-k62Ww7b2AhXnlYsKHZ4IDC4QFnoECAMQAQ&url=https%3A%2F%2Ftamperecloudnc.fi%2Fdownload%2Fnoname%2F%257B30b9d41d-7b64-49a2-a3c7-418aafa3cce1%257D%2F4691648&usg=AOvVaw1-U46yJvHwiN-EijLCSrT4>.