



Marko Mäkitalo

ENERGIAHÄVIÖIDEN SEGMENTOINTI VAA- SAN KAUKOLÄMPÖVERKOSSA

Tekniikka

2021

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Marko Mäkitalo
Opinnäytetyön nimi	Energiahäviöiden segmentointi Vaasan kaukolämpöverkossa
Vuosi	2021
Kieli	suomi
Sivumäärä	55+13
Ohjaaja	Jukka Hautala

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on segmentoida kaukolämpöverkon häviöitä Vaasassa. Näiden häviöiden kokonaismäärä tunnetaan, mutta työn tarkoituksena on selvittää eri osa-alueiden osuudet kokonaishäviöistä. Työssä tutkittiin myös pumppaukseen kuluvan energian suhdetta menolämpötilan muutoksiin. Näiden osuuksien selvitys antaa pohjan systeemin hyötysuhteen parantamiseen.

Työ on toteutettu käyttämällä Vaasan Sähkö Oy:n keräämää dataa vuosilta 2019 sekä 2020. Työssä on käytetty kotimaisia sekä kansainvälisiä lähteitä. Näiden lähtötietojen pohjalta on luotu laskennassa käytetty Excel, jolla voidaan tutkia lämpöhäviöitä eri meno- ja paluulämpötiloilla. Tätä Exceliä on käytetty selvittämään verkoston, vuotokohtien ja kaukolämpökaivojen lämpöhäviöiden selvittämisessä sekä pumppaukseen kuluvan energiamäärän muutosta.

Laskennan pohjalta todettiin, että merkittävin osa häviöistä koostuu kaukolämpöjohtojen läpi johtuvasta lämmöstä. Laskennassa nousivat esille erityisesti betonielementtikanavien osuus kokonaislämpöhäviöistä sekä menolämpötilan muutosten vaikutus lämpöhäviöihin. Menolämpötilan alentamisella voidaan vähentää lämpöhäviöitä noin 500 MWh per aste. Vastaavasti pumppausenergian tarve nousee noin 200 MWh per aste.

Opinnäytetyön pohjalta voidaan todeta, että menolämpötilan sekä pumppauksen optimoimisella voidaan saavuttaa kustannuksellisia etuja, ja että niiden kohdalla kannattaa suorittaa jatkotutkimuksia optimisäätöjen löytämiseksi.

ABSTRACT

Author	Marko Mäkitalo
Title	Segmenting the Energy Losses of District Heating Network in Vaasa
Year	2021
Language	Finnish
Pages	55+13
Name of Supervisor	Jukka Hautala

The topic of this thesis was the segmentation of energy losses in the Vaasa district heating network. Currently, only the total energy losses are known, and the aim of this thesis was to split the losses into smaller sectors. This thesis also demonstrates the correlation between the temperature of the outgoing water and the energy consumption of pumping. The segmentation of these losses is an essential tool when it comes to locating the potential sectors for minimizing energy losses.

Calculations used in this thesis are based on the data gathered by Vaasan Sähkö Oy over the course of 2019 and 2020. In addition to Vaasan Sähkö's data, a number of Finnish and international sources were used to create a calculator in Excel that provides an estimation of energy losses within defined sectors with the possibility of changing the influential parameters. This Excel tool was used to estimate the heat losses of the network, possible leaks within the system and the wells. The Excel tool was also used to estimate the changes in energy consumption of pumps when lowering the temperature of outgoing water.

Based on the calculations one can tell that the biggest segment of total energy losses comes from the energy that is transmitted from the pipe to the surrounding ground. According to the calculations and observed data, the part of the network that is built with concrete elements has substantially higher heat losses compared to its modern counterparts. Another thing that stood out as a possible source for energy savings was lowering the temperature of outgoing water, which would lower the yearly heat losses by 500 MWh per one Celsius. At the same time, it turned out that for each Celsius the outgoing water temperature is lowered, the energy consumption of pumps increased by 200 MWh.

Based on the calculations, it is advised to further research the optimization of water temperature and the pumping in order to lower the production costs and increase the total efficiency of the process.

Keywords	District heating, efficiency, energy saving and heat loss
----------	---

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO	9
1.1	Työn tausta	9
1.2	Työn rakenne	9
2	KAUKOLÄMPÖJÄRJESTELMÄN TOIMINTA	10
2.1	Lämmöntarve	10
2.2	Tuotanto	11
2.2.1	Tuotanto Vaasassa	12
2.3	Jakelu	13
2.3.1	Kiinnivaahdotetut johdot	14
2.3.2	Betonikanavajohdot	15
2.3.3	Muut johtotyypit	16
2.3.4	Verkosto Vaasassa	16
3	KAUKOLÄMPÖVERKON HÄVIÖT	18
3.1	Menolämpötila	18
3.2	Kaukolämpöverkon rakenne ja ominaisuudet	18
3.2.1	Painehäviöt	18
3.2.2	Lämmön johtumisesta johtuvat häviöt	19
3.2.3	Kaukolämpökaivot	20
3.2.4	Vuotohäviöt	20
3.3	Käyttöaste	21
3.4	Kaukolämpöyhtiöiden häviöt keskimäärin Suomessa	21
4	HÄVIÖIDEN LASKENTA	23
4.1	Lämpöhäviöt kaukolämpöverkostossa 2Mpuk-johdoissa	24
4.2	Lämpöhäviöt kaukolämpöverkostossa Mpuk-johdoissa	26
4.3	Lämpöhäviöt kaukolämpöverkostossa Emv-johdoissa	27

4.4	Vuotojen lämpöhäviöt.....	29
4.5	Kaukolämpökaivojen lämpöhäviöt.....	30
4.6	Pumppauksen ja meno- sekä paluulämpötilojen suhde	31
5	HÄVIÖLASKENNAN TULOKSET & ANALYSOINTI	34
5.1	Lähtötiedot	34
5.2	2Mpuk-johtojen lämpöhäviöt	35
5.3	Mpuk-johtojen lämpöhäviöt	36
5.4	Emv-kanavien lämpöhäviöt	37
5.5	Muiden putkityyppien lämpöhäviöt.....	38
5.6	Vuotojen lämpöhäviöt.....	38
5.7	Kaukolämpökaivojen lämpöhäviöt.....	39
5.8	Laitosten omakäytöt.....	40
5.9	Pumppausteho muutos lämpötilan muuttuessa	41
5.10	Lämpöhäviöt osa-alueittain.....	42
5.11	Laskennan epätarkkuudet	43
5.12	Häviöiden analysointi	46
6	ENERGIAHÄVIÖIDEN SEGMENTOINTI SEKÄ MINIMOINTI VAASAN KAUKOLÄMPÖJÄRJESTELMÄSSÄ	50
6.1	Verkoston johtumishäviöt	50
6.2	Vuotohäviöt.....	50
6.3	Kaukolämpökaivojen häviöt	50
6.4	Omakäyttö.....	51
6.5	Emv-kanavien saneeraus.....	51
6.6	Menolämpötilan vaikutus lämpöhäviöihin ja pumppaukseen.....	52
6.7	Pumppauksen optimointi	54
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	55

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

- Kuva 1.** Kaukolämmön markkinaosuus Suomessa. /1/
Kuva 2. Kaukolämmön kulutus Suomessa kuukausitasolla. /3/
Kuva 3. Kaukolämmön energialähteet Suomessa 2019. /1/
Kuva 4. Vaasan kaukolämmön tuotanto polttoaineittain.
Kuva 5. Kaksiputkisen kaukolämpöjakelun periaatekuva. /3/
Kuva 6. 2Mpuk sekä Mpuk. /5/
Kuva 7. Betonielementtikanava. /5/
Kuva 8. Vaasan kaukolämpöverkosto.
Kuva 9. Eri maalajien lämmönjohtavuus kosteuden muuttuessa. /3/
Kuva 10. Vaasan maaperän koostumus. /7/
Kuva 11. Havainnollistava kuva 2Mpuk:n laskennan dimensioista.
Kuva 12. Havainnollistava kuva Mpuk:n laskennan dimensioista.
Kuva 13. Lämpöhäviöt segmenteittäin vuonna 2019.
Kuva 14. Kulutuksen ja hankinnan suhde ulkolämpötilaan sekä maaperän lämpötilaan.
Kuva 15. Kokonaislämpöhäviöiden sekä verkoston aiheuttamien lämpöhäviöiden suhde ulkolämpötilaan sekä maaperän lämpötilaan.
Kuva 16. Vuotohäviöiden, kaukolämpökaivojen, omakäytön sekä laskennasta yli jääneiden osuudet kuukausitasolla.

- Taulukko 1.** Suomen kaukolämpöyhtiöiden tunnuslukuja vuodelta 2019.
Taulukko 2. Lämpöhäviölaskennassa käytetyt lämpötilat.
Taulukko 3. Lämpöhäviölaskennassa käytetyt lämmönjohtavuudet.
Taulukko 4. 2Mpuk:n osuudet lämpöhäviöistä putkityypeittäin.
Taulukko 5. Mpuk:n osuudet lämpöhäviöistä putkityypeittäin.
Taulukko 6. Emv-kanavien osuudet lämpöhäviöistä putkityypeittäin.
Taulukko 7. Muiden putkityyppien osuudet lämpöhäviöistä.
Taulukko 8. Vuotohäviöiden osuudet kuukausitasolla vuonna 2019.
Taulukko 9. Kaukolämpökaivojen laskennalliset lämpöhäviöt kuukausitasolla vuonna 2019.
Taulukko 10. Pumppauksen energiankulutus kuukausitasolla vuonna 2019.
Taulukko 11. Pumppaustehon muutos menolämpötilan suhteen.
Taulukko 12. Kaukolämpöverkoston lämpöhäviöt segmentoidusti.
Taulukko 13. Eri kanavatyyppien lämpöhäviöiden osuudet suhteutettuna niiden verkosto-osuuksiin.
Taulukko 14. Lämpöhäviöiden käyttäytymistä havainnollistava taulukko menolämpötilan muuttuessa vuositason tasolla.
Taulukko 15. Lämpöhäviöiden muutos, mikäli emv-kanava vaihdettaisiin kiinnivaahdotettuun johtotyyppiin.
Taulukko 16. Suomen kaukolämpöverkkojen tunnuslukuja.
Taulukko 17. 2Mpuk eristeluokan 2 dimensiot.
Taulukko 18. 2Mpuk eristeluokan 3 dimensiot.
Taulukko 19. Mpuk eristeluokka 2 dimensiot.

Taulukko 20. Mpuk eristeluokan 3 dimensiot.

Taulukko 21. Betonielementtikanavan dimensiot.

Taulukko 22. Vuoden 2019 lähtöarvot ja tulokset vuotohäviöiden laskennasta.

Taulukko 23. 2Mpuk-elementtien kokonaislämpöhäviöt kuukausittain vuonna 2019 megawattitunneissa.

Taulukko 24. Mpuk-elementtien kokonaislämpöhäviöt kuukausittain vuonna 2019 megawattitunneissa.

Taulukko 25. Betonielementtikanavien kokonaislämpöhäviöt kuukausittain vuonna 2019 megawattitunneissa.

Taulukko 26. Muiden johtojen kuin 2Mpuk, Mpuk sekä Emv kokonaislämpöhäviöt kuukausittain vuonna 2019 megawattitunneissa.

Taulukko 27. Betonikanavajohtojen varrella olevien kaukolämpökaivojen kokonaislämpöhäviöt kuukausittain vuonna 2019 megawattitunneissa.

Taulukko 28. Omakäytön osuus kokonaislämpöhäviöistä vuonna 2020 megawattitunneissa.

LYHENNE- JA SYMBOLILUETTELO

$2M_{puk}$	Yksijohtoputki	
M_{puk}	Kaksijohtoputki	
Emv	Betonikanavajohto	
ϕ_{tot}	Kokonaislämpöhäviö	[W/m]
ϕ_m	Menopuolen lämpöhäviö	[W/m]
ϕ_p	Paluupuolen lämpöhäviö	[W/m]
ϕ_a	Lämpövirta putkien välillä	[W/m]
ϕ_s	Lämpövirta putkesta ympäristöön	[W/m]
T_m	Menopuolen lämpötila	[°C]
T_p	Paluupuolen lämpötila	[°C]
T_g	Maaperän lämpötila	[°C]
λ_g	Maaperän lämmönjohtavuus	[W/mK]
λ_i	Eristeen lämmönjohtavuus	[W/mK]
λ_c	Putken vaipan lämmönjohtavuus	[W/mK]
h_s	Lämmönsiirtokerroin ympäristöön	[-]
h_a	Lämmönsiirtokerroin putkien välillä	[-]
H	Putken keskipisteen korjattu syvyys	[m]
H'	Putken keskipisteen todellinen syvyys	[m]
r_s	Putken säde	[m]
r_t	Virtausputken säde	[m]
D	Puolet putkien keskipisteiden välisestä etäisyydestä	[m]
D_i	Putken kokonaishalkaisija	[m]
D_p	Virtausputken halkaisija	[m]
D_c	Betonielementtikanavan ympärysmitta	[m]
K_1	Lämmönjohtavuus ympäristöön	[W/mK]
K_2	Lämmönjohtavuus putkien välillä	[W/mK]
R_m	Putkien keskinäisen vaikutus per pituusyksikkö	[mK/W]
R_g	Maaperän lämpövastus per pituusyksikkö	[mK/W]
R_i	Eristeen lämpövastus per pituusyksikkö	[mK/W]
R_{hi}	Lämpövastus emv-kanavan eristeen pinnalla	[W/K]
h_{gs}	Lämmönsiirtokerroin maanpinnalla	[W/m²K]
h_{es}	Emv-kanavan eristeen lämmönsiirtokerroin	[W/m²K]
E	Emv-kanavan putkien keskipisteiden välinen etäisyys	[m]
A	Emv-kanavan tilatilan leveys	[m]
B	Emv-kanavan tilatilan korkeus	[m]
β	Apumuuttuja	[-]
σ	Apumuuttuja	[-]
γ	Apumuuttuja	[-]
m'	kaukolämpöveden massavirta	[kg/s]
V'	veden tilavuusvirta	[m³/s]
ΔP_p	pumppaustehon muutos	[kW]
P_p	pumppausteho normaaliajossa	[kW]

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on selvittää sekä segmentoida Vaasan kaukolämpöverkoston lämpöhäviöt sekä tutkia, miten menolämpötilan alentaminen vaikuttaa lämpöhäviöihin sekä pumppausenergian kulutukseen. Lämpöhäviöiden segmentointi auttaa kartoittamaan potentiaalisia säästökohteita. Lisäksi menolämpötilan sekä pumppauksen säädöillä voidaan parantaa prosessin hyötysuhdetta ja säästää kustannuksissa sitä kautta.

1.2 Työn rakenne

Opinnäytetyö on jaettu viiteen osioon; kaukolämmön toimintaan yleisellä tasolla, segmentoinnin määrittelyyn, häviölaskennan teoriaan, häviölaskennan tuloksiin sekä analysointiin sekä häviöiden osuuksien esittelyyn ja mahdollisten kehityskohteiden esittelyyn.

Ensimmäisessä osassa käydään läpi kaukolämpöjärjestelmän toimintaperiaate sekä verkoston rakentamisessa käytetyt johtotyypit. Opinnäytetyön toisessa esitellään sanallisesti energiahäviöitä aiheuttavat tekijät sekä suoritetaan vertailu Suomen kaukolämpöyhtiöiden välillä. Kolmannessa osiossa esitellään häviölaskennan teoria sekä opinnäytetyössä käytetyt kaavat. Opinnäytetyön neljäs osa koostuu laskentaprosessin tuloksien esittelystä sekä analysoinnista. Lisäksi siinä käsitellään laskennallisia virherajoja.

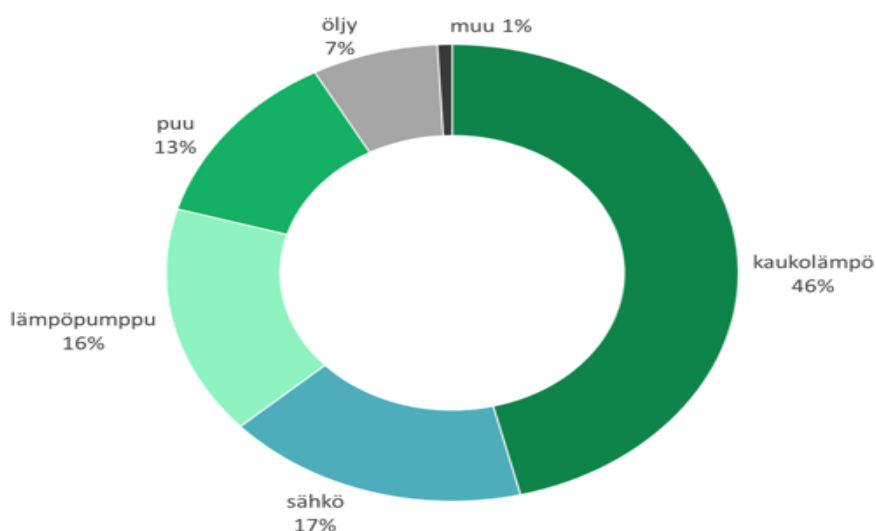
Viimeisessä osiossa esitellään vuoden 2019 lämpöhäviöt segmenteittain sekä esitellään potentiaaliset säästökohteet Vaasan Sähkö Oy:n kaukolämpöjärjestelmän hyötysuhteen parantamiseksi.

2 KAUKOLÄMPÖJÄRJESTELMÄN TOIMINTA

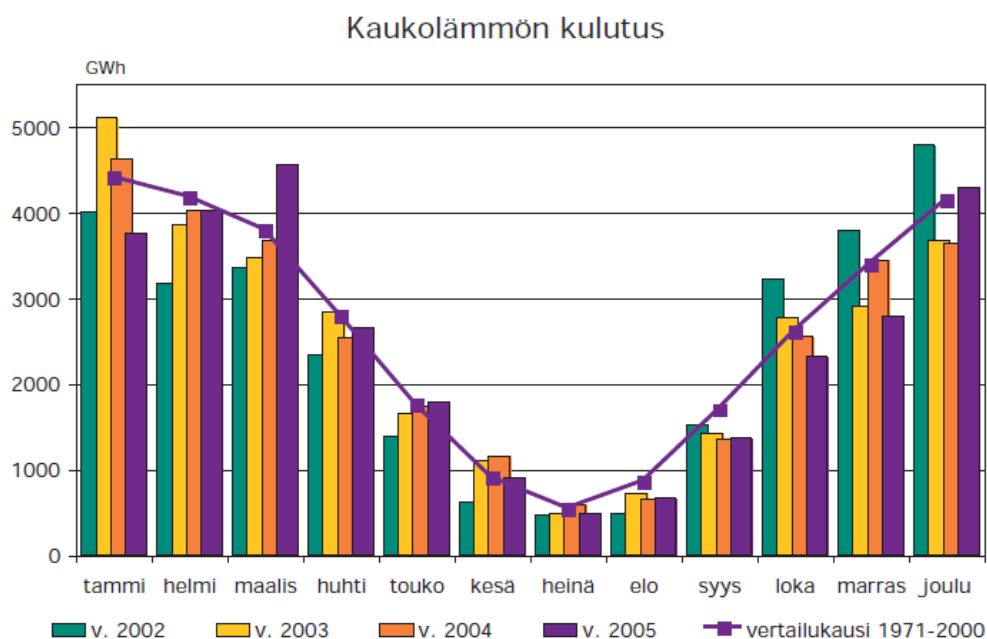
Kaukolämpöjärjestelmä on systeemi, joka koostuu tuotantolaitoksista sekä verkostosta. Kaukolämpöenergian tuotanto perustuu eri polttoaineiden polttamiseen. Polttamisprosessista kerätään lämpöenergiaa veteen, joka pumpataan kaukolämpöverkostoon. Asiakkaat ottavat tarvitsemansa lämpöenergian verkostosta käyttöönsä lämmönvaihtimella, jonka jälkeen jäähtynyt kaukolämpövesi kierrätetään laitokselle uudelleenlämmitettäväksi.

2.1 Lämmöntarve

Kuvassa 1 on esitetty Suomen asuin- ja palvelurakennuksien käyttöveden sekä sisäilman lämmitykseen käytettyjen ratkaisujen osuudet vuodelta 2018. Kaukolämpö kattaa tästä osuudesta 46 %. Kaukolämpöenergiasta noin kaksi kolmasosaa kuluu ilman lämmitykseen ja loppu käyttöveden lämmitykseen. Lämmöntarpeen vaihtelua voidaan tutkia niin vuosittaisella tasolla kuin pienemmillä aikaväleillä, esimerkiksi tuntitasolla. Pidemmän aikavälin lämmöntarvetta katsoessa tulee selväksi, että ulkolämpötila on suurin yksittäinen vaikuttava tekijä, kuten kuvasta 2 voidaan todeta. /1–3/



Kuva 1. Kaukolämmön markkinaosuus Suomessa 2018. /1/

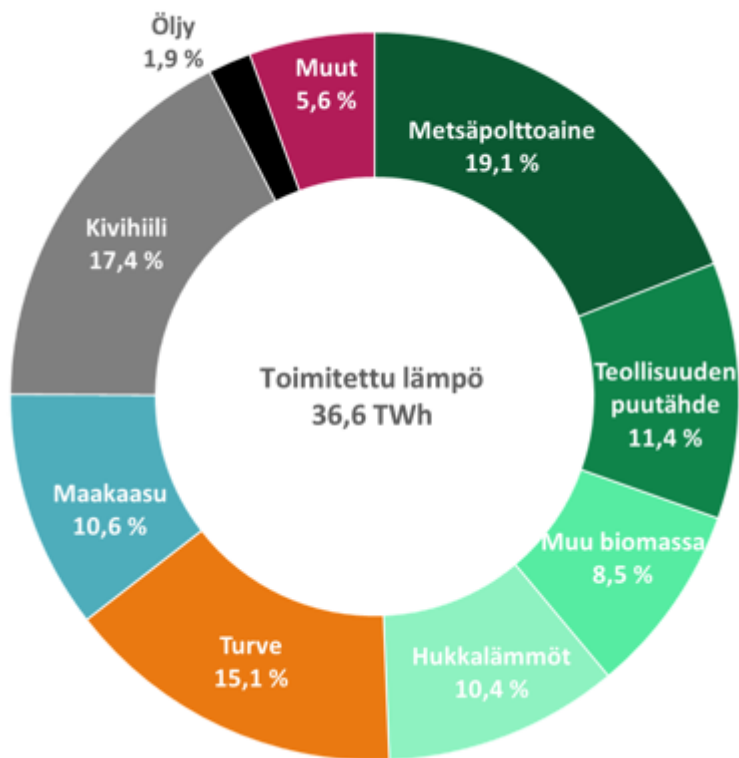


Kuva 2. Kaukolämmön kulutus Suomessa kuukausitasolla. /3/

Kaukolämmön kulutuksen kannalta oleellisin parametri on ulkolämpötila, kuten kuvasta 2 huomataan. Pienemmillä aikaväleillä puolestaan alkaa erottua asiakkaiden kulutustottumukset. Tällaisia piikkejä tuntitasolla ovat esimerkiksi aamun tunnit, kun ihmiset heräävät töihin. Kulutustottumuksia seuraamalla voidaan ennustaa mahdollisia kulutuspiikkejä, joiden pohjalta verkostoon voitaisiin akkumuloida ylimääräistä lämpöä tasoittamaan lämmöntuotannon piikkejä. /3/

2.2 Tuotanto

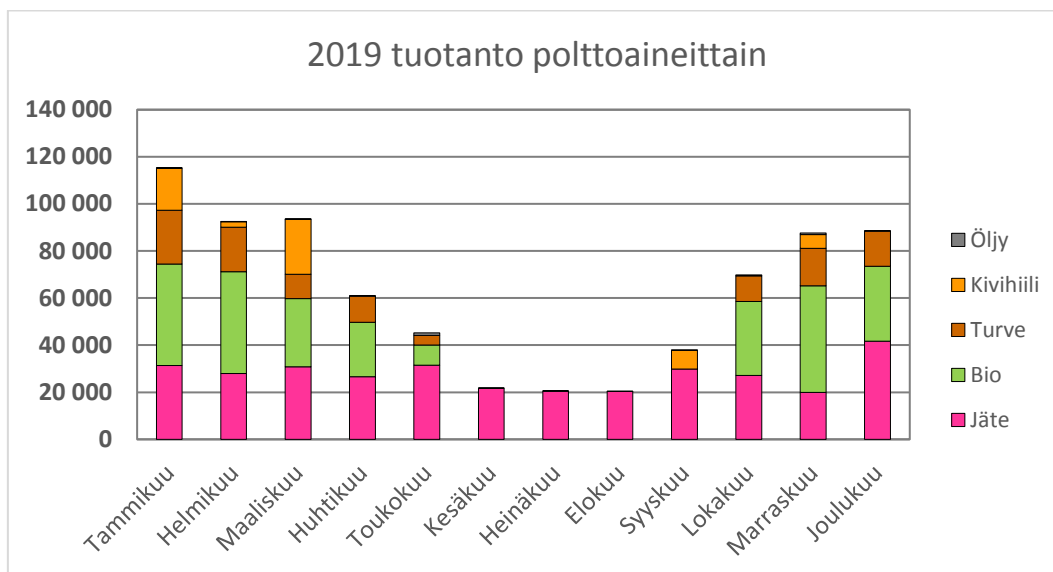
Kaukolämpö on keskitetysti tuotettavaa lämpöenergiaa, joka siirretään asiakkaille kuuman veden välityksellä käyttämällä maanalaista putkiverkostoa. Lämmöntuotannon polttoaineena käytetään yleensä puuta tai muuta biomassaa, kivihiiltä, maakaasua, turvetta, jätettä tai öljyä. Lisäksi kaukolämpöverkkoon voidaan liittää muita kuin polttoon perustuvia ratkaisuja, kuten esimerkiksi lämpöpumppuja. Kuvassa 3 on esitetty Suomalaisen kaukolämmityksen energialähteet vuodelta 2019. /3/



Kuva 3. Kaukolämmön energialähteet Suomessa 2019. /1/

2.2.1 Tuotanto Vaasassa

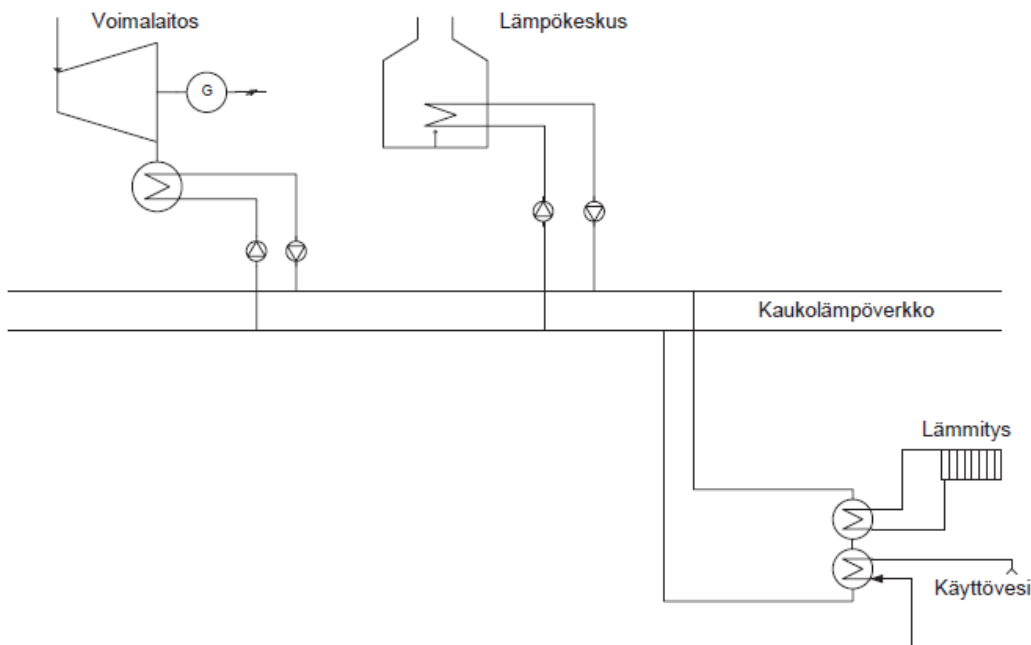
Kaukolämpö Vaasassa tuotetaan lähes kokonaan kahdessa sähköä ja lämpö tuottavassa yhteistuotantolaitoksessa, Vaskiluodossa sijaitsevalla kaukolämpölaitoksella sekä Mustasaarella sijaitsevalla jätteenpolttolaitoksella. Vaskiluodossa poltetaan turvetta, kivihiiltä sekä biomassaa. Yhdessä nämä kaksi laitosta kykenevät kattamaan 99 % Vaasan kaukolämmön vuotuisista tarpeista. Tarvittaessa kaukolämpöä tuotetaan myös Vaasan Sähkön omilla lämpökeskuksilla, joissa käytetään kevyttä polttoöljyä. Lämpökeskuksia käytetään vikatilanteissa sekä talven kovimmilla pakkasilla. Vuonna 2019 Vaasan Sähkö tuotti kaukolämpöä yhteensä 754,7 gigawattituntia. Kuvasta 4 voidaan nähdä eri polttoaineiden kulutuksen sekä tuotettujen megawattituntien määrän per kuukausi. /4/



Kuva 4. Vaasan kaukolämmön tuotanto polttoaineittain.

2.3 Jakelu

Kuvassa 5 on esitelty kaukolämpöjärjestelmän toiminta. Kaukolämmön jakelu tapahtuu maahan kaivetulla, yleensä noin metrin syvyydessä olevalla putkiverkostolla. Verkostossa on kaksi puolta; meno- sekä paluupuoli. Kaukolämpölaitokselta pumpataan kuumaa vettä verkostoon, josta asiakas ottaa tarpeidensa mukaisesti lämpöä käyttöönsä lämmönvaihtimella. Vesi palaa vaihtimen jälkeen verkoston paluupuolelle, josta se ohjataan takaisin laitokselle uudelleenlämmitettäväksi. Verkostoon pumpattavan veden lämpötila on noin 70-110 celsiusastetta, riippuen asiakkaiden energiankulutuksesta. Kuvassa 5 on havainnollistettu systeemin toimintaperiaate.



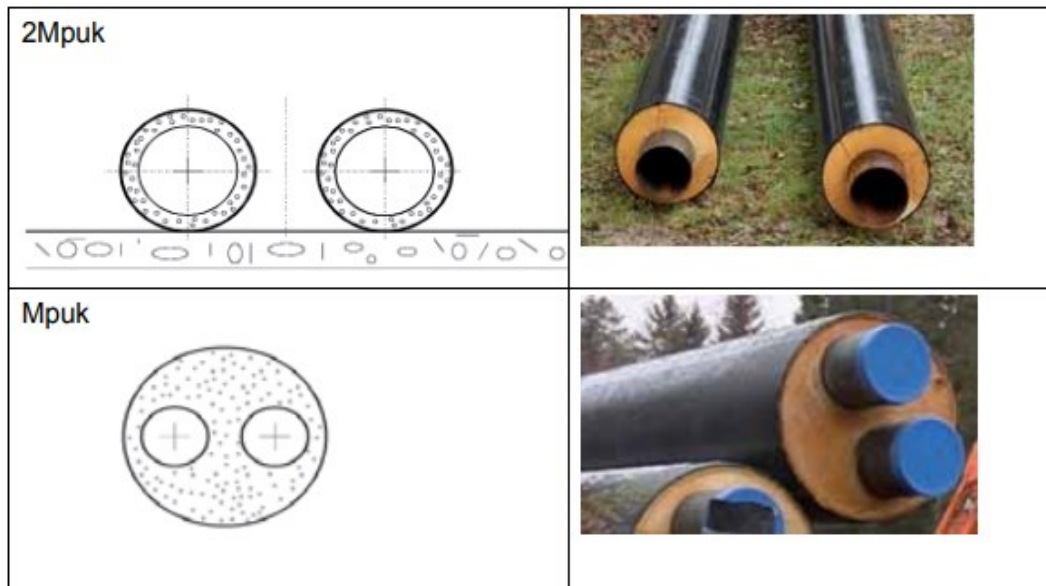
Kuva 5. Kaksiputkisen kaukolämpöjakelun periaatekuva. /3/

2.3.1 Kiinnivaahdotetut johdot

Kiinnivaahdotettujen kaukolämpöjohtojen käyttö Suomessa alkoi 1970-luvulla. 1980-luvun puolivälin jälkeen käytännössä kaikki johdot ovat rakennettu tällä johtotyypillä. Syitä tällaisten putkien yleistymiseen on monia; elementtien helppokäyttöisyys, laadun valvonnan helppous, ympäröivän maan painumisen vaikutusten väheneminen sekä johtojen standardoinnin vuoksi eri valmistajien elementit ovat yhteensopivia. /3/

Kiinnivaahdotettuja johtoja valmistetaan joko yksi- tai kaksiputkisena. Molemissa elementeissä on kuitenkin sama periaate; teräsputki, jota ympäröi kerros polyuretaania sekä polyeteenistä valmistettu muovinen suojakuori. Nimensä mukaisesti yksiputkisessa elementissä (2Mpuk) on vain yksi putki, minkä vuoksi verkostoa rakentaessa maahan joudutaan asentamaan johdot meno- sekä paluupuolelle erikseen. Vastaavasti kaksiputkisessa elementissä (Mpuk) johto sisältää molemmat meno- ja paluupuolen. Suorien kiinnivaahdotettujen johtojen lisäksi saatavilla on kulmaelementtejä, haaraelementtejä sekä venttiilielementtejä. /3/

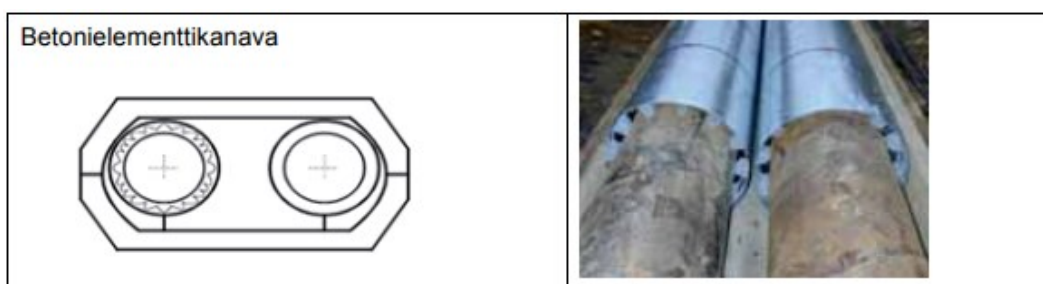
2Mpuk:n sekä Mpuk:n ominaisuuksia verratessa on todettu, että kaksiputkijohdon lämpöhäviöt ovat pienemmät kuin vastaavan yksiputkijohdon. Lisäksi niihin kuluu vähemmän materiaalia ja tarvittavien putkivetojen tarve puolittuu. Rakenteensa vuoksi yksiputkista johtoa on mahdollista kuitenkin saada pitempinä elementteinä; pisimmillään yksiputkista johtoa voi saada 18 metrisenä, kun taas kaksiputkista elementtiä saa maksimissaan 12 metrisenä. /3/



Kuva 6. 2Mpuk sekä Mpuk. /5/

2.3.2 Betonikanavajohdot

Ennen laajamittaista kiinnivaahdotettujen kaukolämpöputkien käyttöä lämmönsiirtoon käytettiin betonielementtikanavia. Käytännössä ne ovat betonista valmistettuja suojakuoria, joiden sisälle asennetaan teräsputket meno- sekä paluuväylälle ja eristys. Eristykseen käytetään pääsääntöisesti mineraalivillaa tai polyuretaania. Betonielementtikanavilla on todettu suuremmat lämpöhäviöt kuin Mpuk:lla, johtuen eristystehokkuuden rajusta heikkenemisestä kostuttuaan. /3/



Kuva 7. Betonielementtikanava (Emv). /5/

2.3.3 Muut johtotyypit

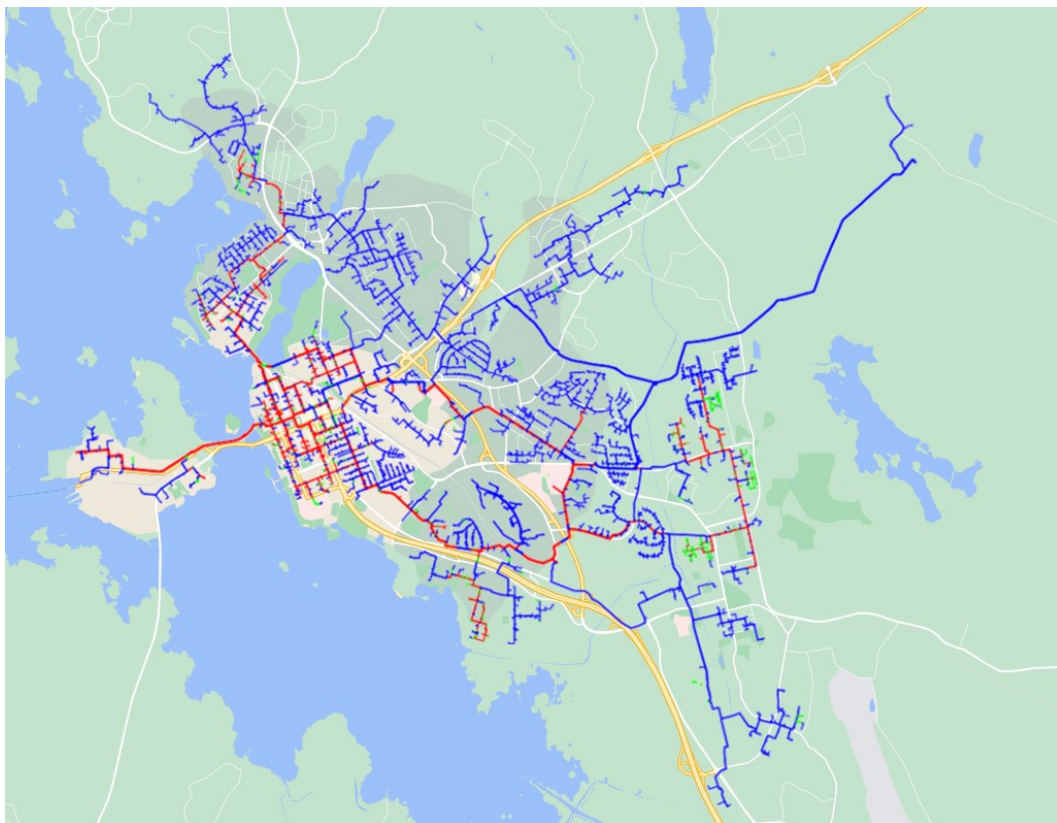
Kiinnivaahdotettujen sekä betonielementtijohtojen lisäksi on harvoissa tapauksissa voitu käyttää muita johtotyypppejä. Tällaisia ovat esimerkiksi kylmävedetty tarkkuusteräs, korrugoitu ruostumaton teräs sekä kupariputket.

Käyttökohteena tällaisilla putkityypeillä ovat talojohdot sekä pienet jakelujohdot. Näiden johtotyyppien etuna on asennusnopeus; putket toimitetaan joko kankitavarana tai kieppeinä. Lisäksi ne joustavat enemmän kuin tavalliset johtotyypit mahdollistaen johtojen muotoilun työmaalla.

Metallisten johtojen lisäksi kaukolämpöverkkoa voidaan rakentaa muoviputkijohdoilla, mikäli kyseisen verkostonosan lämpötila on alle 80°C. Muoviset putket ovat myös nopeasti asennettavia. Suurin ongelma tällaisella johtotyyppillä on materiaalin huokoisuus, joka mahdollistaa diffuusion putken seinän läpi; happidiffuusion putken ulkopuolelta sekä vesihöyrydiffuusion putken sisäpuolelta. Happidiffuusiosta verkostoon pääsee happea, joka aiheuttaa ruostumista. Vastaavasti vesihöyryn diffuusio johtaa lämpöhäviöihin. /3/

2.3.4 Verkosto Vaasassa

Kuvassa 8 on esitetty Vaasan kaukolämpöverkosto. Sinisellä on merkattu kiinnivaahdotetut johdot, punaisella betonikanavajohdot sekä vihreällä muut johtotyypit. Yhteensä verkostoa on noin 257,0 kilometriä, josta betonikanavaa on 50,3 kilometriä ja kiinnivaahdotettuja 203,8 kilometriä. Lisäksi verkostossa on ilmassa sijaitsevia johtoja sekä harvinaisempia putkityyppejä yhteensä 2,2 kilometriä.



Kuva 8. Vaasan kaukolämpöverkosto.

3 KAUKOLÄMPÖVERKON HÄVIÖT

Verkoston hyötysuhde on olennainen osa kulujen minimointia. Lämpöhäviöistä johtuvat kustannukset ovatkin kaukolämpöyhtiön suurin käyttökustannuserä. Verkoston häviöihin voidaan vaikuttaa optimoimalla vaikuttavia parametrejä; verkostoon syötettävän veden lämpötilaa sekä pumppaustehoa. Hyötysuhteen parantamiseen voidaan vaikuttaa myös verkoston asennuksen aikaisilla laatutarkistuksilla sekä jatkuvalla verkoston kuntotarkastuksella. /3/

3.1 Menolämpötila

Kaukolämpöverkon käyttölämpötila, eli verkostoon ajettavan veden lämpötila on keskeisessä osassa häviöitä tutkittaessa. Energiatehokkuutta optimoidessa tulee ottaa huomioon myös pumppaukseen kuluva energia. Mikäli menolämpötilaa lasketaan, on energiansiirtoa kompensoitava kasvattamalla veden virtausta. Veden virtauksen kasvu puolestaan johtaa kasvaviin painehäviöihin ja sitä kautta suurempaan energiankulutukseen.

3.2 Kaukolämpöverkon rakenne ja ominaisuudet

Kaukolämpöverkko koostuu maanalaisesta putkiverkostosta. Nykypäivänä verkostoa rakentaessa käytetään Mpuk ja 2Mpuk kaukolämpöputkia eli muovikuorisia sekä polyuretaanilla eristettyjä teräsputkia. Vanhemmissa verkostoissa on käytetty myös betonielementtikanavia. Verkoston kokonaishäviöt voidaan jakaa paine-, lämpö- sekä vuotohäviöihin.

3.2.1 Painehäviöt

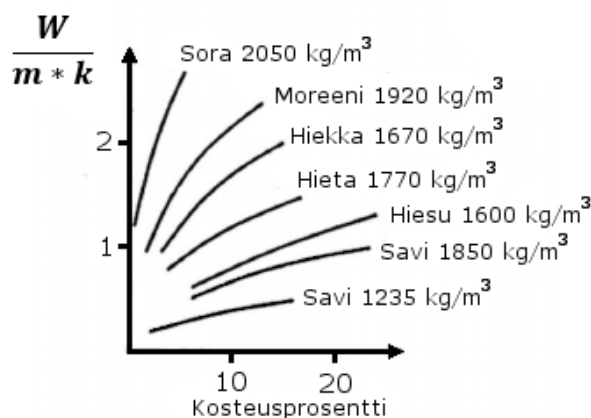
Verkoston painehäviöt koostuvat putkiston sisäpinnan kitkasta, verkoston kulumista ja haaroista sekä putken halkaisijan muunnoksista. Virtausnopeuden kasvassa myös painehäviöt kasvavat. Tämä tarkoittaa, että vaikka menolämpötilaa laskemalla voidaan minimoida kaukolämpöveden lämmitykseen kuluva energiamäärä, joudutaan sitä kompensoimaan kasvattamalla pumppaustehoa, mikä

puolestaan johtaa suurempiin painehäviöihin verkostossa ja sitä kautta suurempiin pumppauskustannuksiin. /3/

3.2.2 Lämmön johtumisesta johtuvat häviöt

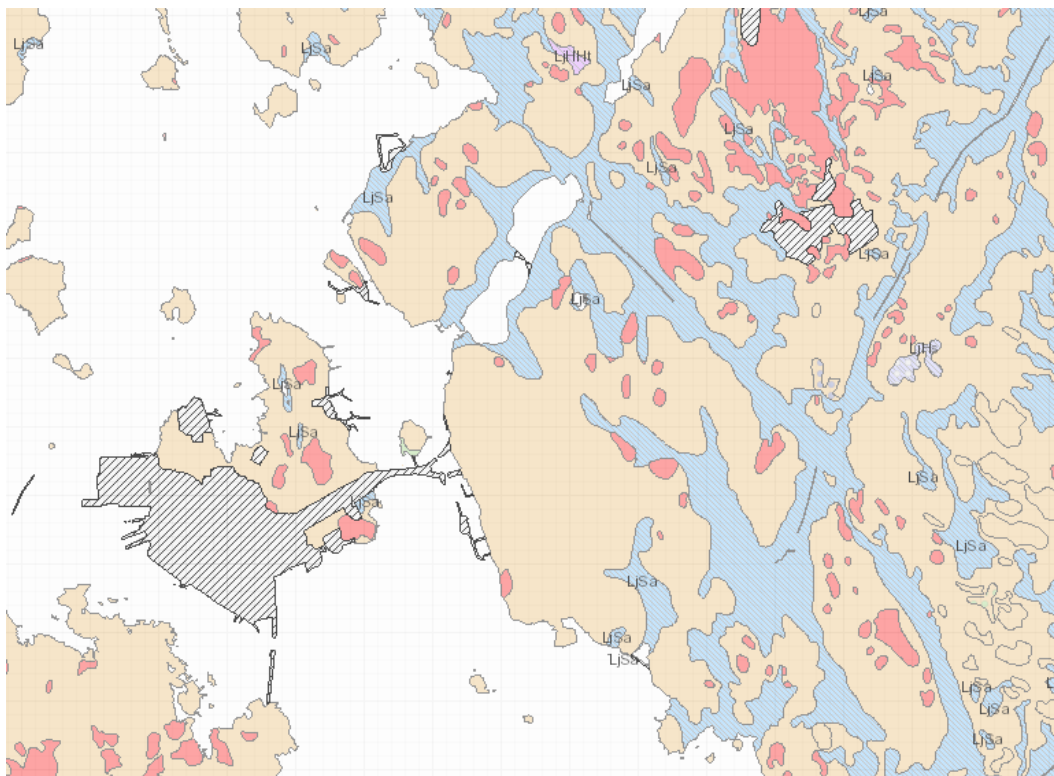
Lämpöä johtuu verkostosta spontaanisti ympäröivään maaperään. Tähän vaikuttavat putken koko ja tyyppi, eristyskerroksen paksuus ja kunto, verkoston sekä maaperän lämpötilaero ja maaperän ominaisuudet. Putkikoon vaikutus lämpöhäviöihin johtuu vaippapinta-alan ja siirtokyvyn suhteesta. Energiateollisuus ry:tä mukaillen putkikoon ollessa keskimäärin DN 50 häviöt ovat noin 10-20 %. Vastavasti putkikoon ollessa DN 150 häviöt tippuvat 4-10 %:iin. /3/

Johtoa ympäröivän maaperän vaikutukset riippuvat sen laadusta sekä kosteudesta. Kuvassa 9 on esitetty näiden ominaisuuksien vaikutus lämmönjohtavuuteen.



Kuva 9. Eri maalajien lämmönjohtavuus kosteuden muuttuessa. /3/

Kuvassa 10 on esitettynä Vaasan seudun maaperän koostumus. Keltainen sävy indikoi hiekkamoreenia, sininen liejusavea ja punainen kalliomaata. Kuvaan 9 verrattaessa voidaan arvioida Vaasan maaperän lämmönjohtavuuden olevan noin 1,5 – 1,8 W/mK riippuen maaperän kosteudesta.



Kuva 10. Vaasan maaperän koostumus. /7/

3.2.3 Kaukolämpökaivot

Kaukolämpöputkien lisäksi lämpöhäviöitä voidaan huomata myös kaukolämpökai-voissa, joita löytyy emv-johtojen varsilta sekä tienalituskohdista, joissa on käytetty kiinnivaahdotettuja johtoja. Näihin kaivoihin on asennettu sulkuventtiilejä, tyhjen-nyksiä sekä ilmanpoistoja.

3.2.4 Vuotohäviöt

Verkoston vuotokohdista vapautuva vesi kuljettaa lämpöä pois systeemistä vuo- tokohdan ympäristöön. Tämä energia voidaan laskea lämpöhäviöksi, sillä kauko- lämpöverkostoon joudutaan lisäämään raakavettä, joka joudutaan lämmittämään vastaavaan lämpötilaan. Lisäksi vuotovesi heikentää putkiston eristekerroksen te- hokkuutta kasvattamalla sen lämmönjohtavuutta. Vuotohäviöitä voidaan arvioida lisäveden vuosikulutuksesta, mutta kulutusta tutkittaessa tulee huomioida kor- jaustöistä aiheutuneet lisävesitarpeet. Vuotohäviöiden energiahäviöihin vaikuttaa

olennaisesti vuotavan veden lämpötila. Tästä syystä on energiahäviöitä laskiessa olennaista tietää, sijoittuuko vuoto meno- vai paluupuolelle. /6/

3.3 Käyttöaste

Käyttöasteella tarkoitetaan sitä, kuinka suuri osa verkostosta on käytössä. Käytännössä tämä tarkoittaa tilannetta, jossa putki on ylimitoitettu. Mitoituksellisesti tärkeintä on kuitenkin se, että verkosto pystyy siirtämään tarvittavan määrän lämpötehoa kylmempien kuukausien aikana. Tämä puolestaan tarkoittaa väistämättömiä lämpöhäviöitä niiden kuukausien aikana, jolloin lämmöntarve on matala. /3/

3.4 Kaukolämpöyhtiöiden häviöt keskimäärin Suomessa

Alla olevasta taulukosta voidaan nähdä Suomen kaukolämpöyhtiöiden tunnuslukuja liittyen verkoston hyötysuhteeseen. Data on kerätty Energiateollisuus ry:n julkaisemasta tilastosta vuodelta 2019.

Taulukko 1. Suomen kaukolämpöyhtiöiden tunnuslukuja vuodelta 2019.

	Nettohan- kinta (GWh)	Verkosto- häviöt (GWh)	Hyöty- suhde	Verkos- ton pi- tuus (km)
Äänekosken Energia Oy	146,10	26,70	81,72 %	133,50
VSV Energia Oy	181,00	14,90	91,77 %	67,00
Riihimäen Kaukolämpö Oy	193,40	10,20	94,73 %	102,50
Varkauden Aluelämpö Oy	207,80	25,50	87,73 %	120,00
Salon Kaukolämpö Oy	218,70	29,50	86,51 %	121,30
Loiste Lämpö Oy	319,00	36,40	88,59 %	124,90
Hyvinkään Lämpövoima Oy	362,50	41,30	88,61 %	165,50
Kokkolan Energia Oy	365,30	47,20	87,08 %	265,30
Kotkan Energia Oy	394,20	20,40	94,82 %	194,40
Etelä-Savon Energia Oy	416,20	37,70	90,94 %	207,80
KSS Lämpö Oy, Kouvola	467,60	52,60	88,75 %	235,90
Loimua Oy, Hämeenlinna	487,20	62,40	87,19 %	203,30
Seinäjoen Energia Oy	534,00	47,10	91,18 %	350,00
Napapiirin Energia ja Vesi Oy, Rovaniemi	549,80	47,40	91,38 %	261,00
Fortum Oy, Joensuu	618,00	69,00	88,83 %	237,70
Lappeenrannan Energia Oy	618,70	87,90	85,79 %	409,00

Pori Energia Oy, Pori	648,20	53,20	91,79 %	286,50
Vaasan Sähkö Oy	757,70	60,00	92,08 %	242,00
Kuopion Energia Oy	1039,40	81,40	92,17 %	488,90
Lahti Energia Oy, Lahti	1256,50	134,10	89,33 %	624,40
Oulun Energia Oy	1819,30	189,10	89,61 %	837,00
Vantaan Energia Oy	1864,70	108,90	94,16 %	577,80
Turku Energia Oy, Turku	2084,80	186,60	91,05 %	390,00
Tampereen Sähkölaitos, Tampere	2232,50	134,40	93,98 %	625,70
Fortum Oy, Espoo	2370,90	230,00	90,30 %	749,40
Helen Oy	7037,80	482,30	93,15 %	1390,10

Taulukosta 1 käy ilmi, että kaukolämpöyhtiöt, jotka tuottavat enemmän kaukolämpöä per vuosi toimivat keskimääräisesti paremmilla hyötysuhteilla. Syitä tähän on monia: pienemmillä paikkakunnilla, joissa energiantarve on pienempi, on myös asiakastiheys pienempi. Tämä tarkoittaa, että kaukolämpöjohtoa joudutaan vetämään pitempiä matkoja aiheuttaen enemmän häviöitä. Hyvänä esimerkkinä taulukosta voidaan poimia verrattavaksi Äänekosken Energia Oy ja Vaasan Sähkö Oy. Äänekoskella hyötysuhde on noin 81,72 prosenttia, kun taas Vaasassa vastaava luku on 92,08 prosenttia. Nettohankinnallisesti Vaasan Sähkö Oy hankkii hieman yli viisi kertaa enemmän kaukolämpöenergiaa, mutta Vaasassa on hieman alle kaksi kertaa enemmän verkostoa kuin Äänekoskella. Tämä tarkoittaa, että Vaasassa siirretään enemmän lämpöä per putkimetri, mikä puolestaan parantaa hyötysuhdetta. Vastaavasti verrattaessa Pori Energia Oy:tä sekä Vaasan Sähkö Oy:tä, voidaan todeta, että samankokoiset kaukolämpöjärjestelmät saavuttavat samantasoisen hyötysuhteen. /11/

4 HÄVIÖIDEN LASKENTA

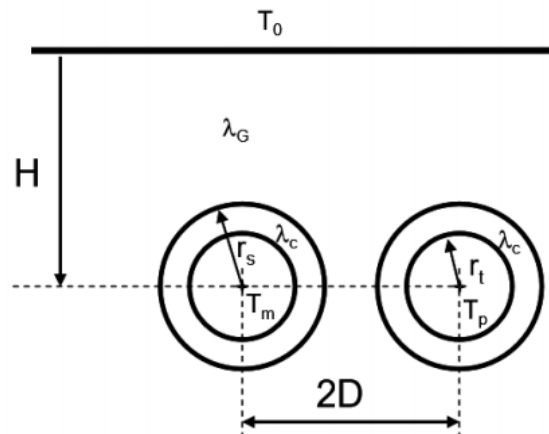
Tässä opinnäytetyössä verkoston lämmön johtumisesta sekä vuodoista aiheutuvia häviöitä on laskettu käyttämällä ruotsalaisen Chalmersin teknillisen yliopiston raporttiin ”Jämförelse mella dubbel- och enkelrör” sekä kaukolämmön käsikirjaan pohjautuvia kaavoja. Lämpöhäviöt on laskettu yksi- ja kaksiputkijärjestelmälle sekä betonielementtikanaaville erikseen. Lisäksi laskennassa on käytetty apuna Kaukolämpöekstra:lta saatavia Exceleitä 2Mpuk:n ja Mpuk:n lämpöhäviöitä määriteltäessä. /8 , 12/

Lämmön johtuminen kaukolämpöverkosta maaperään voidaan paloitella kolmeen osaan: eristeen lämpövastukseen, maaperän lämpövastukseen sekä putkien keskinäiseen vaikutukseen. Eristekerroksen osuus lämpöhäviöistä on se lämpömäärä, joka pääsee johtumaan sen läpi maaperän sekä putken rajapintaan. Maaperän lämpövastus puolestaan on se osa, kuinka tehokkaasti lämpö siirtyy putken rajapinnasta eteenpäin. Putkien keskinäisen vaikutuksen osuus tarkoittaa sitä vaikutusta, jonka putket aiheuttavat toisiinsa joko suorasti tai epäsuorasti, riippuen putkityypistä. 2Mpuk:n tapauksessa vaikutus on epäsuoraa, sillä lämmön johtuminen vaikuttaa ympäröivään maaperään, mikä puolestaan vaikuttaa toiseen putkeen. Mpuk:ssa sekä Emv:ssä lämmön johtuminen puolestaan vaikuttaa suoraan toiseen putkeen niiden välisen eristekerroksen läpi. /1/

Verkostosta johtuvan lämpömäärän lisäksi laskennassa määritellään vuotojen aiheuttamat lämpöhäviöt sekä tarkastellaan tarkemmin kaukolämpökaivojen lämpöhäviöitä. Viimeisenä tässä kappaleessa esitellään pumppauksen sekä meno- ja paluulämpötilojen vaikutusta toisiinsa.

4.1 Lämpöhäviöt kaukolämpöverkostossa 2Mpuk-johdoissa

2Mpuk:t ovat kiinnivaahdotettuja johtoja, joissa meno- ja paluuedelle on rakennettu erilliset putket. Kuvassa 11 on havainnollistettu niiden rakenne sekä laskennassa käytetyt dimensiot.



Kuva 11. Havainnollistava kuva 2Mpuk:n laskennan dimensioista. /8/

Kokonaislämpöhäviöt per pituusyksikkö ϕ_{tot} saadaan summaamalla menopuolen ϕ_m sekä paluupuolen ϕ_p lämpöhäviöt yhteen.

$$\phi_{tot} = \phi_m + \phi_p \quad (1)$$

Lämpöhäviöt johtuvat lämmön johtumisesta ympäröivään maaperään. Lisäksi putkien lämpöhäviöt vaikuttavat toisiinsa. Tämä ei kuitenkaan ole lämpöhäviötä, sillä energia pysyy systeemin sisällä. Täten lämpöhäviöt voidaan esittää muodossa:

$$\phi_m = \phi_s + \phi_a \quad (2)$$

$$\phi_p = \phi_s - \phi_a \quad (3)$$

jossa ϕ_s on ympäristöön johtuvan lämpöhäviön osuus ja ϕ_a on putkien keskinäisen vaikutuksen osuus. Nämä puolestaan voidaan esittää seuraavalla tavalla:

$$\phi_s = \left(\frac{T_m + T_p}{2} - T_g \right) 2\pi\lambda_g h_s \quad (4)$$

$$\phi_a = \left(\frac{T_m - T_p}{2} \right) 2\pi\lambda_g h_a \quad (5)$$

joissa

T_m	on menopuolen lämpötila [°C]
T_p	on paluupuolen lämpötila [°C]
T_g	on ympäröivän maaperän lämpötila [°C]
λ_g	on maaperän lämmönjohtavuus [W/mK]
h_s	on lämmönsiirtokerroin ympäristöön [-]
h_a	on lämmönsiirtokerroin putkien välillä [-]

Lämmönsiirtokertoimien määrittämiseksi tässä työssä on käytetty seuraavia kaavoja, jotka ovat peräisin Chalmersin teknillisen yliopiston tutkimuksesta:

$$\frac{1}{h_s} = \ln\left(\frac{2H}{r_s}\right) + \beta + \ln\left(\sqrt{1 + \left[\frac{H}{D}\right]^2}\right) - \frac{\left(\frac{r_s}{2D}\right)^2 + \left(\frac{r_s}{2H}\right)^2 + \frac{r_s^2}{4(D^2 + H^2)}}{\frac{1+\beta}{1-\beta} + \left(\frac{r_s}{2D}\right)^2} \quad (6)$$

$$\frac{1}{h_a} = \ln\left(\frac{2H}{r_s}\right) + \beta - \ln\left(\sqrt{1 + \left[\frac{H}{D}\right]^2}\right) - \frac{\left(\frac{r_s}{2D}\right)^2 + \left(\frac{r_s}{2H}\right)^2 + \frac{r_s^2}{4(D^2 + H^2)}}{\frac{1+\beta}{1-\beta} + \left(\frac{r_s}{2D}\right)^2} \quad (7)$$

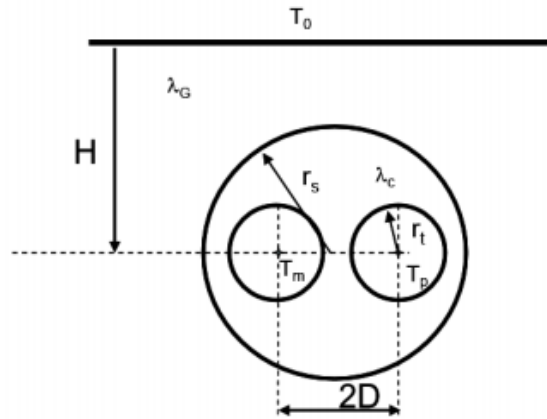
$$\beta = \frac{\lambda_g}{\lambda_c} \ln\left(\frac{r_s}{r_t}\right) \quad (8)$$

joissa

H	on putken keskipisteen peitesyvyys [m]
r_s	on kaukolämpöputken halkaisija [m]
r_t	on virtausputken halkaisija [m]
$2D$	on putkien keskipisteiden välinen etäisyys [m]
h_s	on lämmönsiirtokerroin ympäristöön [-]
h_a	on lämmönsiirtokerroin putkien välillä [-]
β	on apumuuttuja [-]
λ_g	on maaperän lämmönjohtavuus [W/mK]
λ_c	on eristeen lämmönjohtavuus [W/mK]

4.2 Lämpöhäviöt kaukolämpöverkostossa Mpuk-johdoissa

Mpuk:t ovat kiinnivaahdotettuja johtoja, joissa meno- ja paluupuoli ovat saman putken sisällä. Kuvassa 12 on havainnollistettu niiden rakenne sekä laskennassa käytetyt dimensiot.



Kuva 12. Havainnollistava kuva Mpuk:n laskennan dimensioista. /8/

Yksiputkijärjestelmän lämpöhäviöt määritellään samalla periaatteella kuin kaksiputkijärjestelmässä.

$$\phi_{tot} = \phi_m + \phi_p \quad (1)$$

$$\phi_m = \phi_s + \phi_a \quad (2)$$

$$\phi_p = \phi_s - \phi_a \quad (3)$$

$$\phi_s = \left(\frac{T_m + T_p}{2} - T_g \right) 2\pi\lambda_c h_s \quad (9)$$

$$\phi_a = \left(\frac{T_m - T_p}{2} \right) 2\pi\lambda_c h_a \quad (10)$$

Huomioitavaa on, että yksiputkijärjestelmän ympäristöön johtuvan lämmön sekä putkien keskinäisen vaikutuksen kaavoissa käytetään eristeen lämmönjohtavuutta λ_c .

Erilaisen rakenteen vuoksi myös lämmönsiirtokertoimet h_s sekä h_a määritellään eri kaavoilla:

$$\frac{1}{h_s} = \frac{2\lambda_c}{\lambda_g} \ln\left(\frac{2H}{r_s}\right) + \ln\left(\frac{r_s^2}{2Dr_t}\right) + \sigma \ln\left(\frac{r_s^4}{r_s^4 - D^4}\right) - \frac{\left(\frac{r_t}{2D} - \frac{\sigma 2r_t D^3}{r_s^4 - D^4}\right)^2}{1 + \left(\frac{r_t}{2D}\right)^2 + \sigma \left(\frac{2r_t r_s^2 D}{r_s^4 - D^4}\right)^2} \quad (11)$$

$$\frac{1}{h_a} = \ln\left(\frac{2D}{r_t}\right) + \sigma \ln\left(\frac{r_s^2 + D^2}{r_s^2 - D^2}\right) - \frac{\left(\frac{r_t}{2D} - \gamma \frac{Dr_t}{4H^2} + \frac{2\sigma r_t r_s^2 D}{r_s^4 - D^4}\right)^2}{1 - \left(\frac{r_t}{2D}\right)^2 - \gamma \frac{r_t}{2H} + 2\sigma r_t^2 r_s^2 \frac{r_s^4 + D^4}{(r_s^4 - D^4)^2}} - \gamma \left(\frac{D}{2H}\right)^2 \quad (12)$$

$$\sigma = \frac{\lambda_c - \lambda_g}{\lambda_c + \lambda_g} \quad (13)$$

$$\gamma = \frac{2(1 - \sigma^2)}{1 - \sigma \left(\frac{r_s}{2H}\right)^2} \quad (14)$$

joissa

H	on putken keskipisteen peitesyvyys [m]
r_s	on kaukolämpöputken halkaisija [m]
r_t	on virtausputken halkaisija [m]
$2D$	on putkien keskipisteiden välinen etäisyys [m]
h_s	on lämmönsiirtokerroin ympäristöön [-]
h_i	on lämmönsiirtokerroin putkien välillä [-]
σ	on apumuuttuja [-]
γ	on apumuuttuja [-]
λ_g	on maaperän lämmönjohtavuus [W/mK]
λ_c	on eristeen lämmönjohtavuus [W/mK]

4.3 Lämpöhäviöt kaukolämpöverkostossa Emv-johdoissa

Betonielementtikanavien lämpöhäviöiden laskenta perustuu Kaukolämmön käsikirjasta löytyviin kaavoihin. Laskentatapa on muuten samankaltainen kuin kiinnivaahdotettujen kaukolämpöputkien kohdalla, mutta ympäristöön johtuva lämpö sekä putkien keskinäinen vaikutus ilmaistaan muodossa:

$$\phi_{tot} = \phi_m + \phi_p = 2(K_1 - K_2) \left[\frac{T_m + T_p}{2} - T_g \right] \quad (15)$$

Lisäksi maaperän ja eristeen lämpövastukset sekä putkien keskinäinen vaikutus määritellään eri tavalla verrattuna kiinnivaahdotettuihin johtoihin:

$$K_1 = \frac{R_g + R_i}{(R_g + R_i)^2 - R_m^2} \quad (16)$$

$$K_2 = \frac{R_m}{(R_g + R_i)^2 - R_m^2} \quad (17)$$

$$K_1 - K_2 = \frac{1}{R_g + R_i + R_m} \quad (18)$$

joissa

R_g	on maaperän lämpövastus per pituusyksikkö [W/m]
R_i	on eristeen lämpövastus per pituusyksikkö [W/m]
R_m	on putkien keskinäisen vaikutus per pituusyksikkö [W/m]
K_1	on lämmönsiirtokerroin ympäristöön [-]
K_2	on lämmönsiirtokerroin putkien välillä [-]

Maaperän lämpövastus R_g voidaan määrittää seuraavilla kaavoilla:

$$R_g = \frac{1}{2\pi\lambda_g} \left(\ln \left[\frac{4H}{D_c} \right] - \frac{\left[\frac{D_c}{2E} \right]^2 + \left[\frac{D_c}{4H} \right]^2 + \frac{D_c^2}{4[4H^2 + E^2]}}{\frac{1+\beta}{1-\beta} \left[\frac{D_c}{2E} \right]^2} \right) \quad (19)$$

$$H = H' + \frac{\lambda_g}{h_{gs}} \quad (20)$$

$$\beta = \frac{\lambda_g}{\lambda_i} \ln \left(\frac{D_i}{D_p} \right) \quad (21)$$

$$D_c = \frac{2,2 \cdot AB}{A+B} \quad (22)$$

joissa

A	on betonikanavan ilmatilan leveys [m]
B	on betonikanavan ilmatilan korkeus [m]
H	on putken korjattu peitesyvyys [m]
H'	on putken todellinen peitesyvyys [m]
E	on putkien keskipisteiden välinen etäisyys [m]
D_i	on putken kokonaishalkaisija [m]

D_p	on virtausputken halkaisija [m]
D_c	on ilmatilan ympäröysmitta [m]
β	on apumuuttuja [-]
λ_g	on maaperän lämmönjohtavuus [W/mK]
λ_i	on eristeen lämmönjohtavuus [W/mK]
h_{gs}	on lämmönjohtavuus maanpinnalla [W/mK]

Eristeen lämpövastus R_i voidaan määrittää seuraavilla kaavoilla:

$$R_i = \frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln\left(\frac{D_i}{D_p}\right) + \frac{1}{2\pi\lambda_c} \ln\left(\frac{D_c}{D_i}\right) + R_{hi} \quad (23)$$

$$R_{hi} = \frac{1}{\pi D_i h_{es}} \quad (24)$$

joissa

D_i	on putken kokonaishalkaisija [m]
D_p	on virtausputken halkaisija [m]
D_c	on ilmatilan ympäröysmitta [m]
λ_i	on eristeen lämmönjohtavuus [W/mK]
λ_c	on vaipan lämmönjohtavuus [W/mK]
h_{es}	on eristeen lämmönläpäisykerroin [W/m ² K]

Putkien keskinäinen vaikutus R_m voidaan määrittää lisäämällä betoninkanavan pinnan lämpövastus R_{hg} maaperän lämpövastukseen R_g :

$$R_m = R_g + R_{hg}$$

Betoninkanavan pinnan lämpövastus voidaan määrittää seuraavasti:

$$R_{hg} = \frac{1}{2(A+B)h_{es}}$$

4.4 Vuotojen lämpöhäviöt

Kaukolämpöverkoston vuodoista karkaava lämpöteho voidaan laskea seuraavan kaavan avulla:

$$Q = \rho c_p V (T_2 - T_1) \quad (25)$$

missä

Q	on lämpömäärä [J]
ρ	on veden tiheys [kg/m ³]
c_p	on veden ominaislämpökapasiteetti [J/kg°C]
V	on tilavuus [m ³]
T_2	on kaukolämpöveden lämpötila [°C]
T_1	on lisäveden lämpötila [°C]

Edellä olevasta kaavasta saadaan tulokseksi energiamäärä jouleissa. Joulet voidaan muuntaa wattitunneiksi seuraavalla kaavalla:

$$\frac{J}{s} = W \rightarrow J = W * s \rightarrow \frac{J}{3600} = Wh \quad (26)$$

Vuodon lämpöhäviöön vaikuttaa oleellisesti vuodon kohta. Menopuolella vuotohäviön energianmenetys on suurempi kuin paluupuolella, sillä menopuolella veden lämpötila on korkeampi. Tässä opinnäytetyössä oletetaan, että vuodot sijoituvat tasaisesti verkoston molemmille puolille ja että vuotomäärä on sama jokaisena kuukautena. Käytetyt arvot on saatu Vaasan Sähkön sisäisestä lähteestä vuodelta 2019. Oletettaessa, että lämpöhäviöt sijoittuvat tasaisesti molemmille puolille, lämpöhäviö voidaan määrittää laskemalla lisäveden lämmitykseen kuluva energia maksimissaan sekä minimissään ja ottamalla niiden keskiarvo.

4.5 Kaukolämpökaivojen lämpöhäviöt

Kaukolämpökaivojen lämpöhäviöt voidaan myös määritellä tarkastelemalla menoputken lämpöhäviöitä ϕ_m ja paluuputken lämpöhäviöitä ϕ_p . Näiden määrittelemiseen on käytetty seuraavia kaavoja:

$$\phi_{tot} = \phi_m + \phi_p = UA(T_m - T_0) + UA(T_p - T_0) \quad (27)$$

$$\frac{1}{U} = L \left(\frac{1}{r_1 k_s} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{\lambda_t} + \frac{1}{r_2 k_u} \right) \quad (28)$$

joissa

U	on putken lämmönsiirtokerroin ympäristöön [-]
A	on putken pinta-ala [m^2]
T_m	on menoveden lämpötila [$^{\circ}\text{C}$]
T_p	on paluuveden lämpötila [$^{\circ}\text{C}$]
T_0	on kaivon lämpötila [$^{\circ}\text{C}$]
L	on putken pituus kaivossa [m]
r_1	on virtausputken säde [m]
r_2	on koko putken säde [m]
k_s	on putken sisäpuolen lämmönsiirtokerroin [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
k_u	on putken ulkopuolen lämmönsiirtokerroin [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
λ_t	on virtausputken lämmönjohtavuus [W/mK]

Vaasan kaukolämpöverkostossa on yhteensä 486 kappaletta kaukolämpökaivoja, joista 78 sijaitsee joko 2Mpuk-, Mpuk- tai Mpul-johtojen varrella. Loput 408 kaukolämpökaivoa ovat Emv-kanavissa. Lämpöhäviölaskuissa on keskitytty Emv-kanavien varrella sijaitseviin kaukolämpökaivoihin, sillä niiden lämpöhäviöosuus on huomattavasti suurempi kuin muiden tyyppien.

4.6 Pumppauksen ja meno- sekä paluulämpötilojen suhde

Kaukolämpöverkostossa siirtyvä lämpöteho riippuu kiertävästä vesivirtauksesta sekä lämpötilaerosta, joille voidaan määrittää seuraava kaava:

$$\phi = c_p m' \Delta T = c_p \rho V' \Delta T \quad (29)$$

jossa

ϕ	on kaukolämpöteho [W]
c_p	on veden ominaislämpökapasiteetti [J/kgK]
m'	on kaukolämpöveden massavirta [kg/s]
ρ	on veden tiheys [kg/m^3]
V'	on veden tilavuusvirta [m^3/s]
ΔT	on meno- ja paluuveden lämpötilaero [$^{\circ}\text{C}$]

yllä olevasta yhtälöstä voidaan johtaa seuraavat suhteet eri menolämpötiloille:

$$c_{p1} m'_{1} \Delta T_1 = c_{p2} m'_{2} \Delta T_2 \quad (30)$$

$$c_{p1} \rho_1 V'_{1} \Delta T_1 = c_{p2} \rho_2 V'_{2} \Delta T_2 \quad (31)$$

oletetaan, että veden tiheys ρ sekä veden ominaislämpökapasiteetti c_p pysyvät samoina. Käytännössä veden tiheys muuttuu jonkin verran, mutta muutos on sen verran pieni, että sen vaikutus lopputulokseen on hyvin marginaalinen. Kaavat 30 ja 31 voidaan täten supistaa muotoon:

$$m'_1 \Delta T_1 = m'_2 \Delta T_2 \quad (32)$$

$$V'_1 \Delta T_1 = V'_2 \Delta T_2 \quad (33)$$

joista voidaan johtaa lämpötilaerojen sekä virtaamien suhteet:

$$\frac{m'_1}{m'_2} = \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \quad (34)$$

$$\frac{V'_1}{V'_2} = \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \quad (35)$$

Pumppauksen virtaukset voidaan määrittää kaavasta 29, kun tunnetaan kaukolämpöteho sekä meno- ja paluulämpötilojen ero:

$$m' = \frac{\Phi}{c_p \Delta T} \quad (36)$$

$$V' = \frac{m'}{\rho} \quad (37)$$

Sijoittamalla kaavoilla 33 tai 34 lasketut arvot sekä lämpötilan muutosten erotukset kaavoihin 36 ja 37, voidaan arvioida kaukolämpöveden massavirran m' muutosta lämpötilan muuttuessa.

Virtauksen pieneminen vähentää pumppaustehon tarvetta likimain verrannollisena massavirran kuutioon, joten pumppaustehon muutos voidaan merkitä seuraavasti:

$$\Delta P_p = P_p \left(1 - \left[\frac{m'_1}{m'_2} \right]^3 \right) \quad (38)$$

jossa

ΔP_p	on pumppaustehon muutos [kW]
P_p	on pumppausteho normaaliajossa [kW]
m'_1	on kaukolämpöveden massavirta uudella lämpötilalla [kg/s]
m'_2	on kaukolämpöveden massavirta normaaliajossa [kg/s]

5 HÄVIÖLASKENNAN TULOKSET & ANALYSOINTI

Häviölaskenta suoritettiin rakentamalla laskentapohja Exceliin, jonka pohjana toimivat edellisessä kappaleessa esitetyt kaavat. Excel on rakennettu siten, että siihen voi muuttaa vaikuttavia parametrejä, mikä mahdollistaa erilaisten ajotilanteiden tarkemman tutkailun.

5.1 Lähtötiedot

Laskennan pohjana on käytetty Vaasan Sähkön toimesta kerättyä dataa vuosilta 2019 ja 2020. Mpuk:n sekä 2Mpuk:n osalta dimensiot on saatu Uponorilta, joka on yksi suurimmista kaukolämpöputkivalmistajista Suomessa. Emv:n tapauksessa virtausputken halkaisija sekä eristekerroksen paksuus on saatu Vaasan Sähköltä. Maaperän koostumus on peräisin Karttapalvelu GTK:lta. Maaperän lämpötilat ovat kerätty Vaasan yliopistolle tehdystä väitöskirjasta. Peitesyvyydeksi on oletettu 1 metri. Maaperän lämmönjohtavuudeksi on arvioitu kuvien 9 ja 10 pohjalta 1,6 W/mK. /7, 15/

Kaikissa verkostolaskuissa on käytetty taulukon 2 mukaisia lämpötiloja sekä taulukossa 3 esitettyjä lämmönjohtavuuksia. Vaipan lämmönjohtavuutta sekä lämmönjohtavuutta maanpinnalla tarvitaan ainoastaan emv-kanavien laskennassa, joten niille ei ole määritelty arvoa kiinnivaahdotettujen johtojen kohdalle. Lisäksi lämmönsiirtokertoimet määritellään laskennallisesti kiinnivaahdotetuille johdoille.

Taulukko 2. Lämpöhäviölaskennassa käytetyt lämpötilat.

Kuukausi	Menolämpötilan keskiarvo [°C]	Paluulämpötilan keskiarvo [°C]	Maaperän lämpötilan keskiarvo metrin syvyydessä [°C]
Tammikuu	96,46	49,53	0,00
Helmikuu	87,85	45,55	1,00
Maaliskuu	86,60	44,54	2,00
Huhtikuu	81,05	43,52	7,00
Toukokuu	81,65	44,90	8,00
Kesäkuu	79,68	49,84	12,00
Heinäkuu	79,17	51,59	14,00

Elokuu	79,49	51,42	16,00
Syyskuu	82,21	46,11	14,00
Lokakuu	79,88	42,85	7,00
Marraskuu	81,59	43,38	3,00
Joulukuu	81,55	43,70	1,00

Taulukko 3. Lämpöhäviölaskennassa käytetyt lämmönjohtavuudet.

	Maaperän lämmön- johtavuus	Eristeen lämmön- johtavuus [W/mK]	Vaipan lämmön- johtavuus [W/mK]	Pei- tesyvyys [m]	Lämmön- johtavuus maanpin- nalla [W/m²K]	Lämmönsiir- tokerroin ympäristöön [W/m²K]
2Mpuk	1,6	0,029	-	1	-	-
Mpuk	1,6	0,029	-	1	-	-
Emv	1,6	0,050	0,4	1	12	7,70
Muut	1,6	0,035	-	1	-	-

5.2 2Mpuk-johtojen lämpöhäviöt

2Mpuk:n määrä Vaasan kaukolämpöverkostosta on 50 946 metriä, eli noin 19,82 % koko verkostosta. Taulukossa 23 on esitetty 2Mpuk:n lämpöhäviöosuus vuodelta 2019. Alla olevassa taulukossa on eroteltu eri 2Mpuk-elementtien kokonaisuudet, kokonaismitta sekä kunkin tyyppin lämpöhäviöt per metri. Taulukoista 17 ja 18 löytyvät laskuissa käytettävät dimensiot.

Taulukko 4. 2Mpuk:n osuudet lämpöhäviöistä putkityypeittäin.

Putkityyppi	Häviöt yhteensä [MWh]	Putkityypin määrä [m]	Häviö per metri [MWh/m]
2Mpuk20/110	775,10	6 367,21	0,12
2Mpuk20/125	149,89	1 334,53	0,11
2Mpuk25/125	81,79	628,01	0,13
2Mpuk32/125	653,67	4 200,16	0,16
2Mpuk32/140	20,36	143,32	0,14
2Mpuk40/125	1 034,53	5 909,50	0,18
2Mpuk40/140	73,68	465,98	0,16
2Mpuk50/160	59,67	347,71	0,17
2Mpuk65/160	1 389,70	6 322,79	0,22
2Mpuk65/180	92,21	478,35	0,19
2Mpuk80/200	195,70	959,29	0,20

2Mpuk100/225	602,93	2 499,70	0,24
2Mpuk100/250	21,99	103,78	0,21
2Mpuk125/280	206,79	874,96	0,24
2Mpuk150/280	1,56	5,00	0,31
2Mpuk150/315	116,27	446,97	0,26
2Mpuk200/355	870,31	2 624,90	0,33
2Mpuk200/400	698,05	2 560,77	0,27
2Mpuk250/500	556,91	2 043,49	0,27
2Mpuk300/500	454,47	1 235,09	0,37
2Mpuk300/560	1 176,55	3 934,98	0,30
2Mpuk350/560	321,66	905,05	0,36
2Mpuk350/630	26,05	90,33	0,29
2Mpuk400/630	77,41	210,28	0,37
2Mpuk400/710	57,47	194,40	0,30
2Mpuk450/800	2 288,71	6 060,19	0,38
Yhteensä	12 003,43	50 946,74	0,24

5.3 Mpuk-johtojen lämpöhäviöt

Mpuk:n määrä Vaasan kaukolämpöverkostosta on 152 837 metriä, eli noin 59,46 % koko verkostosta. Taulukossa 24 on esitetty Mpuk:n lämpöhäviöosuus vuodelta 2019. Alla olevassa taulukossa on eroteltu eri Mpuk-elementtien kokonaishäviöt, kokonaismitta sekä kunkin tyyppin lämpöhäviöt per metri. Taulukoista 19 ja 20 löytyvät laskuissa käytetyt dimensiot.

Taulukko 5. Mpuk:n osuudet lämpöhäviöistä putkityypeittäin.

Putkityyppi	Häviöt yhteensä [MWh]	Putkityypin määrä [m]	Häviö per metri [MWh/m]
Mpuk20	1,65	18,65	0,09
Mpuk20/140	803,16	9 151,54	0,09
Mpuk20/160	423,75	4 964,75	0,09
Mpuk25/160	765,64	8 238,11	0,09
Mpuk25/180	150,19	1 668,20	0,09
Mpuk32/180	1 049,98	10 326,59	0,10
Mpuk32/200	335,39	3 428,12	0,10
Mpuk40/180	1 352,06	11 502,83	0,12
Mpuk40/200	751,65	6 764,83	0,11
Mpuk50/225	2 341,79	20 387,54	0,11
Mpuk50/250	531,15	4 912,80	0,11

Mpuk65/250	1 584,39	11 778,57	0,13
Mpuk65/280	416,47	3 421,36	0,12
Mpuk80/250	3,37	22,07	0,15
Mpuk80/280	1 720,17	11 735,35	0,15
Mpuk80/315	497,82	3 837,20	0,13
Mpuk100/355	1 012,48	6 953,87	0,15
Mpuk100/400	459,56	3 588,26	0,13
Mpuk125/450	1 190,22	8 676,88	0,14
Mpuk125/500	43,19	350,70	0,12
Mpuk150/500	1 595,43	9 851,91	0,16
Mpuk150/560	13,53	97,06	0,14
Mpuk200/630	443,30	2 599,69	0,17
Mpuk200/710	215,87	1 506,75	0,14
Mpuk250/800	1 110,46	6 941,45	0,16
Mpuk250/900	15,34	112,50	0,14
Yhteensä	18 828,01	152 837,58	0,12

5.4 Emv-kanavien lämpöhäviöt

Emv:n määrä Vaasan kaukolämpöverkostosta on 50 333 metriä, eli noin 19,58 % koko verkostosta. Taulukossa 25 on esitetty Emv:n lämpöhäviöosuus vuodelta 2019. Alla olevassa taulukossa on eroteltu eri Emv-elementtien kokonaishäviöt, kokonaismitta sekä kunkin tyypin lämpöhäviöt per metri. Emv-kanavan tapauksessa meno- ja paluupuoli on eroteltu erikseen, sillä menopuolen eristekerros on paksumpi kuin paluupuolen. Emv-kanavien lämpöhäviölaskennassa käytetyt dimensiot ovat taulukossa 21.

Taulukko 6. Emv-kanavien osuudet lämpöhäviöistä putkityypeittäin.

Putki- tyyppi	Häviöt meno- puolella [MWh]	Häviöt paluu- puolella [MWh]	Häviöt yh- teensä [MWh]	Putkityypin määrä [m]	Häviö per metri [MWh/m]
Emv32	9,59	10,35	19,95	107,84	0,18
Emv40	106,81	115,53	222,35	1118,90	0,20
Emv50	328,22	356,06	684,27	3057,89	0,22
Emv65	318,06	345,98	664,04	2594,24	0,26
Emv80	348,03	379,09	727,12	2603,49	0,28
Emv100	349,34	381,07	730,41	2260,01	0,32
Emv125	377,91	412,41	790,32	2164,84	0,37
Emv150	549,65	632,08	1181,74	3256,08	0,36

Emv200	2149,17	2471,02	4620,19	10855,35	0,43
Emv250	1117,37	1282,68	2400,05	4932,49	0,49
Emv300	1947,41	2280,08	4227,49	9117,88	0,46
Emv400	1119,42	1308,19	2427,61	4545,49	0,53
Emv500	155,36	180,98	336,35	546,63	0,62
Emv600	1012,53	1175,52	2188,05	3172,50	0,69
Yhteensä	9888,90	11331,02	21219,92	50333,63	0,42

5.5 Muiden putkityyppien lämpöhäviöt

Muiden putkityyppien kuin 2Mpuk, Mpuk ja Emv, osuus on huomattavasti pienempi. Tällaisia putkia ovat esimerkiksi kupariset putket sekä Mpul-tyypit. Niiden osuus yhteensä on 2 917,52 metriä, eli noin 1,14 % koko verkostosta. Taulukossa 26 on esitetty näiden putkityyppien lämpöhäviöosuudet vuodelta 2019. Alla olevassa taulukossa on eroteltu eri johtotyyppien kokonaishäviöt, kokonaismitta sekä kunkin tyypin lämpöhäviö per metri.

Taulukko 7. Muiden putkityyppien osuudet lämpöhäviöistä.

Putkityyppi	Häviöt yhteensä [MWh]	Putkityypin määrä [m]	Häviö per metri [MWh/m]
2Mpuk15/65(Copper)	24,73	170,70	0,14
Mpul20	68,85	475,26	0,14
Mpul25	15,06	88,64	0,17
Mpul32	55,16	298,87	0,18
Mpul40	203,07	980,07	0,21
Mpul50	142,98	617,84	0,23
Mpul65	19,78	76,31	0,26
Mpul80	49,92	183,33	0,27
Mpul100	4,81	16,91	0,28
Mpul125	3,13	9,60	0,33
Yhteensä	587,48	2 917,52	0,20

5.6 Vuotojen lämpöhäviöt

Taulukossa 22 on esitelty häviölaskennan lähtötiedot sekä tulokset vuotojen osalta. Seuraavaan taulukkoon on kerätty vuotohäviöiden kuukausittaiset osuudet vuodelta 2019. Lähtötiedot ovat peräisin Vaasan Sähkön sisäisestä lähteestä.

Taulukko 8. Vuotohäviöiden osuudet kuukausitasolla vuonna 2019.

Kuukausi	Lisäveden lämmitykseen kuuluva energia [MWh]
Tammikuu	91,34
Helmikuu	82,89
Maaliskuu	81,48
Huhtikuu	76,07
Toukokuu	74,70
Kesäkuu	76,65
Heinäkuu	74,79
Elokuu	74,88
Syyskuu	73,09
Lokakuu	72,11
Marraskuu	76,33
Joulukuu	77,88
Yhteensä	932,21

Kuten taulukosta voidaan huomata, vuotoenergioiden aiheuttamat lämpöhäviöt ovat suhteellisen pienet verrattuina muihin osuuksiin. Taulukosta voidaan todeta myös, että vuotohäviöt aiheuttavat enemmän lämpöhäviöitä kylmempien kuukausien aikana. Tämä johtuu siitä, että vuotava vesi on keskimääräisesti kuumempaa kyseisenä aikajaksona, jolloin korvaavaa vettä joudutaan lämmittämään korkeampaan lämpötilaan.

5.7 Kaukolämpökaivojen lämpöhäviöt

Taulukossa 27 on esitelty kaukolämpökaivojen osuus lämpöhäviöistä putkityypeittäin ja alla olevaan taulukkoon on kerätty laskennan pohjalta saadut lämpöhäviöt kuukausitasolla. Lähtötietoina on käytetty samoja meno- ja paluulämpötiloja kuin muissakin laskuissa, mutta tarkempaa dataa kaukolämpökaivojen lämpötiloista oli

saatavilla vasta vuodesta 2020 lähtien, jolloin osa Vaasan kaukolämpöjärjestelmän kaivoista liitettiin kunnonvalvonta-järjestelmään. Dataa kaivojen lämpötiloista on kerätty 24:stä eri kaivosta, joista on otettu laskuja varten kuukausittaiset keskiarvot. Putken sisäpuolinen lämmönsiirtokerroin, k_s , sekä putken ulkopuolinen lämmönsiirtokerroin, k_u , ovat otettu Tampereen teknilliselle yliopistolle tehdystä diplomityöstä. /10/

Taulukko 9. Kaukolämpökaivojen laskennalliset lämpöhäviöt kuukausitasolla vuonna 2019.

Kuukausi	Kaukolämpökaivojen häviöt kuukausittain [MWh]
Tammikuu	236,51
Helmikuu	190,72
Maaliskuu	204,87
Huhtikuu	176,33
Toukokuu	167,40
Kesäkuu	142,16
Heinäkuu	147,39
Elokuu	146,71
Syyskuu	152,08
Lokakuu	162,31
Marraskuu	171,37
Joulukuu	184,94
Tammikuu	2 082,80

Taulukosta voidaan todeta, että kaukolämpökaivojen lämpöhäviöt käyttäytyvät hyvin samankaltaisesti kuin verkoston lämpöhäviöt.

5.8 Laitosten omakäytöt

Laitosten omakäytön häviöt koostuvat kattiloiden, öljysäiliöiden sekä rakennusten lämmityksistä. Kerätyt arvot esitellään taulukossa 28. Dataa on kerätty kaikista kaukolämpöjärjestelmän vara- ja huipputuotantolaitoksista. Yhteensä omakäyttöön kuluu noin 1 420 MWh energiaa.

5.9 Pumppausteho muutos lämpötilan muuttuessa

Kuten aiemmin määriteltiin, on menolämpötilan sekä pumppauksen energiankulutuksella suhde, jonka mukaan menolämpötilaa laskiessa tulee pumppaustehon kasvaa. Alla olevissa taulukoissa on havainnollistettu vuosien 2019 ja 2020 datan pohjalta pumppaustehon nykytilannetta systeemin eri osissa, sekä pumppauksen sähkönkulutuksen kasvua menolämpötilan laskiessa. Vaskiluodon pumppaus on kesäkuukausien ajan pieni, sillä touko-syyskuun välisenä aikana kaukolämpö tuotetaan pääsääntöisesti jätteenpolttolaitoksella.

Taulukko 10. Pumppauksen energiankulutus kuukausitasolla vuonna 2019.

Kuukausi	Vaskiluoto [MWh]	Välipumppaamot [MWh]	Jätteenpolttolaitos [MWh]	Yhteensä [MWh]
Tammikuu	463,00	117,00	281,46	861,46
Helmikuu	332,00	85,00	263,50	680,50
Maaliskuu	287,00	62,00	294,37	643,37
Huhtikuu	141,00	53,00	282,01	476,01
Toukokuu	38,00	82,00	350,73	470,73
Kesäkuu	3,00	55,00	359,62	417,62
Heinäkuu	3,00	54,00	382,00	439,00
Elokuu	3,00	46,00	375,18	424,18
Syyskuu	24,00	72,00	346,45	442,45
Lokakuu	208,00	103,00	277,50	588,50
Marraskuu	358,00	285,00	187,77	830,77
Joulukuu	172,00	178,00	404,33	754,33
Yhteensä	2032,00	1192,00	3804,90	7028,90

Taulukko 11. Pumppaustehon muutos menolämpötilan suhteen.

Kuukausi	Muutos, kun menolämpö laskee astetta	Muutos, kun menolämpö laskee 2 astetta	Muutos, kun menolämpö laskee 3 astetta	Muutos, kun menolämpö laskee 4 astetta	Muutos, kun menolämpö laskee 5 astetta
Tammikuu	2,77 %	5,71 %	8,81 %	12,10 %	15,60 %
Helmikuu	2,70 %	5,55 %	8,56 %	11,75 %	15,13 %
Maaliskuu	3,08 %	6,36 %	9,85 %	13,57 %	17,56 %
Huhtikuu	2,90 %	5,97 %	9,23 %	12,70 %	16,40 %
Toukokuu	2,88 %	5,93 %	9,16 %	12,60 %	16,26 %

Kesäkuu	3,28 %	6,78 %	10,53 %	14,55 %	18,88 %
Heinäkuu	3,12 %	6,44 %	9,99 %	13,77 %	17,83 %
Elokuu	3,60 %	7,47 %	11,64 %	16,15 %	21,04 %
Syyskuu	2,79 %	5,75 %	8,87 %	12,19 %	15,72 %
Lokakuu	3,30 %	6,82 %	10,59 %	14,63 %	18,98 %
Marraskuu	2,57 %	5,27 %	8,12 %	11,13 %	14,30 %
Joulukuu	2,62 %	5,38 %	8,29 %	11,37 %	14,63 %

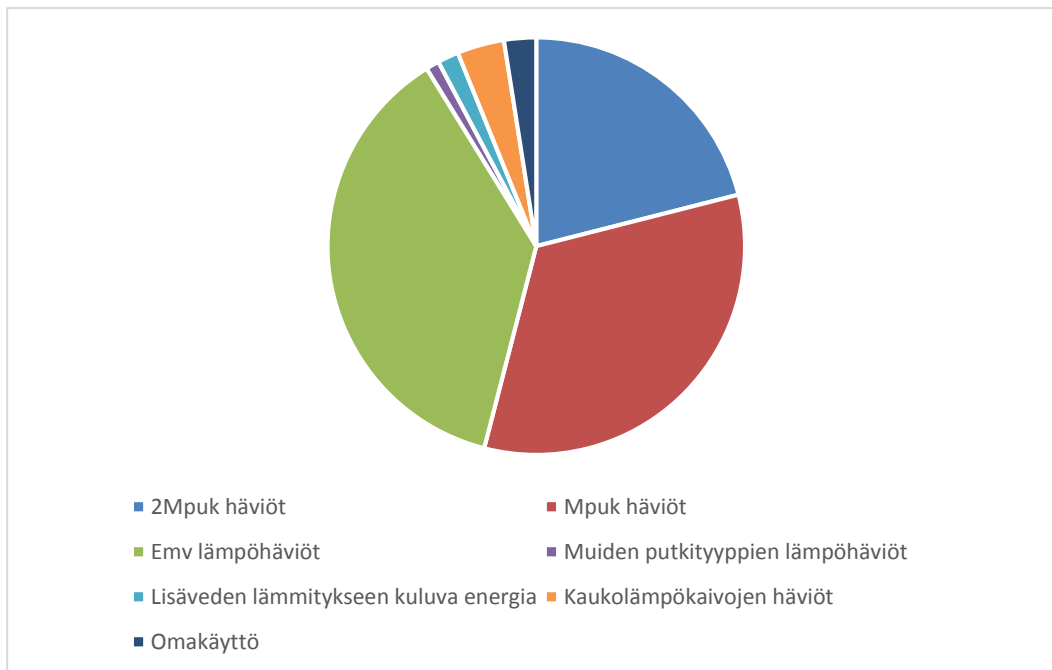
5.10 Lämpöhäviöt osa-alueittain

Alla olevassa taulukossa on lähtötietojen sekä laskennan pohjalta kasattu taulukko Vaasan kaukolämmön lämpöhäviöistä osa-alueittain vuodelta 2019.

Taulukko 12. Kaukolämpöverkoston lämpöhäviöt segmentoidusti.

Kuukausi	Kokonais- lämpöhä- viöt [MWh]	Verkos- ton läm- pöhäviöt [MWh]	Vuoto- häviöt [MWh]	Kaukolämpö- kaivojen hä- viöt [MWh]	Oma- käyttö [MWh]	Ylijäämä + laskennal- lisen epä- tarkkuu- det [MWh]
Tammikuu	6793,24	5669,15	91,34	236,51	181,06	615,17
Helmikuu	5656,76	4608,93	82,89	190,72	176,63	597,59
Maaliskuu	5894,98	4937,40	81,48	204,87	206,09	465,14
Huhtikuu	4804,07	4155,38	76,07	176,33	135,07	261,22
Toukokuu	4993,69	4292,80	74,70	167,40	101,55	357,24
Kesäkuu	4588,91	3894,92	76,65	142,16	48,55	426,63
Heinäkuu	4449,34	3990,41	74,79	147,39	34,88	201,87
Elokuu	4530,33	3840,63	74,88	146,71	43,48	424,63
Syyskuu	4095,71	3770,17	73,09	152,08	69,27	31,09
Lokakuu	4597,79	4222,28	72,11	162,31	95,94	45,15
Marraskuu	5594,98	4470,73	76,33	171,37	135,83	740,71
Joulukuu	5693,05	4786,03	77,88	184,94	191,19	453,00
Yhteensä	61692,83	52638,83	932,21	2082,80	1419,56	4619,43

Seuraava graafi havainnollistaa edellisessä taulukossa esitetyn datan graafina, mutta verkoston osuudet ovat eritelty putkityypeittäin.



Kuva 13. Lämpöhäviöt segmenteittäin vuonna 2019.

Taulukosta sekä graafista voidaan todeta, että verkoston osuus on selvästi suurin, mikä kattaa yksin noin 85,32 % kaukolämpöverkon häviöistä. Laskennan tuloksista yli jäänyt osuus kattaa noin 7,5 % kokonaishäviöistä. Suurin osa tästä häviöistä kuuluu todennäköisesti verkoston lämpöhäviöiden osuuteen, sillä laskennassa ei ole otettu huomioon verkoston eristekerroksen heikentymää vuosien varrella.

5.11 Laskennan epätarkkuudet

Laskentaprosessin laajuuden vuoksi siihen kuuluu useita eri muuttujia, joiden kumulatiivista vaikutusta on vaikea arvioida. Suurin yksittäinen tekijä, jota ei tämän työn puitteissa ole selvitetty, ovat lämpöjohtojen lämmönjohtokyvyn muutokset. Eristekerroksen tehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi käyttöikä sekä eristekerroksen vahingoittumat, kuten eristeen kostumisen aiheuttamat muutokset. Kiinnivaahdotettujen johtotyyppien eristekerroksen lämmönjohtavuutena on käytetty 0,029 W/m²K, mikä on Energiateollisuus ry:n standardien mukainen vaa-

timus uudelle kaukolämpöjohdolle. Mikäli eristekerroksen tehokkuutta laskettaisiin 10 prosentilla, kiinnivaahdotettujen kaukolämpöjohtojen vuosittaiset lämpöhäviöt nousisivat 30 831 megawattitunnista 33 423 megawattituntiin. Tämä tarkoittaisi noin 8,5 prosentin verran eroa kokonaislämpöhäviöissä 2Mpuk:n sekä Mpuk:n osuuksissa.

Maaperän lämmönjohtavuus on myös arvioitu käyttämällä Karttapalvelu GTK:n tarjoamaa dataa. Tämän muuttujan tuottama virhe on kuitenkin huomattavasti pienempi kuin eristekerroksen. Maan lämmönjohtavuutta nostettaessa 0,1 yksikköä, nousee kaikkien kaukolämpöjohtojen yhteenlaskettu lämpöhäviö noin 570 megawattituntia, mikä on noin 1 prosentti kaukolämpöjohtojen kokonaishäviöistä.

Peitesyvyyden osalta työssä on päädytty laskennan helpotuksen vuoksi yhtä metriä kaikkien johtotyyppien kohdalla. Mikäli laskuissa olisi käytetty metrin sijasta olisi käytetty puolta metriä, vaikutus olisi noin 1 600 megawattituntia, mikä puolestaan tarkoittaisi noin kolmen prosenttiyksikön verran muutosta.

2Mpuk:n lämpöhäviöiden laskennassa jouduttiin arvioimaan kaksi asiaa: putkien välinen etäisyys sekä tyyppin 2Mpuk450/800:n lämmönsiirtokertoimet h_s ja h_a puutteellisen datan vuoksi. Putkien välisen etäisyyden vaikutukset ovat hyvin minimaaliset, mikäli väliä kasvatettaisiin 10 prosenttiyksikköä, kasvaisivat lämpöhäviöt vain noin 24 megawattitunnilla. Lämmönsiirtokertoimien vaikutus on puolestaan suurempi, sillä kyseistä putkityyppiä on verkostossa noin 6 060 metriä. 10 prosentin kasvu lämmönsiirtokertoimissa tarkoittaisi noin 2 prosentin kasvua 2Mpuk:n kokonaislämpöhäviöissä.

Emv-kanavien kohdalla, kuten myös kiinnivaahdotettujen johtojen tapauksessa, on käytetty fiksattua arvoa eristeen tehokkuudelle. Laskennassa on käytetty arvoa $0,050 \text{ W/m}^2\text{K}$, mikä on uuden mineraalivillan lämmönjohtavuus. Mikäli tämän eristekerroksen tehokkuus heikkenisi 10 prosenttia, nousisi emv-kanavien lämpöhä-

viöt 1 264 megawattituntia. Tämä muutos tarkoittaisi jopa 6 prosenttiyksikön kasvua. Epätarkkuutta emv-kanavien kohdalla lisää myös se, että eri kanavatyyppien ilmatilavuus sekä eristekerroksen paksuus on jouduttu arvioimaan puuttuvan datan vuoksi.

Vaasan kaukolämpöverkostosta löytyy myös pieni osuus Mpul-tyyppiä. Tämä osuus on kuitenkin sen verran pieni, että työssä päädyttiin laskemaan niiden lämpöhäviöt samoilla arvoilla kuin Mpuk:t lukuun ottamatta eristeen lämmönjohtavuutta. Eristekerroksen lämmönjohtavuutena on käytetty $0,035 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Meno- ja paluulämpötilan kohdalla ongelmakohdaksi muodostui se, että kaukolämpöä tuotetaan kahdessa eri laitoksessa. Työssä päädyttiin käyttämään näiden laitosten meno- ja paluulämpötilojen keskiarvoa niiltä kuukausilta, kun molemmat laitokset olivat käytössä. Niiden kuukausien kohdalla, jolloin Vaskiluodon laitos oli vuosihuollossa, käytettiin jätteenpolttolaitoksen meno- ja paluulämpötiloja. Tämän vaikutusta on vaikea arvioida, sillä laitokset sijaitsevat kaukolämpöverkon vastakkaisilla puolilla.

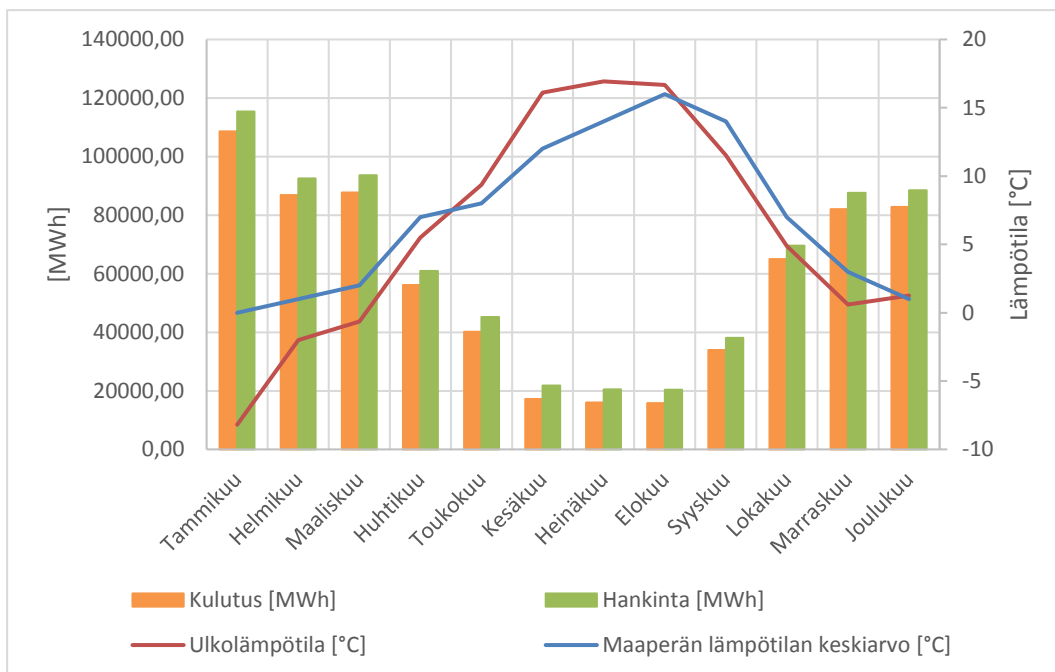
Maaperän lämpötila on tässä työssä arvioitu käyttämällä Karttapalvelu GTK:n dataa, joka on kerätty Nurmijärven maaperästä sekä Anne Mäkirannan väitöskirjaa varten kerättyä dataa Vaasan maaperästä. Mikäli maaperän kuukausittaiset lämpötilat laskisivat yhdellä asteella, nousisivat lämpöhäviöt noin 1 011 megawattituntia, eli noin 2 prosenttiyksikköä. /13 , 14/

Vuotohäviöt on laskettu tässä työssä siten, että vuotokohdat jakautuvat tasapuolisesti meno- ja paluupuolille. Mikäli vuodot sijoittuisivat siten, että 60 prosenttia olisi menopuolella ja 40 prosenttia paluupuolella, nousisi vuotojen aiheuttamat lämpöhäviöt noin 58 megawattituntia eli kuusi prosenttia vuotojen osuudesta. Lisäksi raakaveden lämpötilana on käytetty keskimääräistä Vaasan vesijohtoverkoston kylmän veden lämpötilaa.

Kaukolämpökaivojen laskennassa on otettu huomioon vain emv-kanavien varrella olevat kaivot. Ainoastaan emv500- sekä emv600-kanavatyyppien varrella olevien kaivojen tarkka lukumäärä on tiedossa, joten muiden tyyppien määrä on suhteutettu kanavatyyppin kokonaismitan mukaisesti. Putken pituudeksi per kaivo on arvioitu 4 metriä. Putken pituus kaivossa on suoraan verrannollinen sen aiheuttamaan lämpöhäviöön, joten jos putken pituus per kaivo olisi 5 metriä, kasvaisivat kaivojen lämpöhäviöt 25 prosenttia. Kaivojen lämpötilana on käytetty keskiarvoa kaivoista, joihin on asennettu mittaus. Mikäli haluttaisiin tarkempaa arviota kaukolämpökaivojen lämpöhäviöistä, tulisi mittareita asentaa useampiin kaivoihin. Kaivojen lämpötilojen mittaaminen on aloitettu vuonna 2020, joten laskuissa on jouduttu käyttämään eri vuosien lämpötiloja, sillä meno- ja paluulämpötiloina on käytetty vuoden 2019 dataa. Laskuissa ei myös ole otettu huomioon eristekerrosten kuntoa. Mikäli eristeen tehokkuus olisi 10 prosenttia huonompi, kasvaisivat kaukolämpö lämpöhäviöt noin 145 megawattituntia, eli noin 7 prosenttiyksikköä.

5.12 Häviöiden analysointi

Eri muuttujia vertaillen esiin nousee ulkolämpötila, joka vaikuttaa suoraan asiakkaiden energiankulutukseen. Asiakkaiden lisääntyvä energiankulutus kasvattaa myös energiahäviöitä. Kasvavan energiankulutuksen lisäksi ulkolämpötila vaikuttaa myös maaperän lämpötilaan, mikä puolestaan vaikuttaa verkostosta johtuvaan lämpömäärään. Kuvassa 14 on havainnollistettu maaperän lämpötilan muutoksen, ulkolämpötilan muutoksen sekä kaukolämmön hankinnan ja kulutuksen sekä kokonaishäviöiden käyttäytymistä kuukausitasolla.



Kuva 14. Kulutuksen ja hankinnan suhde ulkolämpötilaan sekä maaperän lämpötilaan.

Laskujen pohjalta voidaan myös tutkia eri putkityyppien osuuksia verkoston häviöistä. Seuraavassa taulukossa on esitelty 2Mpuk:n, Mpuk:n, Emv:n sekä muiden osuudet verkoston aiheuttamista lämpöhäviöistä sekä niiden osuudet koko verkostosta.

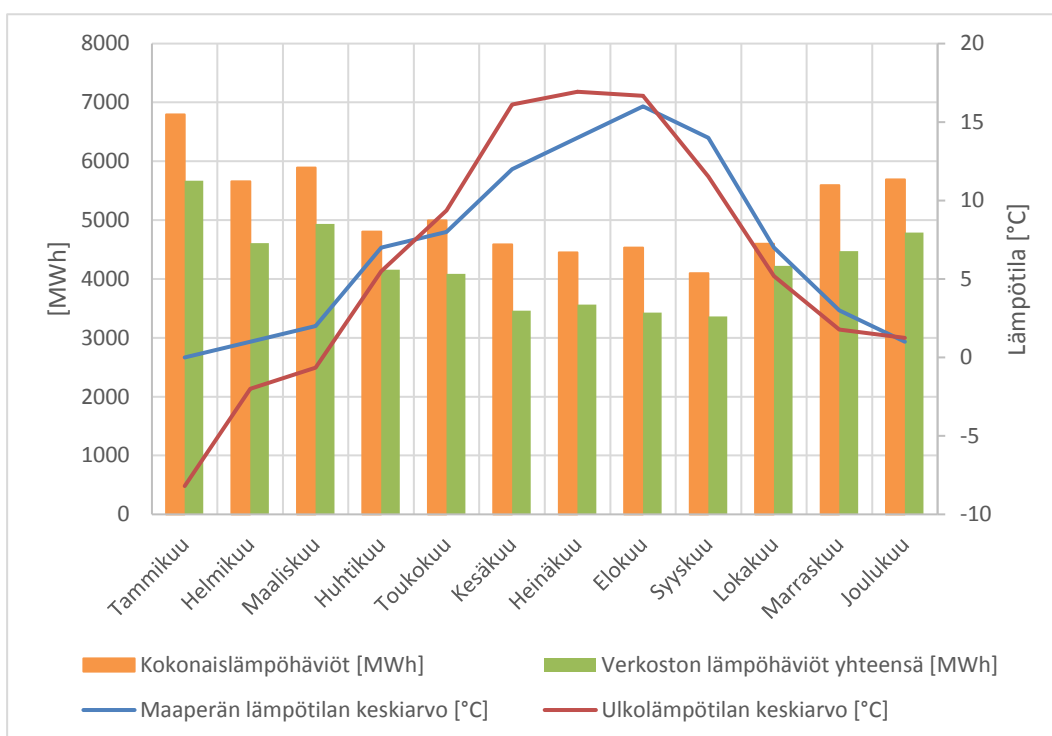
Taulukko 13. Eri kanavatyyppien lämpöhäviöiden osuudet suhteutettuna niiden verkosto-osuuksiin.

Putki- tyyppi	Lämpöhäviöt yhteensä vuonna 2019 [MWh]	Prosentuaalinen osuus verkoston lämpöhäviöistä	Kokonaismitta [m]	Prosentuaalinen osuus verkoston kokonaismittasta
2Mpuk	12003,43	22,80 %	50946,74	19,82 %
Mpuk	18828,01	35,77 %	152837,58	59,46 %
Emv	21219,92	40,31 %	50333,63	19,58 %
Muut	587,48	1,12 %	2917,52	1,14 %

Taulukkoa tutkiessa voidaan todeta, että Emv:n osuus lämpöhäviöistä on huomattava verrattuna sen osuuteen verkoston kokonaismittasta. Vastaavasti Mpuk on

selvästi hyötysuhteellisesti tehokkain putkityyppi. Keskiarvoisesti Emv-kanavasta johtuu lämpöä ympäristöön noin 0,42 MWh per metri, kun taas vastaava luku Mpuk-tyypillä on 0,14 MWh per metri. 2Mpuk on hyötysuhteeltaan hieman huonompi putkityyppi kuin Mpuk, mutta selvästi parempi kuin Emv. 2Mpuk:n keskiarvoinen lämmönjohtavuus ympäröivään maaperään on noin 0,24 MWh per metri. Lämpöhäviöitä vertaillen tulee kuitenkin huomioida se, että EMV-kanavat ovat pääsääntöisesti käytössä niissä osissa verkostoa, joissa on tarvittu suuren kokoluokan putkia.

Seuraava graafi havainnollistaa kuukausittaiset kokonaislämpöhäviöiden ja verkoston lämmönjohtumisen osuuden siitä ulkolämpötilan sekä maaperän lämpötilan funktiona.

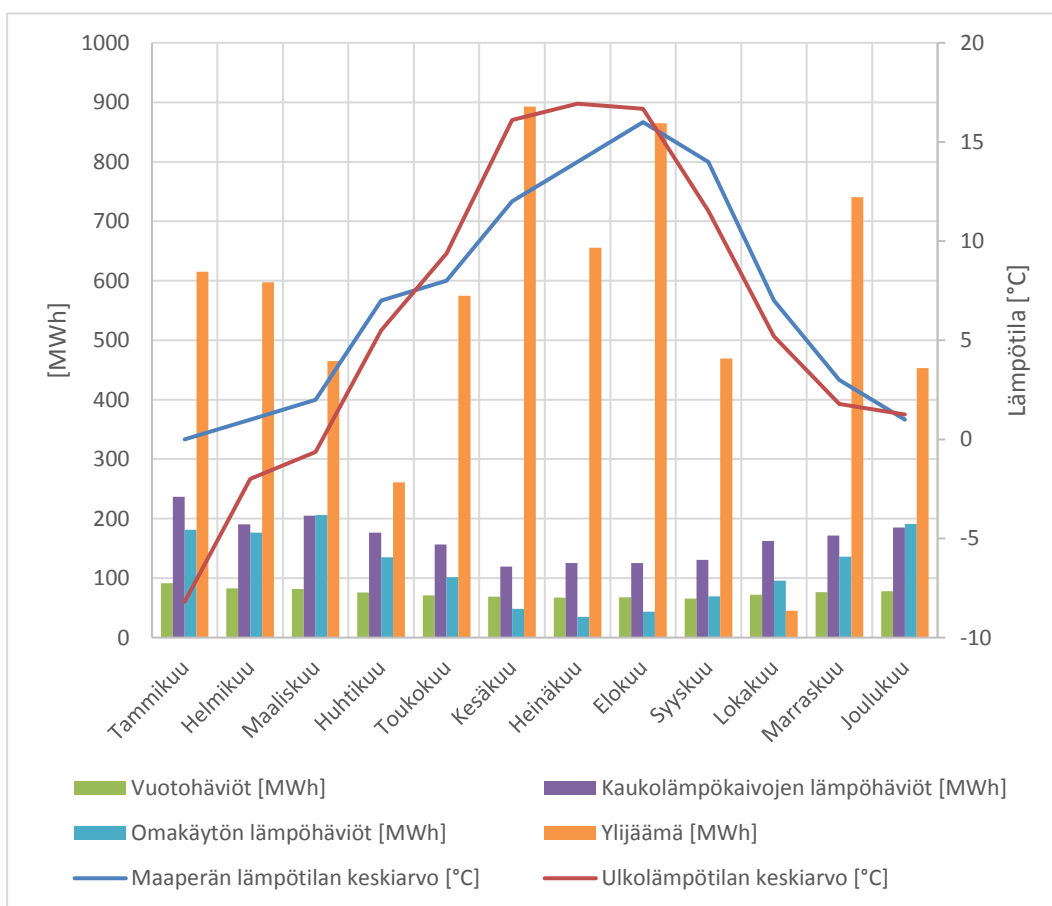


Kuva 15. Kokonaislämpöhäviöiden sekä verkoston aiheuttamien lämpöhäviöiden suhde ulkolämpötilaan sekä maaperän lämpötilaan.

Edellä esitettyjä kuvaajia verrattaessa voidaan huomata, että verkoston aiheuttamat lämpöhäviöt eivät laske samassa suhteessa kulutuksen kanssa. Kuvasta 15 voidaan myös todeta, että valtaosa Vaasan Sähkö Oy:n kaukolämmön lämpöhäviöistä

johtuu verkostosta. Prosentuaalisesti tämä osuus on noin 85,32 % vuosittaisista häviöistä. Lisäksi kuvaajasta voidaan myös nähdä muiden osuuksien kuin verkoston lämpöhäviöt.

Nämä osuudet koostuvat vuotohäviöistä, kaukolämpökaivojen aiheuttamista häviöistä sekä omakäytön kuluttamasta lämpöenergiasta. Lisäksi tässä määrässä on mukana myös laskennasta johtuneet epätarkkuudet sekä segmentoinnin ulkopuolelle jääneet osa-alueet. Alla olevassa kuvaajassa on eritelty näiden tekijöiden osuudet kuukausitasolla. Kuten graafista voidaan todeta, ovat nämä osuudet suhteellisen pieniä verrattuna verkoston johtumislämpöhäviöihin.



Kuva 16. Vuotohäviöiden, kaukolämpökaivojen, omakäytön sekä laskennasta yli jääneiden osuudet kuukausitasolla.

6 ENERGIAHÄVIÖIDEN SEGMENTOINTI SEKÄ MINIMOINTI VAA- SAN KAUKOLÄMPÖJÄRJESTELMÄSSÄ

Kuten edellä olevista laskutoimituksista voidaan todeta, valtaosa energiahäviöistä koostuu lämmön johtumisesta kaukolämpöjohdoista ympäröivään maaperään. Vuonna 2019 Vaasan kaukolämmön kokonaisenergiահankinnat olivat yhteensä 754 024,49 MWh. Lämpöhäviöt yhteensä olivat 61 692,83 MWh, mikä on noin 8 % kokonaishankinnasta. Verkoston johtumisen lämpöhäviöt kattavat kokonaishäviöiden osuudesta noin 85,32 %. Loput 14,68 % häviöistä kuuluvat muihin osuuksiin; vuotohäviöihin, kaukolämpökaivojen häviöihin sekä omakäytön häviöihin sekä laskennan virheisiin.

6.1 Verkoston johtumishäviöt

Verkoston johtumishäviöitä on laskennassa tutkailtu putkityypeittäin kuukausitasolla. Kappaleista 5.2 – 5.5 löytyvissä taulukoissa 4 – 7 on esitelty kunkin putkityypin häviöt. Kuten yllä mainittiin, nämä häviöt kattavat valtaosan kokonaishäviöistä. Yhteensä kaukolämpöjohtojen läpi siirtyvä lämpöenergia on noin 52 638,83 MWh.

6.2 Vuotohäviöt

Vuotohäviöt, eli käytännössä vuotavan veden korvaamiseksi lämmitetty lisävesi, kattavat noin 932,21 MWh häviöistä. Prosentuaalisesti tämä osuus noin 1,5 % kokonaishäviöistä.

6.3 Kaukolämpökaivojen häviöt

Kaukolämpökaivojen osuus häviöistä on laskennan mukaisesti 2 082,80 MWh. Kokonaishäviöistä tämä on noin 3,4 %.

6.4 Omakäyttö

Omakäytön, eli rakennusten sekä kattiloiden ja glykolipiirien lämmityksen, osuus on myös pieni. Vuoden aikana omakäytön osuus oli 1 419,56 MWh, eli noin 2,3 % kokonaishäviöistä.

6.5 Emv-kanavien saneeraus

Emv-kanava, jota löytyy pääsääntöisesti Vaasan keskustan alueelta, kattaa verkoston mitasta noin hieman alle 20 prosenttia. Tämä osuus kuitenkin aiheuttaa hieman yli 40 prosenttia verkoston kokonaislämpöhäviöistä. Alla olevassa taulukossa on esitetty lämpöhäviöiden vuosittaiset muutoksen, mikäli emv-kanava vaihdettaisiin joko 2Mpuk:iin tai Mpuk:iin.

Taulukko 15. Lämpöhäviöiden muutos, mikäli emv-kanava vaihdettaisiin kiinnivaahdotettuun johtotyyppiin.

Putki- tyyppi	Mitta yh- teensä [m]	Häviöt ny- kytilan- teessa [MWh]	Häviöt mi- käli vaihto Mpuk:iin [MWh]	Prosentu- aalinen ero (Mpuk)	Häviöt mi- käli vaihto 2Mpuk:iin [MWh]	Prosentu- aalinen ero (2Mpuk)
Emv32	107,84	19,12	10,13	47,04 %	14,71	23,08 %
Emv40	1118,90	213,22	119,35	44,03 %	169,85	20,34 %
Emv50	3057,89	656,33	317,38	51,64 %	503,78	23,24 %
Emv65	2594,24	637,05	303,16	52,41 %	480,09	24,64 %
Emv80	2603,49	697,65	324,26	53,52 %	509,88	26,91 %
Emv100	2260,01	700,92	277,87	60,36 %	459,63	34,42 %
Emv125	2164,84	758,52	255,93	66,26 %	491,17	35,25 %
Emv150	3256,08	1134,17	435,76	61,58 %	813,14	28,30 %
Emv200	10855,35	4434,85	1493,06	66,33 %	2840,79	35,94 %
Emv250	4932,49	2304,02	645,89	71,97 %	1290,48	43,99 %
Emv300	9117,88	4058,18	-	-	2617,20	35,51 %
Emv400	4545,49	2330,62	-	-	1290,05	44,65 %
Emv500	546,63	322,94	-	-	255,88	20,77 %
Emv600	3172,50	2100,95	-	-	1703,05	18,94 %
Yhteensä	50333,63	20368,55	-	-	13439,72	34,02 %

Taulukoiden 4–7 sekä 15 pohjalta voidaan arvioida, että lämpöhäviöt tippuisivat noin puoleen siltä osaa verkostoa, jossa on käytetty emv-kanavia, mikäli nämä vaihdettaisiin vastaavan kokoiisiin kiinnivaahdotettuihin kaukolämpöjohtoihin. Optimaalisessa tilanteessa, jossa emv32-emv250 vaihdettaisiin vastaavan kokoiseen Mpuk:iin sekä emv300-emv600 vaihdettaisiin 2Mpuk:iin, voitaisiin tämän verkosto-osuuden lämpöhäviöitä laskennallisten arvojen pohjalta noin 50 %. Energiamäärällisesti tämä tarkoittaisi noin 10 000 MWh:n säästöä per vuosi. Emv-kanavan saneerauksessa voidaan myös tarkastella tämän osuuden käyttöastetta. Mikäli putkikoot ovat ylimitoitettuja, voidaan saneerauksen yhteydessä vaihtaa putkikokoja energiahäviöiden minimoimiseksi.

6.6 Menolämpötilan vaikutus lämpöhäviöihin ja pumppaukseen

Menolämpötilan säätö pohjautuu tyypillisesti vallitsevaan ulkolämpötilaan. Muutokset menolämpötilassa vaikuttavat systeemin jokaiseen osa-alueeseen; paluulämpötilaan, lämpöhäviöihin sekä pumppaustehoon. Menolämpötilan ja paluulämpötilan välille on vaikea vetää yhdistävää tekijää, sillä paluulämpötilaan vaikuttaa myös asiakkaiden vaihteleva kulutus. Käytännössä lämpöhäviöiden minimointi vaatisi lämpöhäviöiden jatkuvaa reaaliaikaista seuranta, jonka pohjalta menolämpötilaa voitaisiin optimoida.

Seuraavassa taulukossa on havainnollistettu, mitä lämpöhäviöille tapahtuu, mikäli menopuolen lämpötilaa laskettaisiin. Oletetaan, että paluulämpötila ei muutu.

Taulukko 14. Lämpöhäviöiden käyttäytymistä havainnollistava taulukko menolämpötilan muuttuessa vuositasolla.

Menolämpötila	Verkoston lämpöhäviöt yhteensä [MWh]	Lisäveden lämmitykseen kuluva energia [MWh]	Kaukolämpökaivojen häviöt kuukausittain [MWh]	Laskennalliset häviöt yhteensä	Erotus	Prosentuaalinen vähennys
Nykytilanne	52638,83	932,21	2082,80	55653,85	-	-
-1 °C	52181,61	924,17	2058,78	55164,56	489,29	0,93 %
-2 °C	51724,38	916,14	2034,76	54675,27	978,57	1,86 %
-3 °C	51267,16	908,10	2010,73	54185,99	1467,86	2,79 %
-4 °C	50809,93	900,06	1986,71	53696,70	1957,14	3,72 %
-5 °C	50352,70	892,02	1962,69	53207,41	2446,43	4,65 %

Taulukosta voidaan todeta, että asteen muutos vähentäisi vuosittaisia lämpöhäviöitä verkoston osalta noin 500 MWh per aste. Menolämpötilaa laskiessa tulee kuitenkin huomioida pumppauksen tarpeen kasvu. Menolämpötilaa ei voida kuitenkaan laskea rajattomasti, sillä veden lämpötilan tulee olla riittävän korkea, jotta asiakkaiden laitteisto toimisi oikein.

Laskennan pohjalta voidaankin todeta, että pumppauksen energiantarve ei muutu samassa suhteessa kuin lämpöhäviöt. Kustannuslaskennan pohjalta voidaankin todeta, että menolämpötilan laskeminen voi olla taloudellisesti kannattavaa. Kappaleen 5.9 taulukoiden 10 ja 11 pohjalta voidaan todeta, että kun menolämpötilaa alennetaan asteen verran, nousee pumppauksen tarve noin 200 MWh.

Taulukoita vertaamalla huomataan, että menolämpötilaa säätämällä voidaan verkoston aiheuttamia lämpöhäviöitä alentaa. Tässä pitää myös kuitenkin huomioida pumppaukseen kuluva energia: mikäli menolämpötilaa lasketaan, joudutaan ver-

koston pumppaustehoa nostamaan, jotta asiakkaiden riittävä energiansaanti saadaan varmistettua. Lisäksi pumppaustehon kasvattaminen lisää verkoston painehäviöitä, mikä puolestaan tarkoittaa, ettei pumppaustehoa ole taloudellisesti kannattavaa nostaa yli tietyn rajan. Käytännön kannalta tulee myös huomioida, että virtausta nostettaessa verkoston siirtokyky säilyy.

6.7 Pumppauksen optimointi

Kappaleesta 5.9 löytyvässä taulukossa 10 on eritelty molempien laitosten sekä välipumppaamoiden energiankulutus kuukausitasolla vuonna 2019. Pumppauksen optimoimiseksi tulisi tehdä tarkempi selvitys siitä, miten molempien laitosten menolämpötilat vaikuttavat pumppauksen kokonaissähkökulutukseen. Kappaleen 5.9 taulukossa 11 on havainnollistettu sähkökulutuksen käyttäytymistä menolämpötilan laskiessa. Lisäksi opinnäytetyön rajaamiseksi tässä opinnäytetyössä ei ole otettu kantaa pumppaustehon kasvamisen vaikutusta kokonaispainehäviöihin. Käytännössä tämä tarkoittaa, että kun verkoston virtausnopeutta kasvatetaan, kasvavat myös virtausta vastustavien tekijöiden osuus. Kaukolämmön käsikirjassa on arvioitu, että painehäviöt kasvavat noin nelinkertaisiksi virtausnopeuden kaksinkertaistuessa. /1/

Pumppauksen suhteen voisi myös tehdä tarkemman tarkastelun itse pumppausprosessin tehokkuudesta. Esimerkiksi voi olla taloudellisesti kannattavaa ajaa välipumppaamoita pienemmillä tehoilla ja laitosten pumppuja suuremmilla tai ajaa vain osaa välipumppaamoista ja olla käyttämättä toisia.

Pumppauksella on kuitenkin reunaehdoja; asiakkaalla tulee olla riittävä paine-ero, putkistossa tulee olla riittävä ylipaine sekä paineen tulee olla riittävän suuri ennen jokaista pumppua kavitoinnin välttämiseksi. Kokonaisvaltainen pumppauksen optimointi vaatisi laajamittaista datan keräämistä verkoston eri osa-alueista, kuten massavirran sekä lämpötilojen seuranta eri osissa verkostoa. Näiden tietojen pohjalta voitaisiin suorittaa simulointia verkoston lämpötilojen sekä pumppaustehon käyttäytymisestä. /5/

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoitteena oli selvittää ja segmentoida Vaasan kaukolämpöjärjestelmän lämpöhäviöt sekä menolämpötilan alentamisen vaikutusta lämpöhäviöihin sekä pumppaukseen kuluvaan energiaan. Lämpöhäviölaskenta suoritettiin käyttämällä kotimaisia ja ulkomaisia lähteitä sekä Vaasan sähkön keräämää dataa vuodelta 2019. Lämpöhäviöiden segmentoinnilla voidaan kartoittaa potentiaalisia säästökohteita, mikä mahdollistaa systeemin hyötysuhteen parantamisen.

Lämpöhäviölaskennan pohjalta voidaan todeta, että suurin osa kaukolämpöverkoston lämpöhäviöistä sijoittuu verkostoon. Laskennallisesti noin 85 % lämpöhäviöistä sijoittuukin itse verkostoon. Verkoston osuuksista erityisesti betonielementtikanaavat nousivat esille, sillä vaikka tämä osuus kattaa vain noin 20 % verkoston kokonaismatasta, aiheuttaa se noin 40 % kokonaislämpöhäviöistä.

Laskentaprosessin pohjalta voidaan myös todeta, että vaikka kesäaikana tuotannon määrä laskee rajusti talvikuukausiin verrattuina, eivät lämpöhäviöt eivät laske samassa suhteessa. Syy tähän on se, tehonsiirtokyvylisesti verkosto on mitoitettu toimimaan kylmien ajanjaksojen aikana. Tämä aiheuttaa tilanteen, jossa verkoston tehonsiirtokyky on suhteessa asiakkaiden kulutukseen liian suuri kesäkuukausien aikana. Vastaavasti pumppausteho käyttäytyy menoveden lämpötilan suhteen siten, että kesäkuukausina menoveden lämpötilaa laskiessa pumppauskulut nousevat enemmän kuin kylmempien kuukausien aikana.

Laskennallisesti menolämpötilan alentaminen vähentäisi verkoston lämpöhäviöitä noin 500 MWh per aste vuositasona, mikä tarkoittaisi noin 0,8 % vähemmän lämpöhäviöitä per aste. Vastaavasti menolämpötilan laskiessa pumppauksen tehontarve lisääntyisi noin 200 MWh:lla per aste. Opinnäytetyön pohjalta voidaankin todeta, että menolämpötilan sekä pumppauksen säätöjen optimoinnilla voidaan saavuttaa pienemmät kokonaiskustannukset, joten niitä kannattaa tutkia tarkemmin testijaksojen sekä simulointien avulla.

LÄHTEET

- /1/ Energiateollisuus ry. Kaukolämpö 2019 graafeina. Viitattu 5.12.2020.
https://energia.fi/files/3936/Kaukolampo_2019.pptx
- /2/ Motiva. Lämpöä kotiin keskitetysti – Kaukolämpö. Viitattu 5.12.2020.
[https://www.motiva.fi/files/7963/Lampoa kotiin keskitetysti Kaukolampo.pdf](https://www.motiva.fi/files/7963/Lampoa_kotiin_keskitetysti_Kaukolampo.pdf)
- /3/ Energiateollisuus ry. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki.
- /4/ Vaasan Sähkö Oy. Kaukolämmön tuotanto. Viitattu 5.12.2020.
<https://www.vaasansahko.fi/reaaliaikainen-kaukolampotuotanto/>
- /5/ Mäkelä, V-M., Tuunanen, J. 2015. Suomalainen kaukolämmitys. 57.
- /6/ Energiateollisuus ry. Kaukolämmön ja -jäähdytyksen tekninen laatu. Viitattu 10.12.2020. [http://energia.fi/files/837/RaporttiKK5_2015 Kaukolammon ja -jaahdytyksen tekninen laatu.pdf](http://energia.fi/files/837/RaporttiKK5_2015_Kaukolammon_ja_jaahdytyksen_tekninen_laatu.pdf)
- /7/ Karttapalvelut GTK. <https://gtkdata.gtk.fi/maankamara/>
- /8/ Jarfelt, U. 2002. Jämförelse mellan dubbel- och enkerör. Chalmers tekniska högskola. Viitattu 3.1.2021. <https://docplayer.se/8368081-Jamforelse-mellan-dubbel-och-enkelror-akumulerande-varmeforluster-och-miljobelastning-under-50-ars-drifttid.html>
- /9/ Energiateollisuus ry. Kiinnivaahdotetut kaukolämpöjohdot Suositus L1/2020. Viitattu 12.2.2021. [https://energia.fi/files/593/20200831 SuositusL1 Kiinnivaahdotetut kaukolampojohtot 2020.pdf](https://energia.fi/files/593/20200831_SuositusL1_Kiinnivaahdotetut_kaukolampojohtot_2020.pdf)
- /10/ Martikainen, R. Kaukolämpöverkon verkostohyötysuhteen parantaminen. Viitattu 10.3.2021. <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/21757/Martikainen.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- /11/ Energiateollisuus ry. Kaukolämpötilastot 2019. Viitattu 20.12.2020.
<https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/kaukolampotilasto.html#material-view>
- /12/ Kaukolämpöekstra. Mpuk sekä 2Mpuk häviölaskuri. Viitattu 15.2.2021
<https://kaukolampoekstra.fi/kirjasto/tyokalut>
- /13/ Pöyry Oy. Kaukolämmön asema Suomen energiajärjestelmässä tulevaisuudessa. Viitattu 12.3.2021. <http://www2.energia.fi/kaukolampo/klasemaloppuraportti52a14971.pdf>

/14/ Mäkiranta, A. 2020. Renewable thermal energy sources. Viitattu 28.3.2021. <https://osuva.uwasa.fi/bitstream/handle/10024/11593/978-952-476-935-8.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

/15/ Uponor Oy. Wehotherm tuoteluettelo. Viitattu 215.1.2021. [https://isu.com/uponorfi/docs/41701 wehotherm tuoteluettelo 365121837f4655](https://isu.com/uponorfi/docs/41701_wehotherm_tuoteluettelo_365121837f4655)

LIITTEET

Taulukko 16. Suomen kaukolämpöverkkojen tunnuslukuja. /11/

	Nettohankinta (GWh)	Verkostohäviöt (GWh)	Hyötysuhde	Verkoston pituus (km)	Verkoston häviö per km (GWh)	Hankinta per verkoston pituus
Äänekosken Energia Oy	146,10	26,70	81,72 %	133,50	0,20	1,09
VSV Energia Oy	181,00	14,90	91,77 %	67,00	0,22	2,70
Riihimäen Kaukolämpö Oy	193,40	10,20	94,73 %	102,50	0,10	1,89
Varkauden Aluelämpö Oy	207,80	25,50	87,73 %	120,00	0,21	1,73
Salon Kaukolämpö Oy	218,70	29,50	86,51 %	121,30	0,24	1,80
Loiste Lämpö Oy	319,00	36,40	88,59 %	124,90	0,29	2,55
Hyvinkään Lämpövoima Oy	362,50	41,30	88,61 %	165,50	0,25	2,19
Kokkolan Energia Oy	365,30	47,20	87,08 %	265,30	0,18	1,38
Kotkan Energia Oy	394,20	20,40	94,82 %	194,40	0,10	2,03
Etelä-Savon Energia Oy	416,20	37,70	90,94 %	207,80	0,18	2,00
KSS Lämpö Oy, Kouvola	467,60	52,60	88,75 %	235,90	0,22	1,98
Loimua Oy, Hämeenlinna	487,20	62,40	87,19 %	203,30	0,31	2,40
Seinäjoen Energia Oy	534,00	47,10	91,18 %	350,00	0,13	1,53
Napapiirin Energia ja Vesi Oy, Rovaniemi	549,80	47,40	91,38 %	261,00	0,18	2,11
Fortum Oy, Joensuu	618,00	69,00	88,83 %	237,70	0,29	2,60
Lappeenrannan Energia Oy	618,70	87,90	85,79 %	409,00	0,21	1,51
Pori Energia Oy, Pori	648,20	53,20	91,79 %	286,50	0,19	2,26
Vaasan Sähkö Oy	757,70	60,00	92,08 %	242,00	0,25	3,13
Kuopion Energia Oy	1039,40	81,40	92,17 %	488,90	0,17	2,13
Lahti Energia Oy, Lahti	1256,50	134,10	89,33 %	624,40	0,21	2,01
Oulun Energia Oy	1819,30	189,10	89,61 %	837,00	0,23	2,17
Vantaan Energia Oy	1864,70	108,90	94,16 %	577,80	0,19	3,23
Turku Energia Oy, Turku	2084,80	186,60	91,05 %	390,00	0,48	5,35
Tampereen Sähkölaitos, Tampere	2232,50	134,40	93,98 %	625,70	0,21	3,57
Fortum Oy, Espoo	2370,90	230,00	90,30 %	749,40	0,31	3,16
Helen Oy	7037,80	482,30	93,15 %	1390,10	0,35	5,06
KESKIARVO	1045,82	89,08	91,48 %	361,96	0,25	2,89

Taulukko 17. 2Mpuk eristeluokan 2 dimensiot. /15/

DN	Virtausputken halkaisija [mm]	Virtausputken seinämävah- vuus [mm]	Putken kokonaishalkaisija [mm]	Eristekerroksen paksuus [mm]
20	26,9	2,6	110	77,9
25	33,7	2,6	110	71,1
32	42,4	2,6	125	77,4
40	48,3	2,6	125	71,5
50	60,3	2,9	140	73,9
65	76,1	2,9	160	78,1
80	88,9	3,2	180	84,7
100	114,3	3,6	225	103,5
125	139,7	3,6	250	103,1
150	168,3	4,0	280	103,7
200	219,1	4,5	355	126,9
250	273,0	5,0	450	167,0
300	323,9	5,6	500	164,9
350	355,6	5,6	560	193,2
400	406,4	6,3	630	211,0
500	508,0	6,3	710	189,4
600	610,0	7,1	800	175,8

Taulukko 18. 2Mpuk eristeluokan 3 dimensiot. /15/

DN	Teräsputken halkaisija [mm]	Teräsputken seinämävahvuus [mm]	Putken kokonaishalkaisija [mm]	Eristekerroksen paksuus [mm]
20	26,9	2,6	125	92,9
25	33,7	2,6	125	86,1
32	42,4	2,6	140	92,4
40	48,3	2,6	140	86,5
50	60,3	2,9	160	93,9
65	76,1	2,9	180	98,1
80	88,9	3,2	200	104,7
100	114,3	3,6	250	128,5
125	139,7	3,6	280	133,1
150	168,3	4,0	315	138,7
200	219,1	4,5	400	171,9
250	273,0	5,0	500	217,0
300	323,9	5,6	560	224,9
350	355,6	5,6	630	263,2
400	406,4	6,3	710	291,0
500	508,0	6,3	800	279,4
600	610,0	7,1	900	275,8

Taulukko 19. Mpuk eristeluokka 2 dimensiot. /15/

DN	Virtausputken halkaisija [mm]	Virtausputken seinämävah- vuus [mm]	Putken kokonaishalkaisija [mm]	Putkien välinen etäisyys [mm]
20	26,9	2,6	140	19
25	33,7	2,6	160	19
32	42,4	2,6	180	19
40	48,3	2,6	180	19
50	60,3	2,9	225	20
65	76,1	2,9	250	20
80	88,9	3,2	280	25
100	114,3	3,6	355	25
125	139,7	3,6	450	30
150	168,3	4,0	500	40
200	219,1	4,5	630	45
250	273,0	5,0	800	45

Taulukko 20. Mpuk eristeluokan 3 dimensiot. /15/

DN	Virtausputken halkaisija [mm]	Virtausputken seinämävah- vuus [mm]	Putken kokonaishalkaisija [mm]	Putkien välinen etäisyys [mm]
20	26,9	2,6	160	19
25	33,7	2,6	180	19
32	42,4	2,6	200	19
40	48,3	2,6	200	19
50	60,3	2,9	250	20
65	76,1	2,9	280	20
80	88,9	3,2	315	25
100	114,3	3,6	400	25
125	139,7	3,6	500	30
150	168,3	4,0	560	40
200	219,1	4,5	710	45
250	273,0	5,0	900	45

Taulukko 21. Betonielementtikanavan dimensiot.

DN	Virtausputken halkaisija [mm]	Virtausputki + eristekerros paksuus menopuoli [mm]	Virtausputki + eristekerros paksuus paluupuoli [mm]	A; Betonikanavan ilmatilan leveys [mm]	B; Betonikanavan ilmatilan korkeus [mm]	Eristeen paksuus menopuolella [mm]	Eristeen paksuus menopuolella [mm]
Emv32	37,2	137,2	117,2	304,40	157,20	50	40
Emv40	43,1	143,1	123,1	316,20	163,10	50	40
Emv50	54,5	154,5	134,5	339,00	174,50	50	40
Emv65	70,3	170,3	150,3	370,60	190,30	50	40
Emv80	82,5	182,5	162,5	395,00	202,50	50	40
Emv100	107,1	207,1	187,1	444,20	227,10	50	40
Emv125	132,5	232,5	212,5	495,00	252,50	50	40
Emv150	160,3	300,3	260,3	630,60	320,30	70	50
Emv200	210,1	350,1	310,1	730,20	370,10	70	50
Emv250	263	403	363	836,00	423,00	70	50
Emv300	312,7	512,7	452,7	1055,40	532,70	100	70
Emv400	393,8	593,8	533,8	1217,60	613,80	100	70
Emv500	495,4	695,4	635,4	1420,80	715,40	100	70
Emv600	595,8	795,8	735,8	1621,60	815,80	100	70

Taulukko 22. Vuoden 2019 lähtöarvot ja tulokset vuotohäviöiden laskennasta.

Kuukausi	Lisäveden kulu- tus [m³]	Menolämpötila [°C]	Paluulämpötila [°C]	Lisäveden läm- pötila [°C]	Veden lämmitykseen vaadittu ener- gia;maksimi [MWh]	Veden lämmitykseen vaadittu energia;mi- nimi [MWh]	Maksimin ja minimin keskiarvo [MWh]
Tammikuu	1187,67	96,46	49,53	5	121,92	60,76	91,34
Helmikuu	1187,67	87,85	45,55	5	110,45	55,33	82,89
Maaliskuu	1187,67	86,60	44,54	5	108,79	54,18	81,48
Huhtikuu	1187,67	81,05	43,52	6	100,73	51,41	76,07
Toukokuu	1187,67	81,65	44,90	8	98,84	50,56	74,70
Kesäkuu	1187,67	79,68	49,84	8	96,19	57,10	76,65
Heinäkuu	1187,67	79,17	51,59	10	92,83	56,74	74,79
Elokuu	1187,67	79,49	51,42	10	93,25	56,51	74,88
Syyskuu	1187,67	82,21	46,11	10	96,91	49,28	73,09
Lokakuu	1187,67	79,88	42,85	8	96,47	47,75	72,11
Marraskuu	1187,67	81,59	43,38	6	101,44	51,22	76,33
Joulukuu	1187,67	81,55	43,70	5	102,73	53,03	77,88
Yhteensä	14252,00		-	-	1220,56	643,86	932,21

Taulukko 23. 2Mpuk-elementtien kokonaislämpöhäviöt kuukausittain vuonna 2019 megawattitunneissa.

Putkityyppi	Häviöt tammikuu [MWh]	Häviöt helmikuu [MWh]	Häviöt maaliskuu [MWh]	Häviöt huhtikuu [MWh]	Häviöt toukokuu [MWh]	Häviöt kesäkuu [MWh]	Häviöt heinäkuu [MWh]	Häviöt elokuu [MWh]	Häviöt syyskuu [MWh]	Häviöt lo- kakuu [MWh]	Häviöt marras- kuu [MWh]	Häviöt joulukuu [MWh]	Häviöt yh- teensä [MWh]
2Mpuk20/110	83,37	67,78	72,61	61,11	63,13	58,31	58,68	56,48	55,44	62,09	65,74	70,38	775,10
2Mpuk20/125	16,12	13,11	14,04	11,82	12,21	11,28	11,35	10,92	10,72	12,01	12,71	13,61	149,89
2Mpuk25/125	8,80	7,15	7,66	6,45	6,66	6,15	6,19	5,96	5,85	6,55	6,94	7,43	81,79
2Mpuk32/125	70,31	57,16	61,23	51,53	53,24	49,18	49,49	47,63	46,76	52,36	55,44	59,35	653,67
2Mpuk32/140	2,19	1,78	1,91	1,61	1,66	1,53	1,54	1,48	1,46	1,63	1,73	1,85	20,36
2Mpuk40/125	111,27	90,46	96,91	81,56	84,25	77,83	78,32	75,38	74,00	82,87	87,75	93,94	1034,53
2Mpuk40/140	7,92	6,44	6,90	5,81	6,00	5,54	5,58	5,37	5,27	5,90	6,25	6,69	73,68
2Mpuk50/160	6,42	5,22	5,59	4,70	4,86	4,49	4,52	4,35	4,27	4,78	5,06	5,42	59,67
2Mpuk65/160	149,47	121,52	130,18	109,56	113,18	104,55	105,21	101,26	99,40	111,32	117,87	126,19	1389,70
2Mpuk65/180	9,92	8,06	8,64	7,27	7,51	6,94	6,98	6,72	6,60	7,39	7,82	8,37	92,21
2Mpuk80/200	21,05	17,11	18,33	15,43	15,94	14,72	14,82	14,26	14,00	15,68	16,60	17,77	195,70
2Mpuk100/225	64,85	52,72	56,48	47,53	49,10	45,36	45,65	43,93	43,13	48,30	51,14	54,75	602,93
2Mpuk100/250	2,36	1,92	2,06	1,73	1,79	1,65	1,66	1,60	1,57	1,76	1,86	2,00	21,99
2Mpuk125/280	22,24	18,08	19,37	16,30	16,84	15,56	15,65	15,07	14,79	16,56	17,54	18,78	206,79
2Mpuk150/280	0,17	0,14	0,15	0,12	0,13	0,12	0,12	0,11	0,11	0,13	0,13	0,14	1,56
2Mpuk150/315	12,51	10,17	10,89	9,17	9,47	8,75	8,80	8,47	8,32	9,31	9,86	10,56	116,27
2Mpuk200/355	93,61	76,10	81,52	68,61	70,88	65,48	65,89	63,41	62,25	69,72	73,82	79,02	870,31
2Mpuk200/400	75,08	61,04	65,39	55,03	56,85	52,52	52,85	50,86	49,93	55,92	59,21	63,38	698,05
2Mpuk250/500	59,90	48,70	52,17	43,90	45,36	41,90	42,16	40,58	39,83	44,61	47,24	50,57	556,91
2Mpuk300/500	48,88	39,74	42,57	35,83	37,01	34,19	34,41	33,11	32,51	36,41	38,55	41,27	454,47
2Mpuk300/560	126,54	102,88	110,21	92,75	95,82	88,52	89,07	85,73	84,16	94,25	99,79	106,83	1176,55
2Mpuk350/560	34,60	28,13	30,13	25,36	26,20	24,20	24,35	23,44	23,01	25,77	27,28	29,21	321,66
2Mpuk350/630	2,80	2,28	2,44	2,05	2,12	1,96	1,97	1,90	1,86	2,09	2,21	2,37	26,05

2Mpuk400/630	8,33	6,77	7,25	6,10	6,30	5,82	5,86	5,64	5,54	6,20	6,57	7,03	77,41
2Mpuk400/710	6,18	5,03	5,38	4,53	4,68	4,32	4,35	4,19	4,11	4,60	4,87	5,22	57,47
2Mpuk450/800	246,16	200,13	214,39	180,43	186,40	172,19	173,27	166,76	163,71	183,34	194,12	207,82	2288,71
Yhteensä	1291,03	1049,58	1124,39	946,30	977,59	903,06	908,73	874,62	858,58	961,53	1018,11	1089,92	12003,43

Taulukko 24. Mpuk-elementtien kokonaislämpöhäviöt kuukausittain vuonna 2019 megawattitunneissa.

Putkityyppi	Häviöt tammikuu [MWh]	Häviöt helmikuu [MWh]	Häviöt maaliskuu [MWh]	Häviöt huhtikuu [MWh]	Häviöt toukokuu [MWh]	Häviöt ke- säkuu [MWh]	Häviöt heinäkuu [MWh]	Häviöt elokuu [MWh]	Häviöt syyskuu [MWh]	Häviöt lo- kakuu [MWh]	Häviöt marras- kuu [MWh]	Häviöt joulukuu [MWh]	Häviöt yh- teensä [MWh]
Mpuk20	0,18	0,14	0,15	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,14	0,15	1,65
Mpuk20/140	86,38	70,23	75,23	63,32	65,41	60,42	60,80	58,52	57,45	64,34	68,12	72,93	803,16
Mpuk20/160	45,58	37,05	39,69	33,41	34,51	31,88	32,08	30,88	30,31	33,94	35,94	38,48	423,75
Mpuk25/160	82,35	66,95	71,72	60,36	62,36	57,60	57,96	55,79	54,76	61,33	64,94	69,52	765,64
Mpuk25/180	16,15	13,13	14,07	11,84	12,23	11,30	11,37	10,94	10,74	12,03	12,74	13,64	150,19
Mpuk32/180	112,93	91,81	98,35	82,78	85,51	78,99	79,49	76,51	75,10	84,11	89,06	95,34	1049,98
Mpuk32/200	36,07	29,33	31,42	26,44	27,31	25,23	25,39	24,44	23,99	26,87	28,45	30,45	335,39
Mpuk40/180	145,42	118,22	126,65	106,59	110,12	101,72	102,36	98,52	96,71	108,31	114,68	122,77	1352,06
Mpuk40/200	80,84	65,72	70,41	59,26	61,22	56,55	56,90	54,77	53,76	60,21	63,75	68,25	751,65
Mpuk50/225	251,87	204,77	219,36	184,62	190,72	176,18	177,29	170,63	167,50	187,59	198,63	212,64	2341,79
Mpuk50/250	57,13	46,44	49,75	41,87	43,26	39,96	40,21	38,70	37,99	42,55	45,05	48,23	531,15
Mpuk65/250	170,41	138,54	148,41	124,91	129,04	119,20	119,95	115,45	113,33	126,92	134,39	143,86	1584,39
Mpuk65/280	44,79	36,42	39,01	32,83	33,92	31,33	31,53	30,35	29,79	33,36	35,32	37,82	416,47
Mpuk80/250	0,36	0,29	0,32	0,27	0,27	0,25	0,26	0,25	0,24	0,27	0,29	0,31	3,37
Mpuk80/280	185,01	150,41	161,13	135,61	140,10	129,41	130,23	125,34	123,04	137,79	145,90	156,19	1720,17
Mpuk80/315	53,54	43,53	46,63	39,25	40,54	37,45	37,69	36,27	35,61	39,88	42,22	45,20	497,82
Mpuk100/355	108,90	88,53	94,84	79,82	82,46	76,17	76,65	73,77	72,42	81,10	85,88	91,93	1012,48
Mpuk100/400	49,43	40,18	43,05	36,23	37,43	34,57	34,79	33,49	32,87	36,81	38,98	41,73	459,56
Mpuk125/450	128,01	104,07	111,49	93,83	96,93	89,54	90,11	86,72	85,13	95,34	100,95	108,07	1190,22
Mpuk125/500	4,65	3,78	4,05	3,40	3,52	3,25	3,27	3,15	3,09	3,46	3,66	3,92	43,19
Mpuk150/500	171,60	139,50	149,45	125,78	129,94	120,03	120,78	116,25	114,12	127,80	135,32	144,87	1595,43
Mpuk150/560	1,46	1,18	1,27	1,07	1,10	1,02	1,02	0,99	0,97	1,08	1,15	1,23	13,53

Mpuk200/630	47,68	38,76	41,52	34,95	36,10	33,35	33,56	32,30	31,71	35,51	37,60	40,25	443,30
Mpuk200/710	23,22	18,88	20,22	17,02	17,58	16,24	16,34	15,73	15,44	17,29	18,31	19,60	215,87
Mpuk250/800	119,44	97,10	104,02	87,54	90,44	83,54	84,07	80,91	79,43	88,95	94,19	100,83	1110,46
Mpuk250/900	1,65	1,34	1,44	1,21	1,25	1,15	1,16	1,12	1,10	1,23	1,30	1,39	15,34
Yhteensä	2025,04	1646,33	1763,66	1484,32	1533,40	1416,49	1425,39	1371,89	1346,72	1508,22	1596,96	1709,59	18828,01

Taulukko 25. Betonielementtikanavien kokonaislämpöhäviöt kuukausittain vuonna 2019 megawattitunneissa.

Putki- tyyppi	Häviöt tammikuu [MWh]	Häviöt helmikuu [MWh]	Häviöt maaliskuu [MWh]	Häviöt huhtikuu [MWh]	Häviöt toukokuu [MWh]	Häviöt ke- säkuu [MWh]	Häviöt heinäkuu [MWh]	Häviöt elokuu [MWh]	Häviöt syyskuu [MWh]	Häviöt lo- kakuu [MWh]	Häviöt marras- kuu [MWh]	Häviöt joulukuu [MWh]	Häviöt yh- teensä [MWh]
Emv32	2,21	1,79	1,92	1,62	1,67	0,96	1,55	1,50	1,47	1,64	1,74	1,86	19,95
Emv40	24,53	19,95	21,37	17,98	18,58	11,40	17,27	16,62	16,32	18,27	19,35	20,71	222,35
Emv50	75,15	61,10	65,45	55,09	56,91	38,10	52,90	50,91	49,98	55,97	59,27	63,45	684,27
Emv65	72,59	59,01	63,22	53,21	54,97	39,91	51,09	49,18	48,27	54,06	57,24	61,28	664,04
Emv80	79,27	64,44	69,04	58,10	60,02	45,56	55,80	53,70	52,72	59,04	62,51	66,92	727,12
Emv100	79,30	64,47	69,07	58,13	60,05	48,56	55,82	53,72	52,74	59,06	62,54	66,95	730,41
Emv125	85,55	69,55	74,51	62,71	64,78	54,75	60,22	57,96	56,89	63,72	67,47	72,22	790,32
Emv150	127,94	104,01	111,42	93,78	96,88	81,71	90,05	86,67	85,08	95,29	100,89	108,01	1181,74
Emv200	498,48	405,26	434,14	365,38	377,46	334,20	350,87	337,70	331,51	371,26	393,11	420,83	4620,19
Emv250	258,30	209,99	224,96	189,33	195,59	179,16	181,81	174,99	171,78	192,38	203,70	218,06	2400,05
Emv300	455,37	370,21	396,59	333,78	344,81	312,19	320,52	308,49	302,83	339,15	359,11	384,43	4227,49
Emv400	260,86	212,08	227,19	191,21	197,53	184,70	183,62	176,72	173,48	194,28	205,72	220,23	2427,61
Emv500	36,07	29,32	31,41	26,44	27,31	26,24	25,39	24,43	23,99	26,86	28,44	30,45	336,35
Emv600	234,27	190,46	204,04	171,72	177,40	173,73	164,90	158,71	155,80	174,48	184,75	197,78	2188,05
Yhteensä	2289,90	1861,65	1994,33	1678,45	1733,96	1531,18	1611,81	1551,31	1522,86	1705,47	1805,83	1933,19	21219,92

Taulukko 26. Muiden johtojen kuin 2Mpuk, Mpuk sekä Emv kokonaislämpöhäviöt kuukausittain vuonna 2019 megawattitunneissa.

Putkityyppi	Häviöt tammi- kuu [MWh]	Häviöt helmikuu [MWh]	Häviöt maalis- kuu [MWh]	Häviöt huhtikuu [MWh]	Häviöt toukokuu [MWh]	Häviöt kesäkuu [MWh]	Häviöt heinäkuu [MWh]	Häviöt elokuu [MWh]	Häviöt syyskuu [MWh]	Häviöt lokakuu [MWh]	Häviöt marras- kuu [MWh]	Häviöt joulukuu [MWh]	Häviöt yhteensä [MWh]
2Mpuk15/65_(Copper)	2,66	2,16	2,32	1,95	2,01	1,86	1,87	1,80	1,77	1,98	2,10	2,25	24,73
Mpul20	7,41	6,02	6,45	5,43	5,61	5,18	5,21	5,02	4,92	5,52	5,84	6,25	68,85
Mpul25	1,62	1,32	1,41	1,19	1,23	1,13	1,14	1,10	1,08	1,21	1,28	1,37	15,06
Mpul32	5,93	4,82	5,17	4,35	4,49	4,15	4,18	4,02	3,95	4,42	4,68	5,01	55,16
Mpul40	21,84	17,76	19,02	16,01	16,54	15,28	15,37	14,80	14,52	16,27	17,22	18,44	203,07
Mpul50	15,38	12,50	13,39	11,27	11,64	10,76	10,82	10,42	10,23	11,45	12,13	12,98	142,98
Mpul65	2,13	1,73	1,85	1,56	1,61	1,49	1,50	1,44	1,42	1,58	1,68	1,80	19,78
Mpul80	5,37	4,37	4,68	3,94	4,07	3,76	3,78	3,64	3,57	4,00	4,23	4,53	49,92
Mpul100	0,52	0,42	0,45	0,38	0,39	0,36	0,36	0,35	0,34	0,39	0,41	0,44	4,81
Mpul125	0,34	0,27	0,29	0,25	0,25	0,24	0,24	0,23	0,22	0,25	0,27	0,28	3,13
Yhteensä	63,19	51,37	55,03	46,31	47,85	44,20	44,48	42,81	42,02	47,06	49,83	53,34	587,48

Taulukko 27. Betonikanavajohtojen varrella olevien kaukolämpökaivojen kokonaislämpöhäviöt kuukausittain vuonna 2019 megawattitunneissa.

Tyyppi	Lukumäärä	Häviöt tammi-kuu [MWh]	Häviöt helmikuu [MWh]	Häviöt maaliskuu [MWh]	Häviöt huhtikuu [MWh]	Häviöt toukokuu [MWh]	Häviöt kesäkuu [MWh]	Häviöt heinäkuu [MWh]	Häviöt elokuu [MWh]	Häviöt syyskuu [MWh]	Häviöt lokakuu [MWh]	Häviöt marraskuu [MWh]	Häviöt joulukuu [MWh]	Häviöt vuodessa [MWh]
Emv32	1	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,37
Emv40	9	0,43	0,35	0,38	0,32	0,31	0,26	0,27	0,27	0,28	0,30	0,31	0,34	3,82
Emv50	24	1,44	1,16	1,25	1,07	1,02	0,86	0,90	0,89	0,92	0,99	1,04	1,12	12,66
Emv65	20	1,54	1,24	1,34	1,15	1,09	0,93	0,96	0,96	0,99	1,06	1,12	1,21	13,58
Emv80	20	1,83	1,47	1,58	1,36	1,29	1,10	1,14	1,13	1,17	1,25	1,32	1,43	16,09
Emv100	18	2,21	1,78	1,91	1,65	1,56	1,33	1,38	1,37	1,42	1,52	1,60	1,73	19,45
Emv125	17	2,71	2,18	2,34	2,02	1,91	1,63	1,69	1,68	1,74	1,86	1,96	2,12	23,82
Emv150	25	6,45	5,20	5,59	4,81	4,57	3,88	4,02	4,00	4,15	4,43	4,68	5,05	56,84
Emv200	85	30,84	24,87	26,72	22,99	21,83	18,54	19,22	19,13	19,83	21,17	22,35	24,12	271,60
Emv250	38	18,68	15,06	16,18	13,93	13,22	11,23	11,64	11,59	12,01	12,82	13,54	14,61	164,52
Emv300	71	54,78	44,17	47,45	40,84	38,77	32,93	34,14	33,98	35,22	37,59	39,69	42,83	482,40
Emv400	35	37,04	29,87	32,08	27,61	26,21	22,26	23,08	22,97	23,82	25,42	26,84	28,96	326,16
Emv500	20	29,55	23,83	25,60	22,03	20,92	17,76	18,42	18,33	19,00	20,28	21,41	23,11	260,27
Emv600	25	48,97	39,48	42,41	36,50	34,66	29,43	30,51	30,37	31,48	33,60	35,48	38,29	431,20
Yhteensä	408	236,51	190,72	204,87	176,33	167,40	142,16	147,39	146,71	152,08	162,31	171,37	184,94	2082,80

Taulukko 28. Omakäytön osuus kokonaislämpöhäviöistä vuonna 2020 megawattitunneissa.

Kuukausi	Voimalaitos,		Isolahti [MWh]	Vaskiluoto P3 [MWh]	Klemettilä [MWh]	Keskussai- raala [MWh]	Pitkämäki, glykoli [MWh]	Pitkämäki,Kat- tila [MWh]	Sepänkylä, kattila [MWh]	Yhteensä [MWh]
	Voimalaitos, lämpö+katti- lat [MWh]	energia- mittari [MWh]								
Tammikuu	3,68	119,13	5,97	11,58	5,16	5,16	12	14	4,377	181,057
Helmikuu	3,42	117,04	6,83	12,91	4,64	4,64	9	14	4,152	176,632
Maaliskuu	3,94	132,98	7,08	14,43	5,59	11,76	10	16	4,305	206,085
Huhtikuu	3,27	89,99	2,52	8,9	4,73	9,16	0	13	3,503	135,073
Toukokuu	1,77	56,7	3,68	9,18	3,93	4,85	4,898	14	2,543	101,551
Kesäkuu	2,38	11,55	1,21	8,41	4,11	5,75	0	13	2,144	48,554
Heinäkuu	2,6	13,33	0,03	6,55	4,32	5,36	0,001	0	2,693	34,884
Elokuu	2,63	10,7	0,73	8,24	4,3	6,22	0	8	2,665	43,485
Syyskuu	2,65	29,66	0,75	8,83	4,51	2,92	0,007	17	2,946	69,273
Lokakuu	2,486	56,44	0,63	9,39	3,59	4	0,087	17	2,317	95,94
Marraskuu	2,194	89,5	1,71	11,95	4,89	4,48	0	18	3,109	135,833
Joulukuu	2,97	126,58	5,99	13,18	5,22	12,54	1,766	20	2,946	191,192
Yhteensä	33,99	853,6	37,13	123,55	54,99	76,84	37,759	164	37,7	1419,559