

Joel Taipale

# KAUKOLÄMMÖN MENOVEDEN LÄMPÖTILAN ALENTAMINEN PALUUVEDellä

Opinnäytetyö

Tekniikan ammattikorkeakoulututkinto

Energiatekniikan koulutus

2022



**Kaakkois-Suomen  
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	Insinööri (AMK)
Tekijä/Tekijät	Joel Taipale
Työn nimi	Kaukolämmön menoveden lämpötilan alentaminen paluuedellä
Toimeksiantaja	Lappeenrannan Energiaverkot Oy
Vuosi	2022
Sivut	62 sivua, liitteitä 4 sivua
Työn ohjaaja(t)	Hannu Sarvelainen ja Rami Koivula

## TIIVISTELMÄ

Lämmönjohtumista tapahtuu aina kaukolämpöverkon siirtojohdoissa, kun pyritään siirtämään asiakkaalle riittävä määrä lämpöä. Kaukolämpöverkon lämpöhäviöt ovat suoraan verrannolliset ympäristön- ja kaukolämpöjohdossa virtaavan veden lämpötilaeroon. Nykyisillä asiakaslaitteiden mitoitusarvoilla on mahdotonta päästä tilanteeseen, jossa ympäristön ja menoveden lämpötilaeroa ei olisi. Lämpöhäviöt joudutaan kompensoimaan tuottamalla tai hankkimalla suurempi määrä lämpöä, kuin asiakkaat kuluttavat, mikä taas johtaa taloudellisiin menetyksiin. Tuotettaessa matalampilämpöistä menovettä sekoittamalla paluuvettä lämpöhäviöt pienenevät, mikä mahdollistaa veteen sidotun energian tehokkaamman käytön.

Tutkimuksen kannalta on huomattavaa menoveden lämpötilan alentaminen tietyllä kaukolämpöverkon alueella, eikä alentaminen koske koko kaukolämpöverkkoa. Ongelmaksi tutkimuksen kannalta muodostuu, kuinka paljon menoveden lämpötilaa voidaan aluekohtaisesti alentaa, miten todennettaviin arvoihin päästään ilman paikallisia mittauksia kaukolämpöverkossa ja investoitavan järjestelmän määrittäminen sekä sen kannattavuuden analysointi.

Tutkimuksen painopiste tiedonhaun osalta keskittyy olemassa olevien asiakaslaitteiden mittaustietoihin. Mittaustietojen perusteella johdetut tulokset on laadittu kirjallisuuteen ja aiempiin tutkimuksiin pohjautuen.

Menoveden lämpötilan alentamisella todetaan laskennallisten tulosten perusteella olevan mahdollisuus vähentää lämpöhäviöitä aluekohtaisesti. Tarvittavan lämpötilan menovedelle määrittää alueen kriittisin asiakas, jonka tehonriittävyys energiayhtiön tulee varmistaa. Tarvittava teho kiinteistöjen lämmönsiirtimeen saadaan tuotettua matalalämpöisemmällä menovedellä, kun virtausnopeutta kasvatetaan, mistä seuraa kuitenkin paine-eron kasvamista siirtojohdoissa. Järjestelmään tulee kytkeä meno- ja paluueden sekoittamiseksi sekä lisääntyvän paine-eron kompensoimiseksi taajuusmuuttajalla varustettu sekoituspumppu tarvittavin lämpötilamittauksin ja lisäohjauksin. Tarvittavat investoinnit voidaan kattaa jo ennen kaukolämpöverkon elinajan päättymistä lämpöhäviöiden vähentymisestä johtuvilla säästöillä.

**Asiasanat:** kaukolämpö, lämpöhäviö, jäähtymä, teho, virtausnopeus

Degree title	Bachelor of Engineering
Author (authors)	Joel Taipale
Thesis title	Lowering the district heating flow temperature with return water
Commissioned by	Lappeenrannan Energiaverkot Oy
Time	2022
Pages	62 pages, 4 pages of appendices
Supervisors	Hannu Sarvelainen and Rami Koivula

## ABSTRACT

Heat conduction always occurs in the transmission lines of the district heating network when an attempt is made to transfer a sufficient amount of heat to the customer. The heat losses in the district heating network are directly proportional to the temperature difference between the water flowing in the ambient and district heating pipelines. With the current design values of customer equipment, it is impossible to achieve a situation where there would not be a temperature difference between the environment and the flow. Heat losses have to be compensated by producing or acquiring more heat for customers to consume, leading to financial losses. When producing lower temperature flow water by mixing it with return water, the heat loss is reduced, which enables a more efficient use of the energy bound to the water.

From the point of view of this study, it is significant to reduce the flow temperature in a certain area of the district heating network so that the reduction does not apply to the entire district heating network. The objective of the study was to define how much the flow temperature can be reduced by region and how verifiable values can be reached without local measurements in the district heating network. In addition, the aim was to determine a system in which the commissioner could invest and analyse the profitability of this system.

The focus of the thesis study with respect to data retrieval was on the measurement data obtained from existing customer devices. The results derived from the measurement data have been compiled based on literature sources and previous studies.

Based on this study, by lowering the flow temperature, it is possible to reduce heat losses by region. The required temperature for the flow water is determined by the most critical customer in the area whose power adequacy must be ensured by the energy company. The required power for the heat exchangers in the properties can be produced with a lower temperature when the flow rate is increased. This however, results in an increase in the pressure difference in the transmission lines. In order to mix the flow and return water and to compensate for the increasing pressure difference, a mixing pump with a frequency converter with the necessary temperature measurements and additional controls must be connected to the system. The necessary investments can be covered even before the end of the district heating network's service life with savings due to the reduction in heat losses.

**Keywords:** district heating, heat loss, cooling, power, flow rate

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	KAUKOLÄMPÖ.....	7
2.1	Kaukolämpöverkko .....	7
2.2	Kaukolämmön tuotanto .....	10
2.3	Kaukolämmön kulutuspisteet.....	13
2.4	Lämpöhäviöt kaukolämpöverkossa.....	16
3	KAUKOLÄMPÖJOHDOT .....	21
3.1	Kiinnivaahdotetut johdot .....	22
3.1.1	Yksiputkijohto 2Mpuk .....	23
3.1.2	Kaksijohtoputki Mpuk .....	23
3.2	Betonikanavajohdot .....	24
3.3	Muoviputkijohdot.....	25
3.4	Muovisuojakuorijohto liikkuvien teräsputkin .....	25
4	KAUKOLÄMMÖN MENOVEDEN LÄMPÖTILAN ALENTAMINEN PALUUEDELLÄ	26
4.1	Vaikutus lämpöhäviöihin kaukolämpöverkossa .....	27
4.2	Muut vaikutukset kaukolämpöverkossa .....	27
4.3	Vaikutus kulutuspisteen laitteistossa .....	29
4.4	Menoveden lämpötilan alentamisen mahdollistavia järjestelmiä.....	31
4.4.1	Lämpötilan säätö tuotantolaitoksella .....	31
4.4.2	Paluueden sekoittaminen menoveteen .....	31
5	ALUEEN KARTOITUS JA VALINTA.....	32
5.1	Alueen valintaan vaikuttavat tekijät.....	32
5.2	Valittu alue.....	35
6	LASKELMAT MENOVEDEN LÄMPÖTILAN ALENTAMISESTA .....	37
6.1	Lämmitystarve ja ulkolämpötilaprofiili .....	37
6.2	Meno- ja paluueden lämpötila .....	38
6.3	Tehon riittävyys mitoitustilanteessa .....	40

6.4	Uusi meno- ja paluuveden lämpötila.....	41
6.5	Painehäviöt.....	42
6.6	Lämpöhäviöt.....	45
7	SEKOITUSPUMPPUJÄRJESTELMÄN INVESTOINTI.....	48
7.1	Valittu laskentamalli investoinnin määrittämiseksi.....	48
7.1.1	Takaisinmaksuaika.....	49
7.1.2	Sisäinen korkokanta IRR.....	49
7.1.3	Herkkyysanalyysi.....	50
7.2	Investointilaskelma.....	50
8	JOHTOPÄÄTÖS JA POHDINTA.....	54
9	YHTEENVETO.....	55
	LÄHTEET.....	56
	KUVALUETTELO.....	59
	TAULUKKOLUETTELO.....	62

## LIITTEET

Liite 1. Lämpöhäviöt (ennen) johtotyypeittäin vuonna 2021 (-30 °C...-5 °C)

Liite 2. Lämpöhäviöt (ennen) johtotyypeittäin vuonna 2021 (-5 °C...+15 °C)

Liite 3. Lämpöhäviöt (jälkeen) johtotyypeittäin vuonna 2021 (-30 °C...-5 °C)

Liite 4. Lämpöhäviöt (jälkeen) johtotyypeittäin vuonna 2021 (-5 °C...+15 °C)

## 1 JOHDANTO

Kaukolämpöverkkojen mitoituslämpötiloja lasketaan nykyisin energiatehokkuuden parantamisen ja lämpötilaltaan matalampien tuotantomuotojen mahdollistamiseksi. Kaukolämpöverkot ovat suuria kokonaisuuksia, jotka käsittävät vanhaa sekä uudempaa teknologiaa kaukolämmön jakelijan kuin myös asiakkaan osalta. Kaukolämpöverkon osalle asiakkaista tulee tarpeettoman kuumaa vettä lämmönsiirtimiin, joka aiheuttaa turhia lämpöhäviöitä kaukolämpöverkossa. Lämpöhäviöt aiheuttavat kaukolämmön jakelijoille turhia kustannuksia, kun hankittua / tuotettua lämpöenergiaa ei voida kokonaisuudessaan hyödyntää. Lappeenrannan Energiaverkot Oy halusi selvityksen kaukolämpöverkkoon asennettavan menoveden lämpötilaa alentavan järjestelmän investoinnin kannattavuudesta. Tutkimuksen tuloksena syntyi malli, jonka perusteella olisi mahdollista selvittää tulevaisuudessa matalalämpöverkon asennusmahdollisuuksia, kun kaukolämpöverkkoon ei ole integroitu lämpötilan-, paineen ja virtauksen mittauksia. Mallin avulla tulevaisuudessa kartoitettavat alueet matalalämpöverkolle olisi helposti laskettavissa.

Opinnäytetyön keskeisimpänä tavoitteena on todentaa kaukolämpöverkkoon asennettavan menoveden lämpötilaa laskevan järjestelmän vaikutus lämpöhäviöihin ja käytettävyyteen. Tavoitellun järjestelmän avulla menoveden lämpötilaa alennetaan sekoittamalla paluuvettä menoveden sekaan oikean lämpötilan saavuttamiseksi. Järjestelmän toimivuutta tarkastellaan kaukolämpöverkon ennalta valitussa osassa, jolloin kyseessä ei ole koko kaukolämpöverkon menoveden lämpötilan optimointi. Laskennan perusteella tulee todentaa nykyiset lämpötilan ja virtauksen arvot, joiden perusteella voidaan mitoitaa uutta menolämpötilaa valitulle alueelle. Kannattavuusanalyysi järjestelmän käyttöönotolle valitulla alueella määrittää tutkimustuloksen.

Lappeenrannan Energia Oy on energia-alan konserniyhtiö, jonka omistaa kokonaisuudessaan Lappeenrannan kaupunki. Emoyhtiöllä on kaksi täysin omaa tytäryhtiötä: Lappeenrannan Lämpövoima Oy ja Lappeenrannan Energiaverkot Oy. Kaikilla edellä mainituista yhtiöistä on omat toimialueensa, jotka käsittävät tiiviistä yhteistyötä toistensa kanssa. Lappeenrannan Energia Oy:n liiketoiminta käsittää kaukolämmön, maakaasun ja höyryn hankinnan ja myynnin.

Sähkön myynti on siirtynyt osakkuusyhtiö Väre Oy:lle. Lappeenrannan Lämpövoima Oy tuottaa kaukolämpöä emoyhtiölle ja sähköä kaasuturbiineilla varoimakapasiteetiksi kantaverkkoon. Lämpövoima tuottaa lappeenrantalaisten puhtaan käyttöveden ja vastaa jätevesien käsittelystä samalla alueella. Lappeenrannan Energiaverkot Oy vastaa nimensä mukaisesti energian ja käyttöveden siirtämisestä asiakkaalle. Energiaverkot vastaavat myös jäteveden siirtämisestä jätevedenpuhdistamolle ja toimivat käyttöveden myyjänä. Energiaverkot omistaa, käyttää, rakentaa ja ylläpitää vesi-, jätevesi-, sähkö-, maa-kaasu- ja kaukolämpöverkkoja. Energiamuotojen jakelusta vain sähköä toimitetaan myös Lappeenrannan ulkopuolelle.

## **2 KAUKOLÄMPÖ**

Kaukolämpö on keskitettyä lämmöntuotantoa ja julkista jakelua asiakkaiden kulutuspisteisiin. Kaukolämpöä kuluttajat käyttävät rakennusten ja käyttöveden lämmitykseen ja sen siirtoaineena on vesi. Lämmöntuotantoa tapahtuu myös aluekohtaisesti niin, että lämmöntuottaja ottaa tuotetun lämmön vain omaan käyttöönsä, ilman erillistä liiketoimintaa. (Koskelainen ym. 2006, 25.)

Kaukolämmityksen historia on saanut alkunsa 1800-luvun loppupuolella Saksassa ja Yhdysvalloissa. Ensimmäinen kaukolämpöjärjestelmä valmistui Suomeen vuonna 1940. Ensimmäiset ideoinnit sähköntuotannon lauhdelämmön hyödyntämisestä mahdollistivat 1950-luvulla suurien kaukolämpöjärjestelmien investoinnit Suomessa. (Koskelainen ym. 2006, 34.)

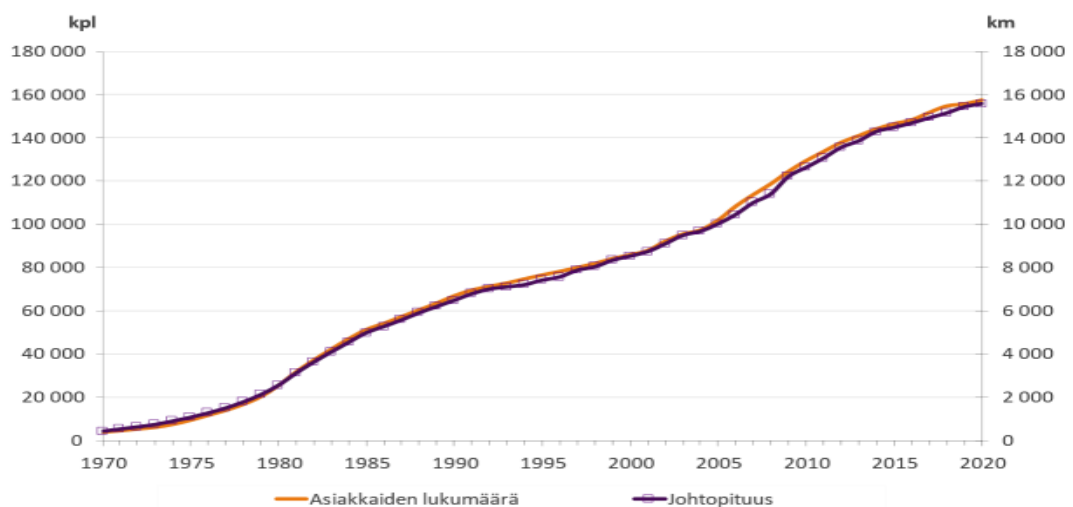
Suomessa käytössä oleva vesikaukolämpöjärjestelmä muodostuu lämpöä tuottavista laitoksista, kaukolämpöverkosta (kaukolämpöjohdot ja niiden erilliset osat) ja asiakkaan laitteistoista lämmön vastaanottamiseen. Energiateollisuus ry:n mukaan vuonna 2020 kaukolämmön markkinaosuus oli 45 % suomalaisten asuin- ja palvelurakennusten lämmitysmuotojen vertailussa (Energiateollisuus ry 2022, 17).

### **2.1 Kaukolämpöverkko**

Kaukolämpöverkon tehtävänä on siirtää lämmitetty vesi tuotantolaitokselta kuluttajalle hyödynnettäväksi menoputkella ja palauttaa jäähtynyt vesi paluuputkella takaisin tuotantolaitoksen lämmönsiirtimiin lämmitettäväksi. Suomessa

on käytössä epäsuorakytkentä, jossa rakennusten lämmityskiertoveden ja käyttöveden lämmitys tapahtuu erillisissä lämmönsiirtimissä, eikä kaukolämpövesi pääse kiertämään rakennusten omassa lämmitysverkossa. Suomessa käytetään kaksiputkijärjestelmää, jossa kaukolämpöverkon menoveden lämpötila on tyypillisesti 65–115 °C välillä ja paluueden 40–60 °C välillä. Tuotantolaitoksella säädetään kaukolämpöverkon menoveden lämpötila ulkolämpötilan mukaan vastaamaan asiakkaiden tarvetta. Kaukolämpöverkossa tulee olla riittävä paine, jolla vältetään veden höyrystyminen sekä estetään paineen romahtaminen verkoston ja kulutuskohteiden painehäviöiden vaikutuksesta. Riittävä paine-ero tulee myös taata verkoston kaukaisimpaan kriittiseen paikkaan asiakkaalle lämmönsiirtolaitteiden toimimiseksi. Suosituksen T1 mukaisesti asiakkaalle pitää taata vähimmäispainero 60 kPa (Energiateollisuus ry 2021, 5). Paineensäätö kaukolämpöverkossa tapahtuu tuotantolaitoksen pääkiertovesipumpuilla ja verkoston paineenkorotuspumpuilla.

Kaukolämmön asiakasmäärät ovat jatkuvasti olleet kasvussa, mikä on johtanut tarpeeseen kasvattaa kaukolämpöverkostoa (kuva 1). Suomessa kaukolämmön kulutus oli Energiateollisuus ry:n mukaan 30 100 GWh vuonna 2020, jakautuen 157 300 asiakkaan kesken. Kaukolämpöverkostoa Suomeen oli rakennettu vuoden 2020 loppuun mennessä 15 570 kilometriä. (Energiateollisuus ry 2022, 1.)



Kuva 1. Asiakasmäärien ja johtopituuksien kehitys vuosina 1970—2020 (Energiateollisuus ry 2022, 5)



Kaukolämpöverkkoon siirretty teho määräytyy asiakkaiden tehontarpeen mukaan, joka vaihtelee kuormitusten välillä. Erilaiset kuormitukset voidaan yhdistää toisiinsa todellisiin mittauksiin perustuvan kulutuskäyttäytymisen mukaan, kuten tässä tutkimuksessa, tai risteilyn avulla. Kulutusvaihtelussa otetaan huomioon kaikki tehoon vaikuttavat tekijät, joita ovat ulkolämpötila, vuorokauden aika, viikonpäivä ja satunnaisvaihtelut, kuten lämpimän käyttöveden kulutusjaksot. Asiakkaiden kulutushuippujen eriaikaisuuden vaikutuksesta jakeluverkon tehontarpeen vaihtelut tasaantuvat. Satunnaisvaihtelut tasaantuvat sen mukaan, mitä suurempi määrä kulutuskohteita jakeluverkko käsittää. Asiakkaiden tehontarpeiden summa on huomattavasti suurempi kuin alueellisessa kaukolämmön siirtojohtossa suurin siirtotehon tarve. Edellisen suhdetta kutsutaan risteilykertoimeksi eli samanaikaisuuskertoimeksi. Risteilykerroin määritetään yhtälön 1 mukaisesti. (Koskelainen ym. 2006, 44–45.)

$$r = \frac{\sum_{i=1}^m \phi_i(t_{max})}{\sum_{i=1}^m \phi_{N,i}} \quad (1)$$

jossa	$r$	risteilykerroin	[-]
	$i$	asiakkaan ryhmä tai indeksi	[-]
	$m$	asiakkaiden määrä	[kpl]
	$\phi_i(t_{max})$	mitattu tehontarve huipputehontarpeen hetkellä	[W]
	$\phi_{N,i}$	nimellistehontarve (=mitoitusteho)	[W]

Tehontarpeen jakauma voidaan määrittää vaihtelukäyrän avulla, joka kuvastaa lyhytjaksoista vaihtelua huipputehontarpeessa. Vaihtelujakauman avulla voidaan muodostaa tehontarpeen keskiarvo yhtälöllä 2.

$$\bar{\phi} = \frac{\sum_{i=1}^n \phi_t}{n} \quad (2)$$

ja varianssi yhtälöllä 3.

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\phi_t - \bar{\phi})^2}{n} \quad (3)$$

Toisistaan riippumattomat vaihtelujakaumat muodostavat yhteen laskettaessa yhteisen vaihtelun keskiarvon yhtälön 4 mukaisesti.

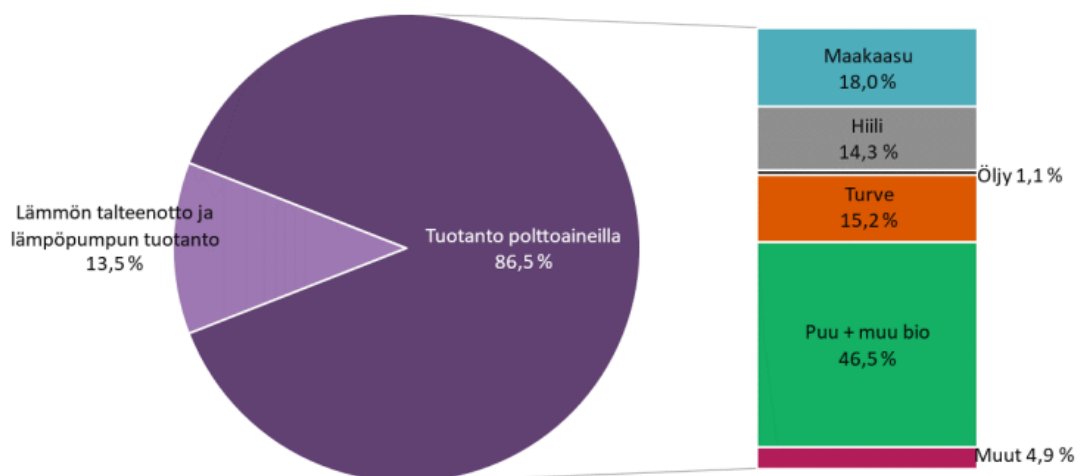
$$\overline{\phi_m} = \sum_{i=1}^m \overline{\phi_i} \quad (4)$$

ja varianssi yhtälöllä 5.

$$\sigma_m^2 = \sum_{i=1}^m \sigma_i^2 \quad (5)$$

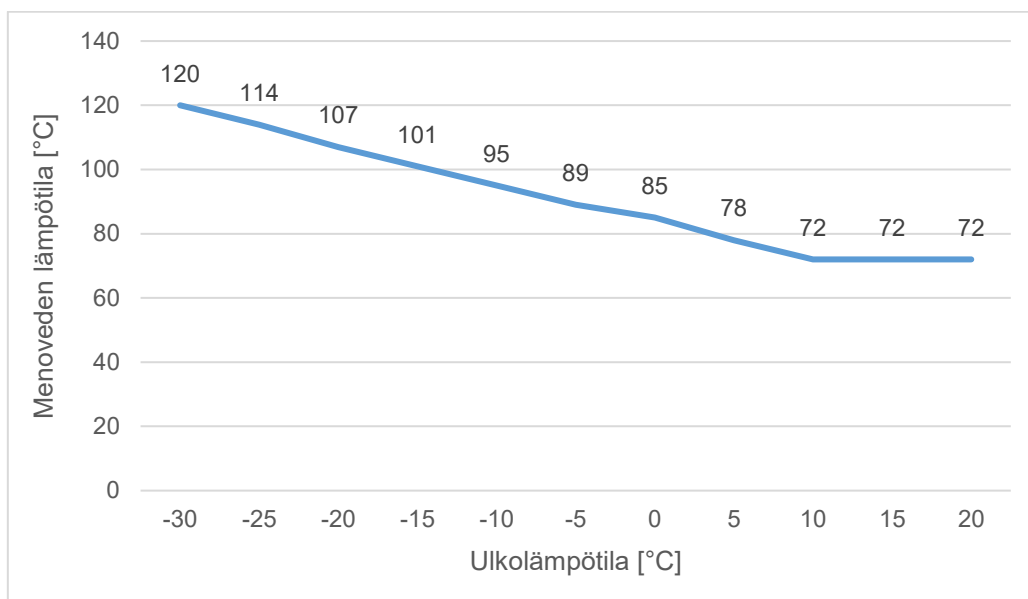
## 2.2 Kaukolämmön tuotanto

Kaukolämpöä tuotetaan sähkön ja lämmön yhteistuotantona ja vain lämpöä tuottavissa lämpölaitoksissa sekä lämpökeskuksissa. Teollisuuden hukkalämpöä esim. savukaasujen ja jätevesien lämpöä hyödynnetään myös useissa kaukolämpöverkoissa. Lämpöpumput ovat yleistyneet osana kaukolämmön tuotantoa, jolloin pienissä kaukolämpöverkoissa pyritään korvaamaan lämpölaitoksissa polttoaineilla tuotettua lämpöä ja keskisuurissa kaukolämpöverkoissa toteuttamaan kaukolämpöjärjestelmän tuotantokustannusoptimointia. Energiategollisuus on esittänyt kuvan 2 mukaan, kuinka lämmöntuotanto oli jakautunut vuonna 2020 eri tuotantomuotojen välillä.



Kuva 2. Kaukolämmön tuotannon jakaantuminen vuonna 2020 (Energiategollisuus ry 2022, 3)

Menoveden lämpötilaa kaukolämpöverkkoon säädetään polttoaineen tehonsäädöllä perustuen vallitsevaan ulkoilman lämpötilaan. Normaaleissa tilanteissa tuotantolaitokselta lähtevä ylin menoveden lämpötila on 120 °C kuvan 3 mukaisesti. Ylärajan menoveden lämpötilalle asettaa kaukolämpöverkoston suunnittelulämpötila. Menoveden alin lämpötila määräytyy käyttöveden lämmönsiirtimien mitoitusarvon 70 °C mukaan.



Kuva 3. Menolämpötilan ohjaukikäyrä ulkolämpötilan funktiona (Kylliäinen ym. 2019)

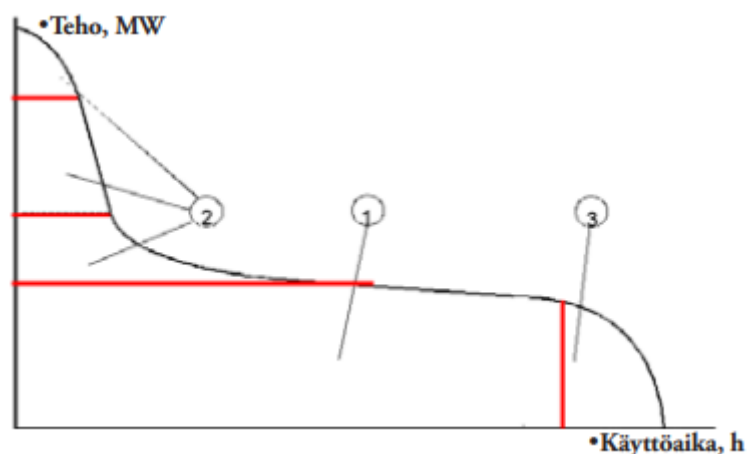
Kaukolämpöverkosta analysoidaan kierto- ja lisäveden laatua sekä toteutetaan vedenkäsittelyä, jossa kaukolämpövedestä poistetaan happi ja kaasut sekä säädetään PH-arvoa korroosion estämiseksi. Samalla puhdistetaan muut epäpuhtaudet kerrostuminen estämiseksi. Kaukolämpövesi värjätään väriaineen (Pyranin) avulla vihertäväksi putkisto- ja lämmönsiirrinvuotojen paikallistamiseksi. Kulutuskohteen käyttöveden värjäytyminen vihertäväksi kertoo kaukolämpöveden sekoittuvan käyttöveteen.

Erikokoisilla tuotantolaitoksilla pyritään optimoimaan lämmöntuotantoa huomioiden tehontarve asiakkailta, kaukolämpöverkon siirtokapasiteetti sekä sähkön- ja polttoaineiden hinnat.

## Yhteistuotanto CHP

Yhteistuotannossa tuotetaan samassa prosessissa sähköä ja lämpöä. Yhteistuotantolaitoksen suurena etuna pidetään korkeaa kokonaishyötysuhdetta, joka voi olla 90 % tai korkeampi. Vastaavasti laitoksessa, jossa tuotetaan pelkkää sähköä ja turbiinista tuleva höyry tai kaasu lauhdutetaan ilman lämpöenergian hyötykäyttöä, jää hyötysuhde 45 %:n lukemille. Sähköä ja lämpöä voidaan tuottaa samanaikaisesti höyryvoimalaitoksessa, kaasuturbiinilaitoksessa, moottorivoimalaitoksessa tai höyryn ja kaasuturbiinin yhdistelmälaitoksessa kombivoimalaitoksessa. Yhteistuotantolaitokset soveltuvat kaukolämpöjärjestelmässä jatkuvaan käyttöön perustehon tuottamiseksi edullisten käyttökustannusten takia. Yhteistuotannon osuus vuoden 2020 kaukolämmön hankinnasta oli 60,2 % (Energiateollisuus ry 2022, 8).

Lähtökohtaisesti yhteistuotantolaitos rakennetaan vastaamaan noin 50 % tarvittavasta lämmöntarpeen huipputehosta ja tämän ylittävä osuus hoidetaan pääasiassa lämpökeskuksilla kuvan 4 mukaisesti. Erillistuotannon osuus ilmenee huipunkäyttöajasta, joka on tyypillisesti noin 10–15 %. (Energiateollisuus ry 2006, 42.)



Kuva 4. Periaatekuva tuotantolaitosten käytöstä pisyvyyskäyrän mukaan (Mäkelä ym. 2015, 31)

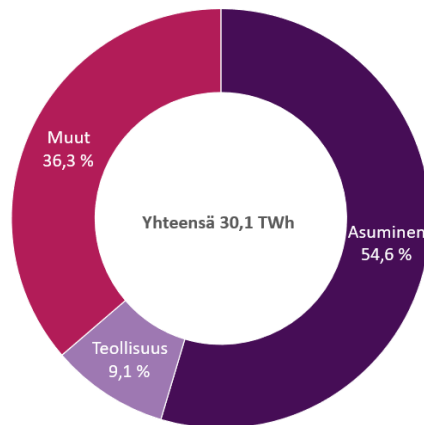
1. Lämmitysvoimalaitos (peruskuorma)
2. Lämpökeskukset (huippukuorma)
3. Lämpökeskukset (kesäaika)

## Lämpökeskukset

Lämpökeskukset eivät tuota sähköä ja ovat tarkoitettuja vain lämmöntuotantoon. Suurissa kaukolämpöjärjestelmissä lämpökeskuksilla ei ole tarkoitus tuottaa järjestelmään jatkuvasti lämpöä, missä perustehon tuottaa lämmitysvoimalaitos. Lämpökeskukset ovat nopeakäynnisteisiä ja tuottavat kaukolämpöjärjestelmään lämpöä huippukuorman aikaan ja ovat varatehon lähteinä. Kesäisin lämpökeskuksia käytetään erityisesti peruskuormalaitosten huoltojen ja tarkastusten aikana.

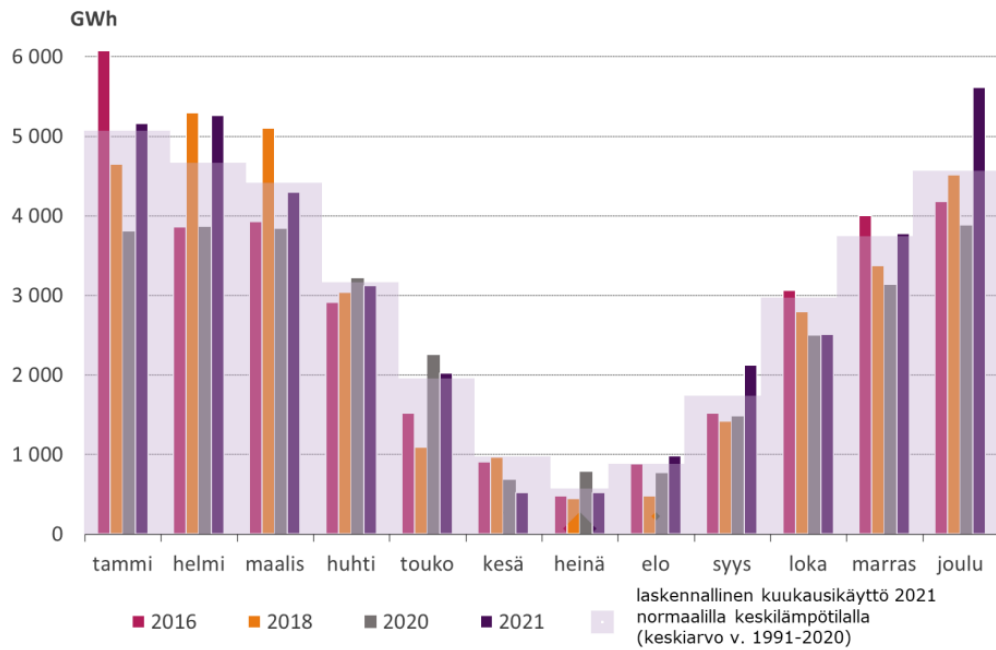
### 2.3 Kaukolämmön kulutuspisteet

Kaukolämmön kulutuspisteet jakautuvat kolmeen eri sektoriin kuvan 5 mukaisesti, jossa asuinrakennukset edustavat reilua puolta koko kaukolämmön kulutuksesta vuonna 2020.



Kuva 5. Kaukolämmön käytön jakaantuminen vuonna 2020 (Energiateollisuus ry 2022, 23)

Ulkoilman lämpötilamuutoksien seurauksena lämmön tarve vaihtelee suuresti verraten eri vuodenaikoja kuvan 6 mukaisesti. Todellisen kaukolämmön tarpeen kulutuspisteessä määrittää rakennuksen ja käyttöveden lämmitys. Kesällä rakennusten lämmitystarvetta ei ole ja kaukolämpöä tarvitaan vain käyttöveden lämmitykseen, joka on noin 10 % liittymistehosta.



Kuva 6. Energiankulutuksen vaihtelut vuosittain (Energiateollisuus ry 2022, 3)

Uudiskohteessa lämmitystehon tarve lasketaan kulutuspiisteelle yleensä tilakohtaisesti, jolloin laskennan perusteella saadun tarvittavan lämmitystehon avulla voidaan mitoittaa lämmityslaitteet tiloittain. Rakennuksen lämmitystehon tarpeeseen vaikuttavat rakenteiden johtumislämpöhäviöt, ilmavuodot ja ilmanvaihto. Lämmitystehontarpeen mitoittamiseen käytetään laskennassa säävyöhykkeisiin perustuvaa karttaa (kuva 7), joissa mitoittava ulkoilman lämpötila vaihtelee aluekohtaisesti (taulukko 1).



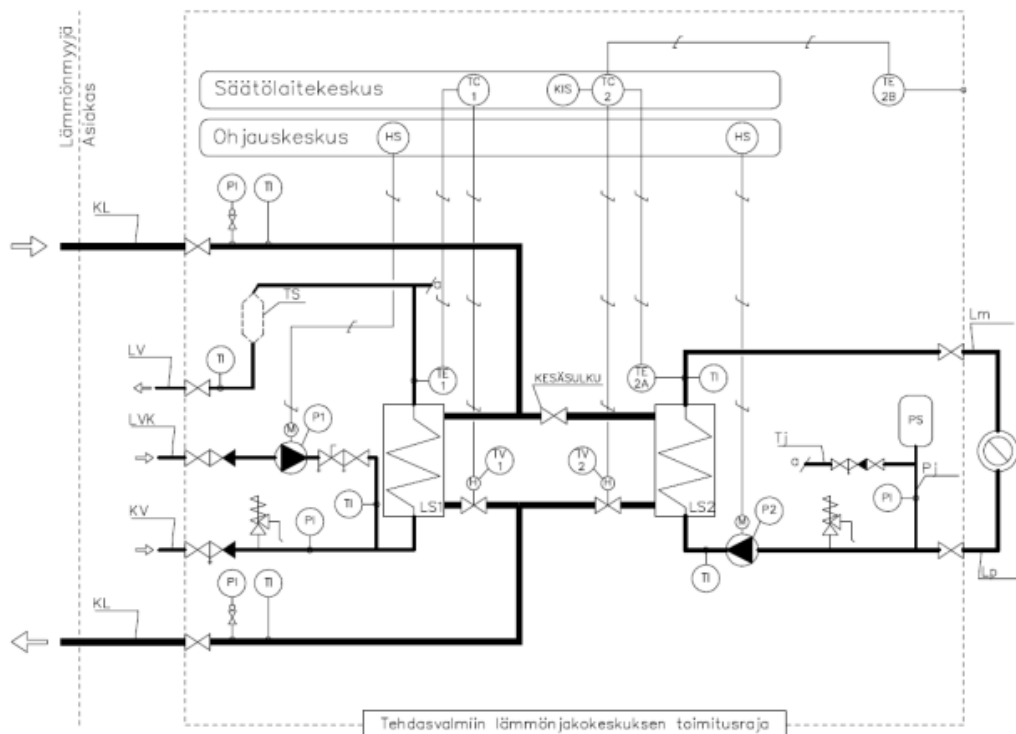
Kuva 7. Säävyöhykkeet (YM 1010/2017, liite 1)

Taulukko 1. Sävyöhykkeet (YM 1010/2017, liite 1)

Mitoittavat ulkoilman lämpötilat eri sävyöhykkeillä	
sävyöhyke	mitoitettava ulkoilman lämpötila
[-]	[°C]
1	-26
2	-29
3	-32
4	-38

Lämmitysteho rakennukselle saadaan laskemalla samanaikaiset lämmitystehontarpeet yhteen Ympäristöministeriön asetuksen mukaisesti (YM ohjeistus 2017). Valmiiden jo käytössä olleiden rakennusten lämmitystehontarve laskeaan kulutustietojen perusteella. Kiinteistöön tuotaessa lämpöä kaukolämpöverkosta, on asennettava etäluettava lämpöenergiamittari (Energiatehokkuuslaki 30.12.2014/1429). Kulutustietoihin perustuvassa mitoituksessa on tärkeää huomioida, onko lämmityslaitteita aiemmin käytetty oikealla tavalla.

Rakennuksen ja käyttöveden lämmitys toteutetaan käyttämällä kahta erillistä lämmönsiirintä kuvan 8 mukaisesti. Ensiöpuolella lämmitysjärjestelmässä virtaa kaukolämpövesi ja toisiopuolella kiinteistön oma lämmitysvesi / käyttövesi.



Kuva 8. Kaukolämmön pientalokytkentä (Energiateollisuus ry 2021, 34)

Lämmönsiirtimet mitoitetaan vastaamaan lämmitystehontarvetta. Mitoituksessa on pyrittävä mahdollisimman korkeaan kaukolämpöveden jäähtymään kaikissa käyttöolosuhteissa. Rakennuksen lämmityksen lämmönsiirtimet mitoitetaan korkeimman lämmitystehontarpeen perustuvilla lämpötiloilla. Ympäristöministeriön säädös käyttöveden alimmasta lämpötilasta 55 °C, asettaa rajan arvonnaukaukolämmön menoveden alimmalle lämpötilalle (YM asetus 1047/2017). Käyttöveden lämmönsiirrin mitoitetaan määräyksen K1/2021 mukaan siten, että mitoitusvirtaamalla saatava käyttöveden lämpötila on vähintään 58 °C, jolloin lämmönsiirtimeen asteisuuden perusteella menoveden lämpötilan tulisi olla 70 °C (Energiateollisuus ry 2021, 13).

## 2.4 Lämpöhäviöt kaukolämpöverkossa

Suurin kustannuserä lämmön jakelukustannuksista muodostuu kaukolämpöverkon lämpöhäviöiden kustannuksista. Pienissä kaukolämpöverkoissa (putkikoot keskimäärin DN 50) lämpöhäviöt ovat keskimäärin suuruusluokkaa 10–20 % ja suurissa kaukolämpöverkoissa (putkikoot keskimäärin DN 150) 4–10 %. Pienten kaukolämpöverkkojen korkeammat lämpöhäviöt johtuvat suuremmasta vaippapinta-alasta verrattain siirtokykyyn. Kaukolämpöjohdoista lämpöä siirtyy maaperään sekä menoputkesta paluuputkeen, jota ei lasketa yleensä lämpöhäviöksi, koska lämpö hyödynnetään tuotantolaitoksella. (Energiateollisuus ry 2006, 203.)

Lämpöhäviöihin kaukolämpöverkossa on useasti sidoksissa useampi eri tekijä, joista tyypillisimpiä mainittu seuraavassa:

- käyttölämpötila verkossa liian korkea
- lämpöeristys liian ohut putkistossa ja eristyksen huono laatu
- lämmönjohtavuus vanhassa eristeessä liian suuri
- kaukolämpökaivoissa puutteellinen eristys
- ulkopuoliset vuotovedet jäähdyttäjänä
- maaperän suuri lämmönjohtavuus
- peitesyvyys putkistolle liian matala
- putkistojen ylirajoitus, josta huono käyttöaste
- tulkinnanvaraiset häviöt, kuten mittausepätaarkkuudet
- huono jäähtymä asiakkaiden lämmönsiirtimissä (Energiateollisuus ry 2006, 209.)

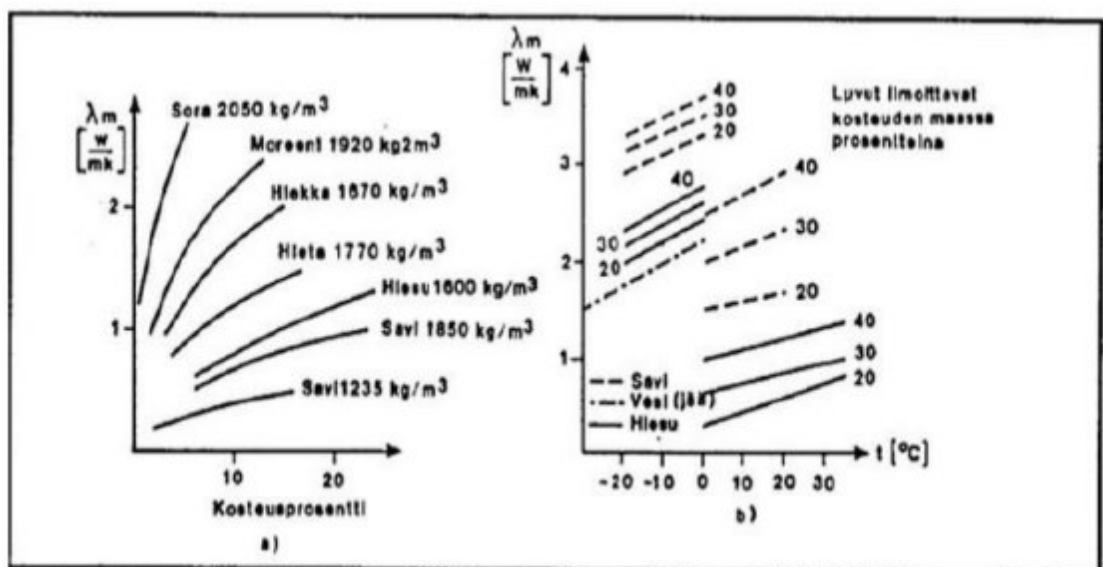


Eristyksen lämmönjohtavuus vaihtelee käytetyn eristeaineen mukaan. Lämmönjohtavuus  $\lambda_i$  eristeelle on riippuvainen käyttölämpötilasta, kosteudesta, eristeen tilavuuspainosta ja eristyksen iästä. Eristyksen lämmönjohtavuus voidaan muodostaa yhtälön 6 mukaisesti.

$$\lambda_i = \lambda_{60} + \lambda_{ikä} + \lambda_{kost} + \lambda_{konv} \quad (6)$$

jossa	$\lambda_{60}$	Uusi eriste keskimääräinen lämmönjohtavuus 60 °C	[W/(mK)]
	$\lambda_{ikä}$	Lämmönjohtavuuden muutos eristeen iän vaikutuksesta	[W/(mK)]
	$\lambda_{kost}$	Lämmönjohtavuuden muutos kosteuden vaikutuksesta	[W/(mK)]
	$\lambda_{konv}$	Lämmönjohtavuuden nousu hallitsemattomien konvektiovirtausten lisääntymisestä	[W/(mK)]

Maaperän lämmönjohtavuus  $\lambda_g$  vaihtelee maa-aineksen, kosteuden ja lämpötilan mukaan. Maaperän lämmönjohtavuus on 0,5–3,5 W/(mK), joka on kuvattu tarkemmin kuvassa 9 ja sen osissa (a) ja (b). (Koskelainen ym. 2006, 203.)



Kuva 9. Maan lämmönjohtavuuden vaihtelu (Koskelainen ym. 2006, 203)

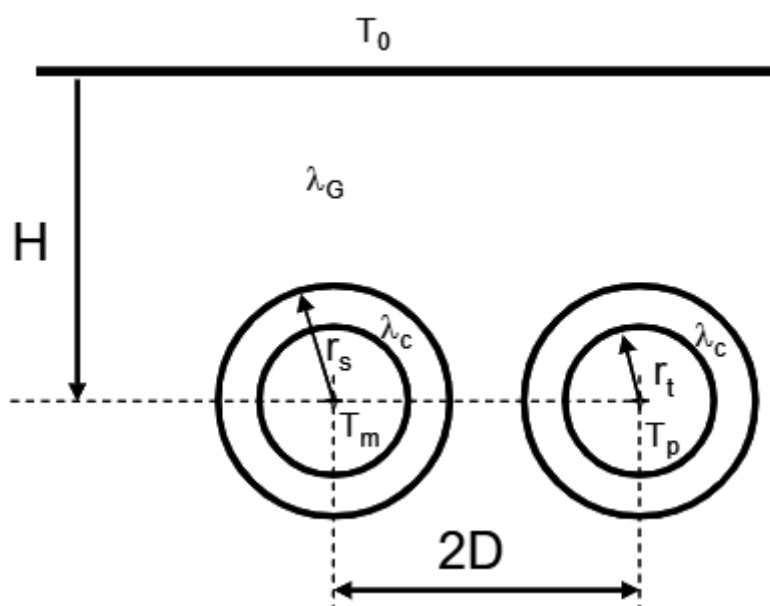
Käyttämättömän kiinnivaahdotetun elementin lämmönjohtavuuden tulee olla suosituksen L1 mukaisesti  $<0,029 \text{ W/(mK)}$  (Energiateollisuus ry 2020, 14).

Lämpöhäviöiden selvittämiseen kaukolämpöjohdoissa on kehitetty useita analyttisiä ratkaisuja. Laskentamenetelmänä käytetään tässä tutkimuksessa ruotsalaisen Chalmers teknillisen yliopiston laatimaa menetelmää. (Koskelainen ym. 2009, 13.)

Kokonaislämpöhäviö pituutta kohti voidaan määrittää eri komponenttien avulla (kuva 10). Kokonaislämpöhäviöt kaukolämpöjohdon pituutta kohden saadaan määritettyä yhtälöllä 7.

$$\phi_{tot} = \phi_m + \phi_p \quad (7)$$

jossa	$\phi_{tot}$	kokonaislämpöhäviö pituutta kohti	[W/m]
	$\phi_m$	menojohdon lämpöhäviö pituutta kohti	[W/m]
	$\phi_p$	paluujohdon lämpöhäviö pituutta kohti	[W/m]



Kuva 10. Yksiputkisten kaukolämpöjohtojen lämpöhäviöiden määrittäminen maahan upotettuina (Koskelainen ym. 2009, 13)

Lämpöhäviöt kaukolämpöjohdosta koostuvat ympäristöön johtuvasta komponentista  $\phi_s$  ja johtojen välisestä komponentista  $\phi_a$ . Näiden komponenttien avulla lämpöhäviöt voidaan määrittää meno- ja paluujohdoille yhtälöiden 8 ja 9 avulla.

$$\phi_m = \phi_s + \phi_a \quad (8)$$

$$\phi_p = \phi_s - \phi_a \quad (9)$$

Lämpöhäviöt ympäristöön määritetään yhtälön 10 mukaisesti.

$$\phi_s = \left( \frac{T_m + T_p}{2} - T_0 \right) 2\pi\lambda_g h_s \quad (10)$$

jossa	$\phi_s$	Lämpöhäviöt ympäristöön	[W/m]
	$T_m$	menolämpötila	[°C]
	$T_p$	paluu lämpötila	[°C]
	$T_0$	ulkoilman lämpötila	[°C]
	$\lambda_g$	maaperän lämmönjohtavuus	[W/m°C]
	$h_s$	lämmönsiirtokerroin	[-]

Lämpövirta  $\phi_a$  meno- paluujohdon välillä voidaan määrittää lämmönsiirtokertoimen  $h_a$  avulla yhtälö 11.

$$\phi_a = \left( \frac{T_m - T_p}{2} \right) 2\pi\lambda_g h_a \quad (11)$$

Lämmönsiirtokertoimet  $h_s$  ja  $h_a$  määritetään maaperän lämpövastuksen  $R_g$ , putkien keskinäisen lämpövastuksen  $R_m$ , kaukolämpöjohtojen eristeen, vaipan lämpövastuksen  $R_i$ , upotussyvyyden  $H$  ja johtojen keskipisteiden etäisyyden  $2D$  avulla, käyttäen yhtälöitä 12 ja 13.

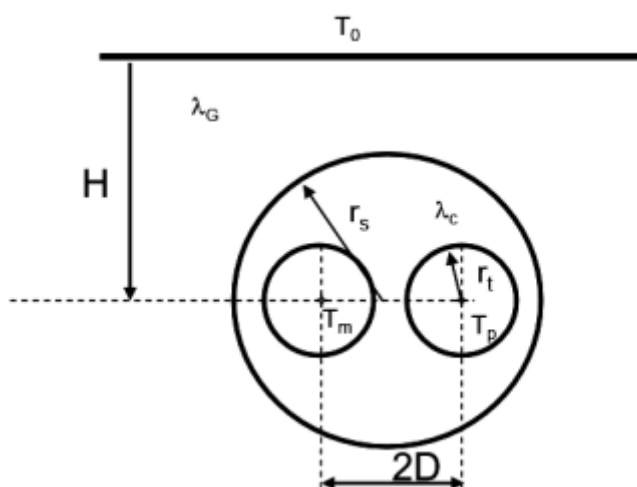
$$\frac{1}{h_s} = \ln\left(\frac{2H}{r_s}\right) + \beta + \ln\left(\sqrt{1 + \left(\frac{H}{D}\right)^2}\right) - \frac{\left(\frac{r_s}{2D}\right)^2 + \left(\frac{r_s}{2H}\right)^2 + \frac{r_s^2}{4(D^2 + H^2)}}{\frac{1 + \beta}{1 - \beta} + \left(\frac{r_s}{2D}\right)^2} \quad (12)$$

$$\frac{1}{h_a} = \ln\left(\frac{2H}{r_s}\right) + \beta - \ln\left(\sqrt{1 + \left(\frac{H}{D}\right)^2}\right) - \frac{\left(\frac{r_s}{2D}\right)^2 + \left(\frac{r_s}{2H}\right)^2 + \frac{r_s^2}{4(D^2 + H^2)}}{\frac{1 + \beta}{1 - \beta} + \left(\frac{r_s}{2D}\right)^2} \quad (13)$$

Apusuure  $\beta$  lämmönsiirtokertoimen määrittämiseksi johdetaan yhtälön 14 mukaisesti.

$$\beta = \frac{\lambda_g}{\lambda_c} \ln\left(\frac{r_s}{r_t}\right) \quad (14)$$

Kaksiputkijohdon lämpövastusten määrittäminen tapahtuu yksiputkirakenteen periaatteiden mukaisesti. Kuvassa 11 on esitetty komponentit kaksiputkirakenteelle.



Kuva 11. Kaksiputkijohto Mpuk lämpöhäviöiden määrittäminen maahan upotettuna (Koskelainen ym. 2009, 15)

Lämmönsiirtokertoimet  $h_s$  ja  $h_a$  määritetään maaperän lämpövastuksen  $R_g$ , putkien keskinäisen lämpövastuksen  $R_m$ , kaukolämpöjohtojen eristeen, vaipan lämpövastuksen  $R_i$ , upotussyvyyden  $H$  ja johtojen keskipisteiden etäisyyden  $2D$  avulla, käyttäen yhtälöitä 15 ja 16.

$$\frac{1}{h_s} = \frac{2\lambda_c}{\lambda_g} \ln\left(\frac{2H}{r_s}\right) + \ln\left(\frac{r_s^2}{2Dr_t}\right) + \delta \ln\left(\frac{r_s^4}{(r_s^4 - D^4)}\right) - \frac{\left(\frac{r_t}{2D} - \frac{\delta 2r_t D^3}{(r_s^4 - D^4)}\right)^2}{1 + \left(\frac{r_s}{2D}\right)^2 + \delta \left(\frac{2r_t r_s^2 D}{(r_s^4 - D^4)}\right)} \quad (15)$$

$$\frac{1}{h_a} = \ln\left(\frac{2D}{r_t}\right) + \delta \ln\left(\frac{r_s^2 + D^2}{r_s^2 - D^2}\right) - \frac{\left(\frac{r_t}{2D} + \gamma \frac{Dr_t}{4H^2} + \frac{2\delta r_t r_s^2 D}{(r_s^4 - D^4)}\right)}{1 - \left(\frac{r_t}{2D}\right)^2 - \gamma \frac{r_t}{2H} + 2\delta r_t^2 r_s^2 \frac{r_s^4 + D^4}{(r_s^4 - D^4)^2}} - \gamma \left(\frac{D}{2H}\right)^2 \quad (16)$$

Apusuureet  $\delta$  ja  $\gamma$  lämmönsiirtokertoimien määrittämiseksi johdetaan yhtälöiden 17 ja 18 mukaisesti.

$$\delta = \frac{\lambda_c - \lambda_g}{\lambda_c + \lambda_g} \quad (17)$$

$$\gamma = \frac{2(1 - \delta^2)}{1 - \delta \left(\frac{r_s}{2H}\right)^2} \quad (18)$$

### 3 KAUKOLÄMPÖJOHDOT

Kaukolämmön johtotyypit ryhmitellään kanavarakenteen mukaan. Yleisimmin käytetty johtotyyppi on nykyisin kiinnivaahdotettu johtotyyppi. Johtotyypit tulee mitoittaa 16 bar suunnittelupaineeseen sekä 120 °C käyttölämpötilaan. Normaaleissa olosuhteissa jatkuvassa 120 °C lämpötilassa johtoelementin ja sen muiden osien käyttöiän tulee olla vähintään 30 vuotta. Lämpötilassa 115 °C ja

sitä alemmissa lämpötiloissa käyttöiän tulee vähintään olla 50 vuotta. Alla esitetty kaukolämpöjohdot nimilyhenteineen eri rakennetyypeille (Koskelainen ym. 2006, 137–138).

Muovisuojakuori rakenteiset kaukolämpöjohdot Mpuk, 2Mpuk, Mpul, 2Mpul, Mpe, Mmv ja 2Mmv, joiden kirjainyhdistelmien merkitykset:

M = eristetty ulkokuori

pu = lämpöeristeenä polyuretaanivaaho

pe = lämpöeristeenä vaahdotettu polyeteeni

mv = lämpöeristeenä mineraalivilla

k = rakenne, jossa putket kiinni eristyksessä

l = rakenne, jossa putket pääsevät liikkumaan

Betonikanavarakenteiset kaukolämpöjohdot Emv, Epu, Tmv, Ymv ja Pkb, joiden kirjainyhdistelmien merkitykset:

E = kokoelementtikanava

W = kolmitukinen elementtikanava

T = työmaalla valettava suorakulmainen kanava

Y = yläelementtikanava, jossa alaosa valetaan työmaalla

P = puolielementtikanava, jossa pohjalaatta valetaan työmaalla

mv = lämpöeristeenä mineraalivilla

pu = lämpöeristeenä polyuretaanivaaho

kb = lämpöeristeenä kevytbetoni

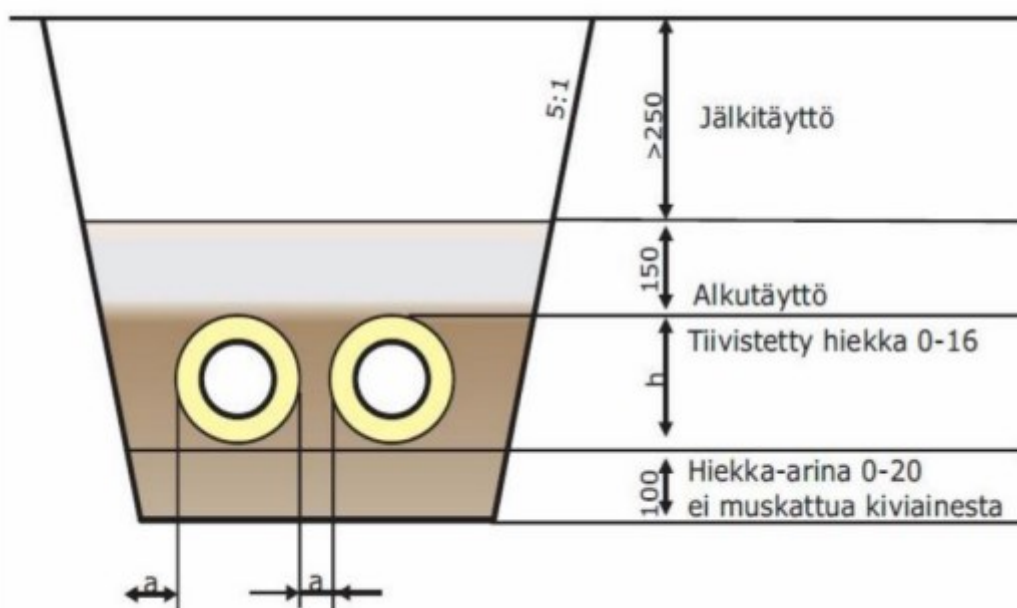
### 3.1 Kiinnivaahdotetut johdot

Kiinnivaahdotetuissa johdoissa on nimensä mukaisesti virtausputki ja ulkoinen polyeteenisuojakuori vaahdotettu toisiinsa kiinni usein polyuretaanieristeellä. Kiinnivaahdotetuissa johdoissa maan painuminen ympärillä ei vaikuta kaukolämpöjohdon toimintaan ja suojakuoren rikkoutuessa korrosio rajoittuu virtausputkessa vain rikkoutumiskohtaan. Virtausputken lämpöliikevaihteluiden rajaus ja huomattavat jännitykset tulee huomioida suunnittelussa. Muovinen suojakuori suojaa virtausputkea betonia heikommin ulkoisilta vaikutuksilta, jolloin asennuksessa ja asennusympäristössä tulee ennalta ehkäistä mahdollisia

vaurioita. Euroopassa johtojen vähimmäisvaatimukset ovat yhtenäistetty standardilla, jolloin eri valmistajien johdot ja niiden osat ovat yhteensopivia. (Koskelainen ym. 2006, 138–139.)

### 3.1.1 Yksiputkijohto 2Mpuk

Yksijohtoputki 2Mpuk käsittää kaksi erillistä meno- ja paluujohtoa, jotka eivät kulje saman suojakuoren sisällä kuvan 12 mukaisesti. Virtausputket ja polyteenisuojakuoret ovat kiinnitetty toisiinsa kiinnivaahdotettujen putkien periaatteella käyttäen polyuretaanieristettä. Tyypillisimmät yksiputkijohdot ovat DN20–DN600 ja myös tarvittaessa kokoluokkaan DN1200 asti. Putken pituudet määräytyvät kokoluokan mukaan 6, 12, 16 tai 18 metriä. (Koskelainen ym. 2006, 139.) Energiateollisuus suosittelee dimensioalueella DN100–250 käytettävän tapauskohtaisesti yksi- tai kaksiputkirakennetta ja suuremmassa kuin DN300 käytettävän vain yksiputkirakennetta.

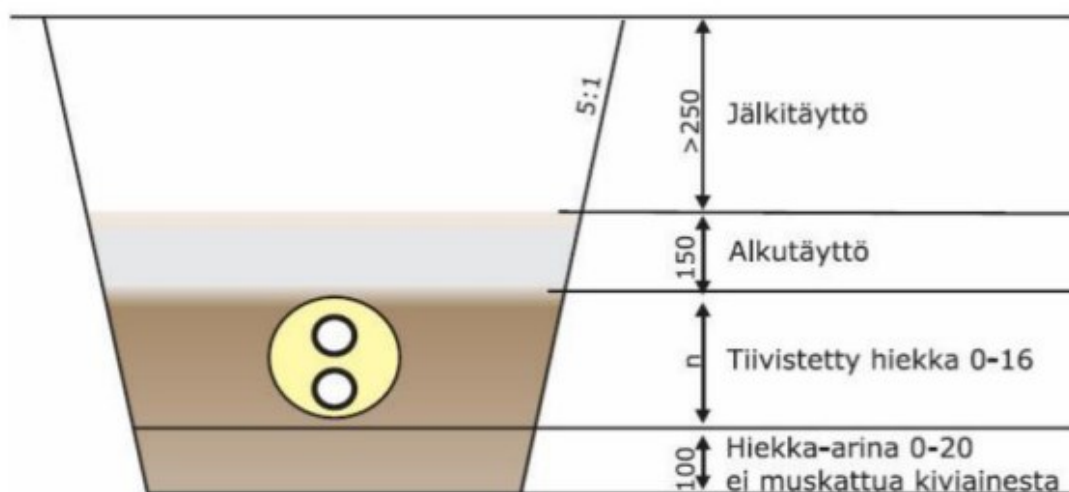


Kuva 12. Kiinnivaahdotettu 2Mpuk yksiputkijohto (Koskelainen ym. 2006, 139)

### 3.1.2 Kaksijohtoputki Mpuk

Kaksijohtoputkessa virtausputket meno ja paluu sekä polyteenisuojakuori ovat kiinnitetty toisiinsa kiinnivaahdotettujen putkien periaatteella käyttäen polyuretaanieristettä kuvan 13 mukaisesti. Kaksijohtoputkessa muodostuu pienempi lämpöhäviö kuin yksijohtoputkessa, missä tyypillisesti menoputki asetetaan

paluuputken alle vielä vähentämään lämpöhäviötä, jolloin lämpö sitoutuu paluuputken veteen. Materiaalin tarve on huomattavasti pienempi kuin yksijohtoputkea käyttäessä, kun virtausputket kulkevat saman eristeen sisässä. Kaksijohtoputki kokoluokat ovat DN15–DN250 ja kaksijohtoputken pituudet määräytyvät kokoluokan mukaan 6 tai 12 metriä. (Koskelainen ym. 2006, 139.) Energiategollisuus suosittelee dimensioalueella DN15–80 käytettävän kaksiputkirakennetta soveltuviissa kohteissa ja DN100–DN250 käytettävän tapauskohtaisesti yksi- tai kaksiputkirakennetta.



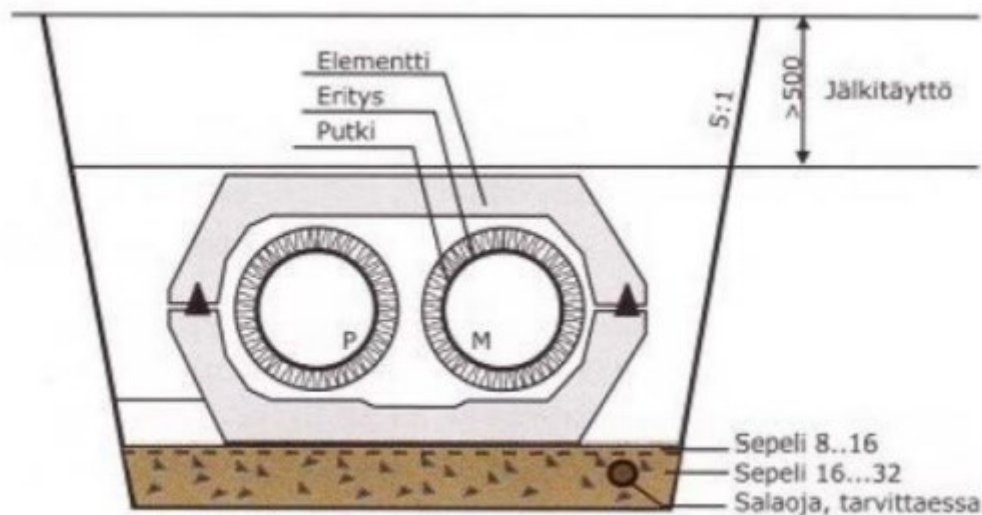
Kuva 13. Kiinnivaahdotettu Mput kaksiputkisena (Koskelainen ym. 2006, 140)

### 3.2 Betonikanavajohdot

Betonikanavajohtoja ei ole valmistettu vuoden 1990 jälkeen, mutta niitä on vielä käytössä monissa kohteissa. Betonikanavassa kulkee virtausputket meno ja paluu, jotka ovat sijoitettu kanavan alaosaan kannakkeiden varaan kuvan 14 mukaisesti. Kanavan kuorien ja virtausputkien väliin on asennettu erilliset terästuennat, joiden avulla lämpöliikettä ohjataan kanavan pohjaan ja seiniin. Kanavat kootaan kahdesta elementistä ylä- ja alaosa. Alaosan elementtien väleihin on sijoitettu erillisiä kiintopiste-elementtejä, joiden avulla näihin hitsattujen virtausputkien luovuttamat lämpötilavaihtoluista johtuvat rasitukset siirtyvät maahan. Virtausputkien eristys on toteutettu mineraalivillalla tai käyttäen polyuretaanikouruja. Kanava koostuu kahdesta erillisestä osasta ylä- ja alapuoli, jotka ovat lähes identtiset tai lähes identtiset. Vaativissa kohteissa alapuoli on mahdollisesti valettu paikalleen, jolloin yläosa on vain valmisra-



kenne. Erittäin vaativissa kohteissa on käytetty myös ylä- ja alaosan valamista. Vetokuormitusta kestävä kanava on saatu aikaan hitsaamalla alaosien vetoteräkset toisiinsa. (Koskelainen ym. 2006, 144.)



Kuva 14. Kokoelementtikanaava (Koskelainen ym. 2006, 144)

### 3.3 Muoviputkijohdot

Muoviputkien käyttö on vähäistä niiden matalan lämpötilan- ja paineenkeston vuoksi ja soveltuvat parhaiten matalalämpöverkkoihin. Jatkuva korkein lämpötila muoviputkelle on n. 80 °C ja hetkellinen korkein lämpötila n. 95 °C sekä korkein sallittu paine 10 bar. Putket pinnoitetaan diffuusionestokerroksella estäen happidiffuusion kaukolämpöveden ja höyrydiffuusion ympäristöön kaukolämpövedestä. Virtausputki ja polyteenisuojuakuori ovat kiinnitetty toisiinsa kiinnivaahdotettujen putkien periaatteella käyttäen kovaa tai puolikovaa polyuretaanieristettä. Kiinnivaahdottomissa putkissa voidaan eristeenä käyttää myös polyuretaanin sijasta vaahdotettua polyeteeniä. Muoviputket ovat notkeaa materiaalia, joita voidaan varastoida kiepillä, mikä helpottaa putken asentamista ilman saumoja Tyypillisiä virtausputkimateriaaleja ovat PEX, PB ja PP. (Koskelainen ym. 2006, 143.)

### 3.4 Muovisuojuakuorijohto liikkuvin teräsputkin

Muovisuojuakuorijohto liikkuvin teräsputkin poikkeaa erityisesti muista johtomalleista virtausputkien lasikuituisilla suojuaputkillä. Virtausputket pääsevät liikku-

maan vapaasti, kun ne asennetaan vapaasti liikkuviin suoja-putkiin. Virtausputken ja lasikuituisen putken väliin jää ns. tuuletustila. Ulkoinen muovisuoja-kuori ja lasikuituiset suoja-putket ovat kiinnitetty toisiinsa polyuretaanieristeellä. Muovisuoja-kuoriputki liikkuvien teräsputkien sisältää myös vuotovesiputken, joka kuuluu johtoelementtiin. (Koskelainen ym. 2006, 145.)

Muovisuoja-kuorijohtoa liikkuvien teräsputkien ei ole enää asennettu vuoden 1990 jälkeen seuraavista syistä:

- johdon toiminta muuttuu ympärillä olevan maan vajoamisen takia
- suoja-putken tai eristeen rikkoutuminen aiheuttaa korroosiota kaivovälin matkalle
- tuuletus riittämätön virtausputken ja suoja-putken välillä
- muovisuoja-putkien liitokset erittäin arkoja maaperän liikkeille
- elementit yhteensopimattomia eri valmistajien kesken (Koskelainen ym. 2006, 145.)

#### **4 KAUKOLÄMMÖN MENOVEDEN LÄMPÖTILAN ALENTAMINEN PALUUEDELLÄ**

Menoveden lämpötilan laskeminen on yleisesti kaukolämpöverkoissa seuraava askel kohti älykkäämpää kaukolämpöjärjestelmää, jossa energiatehokkaamman järjestelmän on helpompi hyödyntää jotakin muuta kuin polttamalla tapahtunutta lämmöntuotantoa, esimerkiksi aurinkolämpöä. Mahdollisia ylijäämälämpöjä tuotantolaitoksilta voidaan myös hyödyntää paremmin matalamman lämpötilan perusteella.

Vastapainetuotantolaitoksen sähköntuotantoa voidaan kasvattaa matalamman menoveden lämpötilan ansiosta, jolloin sähköntuotannosta saatavan höyryn lämpötilaa voidaan laskea matalammaksi. Kaukolämpöverkon paluulämpötilan laskiessa savukaasupesureissa savukaasujen lämpötilaa saadaan laskettua ja näin ollen lämmöntalteenottoa parannettua.

Alueellisesti kaukolämpöverkossa lämpötilaa laskiessa suurimpien hyötyjen voidaan todeta olevan lämpöhäviöiden vähentyminen, rasi-  
tusten vähentyminen kaukolämpöjohdoissa ja näiden perusteella siirtyminen kohti ekologisempaa toimintaa.

#### 4.1 Vaikutus lämpöhäviöihin kaukolämpöverkossa

Menoveden lämpötilalla on suuri merkitys lämpöhäviöiden määrään. Mitä matalalämpoisempää kaukolämpövertä tarvitsee siirtää, sitä vähemmän lämpöhäviöitä syntyy. Lämmönjohtuminen on suoraan verrannollinen lämpötilaeroon, jolloin menoveden ja ulkolämpötilan välinen lämpötilan ero vaikuttaa syntyviin lämpöhäviöihin. Menolämpötilaa laskiessa myös virtausnopeutta joudutaan kasvattamaan tarvittavan tehon siirtämiseksi, mikä vaikuttaa myös vähentävästi lämpöhäviöiden määrään, kun viipymästä aiheutuva jäähtymä pienenee.

Menolämpötilan vaikutuksia lämpöhäviöihin tulisi tarkastella 3–8 eri kuormatilanteen perusteella sisältäen minimi- ja maksimikuormatilanteet (Energiateollisuus ry 2021, 7). Kylmän vuoden aikana lämmitystarve kasvaa huomattavasti ja näin ollen myös lämpötilaero pysyy suhteellisen suurena koko vuoden aikana, jolloin myös lämpöhäviöiden määrä on suurempi kyseisenä aikana. Vastaavasti leudompana talvena lämmitystarve on pienempi ja lämpötilaero myöskin pienenee, jolloin lämpöhäviöitä ei pääsee syntymään niin paljon, kuin kylmempänä ajanjaksona.

#### 4.2 Muut vaikutukset kaukolämpöverkossa

Kaukolämpöverkossa siirtyvä lämpöteho on sidoksissa veden massavirtaan ja lämpötilaeroon yhtälön 19 mukaisesti (Koskelainen ym. 2006, 198).

$$\phi = c_p q_m \Delta T = c_p \rho q_v \Delta T \quad (19)$$

jossa	$\phi$	lämpöteho	[W]
	$C_p$	veden ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kg, °C]
	$q_m$	massavirta	[kg/s]
	$\rho$	veden tiheys	[kg/m <sup>3</sup> ]
	$q_v$	veden tilavuusvirta	[m <sup>3</sup> /s]
	$\Delta T$	meno- ja paluulämpötilojen erotus eli jäähtymä	[°C]

Olettaen menoveden lämpötilaa laskiessa paluueden lämpötilan pysyvän samana, tehonsiirtokyky kaukolämpöverkossa heikkenee. Tehonsiirtokyky on

kaukolämpöverkossa suoraan verrannollinen lämpötilaeroon. Alentunutta lämpötilaeroa voidaan kompensoida kasvattamalla virtausnopeutta, mikä johtaa painehäviöiden kasvamiseen kaukolämpöverkossa. Virtausnopeuden kasvattamisesta aiheutuvat painehäviöt tulee kompensoida ennen kriittistä asiakasta nostamalla paineenkorotusta pumppauksen avulla. Kaukolämpöverkossa kitkasta aiheutuvat painehäviöt nostavat myös menoveden lämpötilaa. (Adato Energia Oy, 2021.)

Kitkan vaikutuksesta aiheutuva painehäviö virtaavassa putkistossa muodostetaan yhtälön 20 mukaisesti (Koskelainen ym. 2006, 199).

$$\Delta p_v = \xi \frac{L \rho w^2}{d_s} = \xi \frac{8L \rho q v^2}{d_s^5 \pi^2} = \xi \frac{8L q_m^2}{d_s^5 \pi^2 \rho} \quad (20)$$

jossa	$\Delta p_v$	painehäviö	[Pa]
	$\xi$	kitkakerroin	[-]
	$\rho$	veden tiheys	[kg/m <sup>3</sup> ]
	$w$	virtausnopeus	[m/s]
	$L$	putkipituus	[m]
	$d_s$	putken sisähalkaisija	[m]
	$q_v$	tilavuusvirta	[m <sup>3</sup> /s]
	$q_m$	massavirta	[kg/s]

Kitkakerroin  $\xi$  muodostuu Reynoldsin luvun ja karheuden  $k$  perusteella. Reynoldsin luku määritetään yhtälön 21 mukaisesti.

$$Re = \frac{w d_s}{\nu} = \frac{4q_v}{\pi d_s \nu} = \frac{4q_v \rho}{\pi \eta d_s} = \frac{4q_m}{\pi \eta d_s} \quad (21)$$

jossa	$\nu$	kinemaattinen viskositeetti	[m <sup>2</sup> /s]
	$\eta$	dynaaminen viskositeetti	[kg/ms]

Virtausnopeuden kasvu on sidoksissa myös kertavastuksista aiheutuviin painehäviöihin putkistossa. Kertavastuksia putkistossa aiheuttavat käyrät, haarotukset, putkihalkaisijan muutokset ja venttiilit. Kertavastuksien aiheuttamana painehäviö  $\Delta p_k$  muodostetaan yhtälön 22 avulla.

$$\Delta p_k = \zeta \frac{\rho w^2}{2} = \zeta \frac{8\rho V^2}{\pi^2 d_s^4} \quad (22)$$

jossa  $\zeta$  kertavastusluku [-]

Kitka- ja kertavastukset aiheuttavat virtausvastukset. Kokonaispainehäviö saadaan laskemalla yhteen kitka- ja kertavastukset yhtälön 23 mukaisesti.

$$\Delta p = \Delta p_v + \Delta p_k = \left( \xi \frac{L}{d_s} + \Sigma \zeta \right) \frac{\rho w^2}{2} \quad (23)$$

Mikäli painehäviö tunnetaan jollakin virtaustilavuudella, saadaan painehäviö muodostettua eri tilavuusvirralle, painehäviön ollessa likimain verrannollinen tilavuusvirran toiseen potenssiin yhtälön 24 mukaisesti (Koskelainen ym. 2006, 202).

$$\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^2 \quad (24)$$

Kaukolämpöverkossa putkistoon aiheutuu mekaanista rasitusta lämpötilamuutoksesta aiheutuvan lämpölaajenemisen takia. Matalampia menolämpötiloja käytettäessä lämpötilamuutokset vähenevät, joka vähentää riskiä väsymisvaurioille putkistossa lisäten käyttöikää.

### 4.3 Vaikutus kulutuspuheen laitteistossa

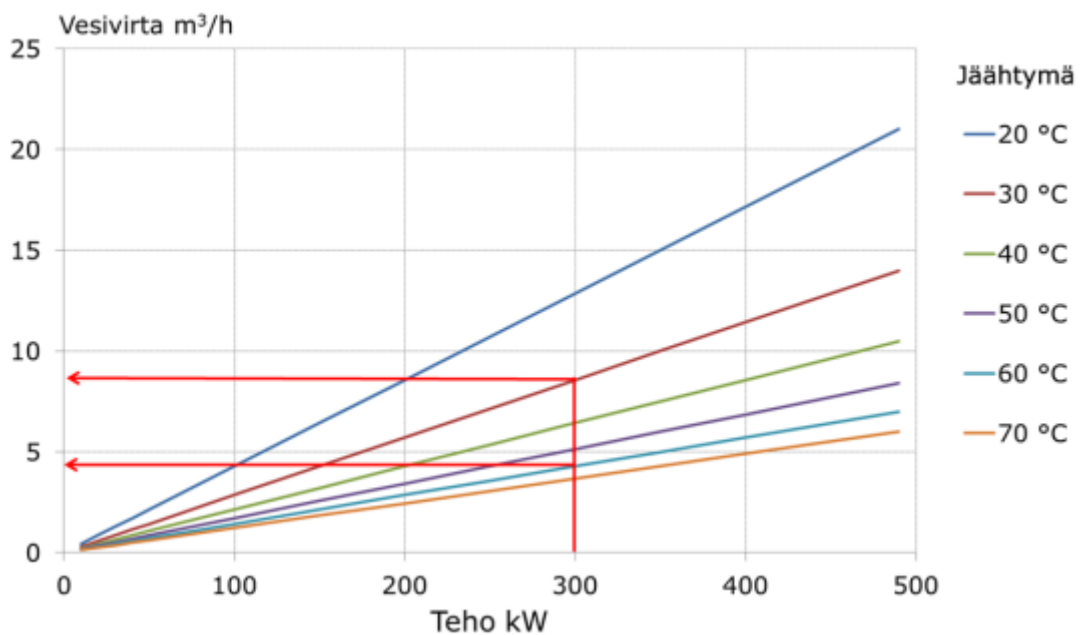
Menoveden lämpötilaa alentaessa ja asiakkaan tehontarpeen pysyessä vakiona, seuraa virtaaman kasvattaminen. Virtauksen vaikutusta lämpötehoon voidaan tarkastella yhtälön 25 avulla (Motiva, 2017).

$$\phi = q_m c_p \Delta T = U \Delta T_{ln} \quad (25)$$

jossa	$\phi$	lämpöteho	[kW]
	$q_m$	massavirta	[kg/s]
	$c_p$	ominaislämpökapasiteetti	[J/(kgK)]
	$\Delta T$	virtaavan aineen lämpötilaero	[K]

$U$	lämmönvaihtimen kokonaislämmönsiirtokerroin [W/K]
$\Delta T_{ln}$	logaritminen lämpötilaero [K]

Jäähtymän suhdetta vesivirtaan voidaan havainnollistaa vesivirran ja tehon funktiona kuvan 15 mukaisesti. Vesivirtapohjaisen maksuperusteen vaikutuksesta alentunut jäähtymä nostaa veden virtausta ja kustannuksia. Jäähtymän laskiessa  $60\text{ °C} \rightarrow 30\text{ °C}$  vesivirta kasvaa 50 %, jolloin 300 kW:n lämpötehon siirtämiseen tarvittava virtaus  $4,3\text{ m}^3/\text{h}$  kasvaa virtaamaan  $8,6\text{ m}^3/\text{h}$ . (Energiateollisuus ry. 2016, 22.)



Kuva 15. Vesivirta tehon funktiona (Energiateollisuus ry. 2016, 22)

Energiayhtiön lupaamaa tehoa asiakkaalle ei voida pelkästään taata nostamalla virtausnopeutta lämmönsiirtimissä. Asiakkaan laitteet ovat mitoitettu tietyille lämpötila-, paine-ero- ja virtausnopeusalueille. Liiallinen virtausnopeuden kasvattaminen voi aiheuttaa lämmönsiirtimissä ja säätöventtiileissä huomattavan suuren paine-eron, joka ei ole enää sallituissa arvoissa. Lämmönsiirtopinta-alan kasvattaminen takaisi matalalämpöisemmälle monovedelle mahdollisuuden luovuttaa vastaavan energiamäärän kuin korkeampi menovesi, mutta tämä ratkaisu vaatisi erillisiä investointeja, joten tutkimuksessa suljetaan tämä vaihtoehto pois.

Tutkimuksen kannalta on merkityksellistä selvittää, paljonko tehoa tarvitsee siirtää asiakkaalle ja mikä vaikutus lämpötilan laskemisella olisi asiakkaan laitteissa.

#### **4.4 Menoveden lämpötilan alentamisen mahdollistavia järjestelmiä**

Menoveden lämpötila pyritään asettamaan sellaiselle tasolla, joka mahdollistaa asiakaslaitteissa mitoitusstehon siirtymisen sekä lämpöhäviöiden mahdollisimman vähäisen syntymisen kaukolämpöverkossa. Menoveden lämpötilaa voidaan optimoida tuotantolaitoksella tai ennalta määritetyssä kaukolämpöverkon osassa.

##### **4.4.1 Lämpötilan säätö tuotantolaitoksella**

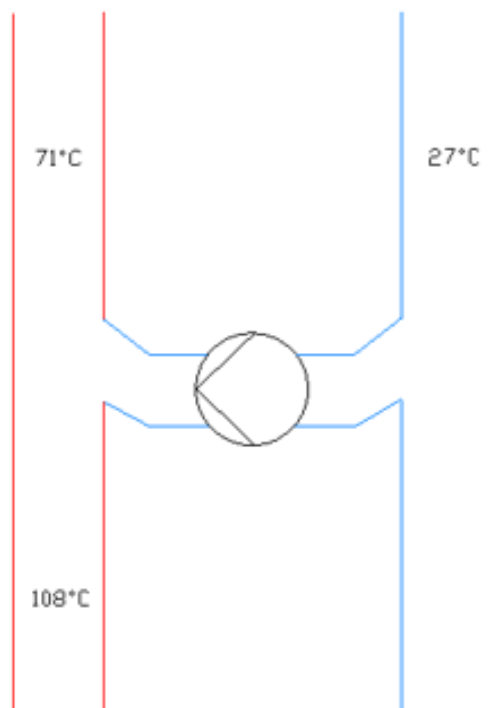
Menolämpötilan alentamisen perinteisin malli on tähän mennessä ollut suoraan tuotantolaitoksilla tapahtuva menolämpötilan säätö. Lämpötilaan vaikutetaan menoveden lämpötilan ohjauksikäyrää muuttamalla tai erilaisia optimointityökaluja hyödyntäen. Ongelmallista tässä tavassa säätää menolämpötilaa on sen vaikutus koko kaukolämpöverkon alueelle.

Kaukolämpöverkkoihin on kytketty paljon vanhoja radiaattorilämmitteisiä kiinteistöjä, joiden mitoituslämpötilat ovat uusia lattialämmitteisiä kiinteistöjä huomattavasti korkeammat. Matalin ja tarvittava lämpötila tuleekin tarkistella näiden asiakkaiden osalta, joiden lämmöntarve on suurin. Menolämpötilaa voidaan optimoida erilaisten mittausten ja laskennallisten mallien avulla, jolloin menolämpötilaa voidaan laskea tietyllä ajanhetkellä, mutta rajoittavana tekijänä tässäkin pitää tuottaa asiakkaalle mitoituslämpötilan mukainen menovesi.

##### **4.4.2 Paluueden sekoittaminen menoveteen**

Menoveden lämpötilaa kaukolämpöverkon tietyllä osa-alueella voidaan alen- taa hyödyntämällä shunttipumppujärjestelmää, jossa menoveden joukkoon sekoitetaan jäähtynyttä paluuvettä. Järjestelmän ansiosta menoveden lämpötila laskee, joka vaikuttaa vähentävästi lämpöhäviöiden määrään kaukolämpöjoh- doissa. Järjestelmä tulee varustaa sekoituspumpulla, joka kykenee siirtämään tarvittavan määrän paluuvettä menoveden joukkoon sekä kompensoimaan vir-

tauksen kasvusta aiheutuvat painehäviöt. Järjestelmä sisältää integroidut lämpötilan mittaukset, joiden perusteella taajuusmuuttajalla toteutettua pumpustaustehoa säädetään automaattisesti. Alla periaatekuva (kuva 16) havainnollistamassa järjestelmän toimintaa, missä 27 °C paluuvesi jäädyttää 108 °C menoveden lämpötilaan 71 °C.



Kuva 16. Periaatekuva (CADS, 2022)

## 5 ALUEEN KARTOITUS JA VALINTA

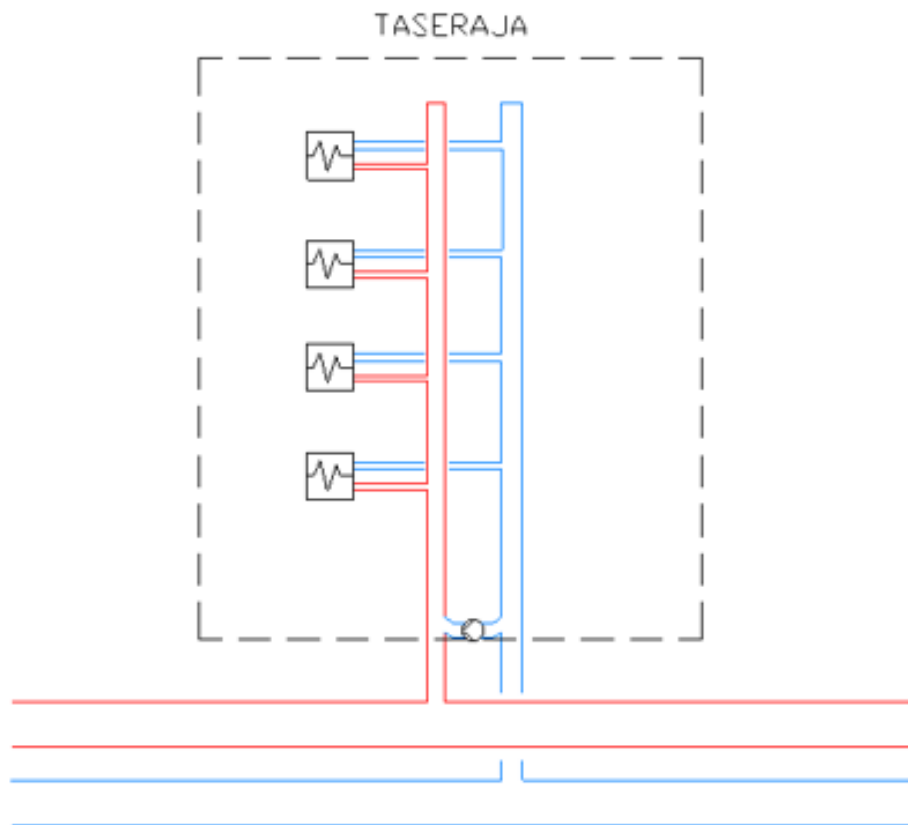
Tutkittavan alueen valintaan kohdistuu useita eri tekijöitä, jotka tulee huomioida aluetta valittaessa. Tärkeimpien kriteerien ollessa tiedossa vältetään turhien laskelmien tekeminen alueella, jossa lähtökohtaisesti ei olisi mahdollista toteuttaa matalalämpöjärjestelmää.

### 5.1 Alueen valintaan vaikuttavat tekijät

Tarkasteltavan alueen tulisi olla yhteydessä muuhun kaukolämpöverkkoon siten, että taserajalla alueeseen liittyy 1 menojohto ja 1 paluujohto eli ns. verkon latvaosa. Kaukolämpöjohtojen ei tulisi olla tarkastelussa rengasverkostona alueella, jossa verkoston toinen pää jäisi avoimeksi. Mikäli alueeseen yhdistyy



useampi meno- ja paluujohto, voidaan tarkastelu toteuttaa, jos käytettävissä on sulkuventtiileitä. Taserajan sisällä siirrettävän tehon tulee pysyä samana, kuin ennen tilannetta, jossa menoveden lämpötilaa on alennettu. Kuvan 17 mukaisesti pumpun tulee siirtää riittävä määrä jäähtynyttä paluuvettä menoveden sekaan oikean lämpötilan saavuttamiseksi. Virtausnopeus kasvaa menoveden lämpötilan alentuessa ja saa näin aikaan tarvittavan tehon siirtymisen. Meno- ja paluupuolen johtojen virtaama taserajan sisällä pysyy samana.



Kuva 17. Taseraja (CADS, 2022)

Menoveden lämpötilaa olisi mahdollista laskea alueella, jossa ei tarvita korkeaa lämpötilaa kaukolämpöverkossa. Lattialämmitteiset kiinteistöt sopivat tutkimukseen, joissa muoviputkissa lattialämmityspiiriin lähtevän veden maksimi lämpötila on 40 °C. Käyttöveden lämmönsiirtimien mitoitusarvo 70 °C olisi sitten määräävä tekijä laitteen ollessa suunniteltu siten, että toisiopuolen lämpimän veden tulee olla vähintään 58 °C ja enintään 65 °C (taulukko 2).

Taulukko 2. Käyttöveden lämmönsiirtimien mitoituslämpötilat (Energiateollisuus ry, 2021)

	LÄMMÖNSIIRTIMIEN MITOITUSLÄMPÖTILAT °C			
	ENSIÖ		TOISIO	
	TULO	PALUU (max)	KYLMÄ VESI	LÄMMIN VESI (min)
Käyttöveden lämmönsiirtimet	70	20	10	58

Alarajaa menolämpötilalle tulee tarkastella myös virtausnopeuksien ja painehäviöiden perusteella. Virtausnopeuden kasvattaminen lisää painehäviöitä kaukolämpöverkossa, jolloin putkistokäyrästä tulee selvittää mahdollinen paineenkorotuksen tarve kriittisen asiakkaan laitteiston vaatiman paine-eron saavuttamiseksi. Virtausnopeus ei saa myöskään nousta liian suureksi kaukolämpöjohdoissa, mikä ylittäisi standardivaatimukset. Taulukossa 3 esitetyt suositeltavat virtausnopeudet standardin PSK-2401 mukaisesti.

Taulukko 3. Veden virtausnopeudet ja putkikoot (PSK-2401: 2009, 3)

DN	≤25	32	40	50	65	80	100	125	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700	800
v (m/s)	0,8	1,0	1,2	1,4	1,5	1,6	1,7	2,0	2,5	2,8	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,5	4,7	5,0
v <sub>max</sub> (m/s)	2,0	2,0	2,0	2,5	2,5	2,5	3,0	3,0	3,5	4,0	4,0	4,0	4,5	4,5	4,5	5,0	5,0	5,5	5,5

Verkoston pituutta voidaan pitää tutkimuksen kannalta yhtenä merkittävimpänä tekijänä. Pidemmät kaukolämpöverkot aiheuttavat luonnollisesti suurempia lämpöhäviöitä kuin mitaltaan lyhyemmät kaukolämpöverkot. Paluuveden sekoittaminen menoveteen vähentää lyhyessäkin verkossa lämpöhäviöitä, mutta taloudellinen hyöty suhteessa investointiin voi olla riittämätön.

Verkoston pituus sekoituksen ja latvapisteen välillä aiheuttaa mahdollisen ongelman kriittisen kuluttajan laitteistossa viipymän takia. Tavoitellussa menolämpötilassa tulee selvittää lämpöhäviöiden määrä ennen kriittistä kuluttajaa. Mitoituslämpötila kuluttajan laitteistossa ei saa laskea alle 70 °C, jotta tarvittava määrä lämpöä saadaan siirrettyä kuluttajan käyttöveden lämmönsiirtimessä.

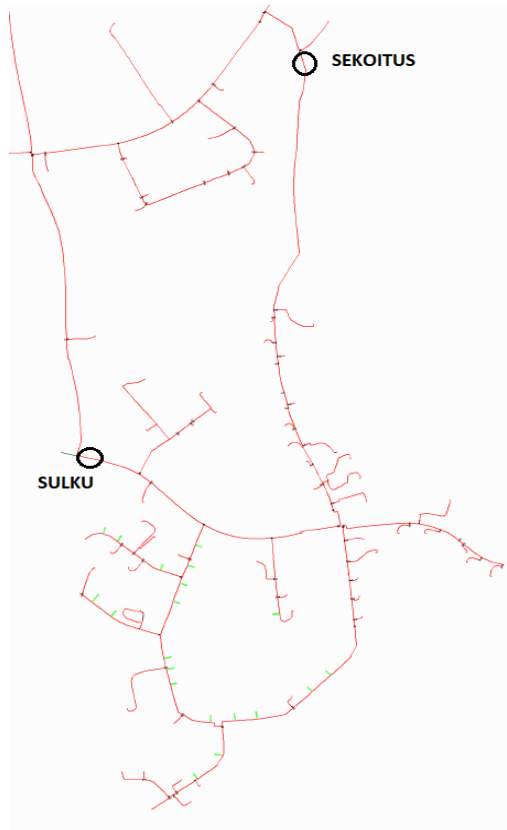
Alueella tulee olla myös tarvittava määrä kulutusposteja, jotta tehoa saadaan siirrettyä jatkuvasti. Tilanteessa, jossa lämpimän menoveden käyttö katkeaa,

aiheutuu viipymän takia lisää lämpöhäviöitä, jotka aiheuttavat vain enemmän ongelmia menoveden lämpötilan ollessa matalampi. Menolämpötilan laskeminen ei saa aiheuttaa tilannetta, jossa joudutaan rakentamaan erillinen kierto meno- ja paluujohdon päihin riittävän lämmön takaamiseksi menojohdossa.

## 5.2 Valittu alue

Tutkimuksen kohteeksi Lappeenrannan Energiaverkot Oy:n verkostopäällikkö Ami Kylliäinen esitti Lappeenrannassa sijaitsevaa kaukolämmitteiseksi kaavoitettua pientaloaluetta, jossa on otettu käyttöön suhteellisen paljon muita lämmitysratkaisuja kuin kaukolämpö. Pientaloalueen siirretty teho suhteessa kaukolämpöjohtojen kokoon ja etäisyyksiin aiheuttaa verkostohäviöitä merkittävästi suunniteltua enemmän, joten tutkimuksen kannalta alue on optimaalinen.

Alueella kaukolämpöön liitetyt kiinteistöt ovat kaikki rakennettu 2000 luvulla, joten tutkimuksen kannalta voidaan olettaa, että näissä kaikissa kiinteistöissä rakennuksen lämmitys on toteutettu lattialämmitysjärjestelmällä. Lämmönjakokeskuksia alueella on 47 kpl, joiden yhteenlaskettu vuosienergian kulutus oli vuonna 2021 kaukolämmön osalta 1042 MWh (Trimble NIS, 2022). Alueeseen yhtyy kaksi meno- ja paluu kaukolämpöjohtoa, joista toinen putkilinja tulee sulkea kaukolämpökaivosta sulkuventtiileillä (kuva 18). Alueen itäiseen osaan, joka jää sulkuventtiilien ulkopuolelle, tulee toteuttaa kaukolämpöveden kierto, jotta kaukolämpövesi ei pääse jäähtymään liikaa suuren siirtojohdon ja vähäisten kuluttajien mitoitustehojen takia (Toivola, E. 2022).



Kuva 18. Pientaloalueen kaukolämpöverkko  
(Trimble NIS, 2022)

Meno- ja paluueden sekoitus toteutetaan alueen pohjoisessa pisteessä, josta alueen kriittiseen pisteeseen lämpötilan osalta tulee putkistopituutta 1284 metriä. Pientaloalue käsittää merkittävän määrän eri kokoisia ja mittaisia kaukolämpöjohtoja, jotka aiheuttavat huomattavan määrän lämpöhäviöitä nykyisillä menolämpötilan arvoilla. Kaukolämpöjohtojen pituudet pientaloalueella on ilmoitettu taulukossa 4.

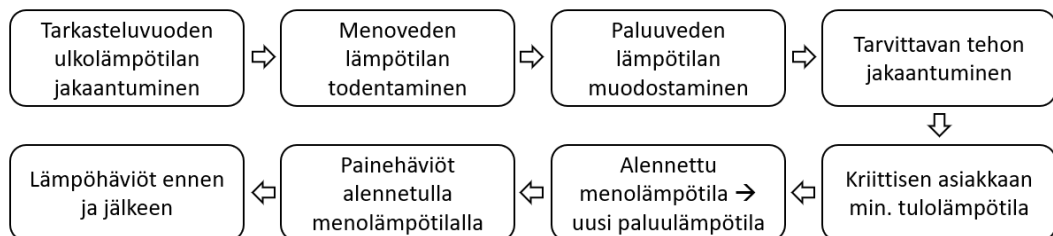
Taulukko 4. Pientaloalueen kaukolämpöjohdot

elementti	koko	pituus
[-]	[-]	[m]
2Mpuk	Cu28	29
2Mpuk	DN20	701
2Mpuk	DN25	809
2Mpuk	DN28	199
2Mpuk	DN40	49
Mpuk	DN25	10
Mpuk	DN40	209
Mpuk	DN50	477
Mpuk	DN65	1196
Mpuk	DN80	692

Erillisiä lämpötilan, virtauksen tai paineen mittauksia alueen kaukolämpöverkoon ei ole asennettu. Menoveden lämpötila eri ulkolämpötiloissa alueelle määritetään sekoitusta edeltävän kulutuspiirteen mittaustietojen perusteella. Menolämpötilan määrittävä kulutuspiirte sijaitsee hyvin lähellä meno- ja paluuvien sekoituspiirteitä, joten tutkimuksen kannalta talojohdon lämpöhäviö voidaan olettaa olevan menolämpötilan jäähtymän suhteen merkityksettömän pieni. Alueelle vallitseva tilavuusvirtaus ja paluulämpötila ilman häviöitä määritetään kuluttajien virtaamien ja paluulämpötilojen mukaan. Mittaukset kuluttajapiirteistä ovat tuntikeskiarvoja, joten tutkimuksen kannalta näitä arvoja voidaan pitää riittävän tarkkana.

## 6 LASKELMAT MENOVEDEN LÄMPÖTILAN ALENTAMISESTA

Tämänhetkisiä lämpöhäviöitä ja menolämpötilan alentamisesta muodostuvia uusia lämpöhäviöitä määrittäessä ilman kiinteitä mittauksia, tulee kaukolämpöverkon alueella muodostaa kuvan 19 mukainen laskentajärjestys luotettavien tuloksien saavuttamiseksi.

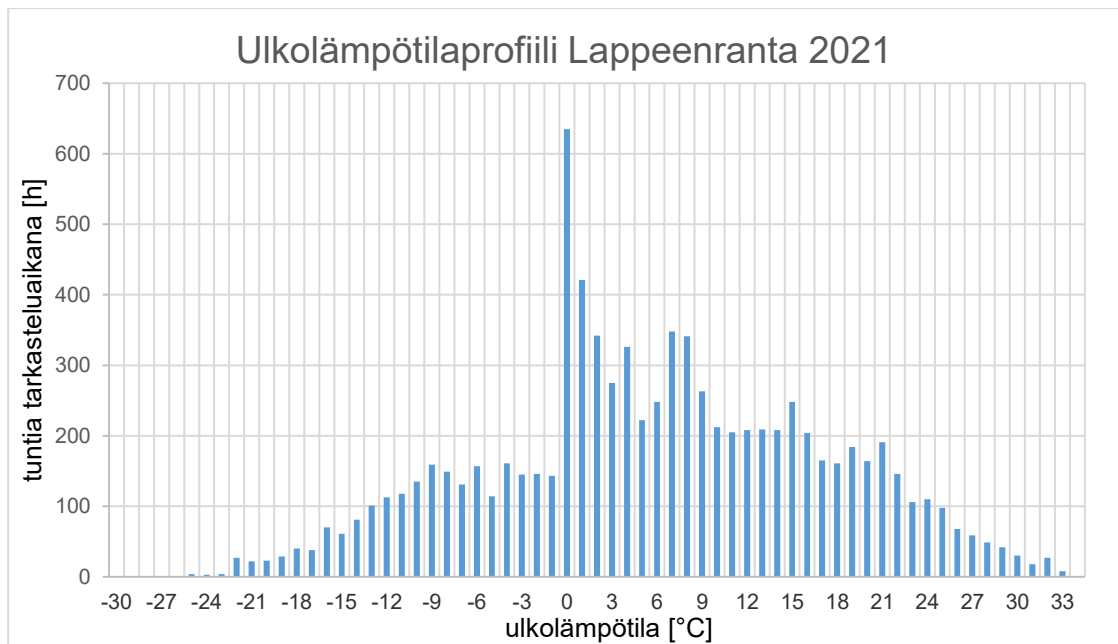


Kuva 19. Laskentajärjestys

### 6.1 Lämmitystarve ja ulkolämpötilaprofiili

Tutkimukseen tulee valita mittaukset, jotka edustavat mahdollisimman tarkasti normaalivuoden lämmitystarvetta, joten lämmitystarveluku eli sisä- ja ulkolämpötilojen erotuksien tietyn ajanjakson summa tulisi olla mahdollisimman lähellä normaalivuoden lämmitystarvelukua. Normaalivuoden lämmitystarveluku Lappeenrannassa on 4510 (Ilmatieteenlaitos, 2013). Tarkasteluvuonna 2021 Lappeenrannan lämmitystarveluku asettui erittäin lähelle normaalivuoden lämmitystarvelukua tämän ollessa 4517 (Ilmatieteenlaitos). Voidaan todeta 0,02 % poikkeaman lämmitystarvelukujen välillä olevan merkityksetön, joten laskelmien perustuessa vuoden 2021 ulkolämpötiloihin, tulos edustaa normaalia vuotta lämmitystarveluvun osalta.

Ulkolämpötilaprofiilia hyödynnetään arvioidessa mittauksista muodostettuja keskimääräisiä arvoja tiettyjen ulkolämpötila-arvojen mukaan. Profiilin muodostukseen Lappeenrannan kantakaupunkialueella on käytetty yhden tunnin keskiarvoisia mittauksia vuoden 2021 mukaisesti (kuva 19). Tutkimuksessa ei oteta kantaa lämmönmittauksen olosuhteisiin Lappeenrannan Energiaverkkojen mittauspisteellä. Silmäämääräisesti voidaan pitää kuvan 20 osoittamaa ulkolämpötilojen jakaumaa normaalijakautuneeksi, jossa korostuu +/-0 °C rajapintaan osuneiden mittausten suuri määrä.



Kuva 20. Ulkolämpötilaprofiili Lappeenranta 2021 (Valmet Dna)

Ulkolämpötilojen mukaisten mittausmäärien perusteella voidaan muodostaa vuodelle 2021 menolämpötilojen jakaantuminen pientaloalueella.

## 6.2 Meno- ja paluuveden lämpötila

Menoveden lämpötila alueelle on muodostettu aiemmin esitetyn kulutuspiirteen perusteella. Menolämpötilat ovat tunnitaitisten mittaustietojen perusteella todennettuja keskiarvoja, tietyillä ulkolämpötilan arvoilla. Menolämpötila vaihtelee suuresti eri ulkolämpötilojen mukaan. Talviaikana (-30...-25)°C menolämpötilan keskiarvo on 107,8 °C ja vastaavasti kesäaikana +15 °C menolämpötilan keskiarvo alenee arvoon 72,5 °C.

Paluueden lämpötila on yksi tärkeimmistä suureista kaukolämpöverkossa, muodostaen jäähtymän menoveden lämpötilan erotuksena. Pientaloalueella ei ole integroitua mittauspistettä, josta paluulämpötila olisi mahdollista todentaa. Tutkimuksessa ulkolämpötilaa vastaava paluulämpötila, joka ei sisällä lämpöhäviöiden määrää on muodostettu asiakkaiden mittauspisteistä saatavien virtaamien ja paluulämpötilojen tunnittaisten keskiarvo mittaustietojen perusteella.

Kaukolämpöverkon laskennallista paluulämpötilaa alueverkossa määrittäessä tulee ensin selvittää ulkolämpötilaa vastaavat paluulämpötilat ilman lämpöhäviöitä, virtaamat ja menoveden lämpötila ennalta määritetyssä pisteessä. Edellisten perusteella muodostetaan siirrettävissä oleva teho, joka yhdessä häviötehon kanssa määrittää kokonaistehon. Kokonaistehon perusteella määritettävissä on lämpötilaero, joka tulee vähentää menolämpötilasta, jolloin tuloksena on laskennallinen paluulämpötila. Merkityksellistä ennen kokonaistehon laskentaa on määrittää häviöteho. Lämpöhäviöt ovat merkittävässä roolissa paluulämpötilan laskennallisen arvon muodostamisesta, mutta tässä vaiheessa ei vielä käytetä aiemmin esitettyjä lämpöhäviöyhtälöitä, joten valitaan iterointimenetelmä halutun paluulämpötilan saavuttamiseksi. Iterointiaskeleissa häviötehon arvoa muutetaan, jolloin todellinen paluulämpötila asettuu tiettyyn arvoon. Taulukon 5 mukaan huomataan laskennallisen paluulämpötilan laskevan huomattavasti verraten paluulämpötilaa, joka ei sisällä kaukolämpöjohdoista aiheutuvaa lämpöhäviötä. Ulkolämpötila-alueiden väliset erot muodostuvat merkittäväksi, jolloin talviaikana jäähtymä on 91,5 °C ja kesäaikana vastaavasti 30,5 °C.

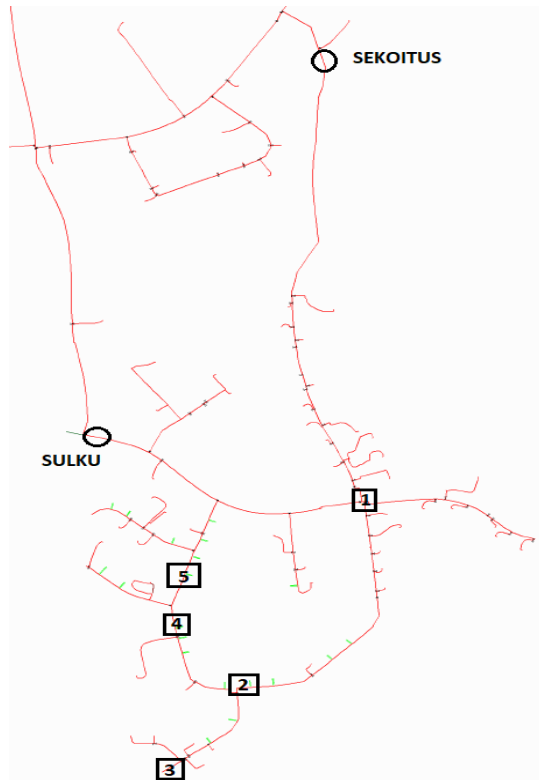
Taulukko 5. Laskennalliset paluulämpötilat

ulkolämpötila	meno lämpötila	massavirta	paluu lämpötila (ei sis. häviöitä)	teho (ei sis. häviöitä)	häviöteho	teho yht.	paluu lämpötila laskennallinen
°C	°C	kg/s	°C	kW	kW	kW	°C
(-30...-25)	107,83	1,3	35,5	386,8	102,3	489,1	16,3
(-25...-20)	106,5	1,2	35,1	363,0	95,8	458,8	16,2
(-20...-15)	103,9	1,1	34,8	327,5	88,5	416,0	16,2
(-15...-10)	100,24	1,0	34,8	288,6	80,9	369,5	16,4
(-10...-5)	95,74	1,0	35,1	254,2	73,3	327,5	17,6
(-5...0)	89,85	0,9	36,5	211,5	65,6	277,1	20,0
0...5	83,58	0,9	39,7	171,5	58,9	230,4	24,6
5...10	78,51	0,9	45,8	120,0	54,0	174,0	31,1
10...15	74,98	0,9	52,1	83,5	50,4	133,9	38,3
(+15)	72,53	0,9	54,2	68,7	45,5	114,2	42,1

### 6.3 Tehon riittävyys mitoitustilanteessa

Tehon riittävyys on olennaista asiakkaan lämmönsiirron takaamiseksi, mikä voidaan tarkistaa tehon yhtälöllä käyttäen asiakkaan mitoitusvirtaamaa sekä menoveden- ja asiakkaan käyttöveden lämmönsiirtimen mitoituslämpötilan lämpötilaeroa.

Menolämpötilan uutta matalinta ja käyttökelpoisinta arvoa selvittäessä on määritettävä lämpötilan kannalta kriittisin piste. Menovesi jäähtyy aina putkistossa viipymästä johtuen, jossa alku- ja loppupään pisteille muodostuu useamman lämpötila-asteen eroavaisuus. Massavirrat kaukolämpöjohdoissa jakaantuvat erillisten putkihaarojen tehontarpeiden mukaisesti. Putkiosuuksille muodostetaan tehontarvetta vastaavat virtausnopeudet, jolloin viipymä, keskimääräinen häviöenergia ja jäähtymä saadaan selville. Kuvan 21 mukaisesti kriittisin lämpötilapiste asettuu kohtaan 5, johon kohdistuu 3,9 °C menoveden jäähtymä, kun menoveden lämpötila on madallettu sekoituspisteessä arvoon 71,6 °C.



Kuva 21. Matalin lämpötilapiste (Trimble NIS, 2022)



Mitoitustilannetta tarkastellessa menolämpötilan kannalta on merkitsevää, kuinka suuria ovat yksittäisten kiinteistöjen sopimusteho ja tilausvesivirta. Piste 5 lämpötilan ollessa 67,7 °C (taulukko 6) toteutuu sopimusteho 12 kW kiinteistön lämmönvaihtimen mitoitusvirtaamalla 0,3 dm<sup>3</sup>. Mikäli menolämpötilan lähtöarvoksi annettaisiin 70 °C, olisi luovutettava teho 11,2 kW, joka ei täyttäisi enää asiakkaalle luvattua sopimustehoa. Sekoitusjärjestelmän toteuttama uusi menolämpötila olisi näin ollen 71,6 °C. Aiemmin kuvatusta menolämpötilan alarajasta 70 °C voidaan kuitenkin poiketa, mikäli asiakkaan mitoitusvirtaamalla voidaan taata riittävä lämpötehon siirtyminen.

Taulukko 6. Menoveden jäähtymä eri pisteiden välillä

Piste	Lämpötila [°C]
Sekoitus	71,6
Piste 1	71,2
Piste 2	70,3
Piste 3	69,8
Piste 4	68,3
Piste 5	67,7

#### 6.4 Uusi meno- ja paluueden lämpötila

Uuden menolämpötilan mukaan massavirta, häviöteho ja laskennallinen paluulämpötila muuttuvat virtauksen kasvamisen ja menoveden lämpötilan muutoksien vaikutuksesta. Paluulämpötila ilman lämpöhäviöitä voidaan olettaa pysyvän samana kiinteistöjen energiantarpeen pysyessä muuttumattomana. Massavirrat eri ulkolämpötilan alueille voidaan muodostaa yhtälön 26 mukaan.

$$q_m = \frac{\phi}{c_p \Delta T} \quad (26)$$

jossa	$q_m$	massavirta	[kg/s]
	$\phi$	lämpöteho	[kW]
	$c_p$	ominaislämpökapasiteetti	[kJ/(kg°C)]
	$\Delta T$	virtaavan aineen lämpötilaero	[°C]

Laskennallisen paluulämpötilan muodostamiseksi valitaan jälleen iterointimenetelmä, jossa häviötehon iterointiaskeleiden perusteella laskennallinen paluulämpötila asettuu pysyvään arvoon. Taulukosta 7 todetaan laskennallisen paluulämpötilan ja massavirran suurenevan, verraten tuloksia lähtötilanteeseen. Massavirran vaikutus tehonsiirtoon on merkittävä, joka todetaan menolämpötilan alentamisen seurauksena kasvaneen talviaikaan kaksinkertaiseksi. Kesäaikaan, jolloin tehontarve ja menolämpötilan alentamisen muutos pienempi on myös massavirran muutos huomattavasti maltillisempi. Menolämpötilaa alennettaessa laskennallinen paluulämpötila suurenee kaukolämpöjohtojen pienentyneen häviötehon seurauksena. Iteroinnin perusteella muodostuneen häviötehon todetaan pienentyneen huomattavasti, joka matalimman ulkolämpötilan alueella pienenee 14,5 kW. Iteroitujen häviötehojen perusteella olisi mahdollista tehdä suoraan vertailu lämpöhäviöiden vuotuisista määristä, mutta tutkimuksen kannalta lämpöhäviöt ovat eri kaukolämpöjohdoille määritetty erillisen kaavan mukaisesti.

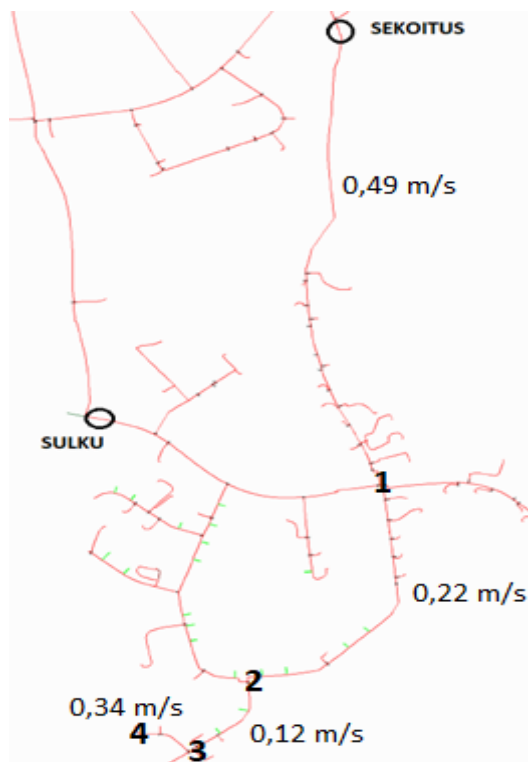
Taulukko 7. Laskennalliset massavirrat ja paluulämpötilat

ulkolämpötila	meno lämpötila	massavirta	paluu lämpötila (ei sis. häviöitä)	teho (ei sis. häviöitä)	häviöteho	teho yht.	paluu lämpötila laskennallinen
°C	°C	kg/s	°C	kW	kW	kW	°C
(-30...-25)	71,6	2,6	35,5	386,8	87,8	474,6	27,3
(-25...-20)	71,6	2,4	35,1	363,0	81,9	444,9	26,8
(-20...-15)	71,6	2,1	34,8	327,5	75,9	403,4	26,3
(-15...-10)	71,6	1,9	34,8	288,6	69,9	358,5	25,8
(-10...-5)	71,6	1,7	35,1	254,2	64,2	318,4	25,9
(-5...0)	71,6	1,4	36,5	211,5	59,0	270,5	26,8
0...5	71,6	1,3	39,7	171,5	54,9	226,4	29,5
5...10	71,6	1,1	45,8	120,0	52,1	172,1	34,6
10...15	71,6	1,0	52,1	83,5	49,7	133,2	40,5
(+15)	71,6	0,9	54,2	68,7	45,3	114,0	42,7

## 6.5 Painehäviöt

Kaukolämpötoimittajan tulee taata asiakkaalle 60 kPa paine-ero asiakaslaitteiden toimimiseksi. Menolämpötilan laskeminen aiheuttaa tehon madaltumista kaukolämpöverkossa, jolloin tulee kasvattaa virtausta saman tehon siirtämiseksi. Virtausnopeuden kasvu aiheuttaa painehäviötä, joten tämä tulee kompensoida korottamalla painetta pumppauksen eri sekoitussuhteilla tarvittavan paine-eron mukaan. Painehäviöt sekoituksen ja kriittisen asiakkaan välillä lasketaan osion 5.2 laskentakaavojen mukaan. Huomion arvoista painehäviötä määrittäessä on käyttää kaukolämpöjohdoissa todellisia virtaamia, jotka

ilmenevät aiemmin selvitettyjen tehontarpeiden jakautuneisuudella. Tehontarpeiden jakaantuneisuuden ja eri reittien painehäviöiden perusteella todetaan reitillä sekoitus–4 toteutuvan suurin painehäviö pientaloalueella, kuvan 22 mukaisesti.



Kuva 22. Suurin painehäviö (Trimble NIS, 2022)

Menolämpötilan laskemisesta aiheutuvat painehäviöt yhdensuuntaisessa johdossa ovat taulukon 8 mukaan kokonaisuudessaan noin 22 kPa, jonka perusteella vaikutusten voidaan todeta olevan hyvin vähäiset. Suurimmat painehäviöt kohdistuvat DN80 kaukolämpöjohdoille, joiden lävitse virtaa käytännössä koko alueen tarvitsema lämpöteho.

Taulukko 8. Painehäviöt pientaloalue

painehäviöt				
sijainti	putkikoko	virtausnopeus	putken pituus	kokonaispainehäviö
[-]	DN	m/s	m	Pa
0-1	80	0,49	614	15323
1-2	65	0,22	350	2381
2-3	50	0,12	119	311
3-4	20/28	0,34	71	4132
yhteensä				22147

Tarvittavan sekoituspumppun valintaa varten tulee muodostaa putkiston ominaiskäyrä, josta ilmenee paineenkorotus tarve kullakin virtaaman arvolla. Mitoitustilanteen (-30 ...-25) °C painehäviö 22 kPa tulee huomioida kahdesti, käsittäen paluujohtojen painehäviöt sekä toimittajan lupaaman paine-eron 60 000 kPa, jolloin tarvittava paineenkorotus on mitoitusohjelmalla 104,3 kPa. Painehäviö kasvaa eksponentiaalisesti eli nelinkertaistuu virtausnopeuden kaksinkertaistuessa, joten tarvittava paineenkorotus eri virtaaman arvoilla voidaan määrittää yhtälön 27 avulla.

$$\Delta p = k q_v^2 \quad (27)$$

jossa	$\Delta p$	paine-ero	[Pa]
	$k$	kerroin	[(Pa·s <sup>2</sup> )/m <sup>6</sup> ]
	$q_v$	tilavuusvirta	[m <sup>3</sup> /s]

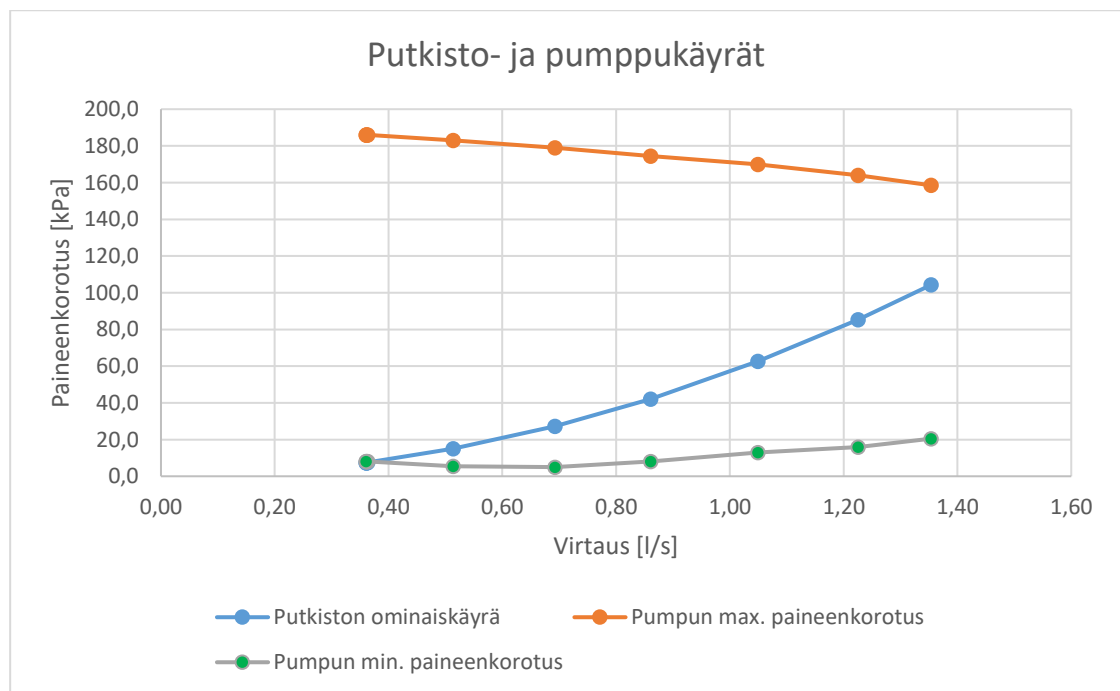
Taulukosta 9 todetaan paineenkorotuksen jäljittelevän virtausta yhtälön 27 mukaisesti, pois lukien ulkolämpötilan asteikoilla (5...+15) °C, jossa rajoittavaksi tekijäksi tulee pumpun säätöalueen minimivirtaama. Kokonaismäärältään energiaa pumppaukseen käytettäisiin vuodessa 0,24 MWh.

Taulukko 9. Paineenkorotukset eri sekoitusvirtaamilla

paineenkorotus					
ulkolämpötila	käyttö	tilavuusvirta	paineenkorotus	teho	energia
[°C]	[h]	[m <sup>3</sup> /s]	[Pa]	[W]	[kWh]
(-30...-25)	4	0,0014	104293	291,7	1,2
(-25...-20)	79	0,0012	85415	223,6	17,7
(-20...-15)	238	0,0010	62658	149,4	35,6
(-15...-10)	550	0,0009	42135	92,5	50,9
(-10...-5)	710	0,0007	27314	58,1	41,2
(-5...0)	814	0,0005	15022	31,8	25,9
0...5	1785	0,0004	7506	18,3	32,7
5...10	1119	0,0004	7457	18,1	20,3
10...15	563	0,0004	7424	18,0	10,1
(+15)	531	0,0004	7402	17,9	9,5

Putkiston ominaiskäyrän mukaan etsitään sopiva pumppu tuottamaan halutun virtaaman ja paineenkorotuksen arvo, jokaisella ulkolämpötilan alueella. Tutki-

muksen kannalta pumpun valinta osoittautui hankalaksi toiminta-alueiden suhteen. Pumpuksi valikoitui monijaksoinen keskipakopumppu sisäisellä taajuusmuuttajalla, joka ohjaa paluueden virtaamaa menoveden sekaan lämpötilan mukaan. Putkisto- ja pumppukäyrästä huomataan putkiston ominaiskäyrän ja pumpun minimi paineenkorotuskäyrän leikkaavan kohdassa 0,35 l/s, jota pienemmällä virtaamalla pumppu ei pysty tuottamaan haluttua paineenkorotusta (kuva 23). Tämän seurauksena ulkolämpötilan alueilla (5...+15) °C pumpun käyntiaikaa on jaksotettu, jolloin säätöalueen minimivirtaama ei alitu. Virtaamat toteutusivat tällöin jaksoissa ulkolämpötilan (0...5) °C mukaan. Käyttötunnit määritetään laskennallisten (5...+15) °C virtausten suhteiden mukaan. Pumpun toiminnan jaksottaminen on mahdollista pitkän etäisyyden ansiosta ennen ensimmäistä kiinteistöä, missä syötetty paluuvesi ehtii sekoittua menoveteen.



Kuva 23. Putkisto- ja pumppukäyrät

## 6.6 Lämpöhäviöt

Kaukolämpöjohtojen lämpöhäviöt tulee määrittää kaikille eri ulkolämpötilan alueille käyttäen aiemmin laskettuja meno- ja paluulämpötilan arvoja. Laskennassa tarkastellaan tilannetta alkuperäisillä meno- ja paluueden arvoilla ja uusilla meno- ja paluueden arvoilla. Tarkastelu suoritetaan referenssi vuoden 2021 ulkolämpötilamittausten lukumäärän mukaan, joka edustaa normaali

vuoden lämmönjohtumista kaukolämpöjohdoissa. Vertailukohdaksi lasketaan lämpöhäviöt vuoden 2010 ulkolämpömittausten lukumäärän mukaan, jonka lämmitystarve oli normaalivuotta korkeampi 5047 (Ilmatieteenlaitos, 2010). Kaukolämpöjohtojen lämpöhäviöiden määrittämiseen on käytetty luvun 2.4 mukaisia laskentakaavoja.

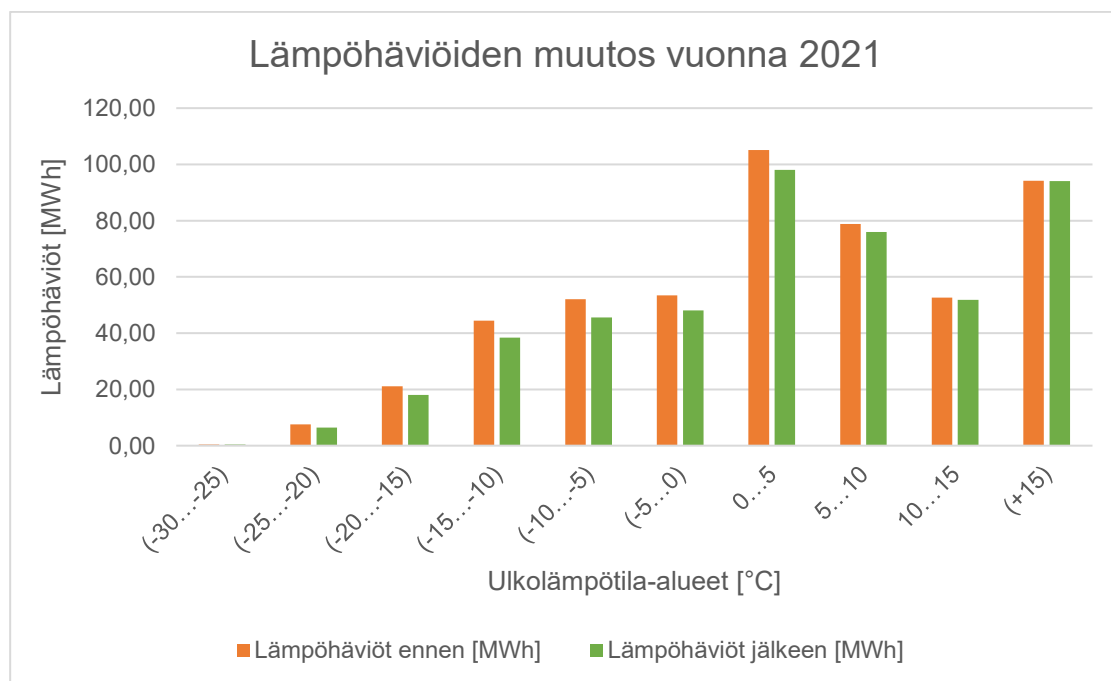
Lämpöhäviöiden laskennassa eristeen lämmönjohtavuutena on käytetty suosituksen L1 mukaista  $0,029 \text{ W/(mK)}$  arvoa, joka kuvastaa lämmönjohtavuuden ylärajaa uudelle elementille. Teräsputkien mitat lämpöhäviöiden laskentaan on valittu suosituksen L1 taulukoista, käyttäen keskimääräistä putken halkaisijaa ja seinämän paksuutta. Suojakuoren halkaisija kaukolämpöjohdoille 2Mpuk ja Mpuk on määritetty suosituksen L1 mukaisilla arvoilla eri DN-putkikokojen mukaan. DN-28 2Mpuk ja Cu28 2Mpuk kaukolämpöjohtojen etäisyys toisistaan on määritetty DN32 kaukolämpöjohdolle asetetun ohjeistuksen mukaan ja muut mitat virtaus- ja suojaputkelle valittu Logstor Kaukolämpö käsikirjasta (Logstor, 2022). Kaukolämpöjohdon peittosyvyytenä on käytetty suosituksen L11 mukaista vähimmäisarvoa 0,5 m. Putkien keskipisteiden etäisyydet 2Mpuk ja Mpuk kaukolämpöjohdoille on valittu suosituksen L11 mukaisesti. Kaukolämpöjohtojen pituudet ovat olemassa olevien tietojen perusteella kerätty verkkotietojärjestelmästä.

Lämpöhäviöiden laskennan perusteella voidaan todeta menoveden lämpötilan laskemisen vaikuttavan alentavasti pientaloalueella syntyviin lämpöhäviöihin kaukolämpöjohdoissa. Vaikutus on suurimmillaan kovimpien pakkasten aikana, jolloin lämpöhäviöitä voidaan alentaa 14,1 % taulukon 10 mukaisesti. Vastaavasti kesäaikaan  $+15 \text{ °C}$  vaikutukset ovat olemattomat, kun menoveden lämpötilaa voidaan madaltaa vain  $0,9 \text{ °C}$ .

Taulukko 10. Lämpöhäviöt pientaloalueella

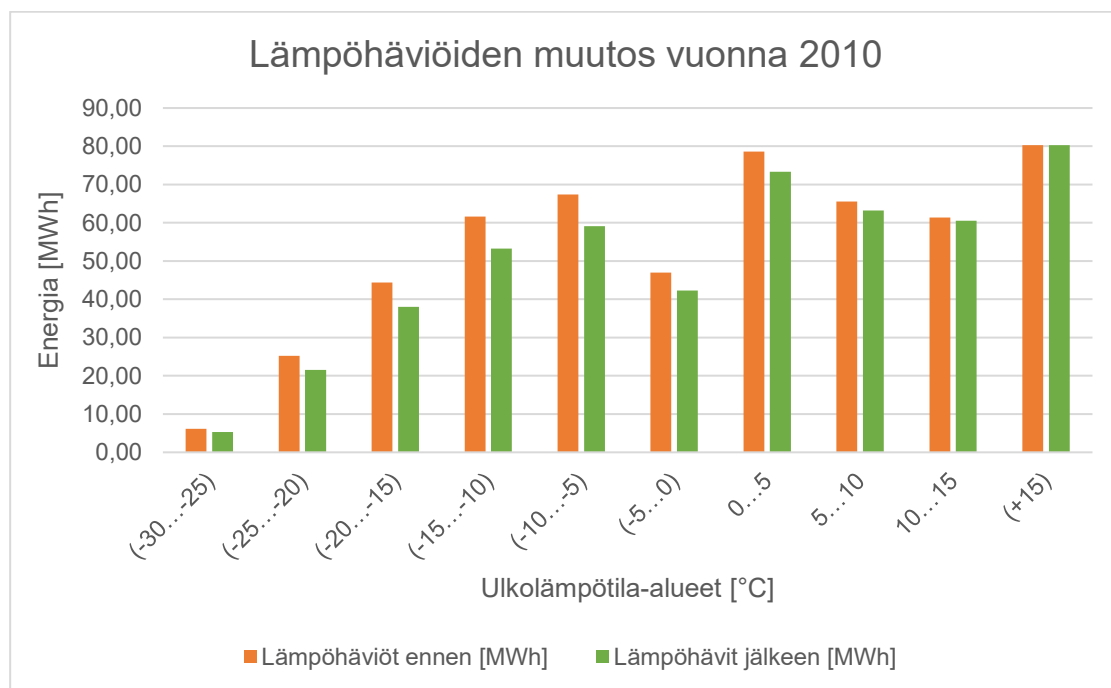
Lämpöhäviöt pientaloalue			
ulkolämpötila	lämpöhäviöt ennen	lämpöhäviöt jälkeen	muutos
[°C]	[kW]	[kW]	[%]
(-30...-25)	102,3	87,9	14,1
(-25...-20)	95,8	81,9	14,5
(-20...-15)	88,6	75,9	14,3
(-15...-10)	80,9	69,9	13,6
(-10...-5)	73,3	64,3	12,3
(-5...0)	65,6	59,1	10,0
0...5	58,9	54,9	6,8
5...10	54,0	52,1	3,6
10...15	50,5	49,8	1,5
(+15)	45,3	45,3	0,02

Energiatasolla tarkasteltuna vuoden 2021 lämpöhäviöitä, todetaan muutoksen vaikuttavan positiivisesti lämpöhäviöiden määrään vuositasolla. Tämänhetkessä tilanteessa lämpöhäviöitä aiheutuisi vuodessa 509,7 MWh, jota olisi mahdollista alentaa 32,7 MWh laskemalla menoveden lämpötilaa, jolloin lämpöhäviöt olisivat 477,1 MWh (kuva 24). Vuoden 2021 osalta kokonaismuutosta lämpöhäviöihin olisi laskennan perusteella saatavilla -6,4 %.



Kuva 24. Lämpöhäviöiden muutos 2021

Tutkimuksen vertailuvuotena 2010 kokonaismuutosta lämpöhäviöiden määrään saavutettiin laskennallisesti -7,6 %. Vuoden 2010 lämpötilojen huomataan kuvasta 25 painottuneen nollarajan alapuolelle huomattavasti enemmän, kuin vuoden 2021 lämpötilojen. Lämpöhäviöitä olisi syntynyt 537,7 MWh, joka menoveden lämpötilaa madaltamalla olisi alentunut arvoon 496,9 MWh, saaden aikaan säästöä lämpöhäviöissä 40,8 MWh.



Kuva 25. Lämpöhäviöiden muutos 2010

Lämpöhäviöt eri putkityypeittäin liitteenä 1-4.

## 7 SEKOITUSPUMPPUJÄRJESTELMÄN INVESTOINTI

Investointilaskelman tulisi antaa mahdollisimman selkeä kuva investoinnin kannattavuudesta. Investointilaskelman mukaan luodaan perusta päätöksenteolle, jolloin kannattavuus pohjautuu taloudelliseen arvioon.

### 7.1 Valittu laskentamalli investoinnin määrittämiseksi

Tutkimukseen valitut laskentamenetelmät on valittu yleisesti käytössä olevien menetelmien joukosta. Laskentamenetelmät sopivat hyvin kuvastamaan investoinnin kannattavuutta, joka rahoitetaan omalla pääomalla.



### 7.1.1 Takaisinmaksuaika

Käytetään kuvaamaan, kuinka nopeasti olisi mahdollista kattaa investoinnista aiheutuneet kustannukset. Lyhyet takaisinmaksuajat antavat paremman kuvan investoinnin kannattavuudesta. Takaisinmaksuaikaa tulosten arvioimiseksi on käytetty keskiarvoisesti, jossa energianhinnan vuosittaiset muutokset ovat jätetty huomioimatta. Takaisinmaksuaika voidaan määrittää yhtälön 28 mukaan.

$$PBP = \frac{H}{NFC} \quad (28)$$

jossa	$PBP$	takaisinmaksuaika	[a]
	$H$	hankintakustannus	[€]
	$NFC$	nettokassavirta	[€/a]

### 7.1.2 Sisäinen korkokanta IRR

Sisäisellä korkokannalla voidaan kuvata investoinnin tuottoa sijoitetulle pääomalle ennalta määritetyllä aikavälillä. Sisäinen korkokanta sopii ennalta mainitusta syystä hyvin laskelmiin, joissa investointi suoritetaan käyttämällä omaa pääomaa. IRR on laskentakorko, jolla investoinnin nettonykyarvo saa arvon nolla. Investointia voidaan pitää kannattavana, kun sisäinen korkokanta on suuri ja verratessa tuottovaatimukseen ylittää vaatimuksen asettaman rajan. Sisäinen korkokanta määritetään yhtälöstä 29.

$$NPV = 0 = \sum_{t=1}^n \frac{NCF_t}{(1+r)^t} + \frac{JA}{(1+r)^n} - H \quad (29)$$

jossa	$NPV$	nettonykyarvo	[€]
	$NCF_t$	nettotuotot vuonna t	[€]
	$r$	sisäinen korkokanta	[%]
	$JA$	jäännösarvo	[€]
	$n$	pitoaika	[a]
	$H$	hankintakustannus	[€]

### 7.1.3 Herkkyysanalyysi

Menoveden alentamiseen perustuva järjestelmä kaukolämpöverkon yksittäiseen pisteeseen muodostaa rakennustöineen suhteellisen korkean kokonaisinvestoinnin. Globaalista maailman tilanteesta johtuen raaka-aineen, energian ja komponenttien hinnat ovat olleet nousussa. Edellä mainittujen vaikutuksia investoinnin kannattavuuteen tulee huomioida ja valita käyttökelpoisimmat muuttujan arvot.

## 7.2 Investointilaskelma

Sekoituspumppujärjestelmän toteuttaminen vaatii investointia useisiin eri komponentteihin. Sekoituspumppu on valittu putkiston- ja pumpun ominaiskäyrien mukaisesti, mikä vaatii ohjaukseen erilliset lämpötila-anturit, ohjelmoitavan logiikan ja modeemin tiedonsiirtoa varten. Sekoituspumppulle tulee toteuttaa suo- jattupaikka huoltomahdollisuuksineen, rakentamalla tämä erilliseen kaivoon suojattuna kannella. Kaivon valinnassa määräävänä tekijänä on sekoituspum- pun korkeus alustoineen ja asennus- / huoltotiloineen. Sekoituspumppun kytke- minen kaivossa kaukolämpöverkkoon vaatii erillisiä johto-osia sekä sähköliitty- män johdotuksineen.

Maanrakennus-, sähkö-, kaukolämmönkierto- ja putkistotöiden sekä sähköliit- tymän kustannukset ovat kerätty kokemusperäisistä lähteistä, jotka jäljittelevät aiempien rakennuskohteiden kustannuksia (Kylliäinen & Toivola 2022). Auto- maatio- ja verkkolaitteistojen hinnat tutkimukseen on valittu myös kokemuspe- räisiä lähteitä käyttäen (Ollikainen, J. 2022).

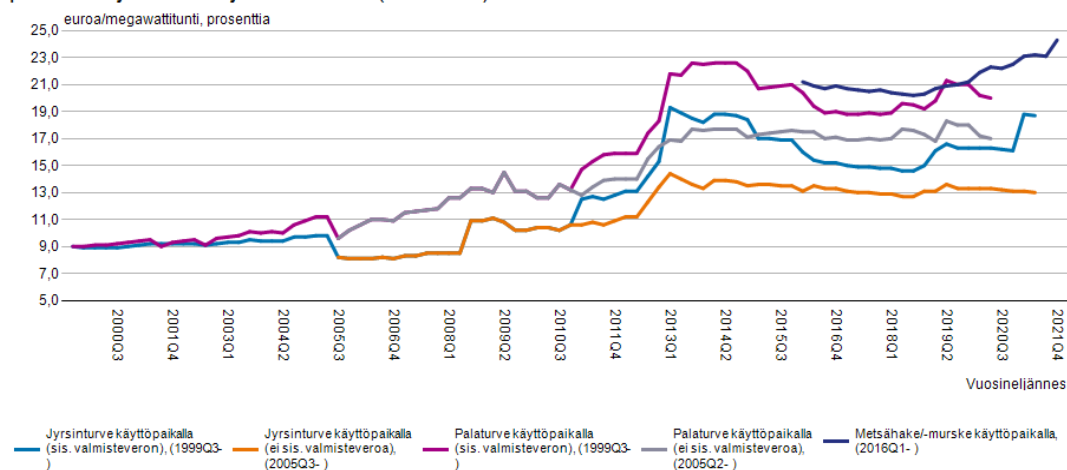
Investoinnin pitoaika on määritetty vastaamaan kaukolämpöverkon elinaikaa. Normaaleissa olosuhteissa käyttölämpötilan ollessa 120 °C käyttöiän tulee olla vähintään 30 vuotta ja jatkuvassa 115 °C käyttölämpötilassa 50 vuotta (Energiateollisuus ry 2020, 2). Kaukolämpöverkko on rakennettu alueelle vuonna 2010, joten pitoajaksi on valittu keskimääräinen 30 vuotta.

Pumppujen tekniseksi käyttöiäksi on esitetty 20–25 vuotta Rakennustietosää- tiön RTS laatiman ohjeistuksen mukaan (RTS. 2008, 17). Taloudellisessa mie- lessä ei ole kuitenkaan järkevää käyttää näin pitkää pitoaikaa laitteelle tässä

tutkimuksessa. Pumpun pitoajaksi laskentaan on valittu 10 vuotta, koska integroidulla taajuusmuuttajalla varustetun pumpun tehokomponenteille käyttöikä 20–25 vuotta olisi turhan optimistinen oletama. Pumpun kustannuksen ovat kolminkertaiset, jolloin tulee uusia käyttöönoton jälkeen 10 vuoden välein. Automaation osalta erillinen ohjelmoitavalogiikka tulee myös uusia pitoajan puolivälissä 15 vuoden kohdalla.

Investointi laskelmassa IRR on määritetty perustuen kolmeen erilaiseen skenaarioon, joita tutkitaan toisistaan poikkeavilla energianhinnan muutoksilla. Energianhinnan muutoksiksi on valittu pysyvyystilanne nykyisessä arvossaan, jolloin energianhintojen odotetaan noudattavan 0 % muutosta. Toisen skenaarion muutos on määritetty kuvan 26 mukaisten kotimaisten polttoaineiden hinnan muutoksien mukaan, jossa vuosittaista muutosta eri polttoaineiden suhteen tapahtuu n. 1 %. Viimeinen muutosprosentti tutkimukseen on valittu Euroopan keskuspankin pitkän aikavälin inflaatiotavoitteen 2 % mukaisesti (EKP, 2022).

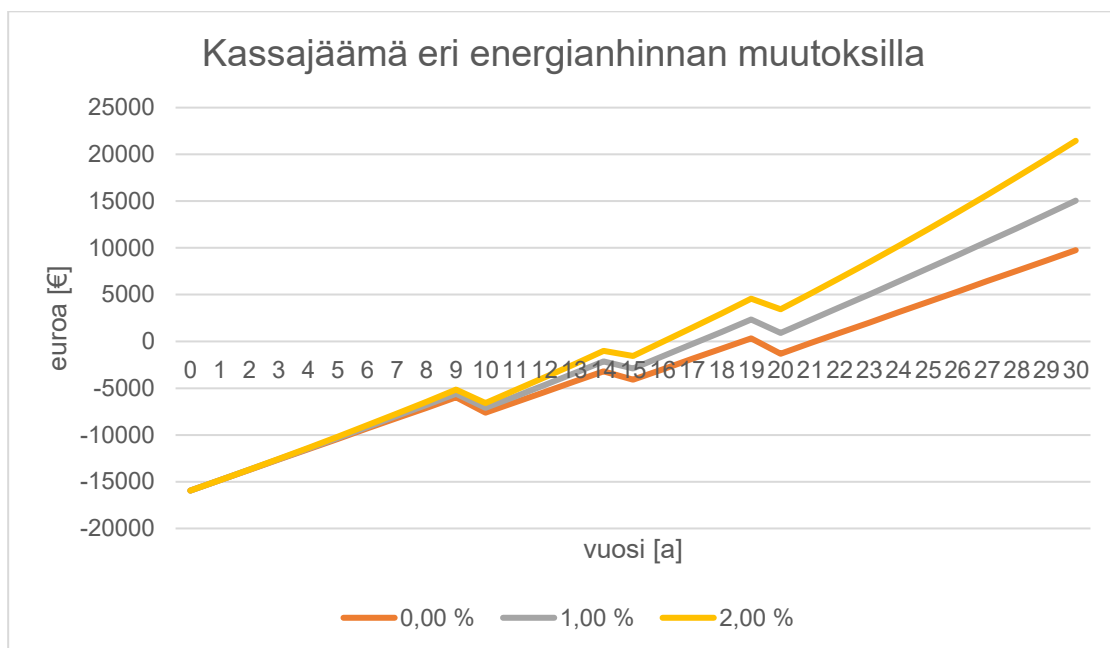
Kotimaisten polttoaineiden käyttäjähinnat energiantuotannossa (ei sis. alv) muuttujina Kotimainen polttoaine ja Vuosineljännes. Hinta (eur/MWh).



Kuva 26. Kotimaisten polttoaineiden hintojen kehitys energiantuotannossa (Tilastokeskus, 2022)

Laskennasta saatujen tulosten perusteella energianhinnaltaan muuttumaton takaisinmaksuaika olisi 18,7 vuotta. Kassajäämää voidaan tarkastella rahavirran kumulatiivisten muutosten perusteella kuvan 27 mukaisesti. Voidaan todeta jokaisella energianhinnan muutoksella investoinnin olevan pitoajan puitteissa positiivisesti tuottoisa. Sisäinen korkokanta asettuu seuraavasti:

- muutos 0 %/a (30 vuotta) → IRR = 3,44 %
- muutos 1 %/a (30 vuotta) → IRR = 4,68 %
- muutos 2 %/a (30 vuotta) → IRR = 5,88 %

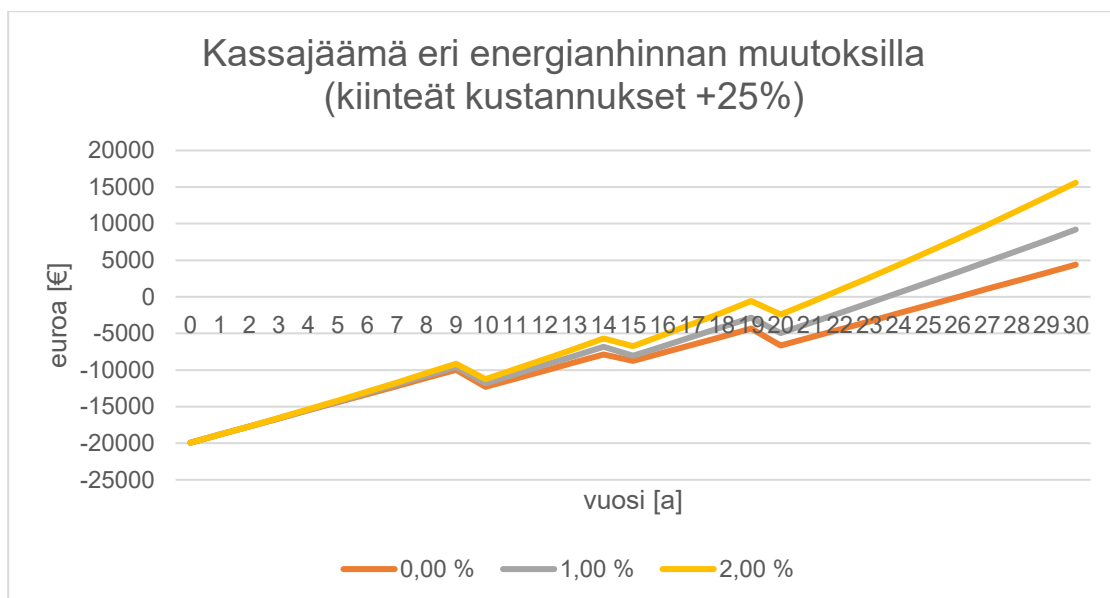


Kuva 27. Kassajäämä eri energianhinnan muutoksilla

Kassajäämään tulee kohdistaa herkkyytarkistelu, jossa kiinteidenkustannusten osuus muuttuu +/-25 %. Kyseisen muutoksen perusteella voidaan tehdä tarvittavat päätelmät vaikutuksista kokonaiskustannuksiin.

Huomioimatta energianhinnan mahdollisia muutoksia kiinteidenkustannusten kasvaessa 25 % takaisinmaksuaika pitkitty huomattavasti ollen 26,5 vuotta. Kiinteiden kustannusten noususta huolimatta investointi maksaa itsensä takaisin, mutta 7,8 vuotta myöhemmin kuin laskennallisessa tapauksessa (kuva 28). Sisäinen korkokanta asettuu seuraavasti kiinteiden kustannusten kasvaessa 25 %:

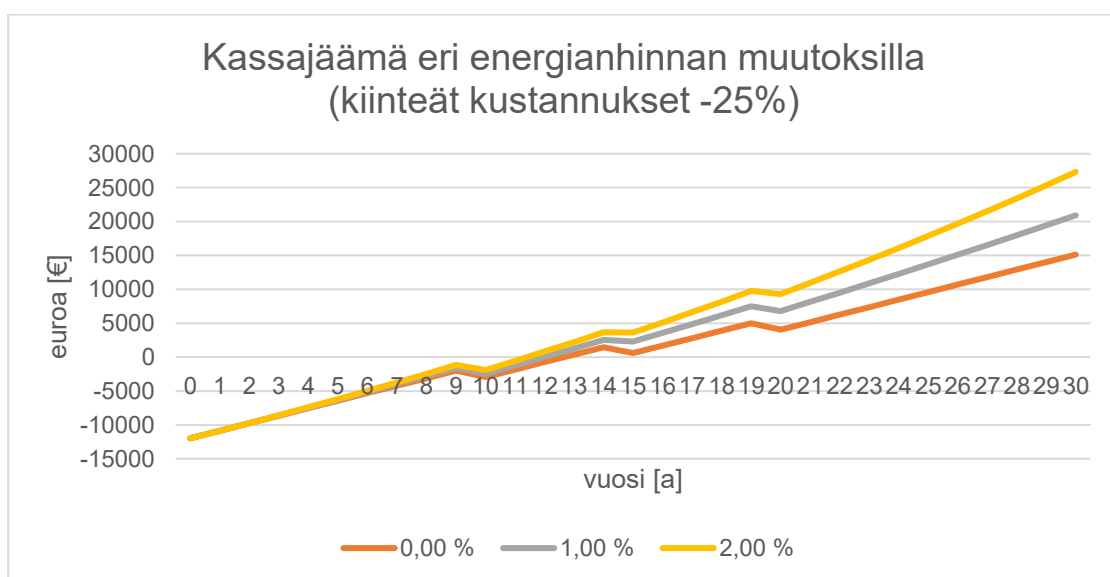
- muutos 0 %/a (30 vuotta) → IRR = 1,33 %
- muutos 1 %/a (30 vuotta) → IRR = 2,47 %
- muutos 2 %/a (30 vuotta) → IRR = 3,71 %



Kuva 28. Kiinteät kustannukset +25%

Vastaavasti kiinteiden kustannusten laskiessa -25 % todetaan kuvan 29 mukaisesti takaisinmaksuajan puolittuvan edellisestä ja saavuttavan huomattavasti suuremman kassajäämän. Takaisinmaksuajalla 12,7 vuotta automaation uusiminen ei edes kerkeä vaikuttamaan pitoajan puolivälissä. Sisäinen korkokanta asettuu seuraavasti kiinteiden kustannusten vähentyessä 25 %:

- muutos 0 %/a (30 vuotta) → IRR = 6,53 %
- muutos 1 %/a (30 vuotta) → IRR = 7,88 %
- muutos 2 %/a (30 vuotta) → IRR = 9,04 %



Kuva 29. Kiinteät kustannukset -25%

## 8 JOHTOPÄÄTÖS JA POHDINTA

Menoveden lämpötilaan toteutettavaa muutosta on mahdollista simuloida laskennallisesti ilman erillisiä mittauksia kaukolämpöverkossa. Kulutuskohteista saatavien mittausten ja mitoitusarvojen perusteella voidaan määrittää kaukolämpöverkon osassa siirtyvä lämpötila, paine-ero ja virtausnopeus. Uuden alhaisimman lämpötilan määrittämiseksi tulee asiaa tarkastella tehojen riittävydellä. Paluuveden lämpötilan oletetaan pysyvän samana ilman lämpöhäviöitä, joten laskennallinen paluulämpötila ennen ja jälkeen saadaan selville iterointimenetelmää käyttäen. Lämpöhäviöt ennen ja jälkeen määritetään laskentayhtälöä käyttäen, jolloin on tiedossa, kuinka paljon energiaa voidaan säästää alentamalla menoveden lämpötilaa.

Tutkimuksen laskelmien mukaan on perusteltua todeta pientaloalueella menoveden lämpötilan alentamisen johtavan taloudellisiin hyötyihin. Investointi olisi teknisesti mahdollista toteuttaa, missä tarvittavat rakentamistyöt olisi mahdollista tehdä nykyiseen osaamiseen perustuen yhdessä yhteistyökumppaneiden kanssa. Herkkyystarkastelussa kiinteiden kustannusten noustessa 25 % tuotto-odotus pysyy positiivisena pitoajan puitteissa ja tuotto-odotus ilman energianhinnan suhdanteisia muutoksia olevan laskennallisesti 3,44 %, joten todetaan investointi kannattavaksi.

Jatkokehityksenä menoveden lämpötilan madaltamista tulisi laskennallisesti simuloida Lappeenrannan Rauhasa sijaitsevaan loma-asuntoalueeseen. Alueella lämmöntuotanto on 80 % uusiutuvista energialähteisistä peräisin, missä hyödynnetään lämpöpumppuja sekä aurinkokeräimiä. Lämpökeskuksessa huippu- ja varatehon riittämiseksi on käytössä myös maakaasukattila. Loma-asuntoalueelta kaukolämpöä johdetaan myös Rauhan toiseen osaan, jossa toimii kaasukäyttöinen lämmitysvoimalaitos. Alueelta jaettaessa lämpöä toisen verkon osaan, tulisi selvittää vastaako lämpölaitokselta lähtevä menoveden lämpötila loma-asuntoalueen tarvetta vai olisiko lämpötilaa mahdollista madaltaa sekoittamalla paluuvettä. Lämpötilan säätöä sekoituksessa tulisi myös selvittää, jossa se voisi perustua jatkuviin kulutusmittauksiin, koska loma-asuntoalueen käyttöaste poikkeaa huomattavasti normaalista asuinalueesta.

## 9 YHTEENVETO

Aiheena kaukolämmön menoveden lämpötilan alentaminen paluuedellä on laaja kokonaisuus, joka oli ennalta rajattu koskemaan tiettyä kaukolämpöverkon aluetta. Tarvittavat mittaustiedot pientaloalueelta tuotiin verkkotietojärjestelmää käyttäen, mitkä käsiteltiin aiempiin tutkimuksiin ja teoksiin perustuvilla laskentakaavoilla. Laskennasta saatuja tuloksia voidaan pitää luotettavina kriittisesti valittujen lähteiden ja Lappeenrannan Energiaverkkojen omiin mittaustietoihin perustuen. Tulosten perusteella valitulle pientaloalueelle todentui matalampi lämpöisellä menovedellä huomattavasti pienemmät lämpöhäviöt, kuin mitä tällä hetkellä on. Opinnäytetyö saavutti tavoitteensa, jolloin mahdollinen uusi lämpötila menovedelle saatiin selvitetty, investoinnin kannattavuus pystyttiin analysoimaan ja opinnäytetyön johtopäätöstä voitaisiin käyttää hankkeen arviointiin. Opinnäytetyöstä syntyneitä laskentamallia on mahdollista käyttää selvittäessä uusilla alueilla mahdollisuutta vähentää lämpöhäviöitä. Laskentataulukkoon tehdyt laskelmat ja tulokset luovutettu Lappeenrannan Energiaverkot Oy:n haltuun.

## LÄHTEET

Adato Enegia Oy. 2021. Kaukolämmön menolämpötilan optimointi. Raportti 2021. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.adato.fi/tietopalvelut/kaukolampoekstra/> [viitattu 8.3.2022].

Energiatehokkuuslaki 30.12.2014/1429

Energiateollisuus ry. 2022. Kaukolämpöt 2020 graafeina. Julkaistu 17.2.2022. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://energia.fi/files/6804/Kaukolampotilasto\\_2020.pdf](https://energia.fi/files/6804/Kaukolampotilasto_2020.pdf) [viitattu 21.2.2022].

Energiateollisuus ry. 2022. Kaukolämpötilasto 2020. Julkaistu 31.1.2022. PPTX-dokumentti. Saatavissa: <https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/kaukolampotilasto.html#material-view> [viitattu 22.2.2022].

Energiateollisuus ry. 2021. Kaukolämmön menolämpötilan optimointi. Julkaistu 9.2.2021. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/raportti\\_kaukolammon\\_menolampotilan\\_optimointi.html#material-view](https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/raportti_kaukolammon_menolampotilan_optimointi.html#material-view) [viitattu 25.2.2022].

Energiateollisuus ry. 2021. Kaukolämmön yleiset sopimusehdot 2021. Suositus T1. Julkaistu 12.10.2021. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://energia.fi/files/6371/Kaukolammon\\_yleiset\\_sopimusehdot\\_Suositus\\_T1\\_2021.docx](https://energia.fi/files/6371/Kaukolammon_yleiset_sopimusehdot_Suositus_T1_2021.docx) [viitattu 25.2.2022].

Energiateollisuus ry. 2022. Energiavuosi 2021 kaukolämpö. Julkaistu 27.1.2022. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://energia.fi/files/5650/Kaukolampovuosi\\_2021\\_v1.4\\_FINAL.pdf](https://energia.fi/files/5650/Kaukolampovuosi_2021_v1.4_FINAL.pdf) [viitattu 2.3.2022].

Energiateollisuus ry. 2020. Kiinnivaahdotetut kaukolämpöjohdot. Suositus L1. Julkaistu 2.9.2020. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://energia.fi/files/593/20200831\\_SuositusL1\\_Kiinnivaahdotetut\\_kaukolampojohdot\\_2020.pdf](https://energia.fi/files/593/20200831_SuositusL1_Kiinnivaahdotetut_kaukolampojohdot_2020.pdf) [viitattu 3.3.2022].

Euroopan keskuspankki. EKP:n neuvoston uusi rahapolitiikan strategia. Julkaistu 1.7.2021. Saatavissa: <https://www.ecb.europa.eu/press/pr/date/2021/html/ecb.pr210708~dc78cc4b0d.fi.html> [viitattu 12.5.2022].

Ilmatieteenlaitos. 2022. Kuntakohtaiset kertoimet. Excel-tiedosto. Julkaistu 2013. Saatavissa: [https://www.ilmatieteenlaitos.fi/documents/30106/666405/Kuntakertoimet\\_kuntajako\\_2013.csv/4e5f8a57-d1a3-41a2-aa9f-59299e5f3476](https://www.ilmatieteenlaitos.fi/documents/30106/666405/Kuntakertoimet_kuntajako_2013.csv/4e5f8a57-d1a3-41a2-aa9f-59299e5f3476) [viitattu 7.4.2022].



Ilmatieteenlaitos. 2022. Lämmitystarveluvut 2021. Julkaistu 20.1.2014. Saatavissa: [https://www.ilmatieteenlaitos.fi/lammitystarveluvut?6Q0hW0Ue3EKANmx4TUFVNx\\_q=y%253D2021](https://www.ilmatieteenlaitos.fi/lammitystarveluvut?6Q0hW0Ue3EKANmx4TUFVNx_q=y%253D2021) [viitattu 7.4.2022].

Koskelainen, L., Saarela, & Sipilä, K. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki: Energiategollisuus ry.

Koskelainen, L., Meuronen, V., Sirola, V-P, & Vakkilainen, E. 2009. Kaukolämpöjohtojen optimaalisen eristyspaksuuden tarkastelu. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Julkaistu 4.9.2009. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://docplayer.fi/3804278-Kaukolampojohtojen-optimaalisen-eristyspaksuuden-tarkastelu.html> [viitattu 9.3.2022]

Logstor Denmark Holding ApS. 2022. Kaukolämpökäsikirja. Katalogi. PDF-dokumentti. Julkaistu 2022. Saatavissa: <https://www.logstor.com/media/7311/kingspan-logstor-district-heating-manual-specifications-fi-fi.pdf> [viitattu 30.3.2022].

Motiva. 2017. Energiategokas lämmönsiirto. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/11078/Energiategokas\\_lammonsiirto\\_opas.pdf](https://www.motiva.fi/files/11078/Energiategokas_lammonsiirto_opas.pdf) [viitattu 11.3.2022].

Mäkelä, V-M. & Tuunanen, J. 2015. Suomalainen kaukolämmitys. Oppimateriaali. Mikkelin ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/97138/URNISBN9789515885074.pdf> [viitattu 10.3.2022].

Ollikainen, J. 2022. Lappeenrannan Lämpövoima Oy. Henkilöhaastattelu 9.5.2022.

Kylliäinen, A. 2022. Lappeenrannan Energiaverkot Oy. Henkilöhaastattelu 24.3.2022.

Rakennustietosäätiö RTS. 2008. Kiinteistön tekniset käyttöiät ja kunnossapitajaksot. Julkaistu tammikuu 2008. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://raksystems.fi/wp-content/uploads/2019/04/KH-90-00403.pdf> [viitattu 25.3.2022].

Soljasalo, M. 2022. Lappeenrannan Energiaverkot Oy. Henkilöhaastattelu 14.3.2022.

Tilastokeskus. 2022. Kotimaisten polttoaineiden hinnat energiantuotannossa. Tietokantataulukot. Saatavissa: [https://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_ene\\_ehi/statfin\\_ehi\\_pxt\\_12gb.px/chart/chartViewLine/](https://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_ene_ehi/statfin_ehi_pxt_12gb.px/chart/chartViewLine/) [viitattu 11.5.2022].

Toivola, E. 2022. Lappeenrannan Energiaverkot Oy. Henkilöhaastattelu 28.4.2022.

Trimble Solutions Oy. Trimble NIS-verkkotietojärjestelmä. Sisäinen tietokanta.

Ympäristöministeriön asetus rakennusten vesi- ja viemärlaitteistosta 01.01.2018. 1047/2017

Ympäristöministeriö. Rakennusten energiakulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. 20.12.2017. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Ohje---Rakennuksen-energiankulutuksen-ja-lammitystehontarpeen-laskenta-20-12-2017-4332AA81\\_75E1\\_4CA0\\_B208\\_B0ACB60A267F-133692.pdf/277c79e7-2a12-5052-ba33-cb2e2c8709ab/Ohje---Rakennuksen-energiankulutuksen-ja-lammitystehontarpeen-laskenta-20-12-2017-4332AA81\\_75E1\\_4CA0\\_B208\\_B0ACB60A267F-133692.pdf?&t=1603260201597](https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Ohje---Rakennuksen-energiankulutuksen-ja-lammitystehontarpeen-laskenta-20-12-2017-4332AA81_75E1_4CA0_B208_B0ACB60A267F-133692.pdf/277c79e7-2a12-5052-ba33-cb2e2c8709ab/Ohje---Rakennuksen-energiankulutuksen-ja-lammitystehontarpeen-laskenta-20-12-2017-4332AA81_75E1_4CA0_B208_B0ACB60A267F-133692.pdf?t=1603260201597) [viitattu 7.3.2022].

## KUVALUETTELO

Kuva 1. Energiateollisuus ry. 2022. Kaukolämpötilasto 2020. Julkaistu 17.2.2022. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://energia.fi/files/6804/Kaukolampotilasto\\_2020.pdf](https://energia.fi/files/6804/Kaukolampotilasto_2020.pdf) [viitattu 21.2.2022].

Kuva 2. Energiateollisuus ry. 2022. Kaukolämpötilasto 2020. Julkaistu 31.1.2022. PPTX-dokumentti. Saatavissa: <https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/kaukolampotilasto.html#material-view> [viitattu 23.2.2022].

Kuva 3. Kylliäinen, A. Toivola, E. Lappeenrannan Energiaverkot Oy. 2019. Lappeenrannan Lämpövoima Oy. Sisäinen tietokanta.

Kuva 4. Mäkelä, V-M., Tuunanen, J. 2015. Suomalainen kaukolämmitys. Oppimateriaali. Mikkelin ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/97138/URNISBN9789515885074.pdf> [viitattu 10.3.2022].

Kuva 5. Energiateollisuus ry. 2022. Kaukolämpötilasto 2020. Julkaistu 31.1.2022. PPTX-dokumentti. Saatavissa: <https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/kaukolampotilasto.html#material-view> [viitattu 22.2.2022].

Kuva 6. Energiateollisuus ry. 2022. Energiavuosi 2021 kaukolämpö. Julkaistu 27.1.2022. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://energia.fi/files/5650/Kaukolampovuosi\\_2021\\_v1.4\\_FINAL.pdf](https://energia.fi/files/5650/Kaukolampovuosi_2021_v1.4_FINAL.pdf) [viitattu 22.2.2022].

Kuva 7. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. 20.12.2017. 1010/2017

Kuva 8. Energiateollisuus ry. 2021. Rakennusten kaukolämmitys, määräykset ja ohjeet. K1/2021. Julkaistu 22.10.2021. Saatavissa: [https://energia.fi/files/6412/Julkaisu\\_K1\\_2021\\_Rakennusten\\_kaukolammitys\\_Maaraykset\\_ja\\_ohjeet\\_%28pdf%29.pdf](https://energia.fi/files/6412/Julkaisu_K1_2021_Rakennusten_kaukolammitys_Maaraykset_ja_ohjeet_%28pdf%29.pdf) [viitattu: 7.3.2022].

Kuva 9. Koskelainen, L., Saarela, & Sipilä, K. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki: Energiateollisuus ry.

Kuva 10. Koskelainen, L., Meuronen, V., Sirola, V-P, & Vakkilainen, E. 2009. Kaukolämpöjohtojen optimaalisen eristyspaksuuden tarkastelu. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Julkaistu 4.9.2009. PDF-dokumentti. Saatavissa:

<https://docplayer.fi/3804278-Kaukolampojohtojen-optimaalisen-eristyspaksuuden-tarkastelu.html> [viitattu 9.3.2022].

Kuva 11. Koskelainen, L., Meuronen, V., Sirola, V-P, & Vakkilainen, E. 2009. Kaukolämpöjohtojen optimaalisen eristyspaksuuden tarkastelu. Lappeenranta teknillinen yliopisto. Julkaistu 4.9.2009. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://docplayer.fi/3804278-Kaukolampojohtojen-optimaalisen-eristyspaksuuden-tarkastelu.html> [viitattu 9.3.2022].

Kuva 12. Koskelainen, L., Saarela. & Sipilä, K. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki: Energiateollisuus ry.

Kuva 13. Koskelainen, L., Saarela. & Sipilä, K. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki: Energiateollisuus ry.

Kuva 14. Koskelainen, L., Saarela. & Sipilä, K. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki: Energiateollisuus ry.

Kuva 15. Energiateollisuus ry. 2016. Teho- ja vesivirta kaukolämmön maksuperusteina. Suositus K15/2014. Julkaistu 17.8.2016. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://energia.fi/files/586/Teho\\_ ja\\_ vesivirta\\_ SuositusK15\\_ 2014.pdf](https://energia.fi/files/586/Teho_ ja_ vesivirta_ SuositusK15_ 2014.pdf) [viitattu 11.3.2022].

Kuva 16. CADS. periaatekuva. Joel Taipale [viitattu 29.4.2022]

Kuva 17. CADS. Taseraja. Joel Taipale [viitattu 29.4.2022]

Kuva 18. Trimble Solutions Oy. Trimble NIS-verkkotietojärjestelmä. Pientaloalueen kaukolämpöverkko. Sisäinen tietokanta.

Kuva 19. Laskentajärjestys. Joel Taipale. 4.5.2022

Kuva 20. Valmet Oyj. Valmet DNA-automaatiojärjestelmän käyttöliittymä. Sisäinen tietokanta.

Kuva 21. Trimble Solutions Oy. Trimble NIS-verkkotietojärjestelmä. Matalin lämpötilapiste. Sisäinen tietokanta.

Kuva 22. Trimble Solutions Oy. Trimble NIS-verkkotietojärjestelmä. Suurin painehäviö. Sisäinen tietokanta.

Kuva 23. Putkisto- ja pumppukäyrät. Joel Taipale. 10.5.2022

Kuva 24. Lämpöhäviöiden muutos 2021. Joel Taipale. 5.5.2022

Kuva 25. Lämpöhäviöiden muutos 2010. Joel Taipale. 5.5.2022

Kuva 26. Tilastokeskus. 2022. Kotimaisten polttoaineiden hinnat energiantuotannossa. Tietokantataulukot. Saatavissa:

[https://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_ene\\_ehi/stat-fin\\_ehi\\_pxt\\_12gb.px/chart/chartViewLine/](https://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_ene_ehi/stat-fin_ehi_pxt_12gb.px/chart/chartViewLine/) [viitattu 11.5.2022].

Kuva 27. Kassajäämä eri energianhinnan muutoksilla. Joel Taipale. 12.5.2022

Kuva 28. Kiinteät kustannukset +25%. Joel Taipale. 13.5.2022

Kuva 29. Kiinteät kustannukset -25%. Joel Taipale. 13.5.2022

## TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. 20.12.2017. 1010/2017

Taulukko 2. Energiateollisuus ry. 2021. Rakennusten kaukolämmitys, määräykset ja ohjeet. K1/2021. Julkaistu 22.10.2021. Saatavissa: [https://energia.fi/files/6412/Julkaistu\\_K1\\_2021\\_Rakennusten\\_kaukolammitys\\_Maaraykset\\_ja\\_ohjeet\\_%28pdf%29.pdf](https://energia.fi/files/6412/Julkaistu_K1_2021_Rakennusten_kaukolammitys_Maaraykset_ja_ohjeet_%28pdf%29.pdf) [viitattu: 10.3.2022]

Taulukko 3. PSK Standardisointi. Standardi. PSK 2401. Putkiston virtausnopeudet. Julkaistu 4.6.2009.

Taulukko 4. Pientaloalueen kaukolämpöjohdot. Joel Taipale. 4.5.2022

Taulukko 5. Laskennalliset paluulämpötilat. Joel Taipale. 29.4.2022

Taulukko 6. Menoveden jäähtymä eri pisteiden välillä. Joel Taipale. 29.4.2022

Taulukko 7. Laskennalliset massavirrat ja paluulämpötilat. Joel Taipale. 4.5.2022

Taulukko 8. Painehäviöt pientaloalue. Joel Taipale. 10.5.2022

Taulukko 9. Paineenkorotukset eri sekoitusvirtaamilla. Joel Taipale. 10.5.2022

Taulukko 10. Lämpöhäviöt pientaloalueella. Joel Taipale. 5.5.2022

ulkolämpötila (-30...-25)°C				
aika-				
jakso	4			h/a
menolämpötila	107,8			°C
paluulämpötila	16,3			°C
		pi-		
rakenne	koko	tuus	häviö	
[-]	[-]	[m]	[kW]	
Mpuk	DN25	9	0,2	
Mpuk	DN40	209	4,6	
Mpuk	DN50	477	10,2	
Mpuk	DN65	1196	30	
Mpuk	DN80	622	17	
2Mpuk	DN20	701	14,1	
2Mpuk	DN25	808	18,9	
2Mpuk	DN28	199	5,2	
2Mpuk	Cu28	28	0,7	
2Mpuk	DN40	49	1,4	
lämpöhäviö	yht.	102,3		kW
lämpöhäviö	yht.	0,41		MWh

ulkolämpötila (-25...-20)°C				
aika-				
jakso	79			h/a
menolämpötila	106,5			°C
paluulämpötila	16,2			°C
		pi-		
rakenne	koko	tuus	häviö	
[-]	[-]	[m]	[kW]	
Mpuk	DN25	9	0,2	
Mpuk	DN40	209	4,3	
Mpuk	DN50	477	9,6	
Mpuk	DN65	1196	28,1	
Mpuk	DN80	692	15,9	
2Mpuk	DN20	701	13,2	
2Mpuk	DN25	808	17,7	
2Mpuk	DN28	199	4,8	
2Mpuk	Cu28	28	0,7	
2Mpuk	DN40	49	1,3	
lämpöhäviö	yht.	95,8		kW
lämpöhäviö	yht.	7,57		MWh

ulkolämpötila (-20...-15)°C				
aika-				
jakso	238			h/a
menolämpötila	103,9			°C
paluulämpötila	16,2			°C
		pi-		
rakenne	koko	tuus	häviö	
[-]	[-]	[m]	[kW]	
Mpuk	DN25	9	0,1	
Mpuk	DN40	209	4	
Mpuk	DN50	477	8,9	
Mpuk	DN65	1196	26	
Mpuk	DN80	692	14,7	
2Mpuk	DN20	701	12,2	
2Mpuk	DN25	808	16,4	
2Mpuk	DN28	199	4,5	
2Mpuk	Cu28	28	0,6	
2Mpuk	DN40	49	1,2	
lämpöhäviö	yht.	88,6		kW
lämpöhäviö	yht.	21,1		MWh

ulkolämpötila (-15...-10)°C				
aika-				
jakso	550			h/a
menolämpötila	100,2			°C
paluulämpötila	16,4			°C
		pi-		
rakenne	koko	tuus	häviö	
[-]	[-]	[m]	[kW]	
Mpuk	DN25	9	0,1	
Mpuk	DN40	209	3,6	
Mpuk	DN50	477	8,1	
Mpuk	DN65	1196	23,7	
Mpuk	DN80	692	13,4	
2Mpuk	DN20	701	11,2	
2Mpuk	DN25	808	15	
2Mpuk	DN28	199	4,1	
2Mpuk	Cu28	28	0,6	
2Mpuk	DN40	49	1,1	
lämpöhäviö	yht.	80,9		kW
lämpöhäviö	yht.	44,5		MWh

ulkolämpötila (-10...-5)°C				
aika-				
jakso	710			h/a
menolämpötila	95,7			°C
paluulämpötila	17,6			°C
		pi-		
rakenne	koko	tuus	häviö	
[-]	[-]	[m]	[kW]	
Mpuk	DN25	9	0,1	
Mpuk	DN40	209	3,3	
Mpuk	DN50	477	7,3	
Mpuk	DN65	1196	21,5	
Mpuk	DN80	692	12,2	
2Mpuk	DN20	701	10,1	
2Mpuk	DN25	808	13,6	
2Mpuk	DN28	199	3,7	
2Mpuk	Cu28	28	0,5	
2Mpuk	DN40	49	1	
lämpöhäviö	yht.	73,3		kW
lämpöhäviö	yht.	52,0		MWh

ulkolämpötila (-5...0)°C			
aikajakso	814	h/a	
menolämpötila	89,9	°C	
paluulämpötila	20,0	°C	
rakenne	koko	pi-tuus	häviö
[-]	[-]	[m]	[kW]
Mpuk	DN25	9	0,1
Mpuk	DN40	209	2,9
Mpuk	DN50	477	6,6
Mpuk	DN65	1196	19,2
Mpuk	DN80	692	10,9
2Mpuk	DN20	701	9,1
2Mpuk	DN25	808	12,1
2Mpuk	DN28	199	3,3
2Mpuk	Cu28	28	0,5
2Mpuk	DN40	49	0,9
lämpöhäviö yht.	65,6	kW	
lämpöhäviö yht.	53,4	MWh	

ulkolämpötila (0...5)°C			
aikajakso	1785	h/a	
menolämpötila	83,6	°C	
paluulämpötila	24,6	°C	
rakenne	koko	pi-tuus	häviö
[-]	[-]	[m]	[kW]
Mpuk	DN25	9	0,1
Mpuk	DN40	209	2,6
Mpuk	DN50	477	5,9
Mpuk	DN65	1196	17,3
Mpuk	DN80	692	9,8
2Mpuk	DN20	701	8,1
2Mpuk	DN25	808	10,9
2Mpuk	DN28	199	3
2Mpuk	Cu28	28	0,4
2Mpuk	DN40	49	0,8
lämpöhäviö yht.	58,9	kW	
lämpöhäviö yht.	105,1	MWh	

ulkolämpötila (5...10)°C			
aikajakso	1459	h/a	
menolämpötila	78,5	°C	
paluulämpötila	31,1	°C	
rakenne	koko	pi-tuus	häviö
[-]	[-]	[m]	[kW]
Mpuk	DN25	9	0,1
Mpuk	DN40	209	2,4
Mpuk	DN50	477	5,4
Mpuk	DN65	1196	15,8
Mpuk	DN80	692	9
2Mpuk	DN20	701	7,5
2Mpuk	DN25	808	10
2Mpuk	DN28	199	2,7
2Mpuk	Cu28	28	0,4
2Mpuk	DN40	49	0,7
lämpöhäviö yht.	54	kW	
lämpöhäviö yht.	78,8	MWh	

ulkolämpötila (10...15)°C			
aikajakso	1043	h/a	
menolämpötila	75,0	°C	
paluulämpötila	38,3	°C	
rakenne	koko	pi-tuus	häviö
[-]	[-]	[m]	[kW]
Mpuk	DN25	9	0,1
Mpuk	DN40	209	2,3
Mpuk	DN50	477	5
Mpuk	DN65	1196	14,8
Mpuk	DN80	692	8,4
2Mpuk	DN20	701	7
2Mpuk	DN25	808	9,3
2Mpuk	DN28	199	2,5
2Mpuk	Cu28	28	0,4
2Mpuk	DN40	49	0,7
lämpöhäviö yht.	50,5	kW	
lämpöhäviö yht.	52,7	MWh	

ulkolämpötila (+15)°C			
aikajakso	2078	h/a	
menolämpötila	72,5	°C	
paluulämpötila	42,1	°C	
rakenne	koko	pi-tuus	häviö
[-]	[-]	[m]	[kW]
Mpuk	DN25	9	0,1
Mpuk	DN40	209	2
Mpuk	DN50	477	4,5
Mpuk	DN65	1196	13,3
Mpuk	DN80	692	7,5
2Mpuk	DN20	701	6,3
2Mpuk	DN25	808	8,4
2Mpuk	DN28	199	2,3
2Mpuk	Cu28	28	0,3
2Mpuk	DN40	49	0,6
lämpöhäviö yht.	45,3	kW	
lämpöhäviö yht.	94,1	MWh	



ulkolämpötila (-30...-25)°C				
aikajakso	4	h/a		
menolämpötila	71,6	°C		
paluulämpötila	27,3	°C		
rakenne	koko	pituus	häviö	
[-]	[-]	[m]	[kW]	
Mpuk	DN25	9	0,1	
Mpuk	DN40	209	4,0	
Mpuk	DN50	477	8,8	
Mpuk	DN65	1196	25,8	
Mpuk	DN80	622	14,6	
2Mpuk	DN20	701	12,1	
2Mpuk	DN25	808	16,3	
2Mpuk	DN28	199	4,4	
2Mpuk	Cu28	28	0,6	
2Mpuk	DN40	49	1,2	
lämpöhäviö yht.	87,91	kW		
lämpöhäviö yht.	0,35	MWh		

ulkolämpötila (-25...-20)°C				
aikajakso	79	h/a		
menolämpötila	71,6	°C		
paluulämpötila	26,8	°C		
rakenne	koko	pi- tuus	häviö	
[-]	[-]	[m]	[kW]	
Mpuk	DN25	9	0,1	
Mpuk	DN40	209	3,7	
Mpuk	DN50	477	8,2	
Mpuk	DN65	1196	24,0	
Mpuk	DN80	692	13,6	
2Mpuk	DN20	701	11,3	
2Mpuk	DN25	808	15,2	
2Mpuk	DN28	199	4,1	
2Mpuk	Cu28	28	0,6	
2Mpuk	DN40	49	1,1	
lämpöhäviö yht.	81,91	kW		
lämpöhäviö yht.	6,47	MWh		

ulkolämpötila (-20...-15)°C				
aikajakso	238	h/a		
menolämpötila	71,6	°C		
paluulämpötila	26,3	°C		
rakenne	koko	pi- tuus	häviö	
[-]	[-]	[m]	[kW]	
Mpuk	DN25	9	0,1	
Mpuk	DN40	209	3,4	
Mpuk	DN50	477	7,6	
Mpuk	DN65	1196	22,3	
Mpuk	DN80	692	12,6	
2Mpuk	DN20	701	10,5	
2Mpuk	DN25	808	14,1	
2Mpuk	DN28	199	3,8	
2Mpuk	Cu28	28	0,6	
2Mpuk	DN40	49	1,0	
lämpöhäviö yht.	75,91	kW		
lämpöhäviö yht.	18,1	MWh		

ulkolämpötila (-15...-10)°C				
aikajakso	550	h/a		
menolämpötila	71,6	°C		
paluulämpötila	25,8	°C		
rakenne	koko	pi- tuus	häviö	
[-]	[-]	[m]	[kW]	
Mpuk	DN25	9	0,1	
Mpuk	DN40	209	3,1	
Mpuk	DN50	477	7,0	
Mpuk	DN65	1196	20,5	
Mpuk	DN80	692	11,6	
2Mpuk	DN20	701	9,7	
2Mpuk	DN25	808	12,9	
2Mpuk	DN28	199	3,5	
2Mpuk	Cu28	28	0,5	
2Mpuk	DN40	49	1,0	
lämpöhäviö yht.	69,92	kW		
lämpöhäviö yht.	38,5	MWh		

ulkolämpötila (-10...-5)°C				
aikajakso	710	h/a		
menolämpötila	71,6	°C		
paluulämpötila	25,9	°C		
rakenne	koko	pi- tuus	häviö	
[-]	[-]	[m]	[kW]	
Mpuk	DN25	9	0,1	
Mpuk	DN40	209	2,9	
Mpuk	DN50	477	6,4	
Mpuk	DN65	1196	18,8	
Mpuk	DN80	692	10,7	
2Mpuk	DN20	701	8,9	
2Mpuk	DN25	808	11,9	
2Mpuk	DN28	199	3,3	
2Mpuk	Cu28	28	0,5	
2Mpuk	DN40	49	0,9	
lämpöhäviö yht.	64,27	kW		
lämpöhäviö yht.	45,6	MWh		

ulkolämpötila (-5...0)°C				
aikajakso	814	h/a		
menolämpötila	71,6	°C		
paluulämpötila	26,8	°C		
rakenne	koko	pi-tuus	häviö	
[-]	[-]	[m]	[kW]	
Mpuk	DN25	9	0,1	
Mpuk	DN40	209	2,7	
Mpuk	DN50	477	5,9	
Mpuk	DN65	1196	17,3	
Mpuk	DN80	692	9,8	
2Mpuk	DN20	701	8,2	
2Mpuk	DN25	808	10,9	
2Mpuk	DN28	199	3,0	
2Mpuk	Cu28	28	0,4	
2Mpuk	DN40	49	0,8	
lämpöhäviö yht.	59,06	kW		
lämpöhäviö yht.	48,1	MWh		

ulkolämpötila (0...5)°C				
aikajakso	1785	h/a		
menolämpötila	71,6	°C		
paluulämpötila	29,5	°C		
rakenne	koko	pi-tuus	häviö	
[-]	[-]	[m]	[kW]	
Mpuk	DN25	9	0,1	
Mpuk	DN40	209	2,5	
Mpuk	DN50	477	5,5	
Mpuk	DN65	1196	16,1	
Mpuk	DN80	692	9,1	
2Mpuk	DN20	701	7,6	
2Mpuk	DN25	808	10,2	
2Mpuk	DN28	199	2,8	
2Mpuk	Cu28	28	0,4	
2Mpuk	DN40	49	0,8	
lämpöhäviö yht.	54,91	kW		
lämpöhäviö yht.	98,0	MWh		

ulkolämpötila (5...10)°C				
aikajakso	1459	h/a		
menolämpötila	71,6	°C		
paluulämpötila	34,6	°C		
rakenne	koko	pi-tuus	häviö	
[-]	[-]	[m]	[kW]	
Mpuk	DN25	9	0,1	
Mpuk	DN40	209	2,3	
Mpuk	DN50	477	5,2	
Mpuk	DN65	1196	15,3	
Mpuk	DN80	692	8,6	
2Mpuk	DN20	701	7,2	
2Mpuk	DN25	808	9,6	
2Mpuk	DN28	199	2,6	
2Mpuk	Cu28	28	0,4	
2Mpuk	DN40	49	0,7	
lämpöhäviö yht.	52,08	kW		
lämpöhäviö yht.	76,0	MWh		

ulkolämpötila (10...15)°C				
aikajakso	1043	h/a		
menolämpötila	71,6	°C		
paluulämpötila	40,5	°C		
rakenne	koko	pi-tuus	häviö	
[-]	[-]	[m]	[kW]	
Mpuk	DN25	9	0,1	
Mpuk	DN40	209	2,2	
Mpuk	DN50	477	5,0	
Mpuk	DN65	1196	14,6	
Mpuk	DN80	692	8,3	
2Mpuk	DN20	701	6,9	
2Mpuk	DN25	808	9,2	
2Mpuk	DN28	199	2,5	
2Mpuk	Cu28	28	0,4	
2Mpuk	DN40	49	0,7	
lämpöhäviö yht.	49,75	kW		
lämpöhäviö yht.	51,9	MWh		

ulkolämpötila (+15)°C				
aikajakso	2078	h/a		
menolämpötila	71,6	°C		
paluulämpötila	42,7	°C		
rakenne	koko	pi-tuus	häviö	
[-]	[-]	[m]	[kW]	
Mpuk	DN25	9	0,1	
Mpuk	DN40	209	2,0	
Mpuk	DN50	477	4,5	
Mpuk	DN65	1196	13,3	
Mpuk	DN80	692	7,5	
2Mpuk	DN20	701	6,3	
2Mpuk	DN25	808	8,4	
2Mpuk	DN28	199	2,3	
2Mpuk	Cu28	28	0,3	
2Mpuk	DN40	49	0,6	
lämpöhäviö yht.	45,29	kW		
lämpöhäviö yht.	94,1	MWh		