

Henri Kalliokoski

# Kaukolämpöverkon lämpöhäviöiden tarkastelu

Opinnäytetyö  
Energia- ja ympäristötekniikka

2018



**Kaakkois-Suomen  
ammattikorkeakoulu**

<b>Tekijä/Tekijät</b>	<b>Tutkinto</b>	<b>Aika</b>
Henri Kalliokoski	Insinööri (AMK)	Joulukuu 2018
<b>Opinnäytetyön nimi</b>		
Kaukolämpöverkon lämpöhäviöiden tarkastelu		43 sivua
<b>Toimeksiantaja</b>		
Valkeakosken Energia Oy		
<b>Ohjaaja</b>		
Lehtori Hannu Sarvelainen		
<b>Tiivistelmä</b>		
<p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tarkastella kaukolämpöverkon lämpöhäviöitä ja tulosten perusteella analysoida verkoston hyötysuhdetta sekä etsiä kehityskohteita edellä mainittujen asioiden parantamiseksi. Varsinainen tutkimuskysymys oli: Miten kaukolämpöverkon lämpöhäviöitä voidaan vähentää? Tutkimusmenetelmänä käytettiin Valkeakosken Energia Oy:n kaukolämpöverkkoon liittyvien tietokantojen analysointia. Kaukolämpöverkon tiedettiin jo etukäteen olevan Energiateollisuus ry:n tilastoihin verrattuna keskimääräistä energiatehokkaampi.</p> <p>Työssä määritettiin laskemalla yhtiön tietokantojen perusteella lämpöhäviöiden määrä erikseen kaikille käytössä oleville kaukolämpöjohtotyypeille, betonielementtikaivoille sekä verkon vuotovedelle. Siinä myös laskettiin verkon lämpötilojen ja eristyspaksuuden vaikutusta lämpöhäviöiden määrään ja pohdittiin, miten lämpötiloihin ja eristyspaksuuteen voidaan vaikuttaa. Lämpöenergian mittauksissa todettiin olevan mahdollista epätarkkuutta ja sillä todettiin olevan mahdollisesti vaikutusta verkon hyötysuhdelaskentaan.</p> <p>Laskelmien perusteella vahvistettiin kaukolämpöverkon olevan energiatehokas ja merkittäviä ongelmakohtia ei siinä havaittu. Merkittävimmäksi kehitysehdotukseksi nousi kaukolämpöjohtotyyppien vaihto 2Mpuk:sta Mpuk-tyyppiseen johtorakenteeseen uudis- ja saneerausrakentamisen yhteydessä. Tällä johtotyyppillä on huomattavasti pienemmät lämpöhäviöt sekä edullisemmat rakentamiskustannukset, joten pitkällä aikavälillä tämä on taloudellisesti erittäin kannattava muutos. Toisena kehitysehdotuksena on betonielementtikaivojen eristämätömien lämpöjohtojen eristäminen, mutta tällä toimenpiteellä todettiin olevan myös haittoja mahdollisten korroosioaurioiden muodossa. Kolmanneksi verkoston paluulämpötilaan tulee kiinnittää huomiota, koska sillä on suoraan vaikutusta lämpöhäviöihin.</p> <p>Etukäteen oli jo tiedossa kaukolämpöverkon hyvä hyötysuhde kohtuullisine lämpöhäviöineen, mutta asioita ei ollut tarkemmin selvitetty ja dokumentoitu. Lämpöhäviöt aiheuttavat taloudellisesti merkittävän menoerän, joita vähentämällä voidaan säästää huomattavasti energian hankintakustannuksissa. Työssä saatiin yksityiskohtaisesti määriteltyä ja dokumentoitua lämpöhäviöiden jakautumista ja tarkasteltua verkon nykytilaa sekä pohdittua lämpöhäviöiden taloudellisia vaikutuksia.</p>		
<b>Asiasanat</b>		
kaukolämpöverkko, lämpöhäviöt, hyötysuhde, kaukolämpöjohto		

<b>Author (authors)</b>	<b>Degree</b>	<b>Time</b>
Henri Kalliokoski	Bachelor of Engineering	December 2018
<b>Thesis title</b>		
Review of the district heating network heat losses		43 pages
<b>Commissioned by</b>		
Valkeakosken Energia Oy		
<b>Supervisor</b>		
Hannu Sarvelainen, senior lecturer		
<b>Abstract</b>		
<p>The purpose of this thesis was to examine the heat losses of the district heating network and to analyze the efficiency of the network and look for development targets to improve the mentioned issues of above. The main research question was: How can the heat losses in the district heating network be reduced? In comparison with the statistics of Finnish Energy, the network was already known to be more energy efficient than the average network.</p> <p>The research method was to analyze the databases related to the district heating network of Valkeakosken Energia. In the work was determined by calculating the amount of heat losses in the basis of the company's data bases for all types of district heating pipes what has been used and to concrete element wells and to the leaking water flow. The effect calculated of network temperatures and insulation thickness on the amount of heat losses and considered how the temperatures and insulation thickness could be affected.</p> <p>Based on the calculations it was confirmed that the district heating network was energy efficient and significant problems were not detected in the network. The most important development suggestion was the replacement of the district heat pipe type from 2Mpuk to Mpuk pipe type in the construction of new and renovation of pipe lines. Secondly, the development proposal was to isolate uninsulated thermal pipes in the concrete element wells, but this arrangement also found possible disadvantages in the form of potential corrosion damages. Thirdly, attention should be paid to the return temperature of the network as it directly affects the heat losses.</p>		
<b>Keywords</b>		
district heating network, heat losses, efficiency, district heating pipe		

# SISÄLLYS

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT .....	6
MERKINNÄT JA SYMBOLIT .....	6
1 JOHDANTO .....	8
1.1 Tavoite ja rajaus .....	8
1.2 Tutkimuskysymys ja tutkimusmenetelmä.....	8
1.3 Valkeakosken Energia Oy:n kaukolämpöverkko.....	9
1.4 Verkon tehokkuutta kuvaavia lukuja .....	9
2 LÄMPÖHÄVIÖLASKENNAN TEORIA .....	10
2.1 Lämpöhäviöt johtotyypeittäin .....	10
2.1.1 2Mpuk.....	12
2.1.2 Mpuk.....	17
2.1.3 Mpul.....	20
2.1.4 2Apuk.....	21
2.1.5 Sisäputki .....	21
2.2 Kaukolämpökaivojen lämpöhäviöt .....	22
2.3 Asiakkaiden jäähdytys .....	22
2.4 Vuotoveden lämpöenergia .....	23
2.5 Mittauksen epätarkkuus.....	23
2.6 Lämpöhäviöiden määrittäminen tuotanto- ja myyntitietojen perusteella.....	26
3 KAUKOLÄMPÖVERKON LÄMPÖHÄVIÖIDEN ANALYSOINTI.....	27
3.1 Kaukolämpöverkon lämpötilat.....	27
3.2 Lämpöhäviöjakauma.....	27
3.3 Lämpöhäviöt johtotyypeittäin .....	28
3.3.1 2Mpuk.....	29
3.3.2 Mpuk.....	29
3.3.3 Mpul.....	30

3.3.4	2Apuk.....	30
3.3.5	Sisäputki .....	30
3.4	Kaukolämpökaivojen lämpöhäviöt .....	31
3.5	Vuotoveden lämpöenergia .....	31
3.6	Mittauksen epätarkkuus.....	32
3.7	Lämpöhäviöiden määrittäminen hankinta- ja myyntitietojen perusteella .....	32
4	LÄMPÖHÄVIÖIDEN ANALYSOINNIN PERUSTEELLA SAADUT TULOKSET .....	33
4.1	Kaukolämpöverkon nykytilan tarkastelu.....	33
4.2	Menolämpötilan vaikutus lämpöhäviöihin .....	34
4.3	Paluulämpötilan vaikutus lämpöhäviöihin .....	35
4.4	Johtotyyppien vaihtamisen vaikutus lämpöhäviöihin .....	37
4.5	Eristyspaksuuden vaikutus lämpöhäviöihin .....	38
4.6	Betonielementtikaivojen eristämisen vaikutus lämpöhäviöihin.....	38
4.7	Mittauksen epätarkkuuden vaikutus lämpöhäviöihin.....	39
4.8	Kehitysehdotukset ja niiden vaikutukset .....	39
5	YHTEENVETO .....	40
	KUVALUETTELO .....	43

## TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

MID	Mittauslainedirektiivi (Measuring Instrument Directive)
Mpuk	Kiinnivaahdotettu 2-putki kaukolämpöjohtotyyppi
Mpul	Muovisuojakuori kaukolämpöjohtotyyppi liikkuvien teräsputkin
2Apuk	Kiinnivaahdotettu asbestisuojakuori kaukolämpöjohtotyyppi
2Mpuk	Kiinnivaahdotettu 1-putki kaukolämpöjohtotyyppi

## MERKINNÄT JA SYMBOLIT

$A$	pinta-ala	[m <sup>2</sup> ]
$c$	ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kgK]
$d$	halkaisija	[m]
$E$	putkien välinen etäisyys	[m]
$G'$	lämpökonduktanssi	[W/mK]
$h$	syvyys putken pintaan	[m]
$H$	ekvivalenttinen maakerros	[-]
$H'$	syvyys putken keskelle	[m]
$\phi$	lämpövirta	[W]
$\phi'$	lämpövirta johtopituutta kohti	[W]
$K$	lämmönsiirtokerroin	[W/mK]
$k$	lämmönläpäisykerroin	[W/m <sup>2</sup> K]
$L$	pituus	[m]
$\ln$	luonnollinen logaritmi	[-]
$m$	massa	[kg]
$\pi$	pii	[-]
$Q$	lämpöenergia	[kWh]
$qp$	nimellisvirtaama	[m <sup>3</sup> /h]
$R$	lämpövastus	[m°C/W]
$r$	säde	[m]
$s$	etäisyys	[m]
$S$	paksuus	[m]
$T$	lämpötila	[°C, K]
$U$	lämmönläpäisykerroin	[W/K]
$V$	tilavuus	[m <sup>3</sup> ]

$\lambda$	lämmönjohtavuus	[W/mK]
$\phi$	lämpöhäviöteho	[W]

### **Alaindeksit**

<i>cr</i>	putken sisäpuoli
<i>e</i>	eriste
<i>g</i>	maa
<i>gs</i>	maanpinta
<i>hankinta</i>	osto tai tuotettu
<i>häviö</i>	häviö
<i>i</i>	eriste ja vaippa
<i>kok</i>	kokonais
<i>m</i>	meno
<i>n</i>	putkien keskinäisen vaikutuksen huomiointi
<i>myynti</i>	myynti
<i>p</i>	paluu
<i>s</i>	sisä
<i>t</i>	teräs
<i>u</i>	ulko
<i>vuoto</i>	vuotovesi
<i>verkosto</i>	verkosto

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön kohde on Valkeakosken Energia Oy:n pääkaukolämpöverkon hyötysuhteen tarkastelu lämpöhäviöiden muodossa. Yrityksellä on 3 kaukolämpöverkkoa ja opinnäytetyössä käsitellään niistä suurinta. Työn laskelmissa on käytetty pääasiassa vuoden 2017 lopun tietoja.

Kaukolämpöverkon hyötysuhteella tarkoitetaan prosenttilukua, joka kuvaa asiakkaalle myytyä lämpöenergiaa verrattuna tuotettuun tai ostettuun energiaan. Toisin sanoen luku kuvaa hyötykäyttöön tulevaa lämpöenergian määrää. Loppuosa on lämpöhäviöitä, joita pyritään vähentämään taloudellisista ja ympäristöllisistä syistä.

Valkeakosken Energia Oy on Energiateollisuus ry:n jäsen ja yhdistyksen päätehtävä on edistää jäsenyritystensä toimintaedellytyksiä sekä kilpailukykyä. Energiateollisuus ry on myös merkittävä kaukolämpöalan tietolähde, jonka materiaalia on tässä työssä laajasti käytetty.

### 1.1 Tavoite ja rajaus

Opinnäytetyön tarkoitus on kartoittaa ja selvittää teoreettisella tasolla mihin lämpöenergia kaukolämpöverkosta häviää. Työssä pohditaan myös mahdollisia kustannustehokkaita ratkaisuja, joilla lämpöhäviöitä voidaan vähentää. Jo 1 prosenttiyksikön verkon hyötysuhteen parannus tuo yritykselle huomattavia kustannussäästöjä.

Opinnäytetyö on rajattu siten, että siinä käsitellään verkon hyötysuhdetta vain lämpöhäviöiden muodossa. Kehitysehdotusten investointi- ja käyttökustannukset on huomioitu vain yleisesti arvioiden.

### 1.2 Tutkimuskysymys ja tutkimusmenetelmä

Opinnäytetyön varsinainen tutkimuskysymys on: Miten kaukolämpöverkon lämpöhäviöitä voidaan vähentää? Tutkimusmenetelmänä opinnäytetyössä käytetään Valkeakosken Energia Oy:n tietokantojen analysointia.



### 1.3 Valkeakosken Energia Oy:n kaukolämpöverkko

Kaukolämpöverkko sisältää n. 57,5 km kaukolämpöjohtoa, jossa on pääasiassa teräksiset meno- ja paluuputket eristettyinä uretaanilla muoviputken tai putkien sisään. Kaukolämpötoiminta Valkeakoskella on alkanut v. 1976 ja kanavia on rakennettu vuosien aikana montaa eri tyyppiä. Vakiintuneeksi johtotyyppiksi on viimeisen kolmenkymmenen vuoden aikana valikoitunut 2Mpuk-tyyppinen johtorakenne, jossa on erikseen meno- ja paluuputkirakenne. Lämpöenergia tulee pääasiassa ostoenergiana ulkoiselta toimijalta. Kaukolämpöasiakkaita Valkeakosken Energia Oy:llä on kyseisessä verkossa 630 kpl ja sillä siirretään vuosittain n. 107 GWh lämpöenergiaa (5 viimeisen vuoden keskiarvo).

### 1.4 Verkon tehokkuutta kuvaavia lukuja

Jakelun hyötysuhde on n. 90,4 % (3 viimeisen vuoden keskiarvo) ja se on Energiateollisuus ry:n (2018b, 4) vuoden 2017 tilastojen mukaan vastaavan kokoisten verkkojen maanlaajuista keskiarvoa parempi, joka on 87 %.

Jakelun hyötysuhde saadaan: 
$$\frac{\text{myytyenergia}}{\text{ostoenergia}} * 100$$

Verkon lämpötiheys vuonna 2017 oli 1,93 MWh/m ja se on Energiateollisuus ry:n (2018b, 3) vuoden 2017 tilastojen mukaan vastaavan kokoisten verkkojen maanlaajuista keskiarvoa parempi, joka on 1,67 MWh/m.

Verkon lämpötiheys saadaan: 
$$\frac{\text{myytyenergia}}{\text{johtopituus}}$$

Verkon asiakastiheys vuonna 2017 on 1,19 MW/km ja se on Energiateollisuus ry:n (2018b, 3) vuoden 2017 tilastojen mukaan vastaavan kokoisten verkkojen maanlaajuista keskiarvoa parempi, joka on 0,90 MW/km.

Verkon asiakastiheys saadaan: 
$$\frac{\text{liittymisteho}}{\text{johtopituus}}$$

## 2 LÄMPÖHÄVIÖLASKENNAN TEORIA

Energiateollisuus ry:n (2006, 209) mukaan selvästi suurimman osan kaukolämpöverkon jakelukustannuksista muodostavat verkon lämpöhäviöistä johtuvat kustannukset. Lämpöhäviöt muodostuvat monen eri tekijän summasta. Seuraavassa on lueteltu yleisimpiä lämpöhäviöiden aiheuttajia kaukolämpöverkoissa:

- verkon liian korkeat lämpötilatasot
- putkiston liian ohut lämpöeristys
- vikaantumisen yleisyys, kuten eristeen suuri lämmönjohtavuus eristeaineen vanhentumisen, kastumisen tai kulumisen vuoksi
- vuotovedet
- suuri maaperän lämmönjohtavuus eli huonoon maahan rakentaminen
- putkiston liian matala peitesyvyys
- huono eristystyön laatu
- verkon putkikokojen ali- tai ylimitoitus.
- huono lämpötiheys eli pieni lämpöenergian myynti putkipituutta kohti
- lämmön mittausepätarckkuudet, jotka tulkitaan häviöiksi, koska niistä ei voida laskuttaa
- ylimääräisten kiertolenkkien ja rengaslinjojen vaikutus
- asiakkaiden huonon jäähtymän vaikutus kaukolämpöveden paluulämpötilaa nostaen

### 2.1 Lämpöhäviöt johtotyypeittäin

Lämpöhäviöt ovat yleensä pienemmissä kaukolämpöverkoissa suuruusluokkaa 10...20 %, kun putkikoot ovat keskimäärin DN50, ja suuremmissa verkoissa 4...10 %, kun putkikoot ovat keskimäärin DN150. Pienten verkkojen suhteellisesti suuremmat lämpöhäviöt johtuvat suuremmasta vaippapinta-alasta suhteessa siirtokykyyn. (Energiateollisuus ry 2006, 203.)

Lämmön johtuminen on suoraan verrannollinen lämpötilaeroon. Kaukolämpöjohtossa lämpöenergia siirtyy johdosta maaperään ja siitä edelleen ympäristöön. Osa lämpöenergiasta siirtyy menoputkesta paluuputkeen. Tämä energia ei mene suoraan lämpöhäviöksi, vaan palaa lämmöntuotantolaitokselle hyödynnettäväksi. (Energiateollisuus ry 2006, 203.)

Kiinnivaahdotettuja johtorakenteita on kahta eri tyyppiä; Mpuk ja 2Mpuk. Nimitykset johtuvat niiden rakenteesta. M tarkoittaa muovisuojuakuorta (polyeteeniä), pu polyuretaanieristettä ja k kiinnivaahdotettua. Mpuk-rakenteessa on yhden (M) muovikuoren sisällä kaksi virtausputkea. 2Mpuk-rakenteessa on yhden muovikuoren sisällä yksi virtausputki, joten kaukolämpöjohdon rakentamiseksi tarvitaan kaksi (2M) muovikuorellista virtausputkea. Nämä kaksi johtotyyppiä ovat yleisesti käytössä kaukolämpöverkoissa. (Mäkelä & Tuunanen 2015, 58.)

Eristeenä nykyaikaisissa kaukolämpöjohdoissa käytetään standardin EN 253 mukaisesti kovaa polyuretaanivaahtoa, jonka ponnekaasuna käytetään syklopentaania. Uuden eristeen lämmönjohtavuus +50 asteessa on 0,025 W/mK. (Wehotherm Oy 2018, 65.)

Kaukolämpöverkko muodostuu käytännössä yksittäisistä putkista, joiden eristyspaksuus riippuu putken halkaisijasta sekä johtotyypistä. Johtotyypin lisäksi lämpöhäviöiden laskentaan vaikuttaa putkien iän vaihtelu, sillä ikääntyneiden putkien eristeet saattavat olla lämmöneristyskyvyltään heikentyneitä. Verkon lämpöhäviöt voidaan kuitenkin laskea putkikohtaisesti, kun putkikoon lisäksi eristävyys on tunnettu. (Pesari 1983, 26, Vianderin 2014, 25 mukaan.)

Kiinnivaahdotettujen muovisuojuakuoristen lämpöjohtojen eristävyys laskee ajan myötä, kun polyuretaanieristeen huokosten sisältämä hiilidioksidi vaihtuu diffuusion kautta paremmin lämpöä johtavaan ilmaan. Kaukolämpöjohdon eristeen hiilidioksidin määrän puoliintumisaika on kokeellisten tutkimusten perusteella noin 1 – 4 vuotta. (Svansström ym. 1997, 183, Vianderin 2014, 25 mukaan.)

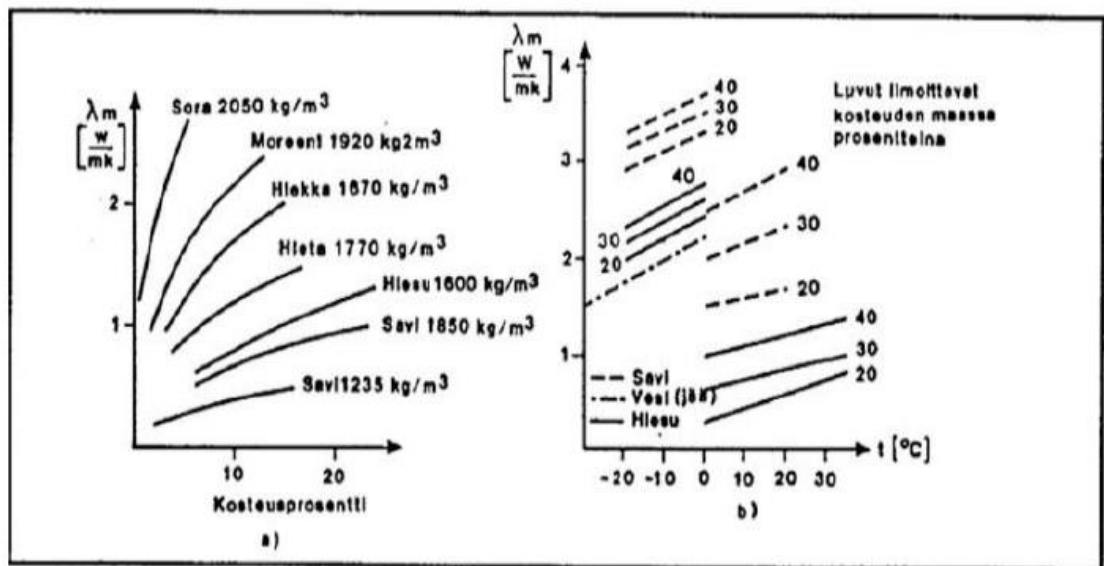
Eristyksen lämmönjohtavuus voidaan määrittää yhtälöstä 1.

$$\lambda_i = \lambda_{60} + \lambda_{ikä} + \lambda_{kost} + \lambda_{konv} \quad (1)$$

jossa	$\lambda_{60}$	eristeen keskimääräinen lämmönjohtavuus 60 °C keskilämpötilassa	[W/mK]
	$\lambda_{ikä}$	eristeen käyttöiän aiheuttama lämmönjohtavuuden muuttuminen	[W/mK]

$\lambda_{kost}$	kosteuden aiheuttama muutos	[W/mK]
$\lambda_{konv}$	eristyksen raoissa, saumoissa ja onteloissa esiintyvien hallitsemattomien konvektiovirtausten aiheuttama lisäys (ilmenee lähinnä villaeristeissä)	[W/mK]

Maaperän lämmönjohtavuus on esitetty kuvassa 1 maaperän laadun ja kosteuden mukaan välillä 0,5...3,5 W/mK.



Kuva 1. Maan lämmönjohtavuuden vaihtelu. (Energiateollisuus ry 2006, 203)

### 2.1.1 2Mpuk

Yksiputkijohdossa on erilliset meno- ja paluuputket, joissa virtausputki ja polyeteenisuojakuori ovat polyuretaanieristeellä kiinnitetty yhteen. (Energiateollisuus ry 2006, 139.)

2Mpuk-tyyppisen kaukolämpöjohdon lämpöhäviöiden määrittelyssä on käytetty Energiateollisuus ry:n kustantamaa Kaukolämmön käsikirjaa, jossa lämpöhäviöiden määrittäminen on yksityiskohtaisesti esitetty. (Energiateollisuus ry 2006, 203 - 208.)

Tarkastellaan lämpöhäviöiden määrittämistä eri komponenttien pohjalta kuvan 2 mukaisesti. Meno- ja paluuputken lämpöhäviöt voidaan määrittää kuvan 2 osakuvan A mukaan yhtälöistä 2 ja 3.

$$\phi'_m = K_{1m}(T_m - T_g) - K_{2m}(T_p - T_g) \quad (2)$$

$$\phi'_p = K_{1p}(T_p - T_g) - K_{2p}(T_m - T_g) \quad (3)$$

jossa	$\phi'$	lämpöhäviö	[W]
	$T_m$	menolämpötila	[°C]
	$T_p$	paluulämpötila	[°C]
	$T_g$	häiriöttömän maaperän lämpötila upotus- syvyydellä	[°C]
	$K_1$	lämmönsiirtokerroin yhtälöstä 6	[W/mK]
	$K_2$	lämmönsiirtokerroin yhtälöstä 7	[W/mK]

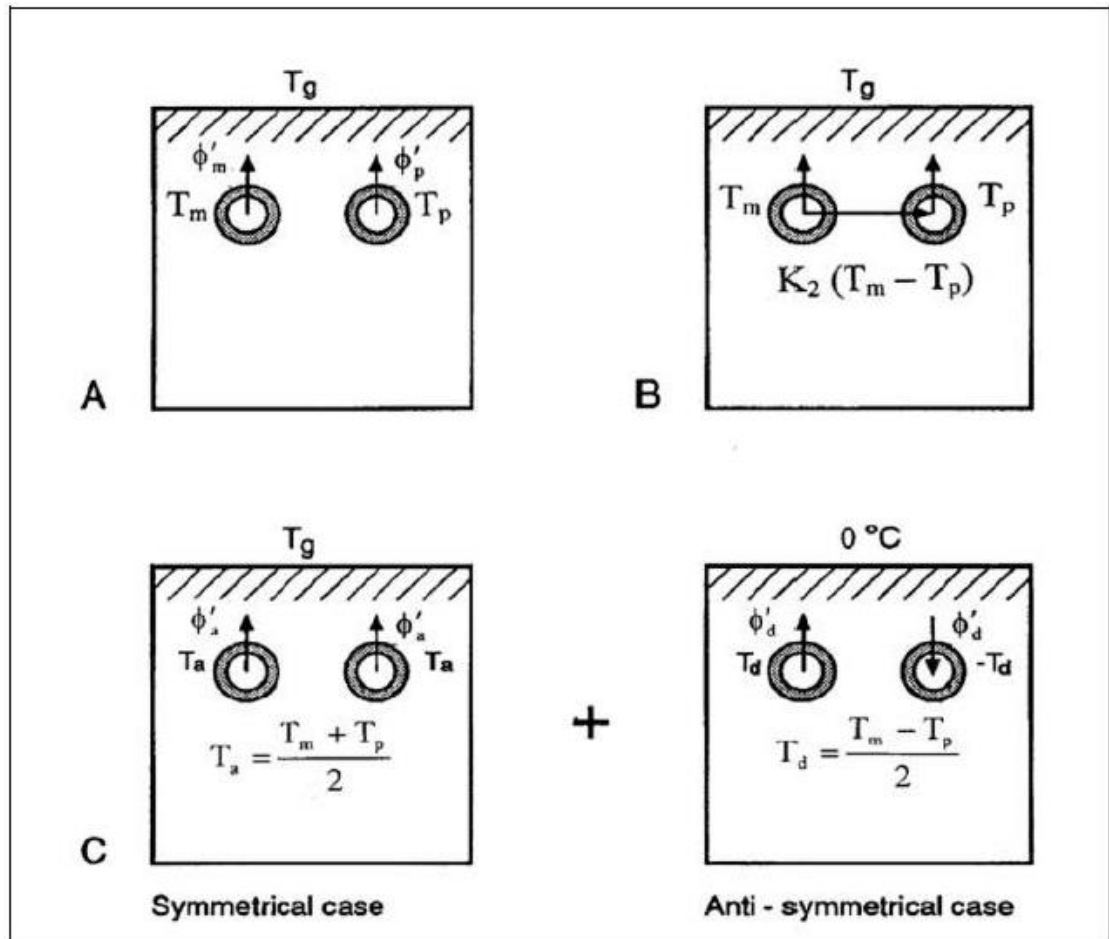
Meno- ja paluuputken lämpöhäviöt voidaan määrittää myös kuvan 2 osakuvan B mukaan yhtälöistä 4 ja 5.

$$\phi'_m = (K_1 - K_2)(T_m - T_g) + K_2(T_m - T_p) \quad (4)$$

$$\phi'_p = (K_1 - K_2)(T_p - T_g) - K_2(T_m - T_p) \quad (5)$$

jossa	$\phi'$	lämpöhäviö	[W]
	$T_m$	menolämpötila	[°C]
	$T_p$	paluulämpötila	[°C]
	$T_g$	häiriöttömän maaperän lämpötila upotus- syvyydellä	[°C]
	$K_1$	lämmönsiirtokerroin yhtälöstä 6	[W/mK]
	$K_2$	lämmönsiirtokerroin yhtälöstä 7	[W/mK]

Näistä yhtälöistä voidaan huomata, että menoputken lämpöhäviö koostuu lämpövirrasta menoputkesta maaperään sekä paluuputkeen. Lämmönläpäisyluku  $K_2$ , liittyy siis meno- ja paluuputken väliseen lämmönsiirtoon.



Kuva 2. Maahan upotettujen kaukolämpöputkien lämpöhäviöiden määrittäminen. (Energiateollisuus ry 2006, 204)

Kun putket ovat symmetrisesti, voidaan lämmönsiirtokerroimet  $K_1$  ja  $K_2$  määrittää yhtälöistä 6 ja 7.

$$K_1 = \frac{R_g + R_i}{(R_g + R_i)^2 - R_m^2} \quad (6)$$

ja

$$K_2 = \frac{R_m}{(R_g + R_i)^2 - R_n^2} \quad (7)$$

jossa	$K$	lämmönsiirtokerroin	[W/mK]
	$R_g$	maaperän lämpövastus/pituus, sisältää lämpövastuksen johdon pinnalla	[m°C/W]
	$R_i$	eristeen ja vaipan lämpövastus	[m°C/W]
	$R_n$	putkien keskinäisen vaikutuksen huomioiva lämpövastus/pituus	[m°C/W]

Näistä saadaan:

$$K_1 - K_2 = \frac{1}{R_g + R_i + R_n} \quad (8)$$

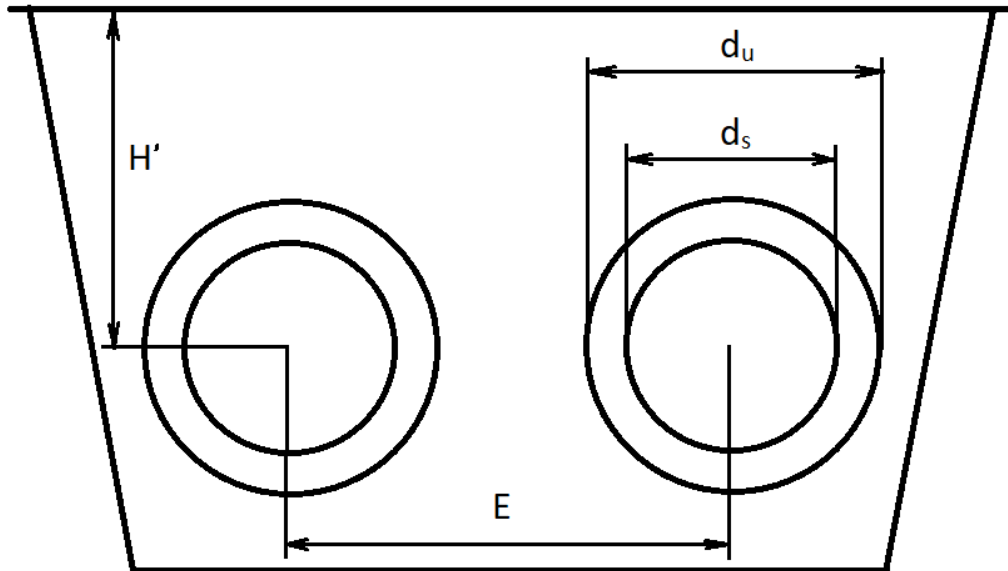
jossa	$K_1$	lämmönsiirtokerroin	[W/mK]
	$K_2$	lämmönsiirtokerroin	[W/mK]
	$R_g$	maaperän lämpövastus	[mK/W]
	$R_i$	eristettyjen putkien eristeen ja vaipan lämpövastus	[mK/W]
	$R_n$	putkien keskinäisen vaikutuksen huomioiva lämpövastus/pituus	[m°C/W]

Lämpöhäviö johtopituutta kohti voidaan määrittää yhtälöstä 9.

$$\phi'_{kok} = 2(K_1 - K_2) \left[ \frac{T_m + T_p}{2} - T_g \right] \quad (9)$$

jossa	$\phi'_{kok}$	lämpöhäviö johtopituutta kohti	[W]
	$K_1$	lämmönsiirtokerroin	[W/mK]
	$K_2$	lämmönsiirtokerroin	[W/mK]
	$T_m$	menoputken lämpötila	[°C]
	$T_p$	paluuputken lämpötila	[°C]
	$T_g$	maaperän lämpötila	[°C]

Kuvassa 3 on esitetty 2Mpuk-yksiputkijohtotyypin rakenne ja yhtälöissä käytettyjen muuttujien määrittäminen.



Kuva 3. 2Mpuk-yksiputkijohdon rakenne.

Eristettyjen putkien eristeen ja vaipan lämpövastus voidaan määrittää yhtälöstä 10.

$$R_i = \frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln \frac{d_u}{d_s} \quad (10)$$

jossa	$R_i$	eristettyjen putkien eristeen ja vaipan lämpövastus	[mK/W]
	$\lambda_i$	eristeen lämmönjohtavuus	[W/mK]
	$d_u$	eristeen ulkohalkaisija	[m]
	$d_s$	eristeen sisähalkaisija	[m]

Maaperän lämpövastus voidaan määrittää yhtälöstä 11.

$$R_g = \frac{1}{2\pi\lambda_g} \ln \frac{4H}{d_u} \quad (11)$$

jossa	$R_g$	maaperän lämpövastus	[mK/W]
	$\lambda_g$	maaperän lämmönjohtavuus	[W/mK]
	$H$	ekvivalenttinen maakerros	[-]
	$d_u$	eristeen ulkohalkaisija	[m]

Putkien keskinäisen vaikutuksen huomioon ottava lämpövastus voidaan määrittää yhtälöstä 12.



$$R_n = \frac{1}{2\pi\lambda_g} \ln \left[ \left(1 + \frac{2H}{E}\right)^2 \right] \quad (12)$$

jossa	$R_n$	putkien keskinäisen vaikutuksen huomioiva lämpövastus/pituus	[m°C/W]
	$\lambda_g$	maaperän lämmönjohtavuus	[W/mK]
	$H$	ekvivalenttinen maakerros	[-]
	$E$	putkien etäisyys	[m]

Maapinnan lämpövastus muutetaan tavallisesti ekvivalenttiseksi maakerrokseksi, jolloin korjattu putken sijainti syvyys voidaan määrittää yhtälöstä 13.

$$H = H' + \frac{\lambda_g}{h_{gs}} \quad (13)$$

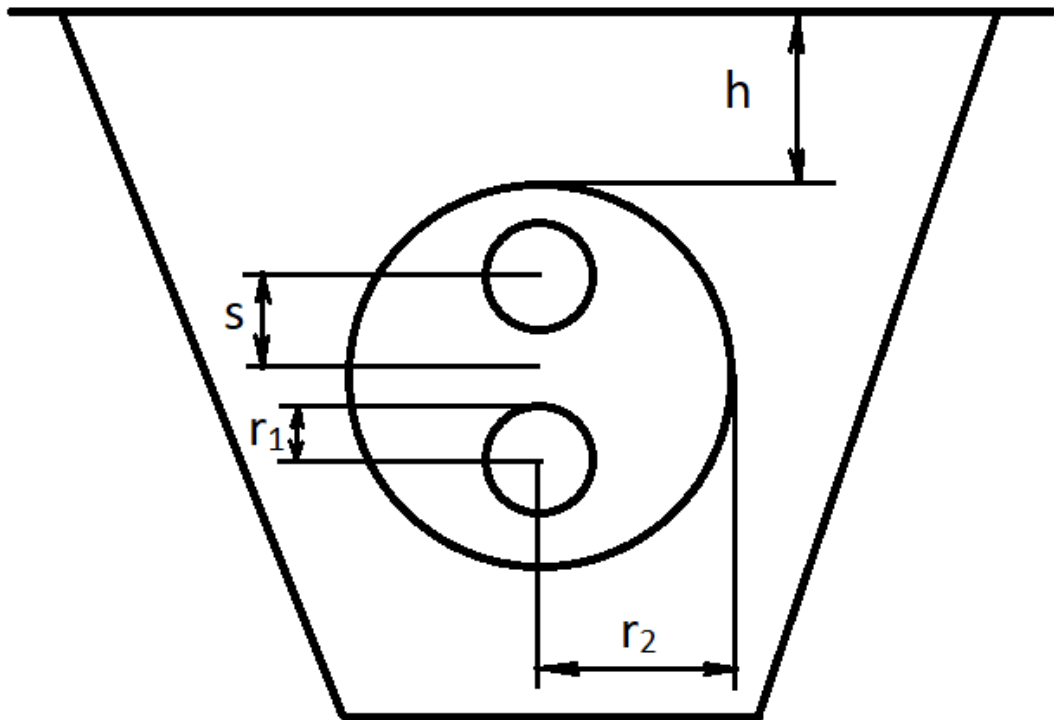
jossa	$H$	ekvivalenttinen maakerros	[-]
	$H'$	putken todellinen sijaintisyvyys	[m]
	$\lambda_g$	maaperän lämmönjohtavuus	[W/mK]
	$h_{gs}$	lämmönsiirtokerroin maanpinnalla	[W/m²K]

### 2.1.2 Mpuk

Kaksiputkijohdossa on sekä meno- että paluupuolen virtausputket ja yhteinen polyeteenisuojaputki on liitetty polyuretaanieristeellä kiinteästi yhteen. Kaksiputkijohdon lämpöhäviöt ovat pienemmät kuin vastaavan yksiputkisen. (Energiateollisuus ry 2006, 139.)

Kaksiputkielementtijohdon lämpöhäviötehon laskennassa on käytetty Huovilaisen ja Koskelaisen (ks. Anttonen 2011. 29 – 31) tapaa laskea kaksiputkielementin lämpöhäviöt.

Kuvassa 4 on esitetty Mpuk-kaksiputkijohdon rakenne ja yhtälöissä käytettyjen muuttujien määrittely.



Kuva 4. Mpu-kaksiputkijohdon rakenne.

Yhden epäkeskeisesti sijoitetun putken lämpökonduktanssi voidaan määrittää yhtälöstä 14.

$$G'_1 = \frac{2\pi\lambda_e}{\ln\frac{A+B}{A-B}} \quad (14)$$

jossa	$G'_1$	epäkeskeisesti sijoitetun putken lämpökonduktanssi pituusyksikköä kohden	[W/mK]
	$\lambda_e$	eristeen lämmönjohtavuus	[W/mK]
	$A$	yhtälöstä 15	[-]
	$B$	yhtälöstä 16	[-]

Yhtälöön 14 tarvittava tekijä A voidaan määrittää yhtälöstä 15.

$$A = \sqrt{(r_2 + r_1)^2 - s^2} \quad (15)$$

jossa	$A$	tekijä	[-]
	$r_1$	virtausputken säde	[m]
	$r_2$	suoja-putken säde	[m]
	$s$	virtausputken keskikohdan ja suoja-putken	

keskikohdan välinen etäisyys [m]

Yhtälöön 14 tarvittava tekijä B voidaan määrittää yhtälöstä 16.

$$B = \sqrt{(r_2 - r_1)^2 - s^2} \quad (16)$$

jossa	B	tekijä	[-]
	$r_1$	virtausputken säde	[m]
	$r_2$	suoja-putken säde	[m]
	s	virtausputken keskikohdan ja suoja-putken keskikohdan välinen etäisyys	[m]

Kahden putken välinen lämpökonduktanssi voidaan määrittää yhtälöstä 17.

$$G'_2 = \frac{2\pi\lambda_e}{\operatorname{arcosh}\left[2\left(\frac{s}{r_1}\right)^2 - 1\right]} \quad (17)$$

jossa	$G'_2$	kahden putken välinen lämpökonduktanssi	[W/mK]
	$\lambda_e$	eristeen lämmönjohtavuus	[W/mK]
	s	virtausputken keskikohdan ja suoja-putken keskikohdan välinen etäisyys	[m]
	$r_1$	virtausputken säde	[m]

Kaksiputkielementin kokonaiskonduktanssi voidaan määrittää yhtälöstä 18.

$$G'_{kok} = 2G'_1 - 0,5G'_2 \quad (18)$$

jossa	$G'_{kok}$	kokonaislämpökonduktanssi	[W/mK]
	$G'_1$	epäkeskeisesti sijoitetun putken lämpökonduktanssi pituusyksikköä kohden	[W/mK]
	$G'_2$	kahden putken välinen lämpökonduktanssi	[W/mK]

Maasta aiheutuva lämpövastus johtopituutta kohti voidaan määrittää yhtälöstä 19.

$$R_g = \frac{1}{2\pi\lambda_g} \ln \left[ \left( \frac{h-r_2}{r_2} \right) + \sqrt{\left( \frac{h-r_2}{r_2} \right)^2 - 1} \right] \quad (19)$$

jossa	$R_g$	maaperän lämpövastus	[mK/W]
	$\lambda_g$	maaperän lämmönjohtavuus	[W/mK]
	$h$	syvyys suojakuoren pintaan	[m]
	$r_2$	suojaputken säde	[m]

Maan ja elementin aiheuttama kokonaislämpövastus voidaan määrittää yhtälöstä 20.

$$R = \frac{1}{G'_{kok}} + R_g \quad (20)$$

jossa	$R$	kokonaislämpövastus	[mK/W]
	$G'_{kok}$	kokonaislämpökonduktanssi	[W/mK]
	$R_g$	maaperän lämpövastus	[mK/W]

Lämpöhäviöteho pituusyksikköä kohden kaksiputkielementille voidaan määrittää yhtälöstä 21.

$$\phi'_{kok} = \frac{T_m + T_p - T_u}{R} \quad (21)$$

jossa	$\phi'_{kok}$	kokonaislämpöhäviöteho	[W]
	$T_m$	menolämpötila	[°C]
	$T_p$	paluulämpötila	[°C]
	$T_u$	ulkolämpötila	[°C]
	$R$	kokonaislämpövastus	[mK/W]

### 2.1.3 Mpul

Mpul-kaukolämpöjohto on johtorakenne, jossa virtausputket saavat liikkua vapaasti toisin kuin kiinnivaahdotetuissa johtorakenteissa. Tätä johtorakennetta

ei ole käytetty 80-luvun jälkeen. Tälle johtotyypille ei löydy valmiita laskentamalleja.

#### 2.1.4 2Apuk

2Apuk-kaukolämpöjohto on hyvin saman tyyppinen johtorakenne kuin 2Mpuk-johtorakenne. Sillä erotuksella, että 2Apuk-johtorakenteessa on muovikuoren sijasta asbestisuojuakuori, jota myös kutsutaan Himaniitiksi. 2Apuk-johtorakennetta käytettiin viimeksi 80-luvulla, jonka jälkeen sitä ei ole asennettu. Terveydelle vaarallisen asbestisuojuakuoren vuoksi sitä pyritään vaihtamaan verkostosaneerauksien yhteydessä uudempaan 2Mpuk-johtorakenteeseen.

#### 2.1.5 Sisäputki

Sisäputkirakenne on asiakkaan kiinteistön sisäpuolella olevaa johtoa. Siinä on teräksiset virtausputket eristettynä 4 cm:n paksuisella villakourulla, jonka päällä on suojamuovi. Tämän tyyppistä johtoa voidaan käyttää vain kuivissa tiloissa, koska siinä ei ole suojausta kosteutta vastaan.

Eristettyjen putkien eristeen ja vaipan lämpövastus voidaan määrittää yhtälöstä 10.

Lämpöhäviöteho pituusyksikköä kohden sisäputkijohdolle voidaan määrittää yhtälöstä 22.

$$\phi'_{kok} = \frac{\lambda_e}{S_e} * (T_m - T_s) * \pi * d_1 \quad (22)$$

jossa	$\lambda_e$	eristeen lämmönjohtavuus	[W/mK]
	$S_e$	eristeen paksuus	[m]
	$T_m$	menolämpötila	[°C]
	$T_u$	putken ulkopuolinen lämpötila	[°C]
	$d_1$	putken ulkohalkaisija	[m]

## 2.2 Kaukolämpökaivojen lämpöhäviöt

Betonielementtikaivojen lämpöhäviö voidaan määrittää lämpövastusten avulla yhtälöistä 26 ja 27.

$$\phi'_{kok} = UA(T_m - T_u) + UA(T_p - T_u) \quad (23)$$

jossa	$\phi'_{kok}$	kokonaislämpöhäviöteho	[W]
	$U$	lämmönläpäisykerroin	[W/K]
	$A$	putken vaipan pinta-ala	[m <sup>2</sup> ]
	$T_m$	veden menolämpötila	[°C]
	$T_p$	veden paluulämpötila	[°C]
	$T_u$	ympäristön lämpötila	[°C]

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{r_1 k_{cr}} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{\lambda_t} + \frac{1}{r_2 k_u} \quad (24)$$

jossa	$U$	lämmönläpäisykerroin	[W/K]
	$r_1$	putken sisäsäde	[m]
	$r_2$	putken ulkosäde	[m]
	$\lambda_t$	teräksen lämmönjohtavuus	[mK/W]
	$k_{cr}$	putken sisäpuolen lämmönsiirtokerroin, konvektio	[W/m <sup>2</sup> K]
	$k_u$	putken ulkopuolen kokonaislämmönsiirtokerroin, säteily ja konvektio	[W/m <sup>2</sup> K]

Yhtälöistä 26 ja 27 saadaan eristämättömän teräspuutken lämpöhäviö. Tämä lämpöhäviö korjataan betonielementtikaivon lämpöhäviöksi arvioimalla, kuinka suurelta osin kaivon putki on eristetty tai eristämätön. (Martikainen 2013, 30.)

## 2.3 Asiakkaiden jäähdytys

Asiakaslaitteiden huono jäähdytys vaikuttaa sitä enemmän mitä kauempana se sijaitsee lämpökeskukselta ja mitä suurempi kulutus asiakkaalla on. Lähellä lämpökeskusta sijaitsevalla asiakkaalla, jolla on huono jäähdytys ei ole suurta

vaikutusta, koska korkea lämpötila ei kerkeä vaikuttamaan lämpöjohtoon suureen eristyspinta-alaan. Suuremman asiakkaan suurempi vesimäärä lämmintä paluuvettä taas nostaa reilusti paluuveden lämpötilaa kokonaisuudessa.

## 2.4 Vuotoveden lämpöenergia

Kaukolämpöverkon vuotoveden hallinta on tärkeää, koska se sisältää huomattavan määrän lämpöenergiaa verkosta ulospäin lämpöhäviönä. Se myös aiheuttaa vuotaessaan lisävaurioita verkkoon vuotokohdan läheisyyteen veden aiheuttaman korroosion vuoksi. Vuotoveden kastellessa kaukolämpöjohtoon eristeen lämmöneristyskyky huononee aiheuttaen lisää lämpöhäviötä.

Vuotoveden vertailuarvo saadaan jakamalla lisäveden vuosikulutus verkon vesitulavuudella.

Vuotoveden sisältämä energiamäärä voidaan määrittää yhtälöstä 25.

$$Q_{vuoto} = \frac{c \cdot m \cdot \rho \cdot (T_1 - T_2)}{3600} \quad (25)$$

jossa	$Q_{vuoto}$	vuotoveden lämpöenergia	[kWh]
	$c$	ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kgK]
	$\rho$	tiheys	[kg/m <sup>3</sup> ]
	$m$	veden massa	[kg]
	$T_1$	syöttöveden lämpötila	[°C]
	$T_2$	vuotoveden lämpötila	[°C]

## 2.5 Mittauksen epätarkkuus

Lämpöenergiamittari on laite, joka on suunniteltu mittaamaan lämpöenergiaa, jota lämmönsiirtopisteissä virtaava lämmönsiirtoneste luovuttaa. Lämpöenergiamittari koostuu virtausanturista, lämpöanturiparista ja laskijalaitteesta tai niiden yhdistelmästä. (Energiateollisuus ry 2006, 115.)

Lämpöenergiamittauksen tulee täyttää kansallisen lainsäädännön vaatimukset. Mittauslaitteen omistaja, haltija tai käyttäjä vastaavat siitä, että laite on

määräysten mukainen. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi mittauslaitteista 2014/32/EU (Measuring Instrument Directive, MID) tuli voimaan 26.2.2014. Direktiivi koskee siinä mainittujen mittauslaitteiden markkinoille saattamista ja käyttöönottoa. (Energiateollisuus ry 2006, 115.)

Valmistajilla on valittavanaan perinteisen tyyppi hyväksynnän ja ensivakauksen rinnalle laitetyyppiin liittyvien riskien perusteella valittuja vaihtoehtoisia menetelyjä. Mittarin käyttäjän ja omistajan kannalta on oleellista, että mittauslaitteesta löytyy MID:n vaatimusten mukaisuutta osoittava CE-merkintä. (Energiateollisuus ry 2006, 115.)

Vaatimusten mukaisuutta osoittava merkintä on esitetty kuvassa 5 ja se koostuu:

- CE-tunnuksesta
- M-kirjaimesta ja kiinnitysvuoden kahdesta viimeisestä numerosta (17), joita ympäröi suorakulmio.
- Ilmoitetun laitoksen numerosta (0200)



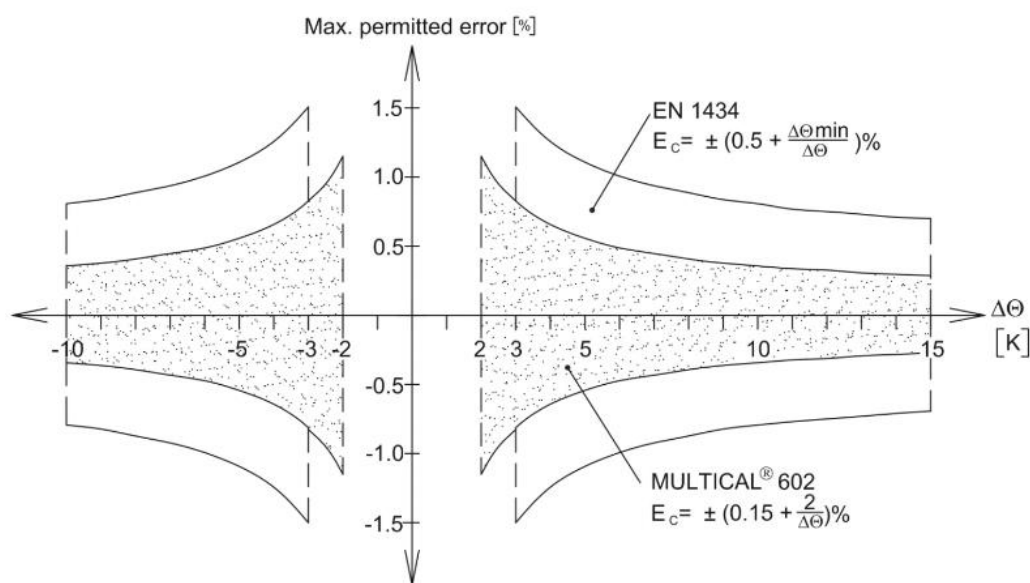
Kuva 5. Kamstrup MC603 MID:n vaatimusten mukaisuutta osoittava merkintä on punaisella merkitty (Kamstrup 2018a, 17).

Asiakkaiden lämpömäärälaskurit ovat Kamstrupin toimittamia. Niiden virtausanturit ovat luotettavaan ultraäänitekniikkaan perustuvia, eikä niissä ole vanhempien virtausmittarityyppien ongelmia kuten likaantuminen ja jumittuminen.



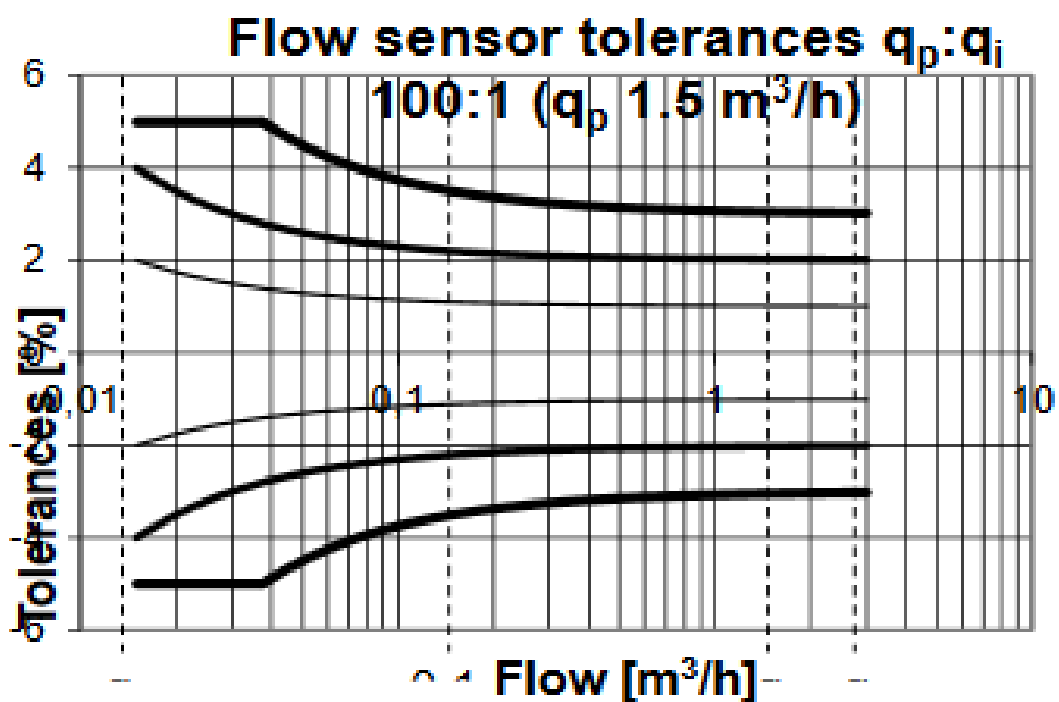
Virtausanturit ovat Ultraflow 54 -tyyppisiä. Laskijalaitteen mahdollinen epätarkkuus tulee pääasiassa lämpötilamittauksista. Laskijalaitteet ovat Multical tyyppisiä. Mitä pienempi lämpötilaero on meno- ja paluuputken välillä, sitä suurempi on mahdollinen epätarkkuus. Lämpötilaeron kasvaessa mahdollinen epätarkkuus pienenee. Siksi on tärkeää, että asiakaslaitteet ovat kunnossa ja lämpötilaero pysyy näin korkeana. Virtausputken mahdollinen epätarkkuus on myös sitä suurempi, mitä pienempi on virtaus. Virtauksen kasvaessa mahdollinen epätarkkuus pienenee. Siksi lämpö määränmittauksen oikea mitoitus on erittäin tärkeää.

Kuvassa 6 on esitetty Kamstrup Multical 602 -laskijalaitteen mahdollinen epätarkkuus. Kuvan valkoinen alue on standardin EN1434 sallima epätarkkuus ja tummennettu alue on laskijalaitteen maksimi epätarkkuus. (Kamstrup 2018a, 11)



Kuva 6. Multical 602 -laskijalaitteen mahdollinen epätarkkuus. (Kamstrup 2018a, 11)

Kuvassa 7 on esitetty Kamstrup Ultraflow 54 -virtausanturin mahdollinen epätarkkuus. Kuvan paksuin viiva on standardin EN 1434 class 3 sallima epätarkkuus ja keskipaksu viiva on EN 1434 class 2 epätarkkuus. Ultraflow'n epätarkkuus on kuvan 7 ohuin viiva, jolloin sen epätarkkuus on alle puolet standardin EN 1434 class 2 sallimasta epätarkkuudesta. (Kamstrup 2018b, 47)



Kuva 7. Kamstrup Ultraflow -virtausanturin mahdollinen epätarkkuus. (Kamstrup 2018b, 48)

Kuvista 6 ja 7 voimme todeta, että Kamstrup -mittareiden mahdollinen epätarkkuus on huomattavasti pienempi, kuin mittausstandardi EN1434 vaatii.

## 2.6 Lämpöhäviöiden määrittäminen tuotanto- ja myyntitietojen perusteella

Yksinkertaisin tapa laskea verkon lämpöhäviöt on määrittää ne hankitun ja myydyt energian mukaan. Tällöin häviöissä on kaikki mahdolliset lämpöhäviöt ja mittausvirheet mukana, mutta se ei kerro mihin lämpöenergia häviää verkosta.

Verkon lämpöhäviöt kokonaisuudessaan voidaan määrittää yhtälöstä 26.

$$Q_{\text{häviö}} = Q_{\text{hankinta}} - Q_{\text{myynti}} \quad (26)$$

jossa	$Q_{\text{häviö}}$	verkon lämpöhäviö	[MWh]
	$Q_{\text{hankinta}}$	osto tai tuotettu energia	[MWh]
	$Q_{\text{myynti}}$	myyty energia	[MWh]

### 3 KAUKOLÄMPÖVERKON LÄMPÖHÄVIÖIDEN ANALYSOINTI

Lämpöhäviölaskelmien perusteella saatiin määritettyä häviöiden energiamäärät sekä jakautumisen määrä eri johtotyypeille, betonielementtikaivoille, vuotovedelle sekä mittausvirheiden mahdollinen vaikutus hyötysuhteeseen.

#### 3.1 Kaukolämpöverkon lämpötilat

Menolämpötila on laskettu ulkolämpötilan pysyvyydentien mukaan menolämpötilasuosituskäyrästä, jolloin painotetuksi keskiarvoksi on saatu 78,2 °C. Verkossa vesi kuitenkin jäähtyy lämpöhäviöiden vuoksi, joten on arvioitu verkon keskimääräiseksi menolämpötilaksi 77 °C ja keskimääräiseksi paluulämpötilaksi on arvioitu mittausten perusteella 45 °C. Edellä mainittuja lämpötiloja on käytetty kaikissa laskuissa. Menolämpötila on automaatiolla ohjattu suosituskäyrän mukaiseksi, joten lämpötila uskottavasti seuraa käyrän arvoja, eikä heittoa todellisuudessa voi paljoa olla.

Energiateollisuus ry:n (2018b, 4) vuoden 2017 tilastojen mukaan verkon keskimääräinen menolämpötila on vastaavankokoisessa verkossa 90 °C ja paluulämpötila 55 °C. Ero tilastoihin verrattuna selittyy todennäköisesti menolämpötilassa automaatiolla, koska se auttaa menolämpötilaa pysymään suosituskäyrän mukaisena ja paluulämpötilassa kohtuullisen hyvässä kunnossa olevilla asiakaslaitteilla.

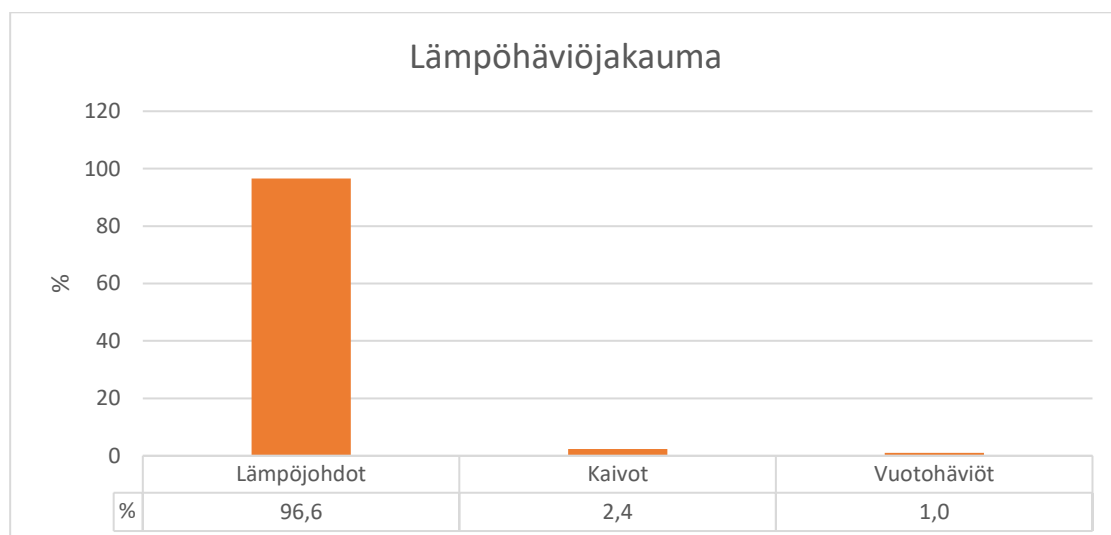
Kaukolämpöjohdosta lämpöenergia johtuu lämpöeristeen läpi maaperään ja sen keskimääräisen lämpötilan on arvioitu olevan 5 °C.

#### 3.2 Lämpöhäviöjakauma

Pääverkon viiden viimeisen vuoden keskimääräiseksi vuosittaiseksi lämpöhäviöksi mittaustietojen perusteella on saatu 12 302,23 MWh, joka on laskettu vähentämällä hankitusta energiamäärästä myyty energiamäärä. Teoreettisesti keskimääräiseksi lämpöhäviöksi lämpöhäviölaskennan perusteella on saatu

12 456,85 MWh. Ero tulosten välillä saattaa johtua laskennassa käytetyistä arvoista, jotka osittain perustuvat arvioihin tai energiamäärämittareiden mitausepä tarkkuudesta, joka on esitetty kohdassa 2.5. Toisaalta laskennallinen lämpöhäviöiden energiamäärä on todella lähellä mittauksien perusteella saatu lämpöhäviöiden määrää ja eron olisi voinut olettaa olevan suurempikin laskennassa käytettyjen muuttujien suuren määrän vuoksi. Taloudellisesti tämä laskennallisesti saatu lämpöhäviöiden energiamäärä merkitsee 622 843 € vuodessa, jos lämpöenergian hankintahinta on 50 €/MWh.

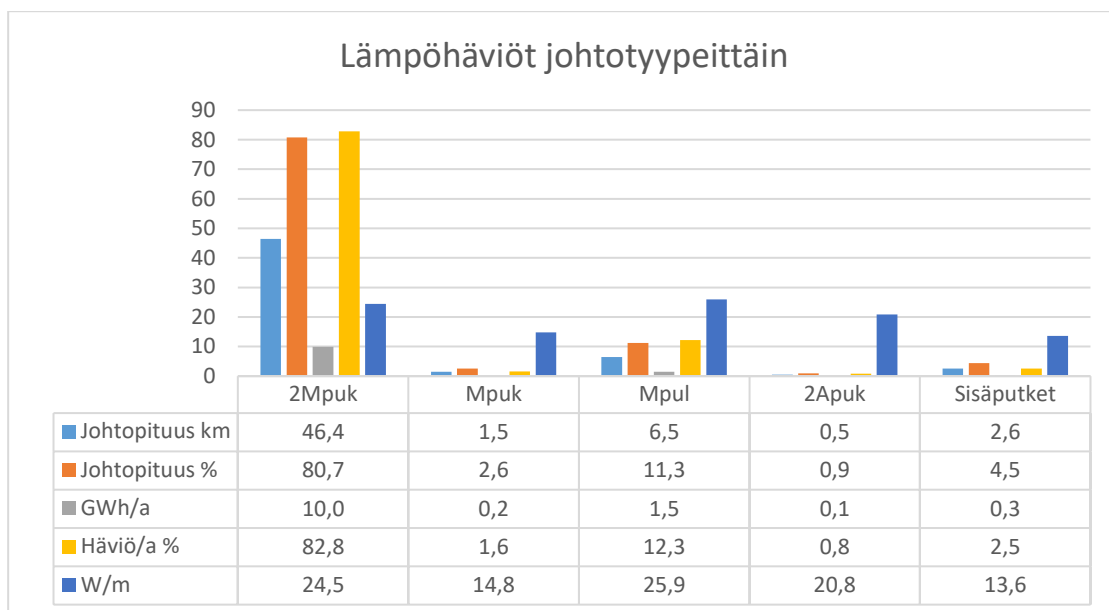
Kuvassa 8 on esitetty verkon lämpöhäviöiden jakautuminen eri kohteisiin. Lämpöjohdot aiheuttavat suurimman osan verkon lämpöhäviöistä (96,6 %).



Kuva 8. Verkon lämpöhäviöjakauma.

### 3.3 Lämpöhäviöt johtotyypeittäin

Jokaisen johtotyypin lämpöhäviöt on laskettu kaikille käytössä oleville putkidiensioille erikseen ja sen jälkeen laskettu yhteen. Kuvassa 9 on esitetty lämpöhäviöt johtotyypeittäin ja siitä selviää 2Mpuk-tyyppisen kaukolämpöjohdon aiheuttavan suurimmat lämpöhäviöt. Tämä johtuu siitä, että tätä johtotyyppiä on metrimääräisesti eniten. Mpul-johtotyypin lämpöhäviöt metriä kohti ovat suurimmat, joka johtuu tämän huonoimmasta eristyskyvystä.



Kuva 9. Lämpöhäviöt johtotyypeittäin.

### 3.3.1 2Mpuk

2Mpuk-kaukolämpöjohdon lämpöhäviölaskenta on toteutettu kohdan 2.1.1 mukaan. Tämän tyyppisessä johdossa lasketaan meno- ja paluuputken lämpöhäviöt erikseen, mutta kuitenkin niiden keskinäinen vaikutus huomioidaan. Laskelmissa on käytetty polyuretaanieristeen  $\lambda$ -arvoa 0,032 W/mK. 2Mpuk-tyypeistä kaukolämpöjohtoa on 46 428 m, joka on 80,7 % kokonaispituudesta. Lämpöhäviö vuodessa on 9 961,0 MWh, joka on 80,0 % kokonaislämpöhäviöstä. Lämpöhäviön osuus kokonaislämpöhäviöistä suhteessa johtopituuteen on suurempaa johtuen siitä, että kaikki isommat isodimensioiset johdot ovat rakennettu tällä johtotyyppillä.

### 3.3.2 Mpuk

Mpuk-kaukolämpöjohdon lämpöhäviölaskenta on toteutettu kohdan 2.1.2 mukaan. Laskelmissa on käytetty polyuretaanieristeen  $\lambda$ -arvoa 0,032 W/mK. Mpuk-tyypeistä kaukolämpöjohtoa on 1 502 m, joka on 2,6 % kokonaispituudesta. Lämpöhäviö vuodessa on 194,2 MWh, joka on 1,6 % kokonaislämpöhäviöstä. Lämpöhäviön osuus kokonaislämpöhäviöistä suhteessa johtopituuteen on melko pientä johtuen johtotyyppille ominaisesta pienemmästä lämpöhäviöstä.

### 3.3.3 Mpul

Mpul-kaukolämpöjohdolle ei löydy valmiita laskukaavoja ja lämpöhäviölaskenta tälle johtotyypille on monimutkaista, joten lämpöhäviöt on arvioitu olevan 9 % suuremmat kuin eniten käytössä olevalla 2Mpuk-tyyppisellä kaukolämpöjohdolla. Mpul-johtoa on 6 493 m, joka on 11,3 % kokonaispituudesta, joten arvioitu lämpöhäviö ei vaikuta kovin paljoa kokonaisuuteen. Lämpöhäviö vuodessa on 1 474,8 MWh, joka on 11,8 % kokonaislämpöhäviöstä. Lämpöhäviön osuus kokonaislämpöhäviöistä suhteessa johtopituuteen on suurempaa johtuen siitä, että tämä johtotyyppi on lämpöhäviöiltään suurempi kuin nykyiset kiinnivaahdotetut johtotyypit.

### 3.3.4 2Apuk

2Apuk-kaukolämpöjohdon lämpöhäviölaskenta on toteutettu kohdan 2.1.1 mukaan, koska johtorakenne on hyvin samanlainen, kuin 2Mpuk-johtorakenteessa. Erotuksena laskennassa eristeen lämmönjohtavuutena on käytetty suurempaa  $\lambda$ -arvoa 0,035 W/mK, eristeen vanhenemisen vuoksi. 2Apuk-tyypistä kaukolämpöjohtoa on 526 m, joka on 0,9 % kokonaisjohtopituudesta. Lämpöhäviö vuodessa on 95,9 MWh, joka on 0,8 % kokonaislämpöhäviöstä. Lämpöhäviön osuus kokonaislämpöhäviöistä suhteessa johtopituuteen on melko pientä johtuen pienistä putkidimensioista.

### 3.3.5 Sisäputki

Sisäputkijohdon lämpöhäviölaskenta on toteutettu kohdan 2.1.5 mukaan. Laskelemissa on käytetty villaeristeen paksuutta 4 cm ja  $\lambda$ -arvoa 0,04 W/mK. Johdon ulkopuoliseksi lämpötilaksi on arvioitu 25 °C. Sisäputkijohtoa on 2 567 m, joka on 4,5 % kokonaisjohtopituudesta. Lämpöhäviö vuodessa on 302,5 MWh, joka on 2,5 % kokonaislämpöhäviöstä. Lämpöhäviön osuus kokonaislämpöhäviöistä suhteessa johtopituuteen on melko pientä johtuen pienemmästä lämpötilaerosta putkessa virtaavan veden ja eristeen ulkopuolisen lämpötilan välillä.

### 3.4 Kaukolämpökaivojen lämpöhäviöt

Betonielementtikaivoja on pääverkossa 56 kpl, joista eristettyjä on 2 kpl. Niitä on asennettu aikaan, kun kiinnivaahdotettuja venttiilielementtejä ei ollut saatavilla. Tässä kaivotyypissä on yleensä huomattavat lämpöhäviöt verrattuna kiinnivaahdotettuun ja suuri korroosioaurion vaara. Keskimääräinen lämpötila kaivojen sisällä on arvioitu olevan 30 °C. Teräsputken lämmön johtavuudeksi on oletettu 16 W/mK ja putken sisäpuolisen konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen on oletettu olevan 35 W/m<sup>2</sup>K. Putken ulkopuolisen lämmönsiirtokertoimen on oletettu olevan 30 W/m<sup>2</sup>K. Laskennan tuloksena on saatu eristämättömän putken lämmönvastukseksi 0,283 K/W ja yhden putken konduktanssiksi 9,72 W/K. Lämmönläpäisykertoimeksi on saatu 3,53 W/m<sup>2</sup>K. Putkien keskimääriksi kaivoissa on arvioitu DN200 ja keskimääräiseksi pituudeksi 8 m. Kaivojen lämpöhäviö vuodessa on 295,6 MWh, joka on 2,4 % kokonaislämpöhäviöstä.

Kiinnivaahdotettuja maaventtiilikaivoja (kartioita) on 117 kpl ja tätä kaivotyyppiä käytetään nykyään, koska se on nykyaikainen, pitkäikäinen, luotettava sekä energiatehokas tapa tehdä maaventtiilikaivo. Niiden lämpöhäviö on lähes sama, kuin suoran putken. Käytännössä venttiilinkara johtaa hieman lämpöä, mutta se on vähäistä kokonaisuuden kannalta, joten elementit lasketaan suorana putkenä. Venttiilinkaroista johtuvan lämpöhäviön on arvioitu olevan alle 0,4 % kokonaislämpöhäviöistä ja vaikutus jakelun hyötysuhteeseen on huomattavasti alle 0,1 prosenttiyksikköä, joten maaventtiilikaivojen lämpöhäviöiden osuutta ei ole huomioitu laskelmissa.

### 3.5 Vuotoveden lämpöenergia

Kaukolämpöverkon vuotoveden vuosikulutuksen viimeisen 5 vuoden keskiarvo on 1 534,2 m<sup>3</sup>/a ja verkon keskitilavuus on ollut 3 000 m<sup>3</sup>. Verkon vertailuarvo on 0,51 m<sup>3</sup><sub>vuoto</sub>/m<sup>3</sup><sub>verkosto</sub> ja se on Energiateollisuus ry:n (2018b, 4) vuoden 2017 tilastojen mukaan vastaavan kokoisten verkkojen keskitason alapuolella, joka on 0,7 m<sup>3</sup><sub>vuoto</sub>/m<sup>3</sup><sub>verkosto</sub>.

Vuotoveden sisältämä energiamäärä on saatu laskemalla yhtälöllä 25.

Yksi kuutiometri vuotovettä menopuolelta sisältää keskimäärin lämpöenergiaa 83,8 kWh.

Yksi kuutiometri vuotovettä paluupuolelta sisältää keskimäärin lämpöenergiaa 46,6 kWh.

Vuotoveden oletetaan vuotavan menopuolelta, joka on todennäköisempää ja vuodon vesimääränä on käytetty viimeisen 5 vuoden keskiarvoa. Jolloin on saatu vuotoveden sisältämäksi energiamääräksi vuodessa 128,6 MWh, joka on 1,0 % kokonaislämpöhäviöstä.

### 3.6 Mittauksen epätarkkuus

Mittarivalmistaja ilmoittaa mittalaitteille ominaisen mahdollisen epätarkkuuden ja mahdolliset mittausvirheet johtuvat tästä. Huonoimmissa olosuhteissa lämpö määränmittauksen epätarkkuus on  $2\% + 1,2\% = \pm 3,2\%$ . Parhaissa olosuhteissa  $1\% + 0,4\% = \pm 1,4\%$ . Tämä ei tietenkään tarkoita jatkuvaa virhettä, vaan mahdollista mittausvirhettä. Epätarkkuus prosentit on määritetty kuvista 7 ja 8.

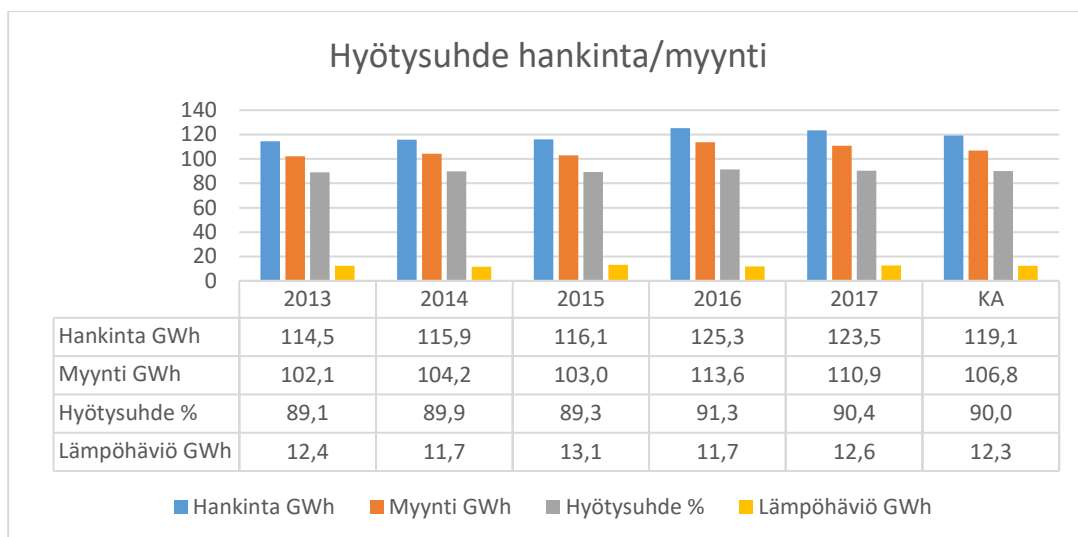
Keskimäärin mittauksen epätarkkuus koostuu virtauksen epätarkkuudesta keskivirtaamalla  $q_p 0,1 \text{ m}^3/\text{h} = 1,2\%$  ja laskijalaitteen epätarkkuudesta, joka on mittauspisteen keskilämpötilaerolla  $32 \text{ °C} = 0,4\%$ . Tästä voimme olettaa myynnin lämpö määränmittauksen mahdolliseksi epätarkkuudeksi  $1,2\% + 0,4\% = \pm 1,6\%$ .

Myynnin lämpö määränmittauksen mahdollinen epätarkkuus energiamääränä on  $\pm 1,6\% * 107 \text{ GWh} = \pm 1,712 \text{ GWh/a}$ . Kokemuksen perusteella lämpö määränmittauksen mahdolliset todetut epätarkkuudet ovat kuitenkin aina olleet asiakkaan eduksi, joten voimme olettaa mahdollisen epätarkkuuden lämpöhäviöiksi.

### 3.7 Lämpöhäviöiden määrittäminen hankinta- ja myyntitietojen perusteella

Kuvassa 10 on esitetty jakelun hyötysuhde 5 viimeisen vuoden tietojen perusteella. Verkon lämpöhäviöiden energiamäärä on saatu laskemalla yhtälöllä 26.





Kuva 10. Jakelun hyötysuhde

Jakelun hyötysuhde on pysynyt melko vakaana, joskin pientä parannusta on havaittavissa. Tämä on selitettävissä myydyn energiamäärän kasvusta, jolloin verkon tehokkuus kasvaa. Hyötysuhde paranee yleisesti siirretyn energiamäärän kasvaessa suhteessa johtopituuteen.

## 4 LÄMPÖHÄVIÖIDEN ANALYSOINNIN PERUSTEELLA SAADUT TU- LOKSET

Lämpöhäviölaskennan perusteella on pohdittu teoreettisia ja käytännön toimenpiteitä kaukolämpöverkon lämpöhäviöiden vähentämiseksi sekä niiden vaikutuksia hyötysuhteeseen.

### 4.1 Kaukolämpöverkon nykytilan tarkastelu

Kaukolämpöverkon nykytila on melko hyvä. Saneerauksissa ja uudisrakentamisessa käytetään Energiateollisuus ry:n suositusten mukaisia kaukolämpöjohtoa, joiden lämmöneristyskyky on hyvä. Vanhanmallisia kaukolämpöjohtoja on jäljellä n. 7 km, joka on noin 12 % kokonaisjohtopituudesta.

Verkon menolämpötilaa säädetään automaatiolla ulkolämpötilan mukaan suosituskäyrän perusteella, jolloin verkon menolämpötila on aina optimaalisella tasolla.

Paluulämpötiloihin kiinnitetään huomiota seuraamalla aktiivisesti asiakkaiden jäähtymää ja opastamalla heitä lämmönjakokeskuksien käytössä. Kaukolämpöverkossa ei ole tarpeettomia kiertolenkkejä ja tarpeelliset eivät ole kohtuuttoman suuria.

Myynnin lämpöenergiamittarit ovat ajanmukaisia ja oikein mitoitettuja, jolloin mittaustarkkuus on hyvällä tasolla.

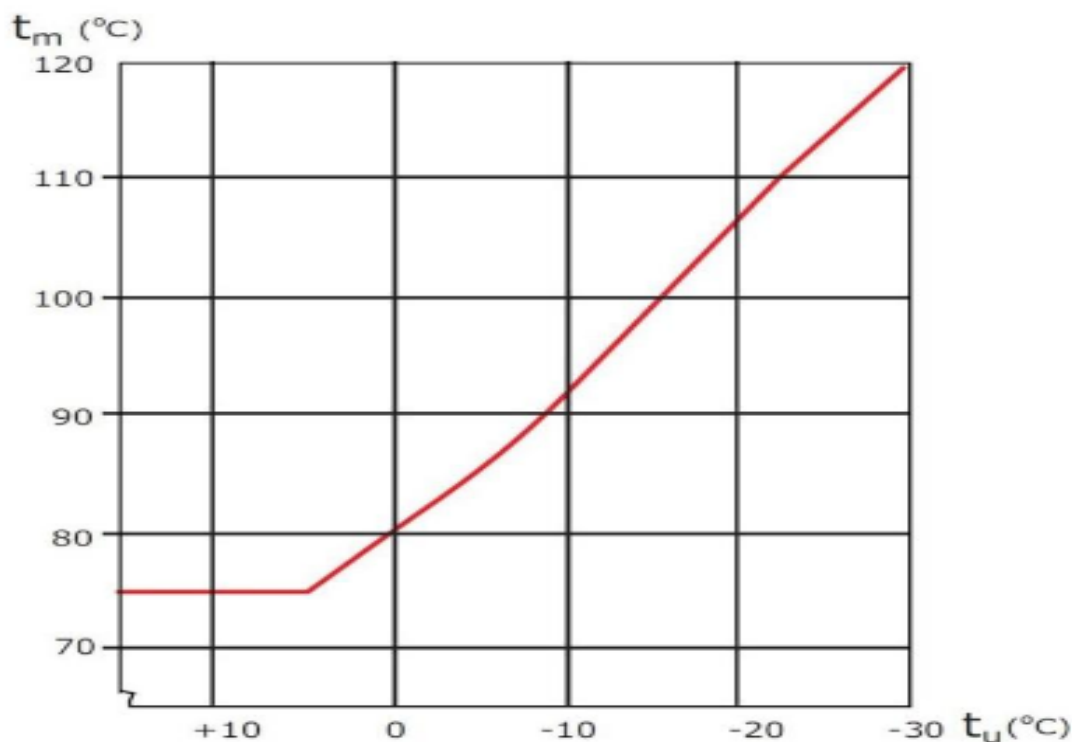
Verkon vuotoveden määrät ovat keskimääräistä huomattavasti pienemmät. Tähän on päästy seuraamalla aktiivisesti vuotoveden määrää ja sen perusteella etsitty vuotokohtia verkosta. Hyvä verkon tuntemus auttaa etsimään vuotoja. Aktiivinen verkon saneeraus ennen vuotojen alkamista on osa hyvää vuotojen hallintaa.

Kaukolämpöverkon laskennallisia häviöitä on saatu vähennettyä asentamalla lämpökeskuksien lämmityksiin omakäytön lämpöenergiamittarit vuonna 2015, jolloin tätä energiamäärää ei enää käsitellä häviönä, vaan se on saatu kohdistettua oikein lämpökeskuksien kustannuksiin.

Verkon lämpötiheyttä kasvattamalla saadaan hyötysuhdetta parannettua. Se ei vähennä lämpöhäviöitä, mutta kasvattaa verkon energiatehokkuutta, joten uusien asiakkaiden saaminen olemassa olevan verkon varrelle on tärkeää edellä mainittujen saavuttamiseksi.

## **4.2 Menolämpötilan vaikutus lämpöhäviöihin**

Kaukolämpöveden menolämpötila määräytyy kuvassa 11 esitetyn Energiateollisuus ry:n suosituskäyrän mukaan, joten siihen ei voi vaikuttaa. Menolämpötila on riippuvainen ulkolämpötilasta. On kuitenkin tärkeää pitää huolta siitä, että menolämpötila vastaa käyrän arvoja. Jos lämpötila nousee yli suositellun, lämpöhäviöt kasvavat ja lämpötilan laskiessa alle suosituksen, asiakkaat eivät saa laadukasta kaukolämpöä.



Kuva 11. Energiateollisuuden menolämpötilan suosituskäyrä. (Energiateollisuus ry 2006, 336)

Menolämpötilan laskeminen 1 °C:een pienentää laskelmien mukaan lämpöhäviötä 0,91 %. Energiämääränä se on vuodessa 113,72 MWh. Vaikutus jakelun hyötysuhteeseen on 0,11 prosenttiyksikköä.

### 4.3 Paluulämpötilan vaikutus lämpöhäviöihin

Paluuveden lämpötilan nousu lisää lämpötilaeroa putkessa virtaavan veden ja maaperänlämpötilan välillä. Tämä lisää suoraan lämpöhäviötä paluuputkesta ja siksi siihen on kiinnitettävä huomiota.

Paluulämpötilaan voidaan vaikuttaa asiakaslaitteiden jäähtymän parannuksella ja kiertojohtojen vedenvirtaaman optimoinnilla.

Asiakkaiden lämmönjakokeskuksien säätölaitteiden kunto ja oikeat asetukset vaikuttavat jäähtymään oleellisesti. Säätölaitteissa yleinen vika on säätöventtiilin jumittuminen auki-asentoon, jolloin kaukolämpövettä virtaa venttiilin lävitse ja jäähtymä laskee. Tämä aiheuttaa paluulämpötilan nousun. Asiakkaiden opastuksella voidaan vaikuttaa siihen, että asiakkaat ovat valveutuneempia pitämään säätölaitteensa kunnossa.

Asiakaslaitteiden korkeasta iästä johtuvat toimintahäiriöt vaikuttavat jäähtymään. Tällöin säätölaitteet eivät yleensä toimi parhaalla mahdollisella tavalla eivätkä vastaa tämän päivän vaatimuksia. Asiakkaiden lämmönvaihtimet ovat iäkkäimmissä lämmönjakokeskuksissa putkilämmönvaihtimia, jotka ovat herkkiä likaantumiaan ja tämä huonontaa jäähdytystä entisestään. Pitäisi keksiä kannustimia esimerkiksi hinnoittelulla, jotta asiakkaat vaihtaisivat lämmönjakokeskuksensa aikaisemmin uudempaan teknologiaan. Myös uudemmissa lämmönjakokeskuksissa saattaa olla toimintahäiriöitä, mutta niitä on harvemmin ja yleensä ne laitetaan nopeasti kuntoon.

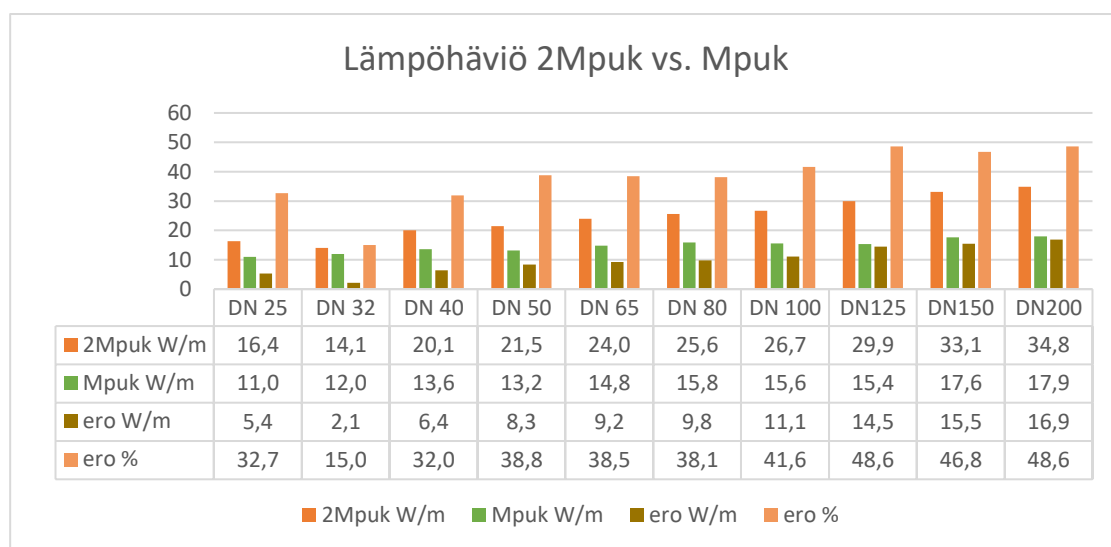
Kaukolämpöverkossa suljettujen venttiilien välittömässä läheisyydessä ja päättyvien johtojen päissä joudutaan pitämään vedenkiertoja yllä jäähtymisen ja metallin jännitysten välttämiseksi. Kiertoja joudutaan asentamaan mahdollisesti myös tapauksissa, joissa asiakkaat eivät saa riittävän lämpöistä kaukolämpövettä verkossa olevien lämpöhäviöiden aiheuttaman jäähtymisen vuoksi. Tämä ongelma on yleinen kesällä, jolloin veden virtaama verkossa on pieni. Pääverkossa ei ole yhtään edellä mainitusta syystä olevaa kiertoa.

Osa kierroista on toteutettu kiinteillä kupariputkilla, joiden liittimien sisään on asennettu tukiholkki, jossa on 6 mm halkaisijaltaan oleva reikä. Tällöin virtaama pysyy lähes vakiona. Tämä on todettu taloudelliseksi tavaksi. Lämpöhäviöiden vähentämiseksi olisi syytä asentaa kaikkiin kiertoihin joko termostaattiventtiilit, jotka optimoivat kiertoveden virtaaman ja pitävät lämpötilan asetetussa lämpötilassa, tai vähintään halkaisijaltaan 6 mm:n reiällä varustetut tukiholkit.

Paluulämpötilan laskeminen 1 °C:ta pienentää lämpöhäviötä saman verran, kuin menopuolella. Hyöty on sama, koska oletetaan lämmön siirtymisen olevan suoraan verrannollinen lämpötilaeroon putkessa virtaavan veden ja maan lämpötilan välillä. Polyuretaanieristeen lämmönjohtavuus ei oleellisesti muutu lämpötilan muuttuessa, joten sitä ei ole tässä huomioitu.

#### 4.4 Johtotyyppin vaihdon vaikutus lämpöhäviöihin

Kaukolämpöjohtotyyppiä on käytettävissä käytännössä kahta eri tyyppiä, jotka ovat 2Mpuk ja Mpuk. Valkeakosken Energia Oy käyttää asennuksissaan pääsääntöisesti 2Mpuk-tyypistä kaukolämpöjohtoa, jonka lämpöhäviöt ovat merkittävästi suuremmat kuin Mpuk-tyyppisellä johdolla. Ero Mpuk-tyyppisen johdon hyväksi on noin 30 - 50 % pienemmät lämpöhäviöt johtodimensiosta riippuen. Tarkemmat erot on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Lämpöhäviö 2Mpuk- ja Mpuk-johtotyypeillä.

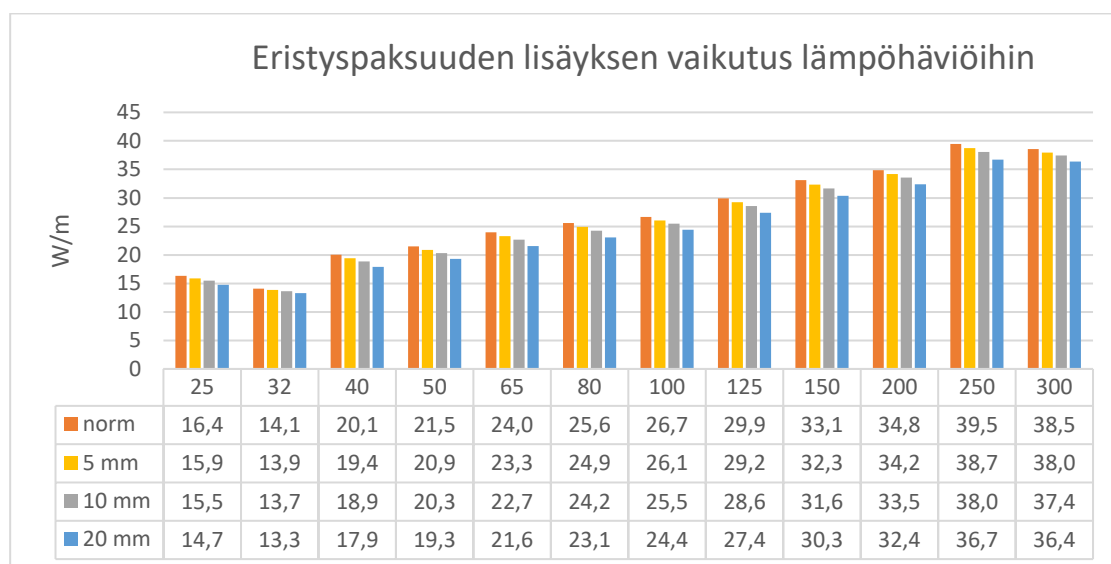
Maahan asennettavien kaukolämpöjohtojen teoreettinen lämpöhäviö vuodessa nykyisellä verkoston koostumuksella on 11 725 MWh. Jos nämä johtotyytit olisivat kokonaan Mpuk-tyypistä, teoreettinen lämpöhäviö vuodessa olisi 6 568 MWh. Tämä on 44 % vähemmän lämpöhäviötä. Vaikutus jakelun hyötysuhteeseen on 4,82 prosenttiyksikköä.

Johtotyyppin vaihto lyhyellä aikavälillä ei ole kannattavuudeltaan mahdollista, mutta pitkällä aikavälillä uutta linjaa rakennettaessa ja vanhaa saneerattaessa lämpöhäviöitä voidaan johtotyyppin vaihdolla merkittävästi vähentää.

Energiateollisuus ry:n (2018a, 3) vuoden 2017 tilastojen mukaan 2Mpuk-johtotyyppin verottomat rakentamiskustannukset ovat keskimäärin 476 €/m ja Mpuk-johtotyyppin 231 €/m. Tämä tarkoittaa 51,5 % alhaisempia rakentamiskustannuksia Mpuk-johtotyyppillä, joten tämäkin puoltaa vaihtoa.

#### 4.5 Eristyspaksuuden vaikutus lämpöhäviöihin

Käytössä olevan 2Mpuk-tyyppisen johdon eristyspaksuuden 10 % lisäys vähentää lämpöhäviöitä n. 5 - 6 % putkidimensioista riippuen. Kuvassa 13 on esitetty lämpöhäviöitä johtometriä kohden eristyspaksuuden lisäyksellä eri putkidimensioilla. Eristyksen kasvattaminen ei käytännössä tule kysymykseen ainakaan tällä hetkellä, koska kaukolämpöjohtojen toimittajilla on vain Energia- teollisuus ry:n suositusten mukaisella eristyspaksuudella olevia kaukolämpöjohtoja tarjolla. Mutta eristyspaksuuden kasvattamisen vaikutus lämpöhäviöihin on hyvä ymmärtää.



Kuva 13. Eristyspaksuuden lisäyksen vaikutus lämpöhäviöihin.

#### 4.6 Betonielementtikaivojen eristämisen vaikutus lämpöhäviöihin

Betonielementtikaivojen eristämättömien putkien eristäminen 4 cm:n paksuisella polyuretaanikerroksella vähentäisi vuodessa lämpöhäviöitä 188,8 MWh, joka on 63,9 % vähemmän lämpöhäviöitä kaivojen osalta. Vaikutus jakelun hyötysuhteeseen on 0,18 prosenttiyksikköä.

Kaivojen paljaiden putkien eristäminen polyuretaanilla on mahdollista ja näin on tehtykin yhteen kaivoon. Tämä vaikuttaa negatiivisesti kaivon kosteusprosenttiin ja mahdolliseen kuivumiseen putken kastuessa, joten korroosiovaurion mahdollisuus kasvaa. Eristys aiheuttaa kaivon jäähtymisen ja painovoimaisen

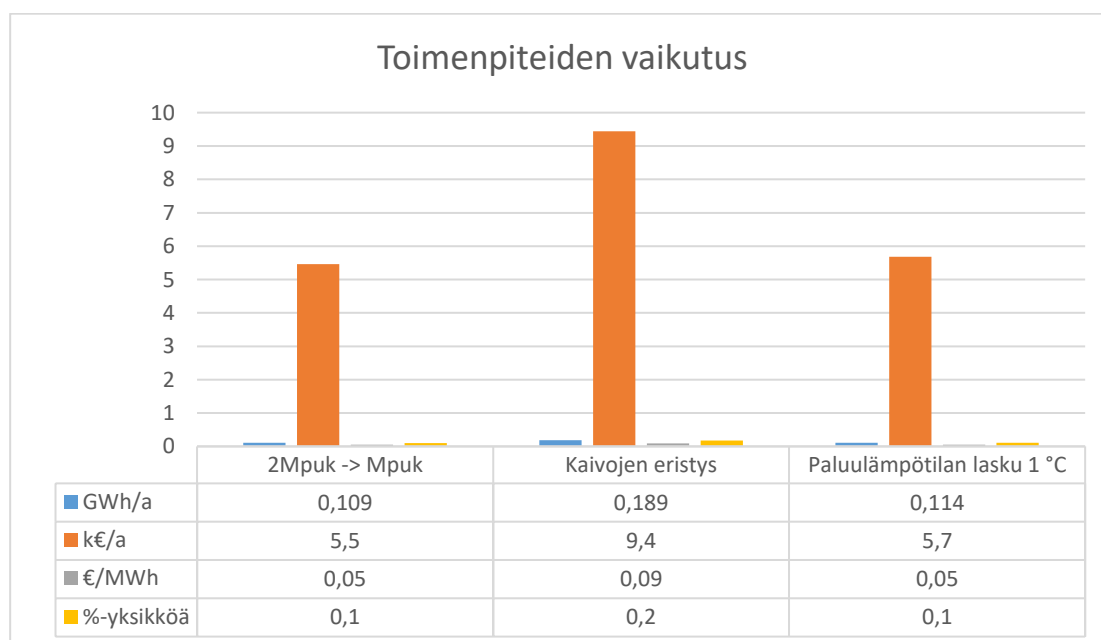
ilmanvaihdon määrä vähenee, koska pienempi lämpötilaero kaivon ja ulkolämpötilan välillä vähentää tätä. Pienempi ilmanvaihdon määrä nostaa ilman kosteusprosenttia kaivossa ja vähentää mahdollisesti pohjalla olevan veden haihtumista. Toisaalta polyuretaanieriste on suoraan putkessa kiinni ja suojaa tällä tavoin eristettyä putken osaa korroosiolta.

#### 4.7 Mittauksen epätarkkuuden vaikutus lämpöhäviöihin

Lämpöenergiamittareiden mittausvirheet eivät ole lämpöhäviöitä, mutta ne vaikuttavat verkoston hyötysuhteeseen. On tärkeää tiedostaa mittausvirheiden mahdollisuus ja niiden mahdollinen määrä. Verkossa on myyntienergian mittausjärjestelmä, joka on osoittautunut erittäin hyväksi ja luotettavaksi. Mittausvirheiden vähentämiseksi on tärkeää oikea mittarin mitoitus ja asiakaslaitteiden hyvä jäähdytys.

#### 4.8 Kehitysehdotukset ja niiden vaikutukset

Toimenpiteiden vaikutuksia on esitetty kuvassa 14. Laskelmissa on käytetty energian hankintahintana 50 €/MWh, joka ei ole Valkeakosken Energia Oy:n hankintahinta, vaan on suuntaa antavana hintana. Huomioimatta investointeja ja käyttökuluja 1 prosenttiyksikön hyötysuhteen parannus vaikuttaa vähentämällä suoraan yhtiön kustannuksia 53 500 € vuodessa.



Kuva 14. Toimenpiteiden vaikutus

Lämpöjohtotyyppin vaihto 2Mpuk:sta Mpuk-tyyppiseen johtorakenteeseen on pitkällä aika välillä kannattavaa. Vaikutuslaskelmassa hyödyt on jaettu 50 vuodelle. Oletetaan, että 50 vuoden päästä kaikki kaukolämpöjohdot olisi vaihdettu Mpuk-tyyppiseen johtoon ja vasta tällöin saataisiin kokonaishyöty käyttöön.

Kaivojen eristys lyhyellä aikavälillä saattaisi tulla kysymykseen, jos investointikustannukset ja eristyksen haitat arvioidaan hyötyjä pienemmiksi.

Paluulämpötilaan ei voi suoraan vaikuttaa, mutta sen vaikutus on tässä huomioitu. Paluulämpötilan laskuun voi vaikuttaa välillisesti asiakkaiden lämmönjakokeskusten toimintaa seuraamalla ja asiakkaita opastamalla.

Tässä työssä keskityttiin vain verkon lämpöhäviöihin ja niiden vaikutuksista jakelun hyötysuhteeseen. Tarkempia investointi- ja käyttökustannuksia ei huomioitu, joten jatkotutkimuksena voisi olla kehitysehdotuksien tarkemmat kustannuslaskelmat sekä virtauksiin liittyvät laskelmat.

## 5 YHTEENVETO

Työn alussa todettiin verkon olevan Energiateollisuus ry:n tilastoihin verrattuna keskimääräistä energiatehokkaampi ja tämän vuoksi tehokkaiden kehitysehdotuksien löytämisessä oli haasteita. Tämän työn varsinaiseen tutkimuskysymykseen ”Miten kaukolämpöverkon lämpöhäviöitä voidaan vähentää?” saatiin kuitenkin vastauksia, vaikka toteutettavia kehitysehdotuksia löytyi vähän.

Laskemalla kaukolämpöverkon lämpöhäviöt eri johtotyypeille ja betonielementtikaivoille voitiin määrittää häviöiden jakautuminen eri kohteisiin ja arvioida mahdollisia kehitysehdotuksia. Samalla kävi ilmi eri johtotyyppien väliset erot lämpöhäviöiden suhteen ja Energiateollisuus ry:n tilastoista selvisi niiden keskimääräisten rakentamiskustannusten erot.

Tehokkain pitkän aikavälin kehitysehdotus on vaihtaa 2Mpuk-johtotyyppin asentaminen saneeraus- ja uudisrakentamisessa Mpuk-johtotyyppiin. Sen etuja ovat pienemmät lämpöhäviöt ja rakentamiskustannukset. Tämä vaatii



niin sanotun periaatepäätöksen aloittaa käyttämään asennuksissa pääasiassa tätä johtotyyppiä. Olemassa olevia lämpöjohtoja ei kannata niiden korkeiden rakentamiskustannusten vuoksi vaihtaa pelkästään lämpöhäviöiden vähentämiseksi. Korjausrakentamisen yhteydessä vaihto on kuitenkin kannattavaa.

Lyhyen aikavälin kehitysehdotus on eristää polyuretaaniruiskutuksella betonielementtikaivojen eristämättömät putket. Eristäminen vähentää lämpöhäviöitä verrattuna eristämättömään putkeen. Eristys tuo myös haittoja, jotka tulee huomioida ennen eristyspäätöstä.

Laskelmissa todettiin verkon lämpötilan olevan suoraan verrannollinen lämpöhäviöihin. Lämpötilaan ei voida suoraan itse juurikaan vaikuttaa, joten asiakaslaitteiden jäähtyvyyteen kannattaa kiinnittää huomiota. Niihin voidaan vaikuttaa seuraamalla aktiivisesti asiakaslaitteiden jäähdytystä kaukoluennan avulla ja opastamalla asiakasta näiden laitteiden käytössä huonon jäähdytyksen toteutuessa.

## LÄHTEET

- Anttonen, K. 2011. Kaukolämpöverkon paluuvien hyödyntäminen lämmityksessä. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Teknillinen tiedekunta. Diplomityö. Saatavissa: <http://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/73946/Diplomity%C3%B6%2C%20Kari%20Anttonen%202011.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [viitattu 17.10.2018].
- Energiateollisuus ry. Kaukolämmön käsikirja. 2006. Helsinki: Energiateollisuus ry.
- Energiateollisuus ry. 2018a. Kaukolämpöjohtojen rakentamiskustannukset 2017. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://kaukolampoextra.fi> [Sisäinen dokumentti] [viitattu 13.11.2018].
- Energiateollisuus ry. 2018b. Kaukolämmön käyttötaloudelliset tunnusluvut 2017. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://kaukolampoextra.fi> [Sisäinen dokumentti] [viitattu 18.9.2018].
- Kamstrup. 2018a. Multical 603, technical description. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://products.kamstrup.com/ajax/download-File.php?uid=5942362944387&display=1> [viitattu 5.10.2018].
- Kamstrup. 2018b. Ultraflow 54, technical description. PDFdokumentti. Saatavissa: <http://products.kamstrup.com/ajax/download-File.php?uid=512b6280df192&display=1> [viitattu 5.10.2018].
- Martikainen, R. 2013. Kaukolämpöverkon verkostohyötysuhteen parantaminen. Tampereen teknillinen yliopisto. Teknillinen tiedekunta. Diplomityö. Saatavissa: <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/21757/Martikainen.pdf> [viitattu 15.11.2018].
- Mäkelä, V-M., Tuunanen, J. 2015. Suomalainen kaukolämmitys. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/97138/URNISBN9789515885074.pdf> [viitattu 3.10.2018].
- Viander, T. 2014. Kaukolämpöverkon käytön optimointi. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Teknillinen tiedekunta. Diplomityö. Saatavissa: <https://docplayer.fi/1167319-Kaukolampoverkon-kayton-optimointi.html> [viitattu 22.10.2018].
- Wehotherm. Tuoteluettelo. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://isu-su.com/uponorfi/docs/41701\\_wehotherm\\_tuoteluettelo-1\\_201](https://isu-su.com/uponorfi/docs/41701_wehotherm_tuoteluettelo-1_201) [viitattu 25.9.2018].

## KUVALUETTELO

Kuva 1. Kuvakaappaus. Maan lämmönjohtavuuden vaihtelu. Kaukolämmön käsikirja. 2006. Helsinki: Energiateollisuus ry. 27.9.2018

Kuva 2. Kuvakaappaus. Maahan upotettujen kaukolämpöputkien lämpöhäviöiden määrittäminen. Kaukolämmön käsikirja. 2006. Helsinki: Energiateollisuus ry. 27.9.2018

Kuva 3. 2Mpuk-yksiputkijohdon rakenne.

Kuva 4. Mpuk-kaksiputkijohdon rakenne.

Kuva 5. Kuvakaappaus. Kamstrup MC603 MID:n vaatimusten mukaisuutta osoittava merkintä on punaisella merkitty. Kamstrup. 2018a. Multical 603, technical description. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://products.kamstrup.com/ajax/downloadFile.php?uid=5942362944387&display=1> [viitattu: 13.10.2018].

Kuva 6. Kuvakaappaus. Multical 603 laskijalaitteen mahdollinen epätarkkuus. Kamstrup. 2018a. Multical 603, technical description. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://products.kamstrup.com/ajax/downloadFile.php?uid=5942362944387&display=1> [viitattu: 13.10.2018].

Kuva 7. Kuvakaappaus. Kamstrup Ultraflow virtausanturin mahdollinen epätarkkuus. Kamstrup. 2018b. Ultraflow 54, technical description. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://products.kamstrup.com/ajax/downloadFile.php?uid=512b6280df192&display=1> [viitattu: 13.10.2018].

Kuva 8. Verkoston lämpöhäviöjakauma.

Kuva 9. Lämpöhäviöt johtotyypeittäin.

Kuva 10. Jakelun hyötysuhde

Kuva 11. Kuvakaappaus. Energiateollisuuden menolämpötilan suosituskäyrä. Energiateollisuus ry. Kaukolämmön käsikirja. 2006. Helsinki: Energiateollisuus ry. 25.10.2018

Kuva 12. Lämpöhäviö 2Mpuk- ja Mpuk-johtotyypeillä.

Kuva 13. Eristyspaksuuden lisäyksen vaikutus lämpöhäviöihin.

Kuva 14. Toimenpiteiden vaikutus