LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Teknillinen tiedekunta
Energiatekniikan koulutusohjelma

Kari Anttonen

KAUKOLÄMPÖVERKON PALUUVEDEN HYÖDYNTÄMINEN LÄMMITYKSESSÄ

Työn tarkastajat: Dosentti, TkT Juha Kaikko
Professori, TkT Esa Vakkilainen

Työn ohjaaja: DI Maija Henell

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Energiatekniikan koulutusohjelma

Kari Anttonen

Kaukolämpöverkon paluuveden hyödyntäminen lämmityksessä

Diplomityö

2011

109 sivua, 38 kuvaa, 7 taulukkoa ja 3 liitettä

Tarkastajat: Dosentti, TkT Juha Kaikko
Professori, TkT Esa Vakkilainen

Ohjaaja: DI Maija Henell

Hakusanat: Kaukolämmitys, kaukolämmön paluuvesi, paluuvesilämmitys
Keywords: District heating, return water of district heating, return water heating

Tässä diplomityössä on määritetty paluuvesilämmityksen mahdollisuudet Savon Voima Oyj:n kaukolämpöpaikkakunnilla. Työssä tarkasteltiin paluuvesilämmityksen tuoman paremman kaukolämpöveden jäähtymän vaikutuksia kaukolämpöverkkoon ja energiantuotantoon sekä laskettiin esimerkkipaikkakunnilla kaukolämmön paluuveden lämpötilan alentumisen tuomat rahalliset hyödyt. Lisäksi tarkasteltiin paluuvesilämmityksen taloudellisuutta esimerkkipaikkakunnilla.

Laskennassa saatiin paluuvesilämmityksen tuomaksi jäähtymähyödyksi pumppauskustannuksissa 0,7 – 0,8 €/MWh ja lämpöhäviöissä 1,5 – 2,9 €/MWh. Iisalmessa sähköntuotannon lisääntymisestä saadaan hyötyä 0,7 €/MWh. Suurin hyöty saadaan Pielaveden ja Suonenjoen biolämpökeskusten lämmöntalteenotolla varustetuista savukaasupesureista. Pielavedellä tämä hyöty on 6,4 €/MWh ja Suonenjoella 6,1 €/MWh.

Paluuvesilämmityksen kannattavuus asuinkiinteistöissä vaatii lämmöntuotannon yhteydessä olevan savukaasupesurin tuoman rahallisen hyödyn. Esimerkiksi Iisalmessa asiakkaalle myönnettävissä oleva jäähtymähyvitys paluuvesilämmöstä ei riitä kattamaan paluuvesilämmityksen suurempia investointikuluja. Myös pesuripaikkakunnilla kannattavuus vaatii suuren vuosittaisen lämmönkäytön. Tavoiteltaessa 8 vuoden korollista takaisinmaksuaikaa vaatii kannattavuus kohteelta Pielavedellä 250 MWh:n ja Suonejoella 300 MWh:n vuosittaisen lämmönkäytön. Myös asiakkaan sijainnin sopivuus kaukolämpöverkossa paluuvesilämmitykseen täytyy tarkastella tapauskohtaisesti. Paluuvesilämmitys ei tule työn tulosten perusteella tulevaisuudessa yleisesti käyttöön, mutta yksittäisiä asiakkaita siihen voidaan liittää.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
Degree Programme in Energy Technology

Kari Anttonen

Utilisation of district heating return water in heating

Master's thesis

2011

109 pages, 38 figures, 7 tables and 3 appendices

Examiners: Docent, D. Sc. (Tech) Juha Kaikko
Professor, D. Sc. (Tech) Esa Vakkilainen

Instructor: Master of Science in Technology Maija Henell

Keywords: District heating, return water of district heating, return water heating

This thesis examines the possibilities of district heat return water heating on district heating networks of Savon Voima Oyj. This thesis examines how the better cooling of district heating water effects on energy production and district heating network. The savings per cooling energy are determined and the economic efficiency of return water heating is examined on three different district heat places.

The benefit from district heat water pumping is 0,5 – 0,8 €/MWh and from heat losses of district heat network 1,5 – 2,9 €/MWh. In Iisalmi the better cooling of district heat water brings also benefits from the increase of electricity production on CHP power plant. This benefit is 0,7 €/MWh. The biggest benefit is received from heat recovery flue gas scrubber. Savon Voima has this kind of scrubber in two different places. In Pielavesi this benefit is 6,4 €/MWh and in Suonenjoki 6,1 €/MWh.

For the return water heating to be cost effective on residential building, the benefits from flue gas scrubber are needed. For example in Iisalmi the cooling compensation which can be given to customer from return water heat will not offset the higher investment costs on return water heating. Also in Pielavesi and Suonenjoki the annual use of heat must be high, so that the return water heating could be cost effective. If 8 years is the target of repayment period the annual use of heat must be 250 MWh in Pielavesi and 300 MWh in Suonenjoki. Also the convenience of client location on district heat network must be examined specifically. Based on the results of this thesis the return water heating won't be generalized but single clients can be connected to district heating return water heating.

ALKUSANAT

Kiitän koko Savon Voiman Energiantuotanto ja kaukolämpö – yksikköä erittäin mielenkiintoisesta diplomityön aiheesta. Erityisesti haluan kiittää työn aiheesta ja ohjauksesta suunnittelupäällikkö Maija Henelliä. Lisäksi suuri kiitos kuuluu asiakasvastaava Heino Vidgrenille, tekniselle asiakasvastaavalle Risto Pohjolaiselle sekä verkostoinsinööri Aki Pitkäselle saamistani neuvoista työn aikana.

Dosentti Juha Kaikolle ja Professori Esa Vakkilaiselle kiitos työni tarkastuksesta ja ohjauksesta.

Kiitokset unohtumattomasta opiskeluajasta ja etenkin loistavista exkursioista kaikille ystäville ja opiskelutovereille.

Erityisen lämmin kiitos kuuluu vaimolleni Jonnalle tuesta ja kannustuksesta opiskeluiden aikana. Kiitos myös Saralle. Kiitokset vanhemmilleni, veljille ja siskolle kannustuksesta ja tuesta opiskeluiden aikana. Erityisesti kiitos äidilleni kannustuksesta opiskeluun.

Siilinjärvellä 16.12.2011

Kari Anttonen

SISÄLLYSLUETTELO

KÄYTETYT MERKINNÄT 4
1 JOHDANTO 6
2 SAVON VOIMA Oyj 7
3 TARKASTELTAVAT PAIKKAKUNNAT 10
3.1 Iisalmi 10
3.2 Pielavesi 11
3.3 Suonenjoki 12
4 KAUKOLÄMPÖJÄRJESTELMÄN TOIMINTAPERIAATE 13
5 KAUKOLÄMPÖVEDEN JÄÄHTYMÄN PARANEMISEN VAIKUTUKSET 16
5.1 Vaikutukset energiantuotannossa 16
5.1.1 Lämmön talteenotto ja polttoaineen säästö 16
5.1.2 Sähkön ja lämmön yhteistuotanto 17
5.1.3 Lämmön varastointi 18
5.1.4 Matalalämpöiset lämmönlähteet 18
5.2 Vaikutukset kaukolämmön siirtoverkossa 19
5.2.1 Verkoston lämpöhäviöt 19
5.2.2 Pumppauskustannukset 20
5.2.3 Kaukolämpöverkon siirtokapasiteetti 20
5.2.4 Kaukolämpöverkon lämpöjännitykset 20
6 LASKENNAN PERUSTEET 21
6.1 Jäähtymätermi 21
6.2 Pumppaustehon pienenemisen määritys 22
6.3 Lämpöhäviöiden pienenemisen määritys 25
6.3.1 Betonielementtikanavien laskenta 27
6.3.2 Kaksiputkielementtikanavien laskenta 29
6.3.3 Yksiputkielementtikanavien laskenta 31
6.3.4 Muovisuojakuorijohto liikkuvin teräsputkin 33
6.3.5 Lämpöhäviöiden pienentymä tuotanto- ja myyntitietojen perusteella 34
6.4 Sähköntuotannon lisääntymisen määritys 34

6.5 Lämmöntalteenoton paranemisen määritys ... 40
7 LASKENNAN TULOKSET ... 45
7.1 Iisalmi ... 45
7.1.1 Pumppauskustannukset ... 45
7.1.2 Lämpöhäviöt ... 47
7.1.3 Sähköntuotanto ... 49
7.1.4 Kokonaisvaikutus ... 49
7.2 Pielavesi ... 50
7.2.1 Pumppauskustannukset ... 50
7.2.2 Lämpöhäviöt ... 52
7.2.3 Lämmön talteenotto ... 54
7.2.4 Kokonaisvaikutus ... 55
7.3 Suonenjoki ... 56
7.3.1 Pumppauskustannukset ... 56
7.3.1 Lämpöhäviöt ... 58
7.3.3 Lämmön talteenotto ... 60
7.3.4 Kokonaisvaikutus ... 61
8 PALUUVEDEN KÄYTTÖ LÄMMITYKSESSÄ ... 62
8.1 Yleistä ... 62
8.3 Kytkentävaihtoehdot ... 63
8.2.1 Kytkentävaihtoehto 1 ... 64
8.2.2 Kytkentävaihtoehto 2 ... 66
8.2.3 Kytkentävaihtoehto 3 ... 67
8.2.4 Kytkentävaihtoehto 4 ... 69
8.2.5 Kytkentävaihtoehtojen paremmuus ... 70
8.3 Ongelmat ... 70
9 JÄÄHDYTYKSESTÄ PALKITSEVA TARIFFI ... 73
9.1 Jäähtymähyvitys ... 73
9.2 Jäähtymähyvityksen käyttö Savon Voiman hinnoittelumallissa ... 75
9.3 Jäähtymän huomioiva kaukolämpötariffi nykyisille asiakkaille ... 75

9.3.1 Tilausteho ... 76
9.3.2 Tilausvesivirta ... 76
9.3.3 Vesivirtamaksu ... 77
9.3.4 Jäähtymähyvitys nykyiselle asiakkaalle ... 78
9.3.5 Lisämaksu huonosta jäähtymästä ... 79
10 PALUUVESILÄMMITYKSEN TALOUDELLISUUS ... 81
10.1 Investointikustannukset asiakkaalle ... 81
10.1.1 Liittymismaksun suuruus ... 81
10.1.2 Lämmönjakokeskuksen kustannukset ... 83
10.2 Kannattavuus ... 84
10.2.1 Iisalmi ... 86
10.2.2 Pielavesi ... 88
10.2.3 Suonenjoki ... 91
10.3 Paluuvesilämmityksen kannattavuuden reunaehdot ... 93
10.4 Kytkentämuutos vanhoille asiakkaille ... 96
10.5 Case-tarkastelu, Pielaveden kirkko ... 98
11 POTENTIAALI ENERGIA- JA KOKONAISKUSTANNUSSÄÄSTÖILLE ... 102
12 JOHTOPÄÄTÖKSET ... 103
LÄHTEET ... 108

LIITTEET

Liite 1. Iisalmen kaukolämpöverkosto
Liite 2. Pielaveden kaukolämpöverkosto
Liite 3. Suonenjoen kaukolämpöverkosto

KÄYTETYT MERKINNÄT

c_p	ominaislämpökapasiteetti	kJ/kgK
d	halkaisija	m
E	lämpöenergia	MWh
G	lämpökonduktanssi pituusyksikköä kohti	W/mK
g	putoamiskiihtyvyys	m/s^2
K	lämmönläpäisyluku pituusyksikköä kohti	W/mK
H	korkeus	m
h	syvyys	m
J	jäähtymätermi	€/MWh
P	teho	W
p	paine	bar, Pa
R	lämpövastus pituusyksikköä kohti	mK/W
r	säde	m
S	säästö	€
s	etäisyys	m
T	lämpötila	°C, K
t	aika	h, s
M	moolimassa	kg/kmol
m	massa	kg
n	pyörimisnopeus	1/s
V	tilavuus	m^3
α	lämpötilan johtavuus	m^2/s
η	hyötysuhde	-
ρ	tiheys	kg/m^3
λ	lämmönjohtavuus	W/mK
$\emptyset$	lämpöhäviöteho	W

Alaindeksit

as	asteisuus
e	eriste
g	maa
H2O	vesi
i	ilma
ka	keskiarvo
kl	kaukolämpö
klv	kaukolämpövesi
klvp	kaukolämpöpumppu
kok	kokonais
kp	kastepiste
m	meno
p	paluu
s	sisä
sk	savukaasu
u	ulko
t	turbiini
th	tuorehöyry
vols	väliottolämmönsiirrin
vph	vastapainehöyry
vpls	vastapainelämmönsiirrin
vp	vastapaine

1 JOHDANTO

Kaukolämmityksen kilpailukyky ei ole enää itsestäänselvyys varsinkaan maalämpöä vastaan kilpailtaessa. Viimeaikaiset energiaverojen korotukset ja polttoaineiden hintojen nousu ovat pakottaneet kaukolämpöyhtiöitä nostamaan kaukolämmön hintaa huomattavasti, kun taas maalämmön tuotantokustannukset eivät ole nousseet samassa suhteessa ja maalämmön investointikustannukset ovat taas laskeneet sen suosion myötä. Etenkin kaukolämmön tuotantoon käytetyn polttoöljyn hinta on noussut reilusti, noin kaksinkertaiseksi viimeisen kymmenen vuoden aikana. Kaukolämmön kilpailukyvyn parantamiseksi on tehtävissä kaksi asiaa. Toinen niistä on tuotannon ja siirron kustannus- sekä energiatehokkuuden parantaminen ja toinen on tuotantokustannuksiltaan edullisempien uusien tuotteiden kehittäminen ja kannustimet asiakaspäässä.

Tämä työ keskittyy jälkimmäiseen mahdollisuuteen eli uusien tuotteiden ja kannustimien kehittämiseen asiakaspäässä. Työn lähtökohtana on käytetty Pöyryn vuonna 2010 julkaisemaa tutkimusta ”Kaukolämpöjärjestelmän paluuveden hyväksikäyttö kiinteistöjen lämmityksessä” (Pöyry 2010). Kyseisessä tutkimuksessa on kartoitettu karkeasti paluuvesilämmityksen aiheuttaman kaukolämmön paluuveden lämpötilan alentumisen tuomia rahallisia hyötyjä. Nämä rahalliset hyödyt mahdollistaisivat uuden tuotteen eli paluuvesilämmön tarjoamisen asiakkaalle normaalia kaukolämpöenergiaa halvemmalla. Lisäksi tutkimuksessa on käsitelty paluuvesilämmön hyödyntämisen mahdollistavia tekniikoita, sekä niiden investointikustannuksia.

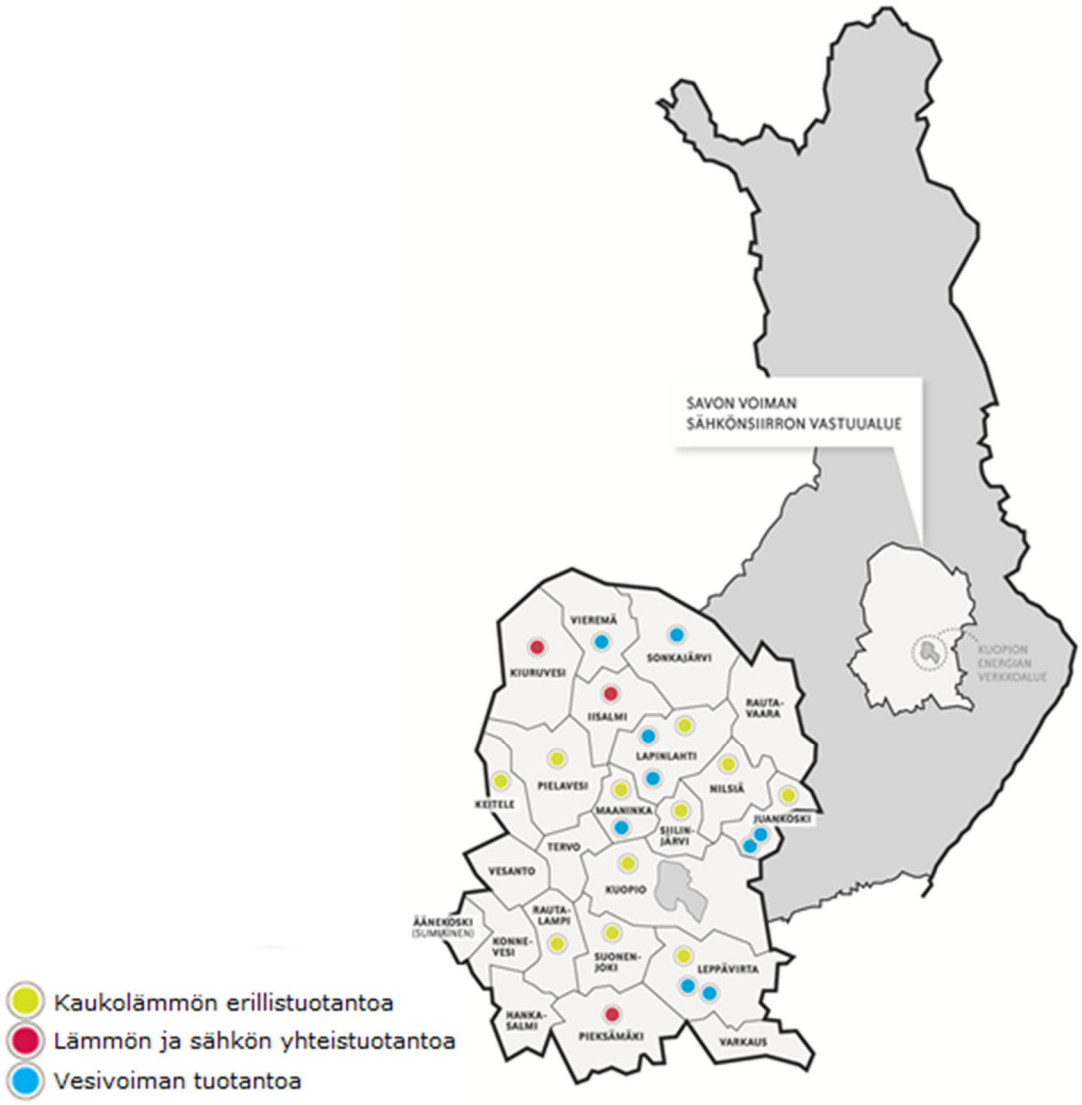
Tämä työn tavoitteena on määrittää paluuvesilämmityksen mahdollisuudet Savon Voima Oyj:n kaukolämpöpaikkakunnilla. Työssä tarkastellaan paremman kaukolämpöveden jäähtymän vaikutuksia kaukolämpöverkkoon sekä lasketaan esimerkkipaikkakunnilla kaukolämmön paluuveden lämpötilan alentumisen tuomat rahalliset hyödyt. Näiden avulla määritetään paluuvesilämmön käytöstä asiakkaalle myönnettävissä oleva jäähtymähyvitys. Työssä kehitetään myös Pöyryn tutkimuksen pohjalta paluuvesilämmityksen mahdollistavien lämmönjakokeskusten kytkentöjä ja tarkastellaan niiden investointikustannuksia verrattuna normaaliin kaukolämpökytkentään. Investointikustannusten ja jäähtymähyvitysten perusteella tarkastellaan

paluuvesilämmityksen taloudellisuutta esimerkkipaikkakunnilla ja määritetään paluuvesilämmityksen taloudelliselle kannattavuudelle karkeat reunaehdot. Lisäksi työssä pohditaan kaukolämpöveden jäähtymän huomioivaa kaukolämpötariffia nykyisille asiakkaille.

Työn lopputuloksena syntyy käsitys paluuvesilämmityksen kannattavuudesta Savon Voiman kaukolämpöpaikkakunnilla sekä paluuvesilämmityksen käytännön toteutuksesta. Työn lopputulosten perusteella Savon Voima voi ryhtyä tarjoamaan kaukolämpöasiakkaille uutta tuotetta eli paluuvesilämpöä.

2 SAVON VOIMA Oyj

Savon Voima Oyj on sähkö- ja lämpöpalveluja tuottava ja markkinoiva suomalainen energiayhtiö. Vuonna 2010 Savon Voima Oyj:n liikevaihto oli 239,2 milj. € ja se kuuluukin Suomessa kymmenen suurimman energiayhtiön ja viiden suurimman sähkönmyyjän joukkoon. Sen toimialue sijaitsee Pohjois- ja Keski-Savossa, jossa yhtiön sähkö- ja kaukolämpöverkot tuottavat energiapalveluja yli 111 000 sähkönkäyttöpaikkaan ja 2700 kaukolämpöliittymään. Savon Voima myy kaukolämpöä 14 savolaiskunnan alueella. (Savon Voima Oyj 2011.) Savon Voiman sähkön siirron vastuualue ja kaukolämpöpaikkakunnat on esitetty kuvassa 1.



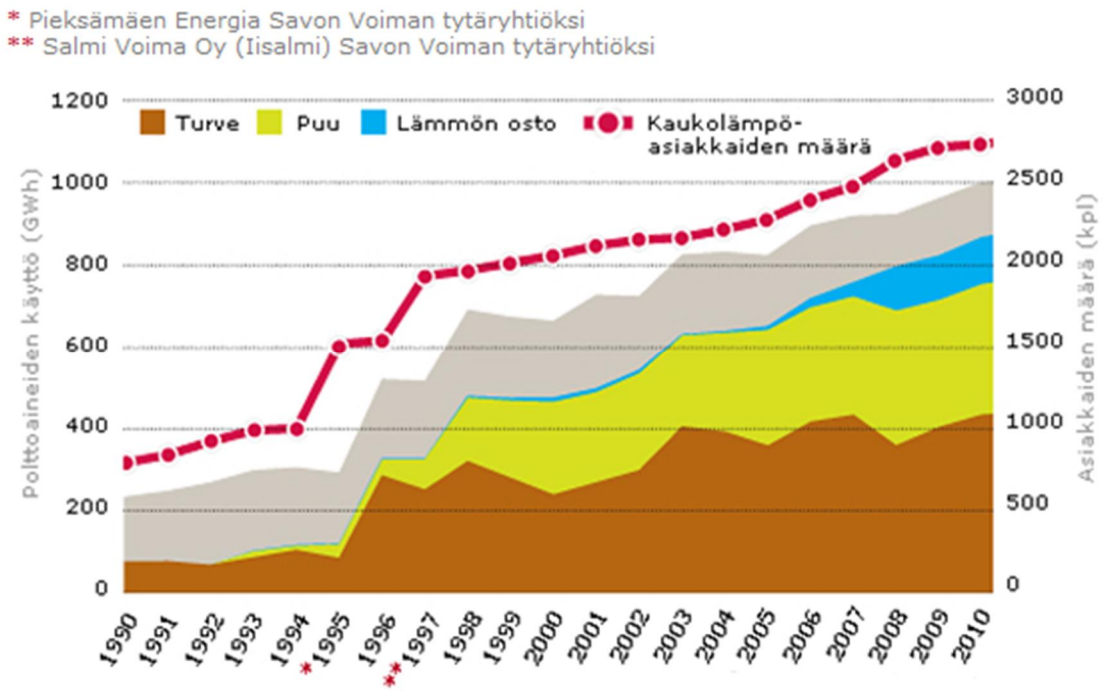
Kuva 1. Savon Voiman sähkön siirron vastuualue ja kaukolämpöpaikkakunnat (Savon Voima Oyj 2011).

Savon Voima Oyj:n omistaa Savon Energiaholding Oy, jonka osakkeet taas omistaa 23 Savon Voiman verkkotoiminnan alueella sijaitsevaa kuntaa. Savon Voima muodostaa konsernin, johon emoyhtiön ohella kuuluu sähköverkkopalveluja tarjoava Savon Voima Verkko Oy:n lisäksi sähkön myynti ja salkunhallinta sekä energiantuotanto ja kaukolämpö. Savon Voima Oyj työllisti vuonna 2010 203 henkilöä. (Savon Voima Oyj 2011.) Savon Voima Oyj:n konsernirakenne ja tärkeimmät osakkuudet on esitetty kuvassa 2.

Kuva 2. Savon Voima Oyj:n konsernirakenne ja tärkeimmät osakkuudet (Savon Voima Oyj 2011).

Savon Voima omistaa voimalaitoksia ja tuotanto-osuuksia vesi- ja tuulivoimasta bio-, maakaasu-, hiili- ja ydinvoimaan. Savon Voiman yhdeksän vesivoimalaitosta sijaitsevat Pohjois-Savossa ja yhtiön omistamat CHP-laitokset sijaitsevat Iisalmessa ja Pieksämäellä. Savon Voiman osakkuusyhtiö Kymppivoima Oy on osakkaana Pohjolan Voima Oy:ssä ja Etelä-Pohjanmaan Voima Oy:ssä, ja sen myötä Savon Voimalla on tuotanto-osuuksia mm. Olkiluodossa, Kotkassa, Porissa, Seinäjoella ja Tampereella. Savon Voima on lisäksi 20 %:n osuudella mukana PVO Innopower Oy:n Kemin Ajoksen tuulipuistossa. (Savon Voima Oyj 2011.)

Savon Voimassa on toteutettu vuodesta 2001 lähtien bioenergiaohjelmaa, jonka tavoitteena oli nostaa kaukolämmöntuotannossa ja siihen liittyvässä sähköntuotannossa käytettyjen kotimaisten polttoaineiden osuus 90 %:iin. Vuonna 2010 kotimaisten polttoaineiden käyttöaste oli 87 %. (Savon Voima Oyj 2011.) Kuvassa 3 on esitetty lämmön ja sähköntuotannossa käytettyjen polttoaineiden osuuksien sekä kaukolämpöasiakasmäärien kehitys.



Kuva 3. Polttoaineiden käytön sekä kaukolämmön asiakasmäärien kehitys (Savon Voima Oyj 2011).

3 TARKASTELTAVAT PAIKKAKUNNAT

Tässä luvussa esitellään kaukolämpöveden jäähtymän parantamisen vaikutusten tarkastelun kohteena olevat paikkakunnat Iisalmi, Pielavesi sekä Suonenjoki. Lisäksi esitetään perusteluita paikkakuntien valinnalle Savon Voiman kaukolämpöpaikkakuntien joukosta.

3.1 Iisalmi

Iisalmi on kaupunki Pohjois-Savossa, noin 100 kilometriä Kuopiosta pohjoiseen. Asukkaita Iisalmessa oli vuoden 2011 alussa 20 095. Kaukolämmitys alkoi Iisalmessa vuonna 1976. Vuonna 2010 kaukolämpöasiakkaita Iisalmessa oli noin 565 kappaletta ja myydyn kaukolämpöenergian määrä oli 178 467 MWh. Kaukolämpö tuotetaan Iisalmessa biopolttoaineilla ja raskaalla sekä kevyellä polttoöljyllä. Kaukolämpöverkoston pituus vuoden 2011 alussa oli 76,7 kilometriä. Iisalmen kaukolämpöverkko on esitetty liitteessä 1.

Iisalmessa sijaitsee Savon Voiman kolmas sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitos. Voimalaitoksen kattilana on vuonna 2002 valmistunut Foster Wheelerin tuorehöyryteholtaan 45 MW_{th}:n kuplapetikattila. Laitoksen kaukolämpöteho on 30 MW ja sähköteho 15 MW. Kattilan pääpolttoaineena on turve, mutta myös muiden puuperäisten polttoaineiden osuus voi olla 30 % käytetystä polttoaineesta. Voimalaitoksen yhteydessä sijaitsee myös toinen kuplapetikattila jolla tuotetaan pelkästään kaukolämpöä. Kattila on lämpöteholtaan 15 MW:n kuumavesikattila. Polttoaineenaan kattila käyttää turvetta ja puuperäisiä polttoaineita. Voimalaitoksen tontilla sijaitsee myös kaksi lämpöteholtaan 12 MW:n raskasta polttoöljyä käyttävää kuumavesikattilaa. Näiden lisäksi eri puolilla Iisalmea on 12 öljykäyttöistä huippu-/varavoimakattilaa kaukolämmön tuotantoon yhteisteholtaan 55 MW. Kaiken kaikkiaan Iisalmessa on siis varattu kaukolämmön tuotantoon tehoa 123 MW.

Iisalmi on valittu tutkittavien paikkakuntien joukkoon siellä sijaitsevan CHP-laitoksen takia. Kaukolämpöveden jäähtymän parantaminen lisäisi laitoksen höyryturbiinilta saatavaa sähkötehoa ja nostaisi laitoksen rakennusastetta. Jäähtymän parantamisella Iisalmen verkossa saataisiin myös muita yleisiä hyötyjä, joita on esitelty luvussa 5.

3.2 Pielavesi

Pielavesi on reilun 5000 asukkaan kunta, joka sijaitsee Kuopiosta noin 80 kilometriä pohjoiseen. Kaukolämmitys Pielavedellä on alkanut vuonna 1976. Tällä hetkellä Pielavedellä on kaukolämpöasiakkaita noin 150 kappaletta ja vuonna 2010 myydyn kaukolämpöenergian määrä oli 21 900 MWh. Kaukolämpö tuotetaan Pielavedellä biopolttoaineilla sekä öljyllä. Kaukolämpöverkon pituus vuoden 2011 alussa oli yhteensä 16 kilometriä. Kartta Pielaveden kaukolämpöverkostosta on esitetty liitteessä 2.

Pielavedellä sijaitsee lämpöteholtaan 3 MW:n biolämpökeskus arinakattilalla, jolla tuotetaan suurin osa Pielaveden kaukolämmöstä. Tämän lisäksi Pielavedellä sijaitsee kolme öljykäyttöistä huippu- /varalämpökeskusta lämpötehoiltaan 6 MW, 5 MW ja 2 MW. Kaiken kaikkiaan Pielavedellä on kaukolämmön tuotantotehoa 16 MW.

Pielaveden biolämpökeskuksella on savukaasujen puhdistukseen rakennettu multisyklonin lisäksi lämmöntalteenottopesuri. Pielavesi on valittu tarkasteltavien paikkakuntien joukkoon, koska kaukolämpöveden jäähtymää parantamalla saataisiin savukaasupesurin lämmön talteenottoa tehostettua.

3.3 Suonenjoki

Suonenjoki on noin 7600 asukkaan kaupunki Pohjois-Savossa, noin 50 kilometriä Kuopiosta etelään. Suonenjoen kaukolämpöverkkoa on ryhdytty rakentamaan vuonna 1975. Kaukolämpöasiakkaita Suonenjoella on tällä hetkellä noin 150 kappaletta ja vuonna 2010 myydyn kaukolämpöenergian määrä oli 38 500 MWh. Suonenjoella kaukolämpöä tuotetaan biopolttoaineiden ja öljyn lisäksi myös nestekaasulla. Suonenjoen kaukolämpöverkon pituus vuoden 2011 alussa oli 19,2 kilometriä. Kartta Suonenjoen kaukolämpöverkosta on esitetty liitteessä 3.

Suonenjoella on kaukolämmöntuotannossa 7 MW:n kiertopetikattila, joka käyttää polttoaineenaan turvetta. Tämän kattilan yhteydessä on myös 8 MW:n öljykattila. Vanhaksi jäänyt biokattila ollaan korvaamassa vuoden 2012 alussa valmistuvalla MW-Powerin kekoarinakattilalla, jonka lämpöteho on 8 MW. Kattilassa pystytään polttamaan turvetta ja puuperäisiä polttoaineita halutulla sekoitussuhteella. Lisäksi polttoaineesta 10 % voi olla kasviperäisiä polttoaineita. Uuden biolämpökeskuksen yhteyteen tulee myös 8 MW:n raskasta polttoöljyä polttava kattila. Vanha biolämpökeskus jää kuitenkin varatehoksi Suonenjoelle. Näiden lisäksi Suonenjoella on kaukolämmöntuotannossa lämpöteholtaan 3 MW:n nestekaasukattila, kaksi öljykattilaa lämpötehoiltaan 1,3 MW sekä yksi 6 MW:n öljykattila. Kaiken kaikkiaan Suonenjoella on kaukolämmön tuotantotehoa uuden lämpölaitoksen käyttöönoton jälkeen 42 MW.

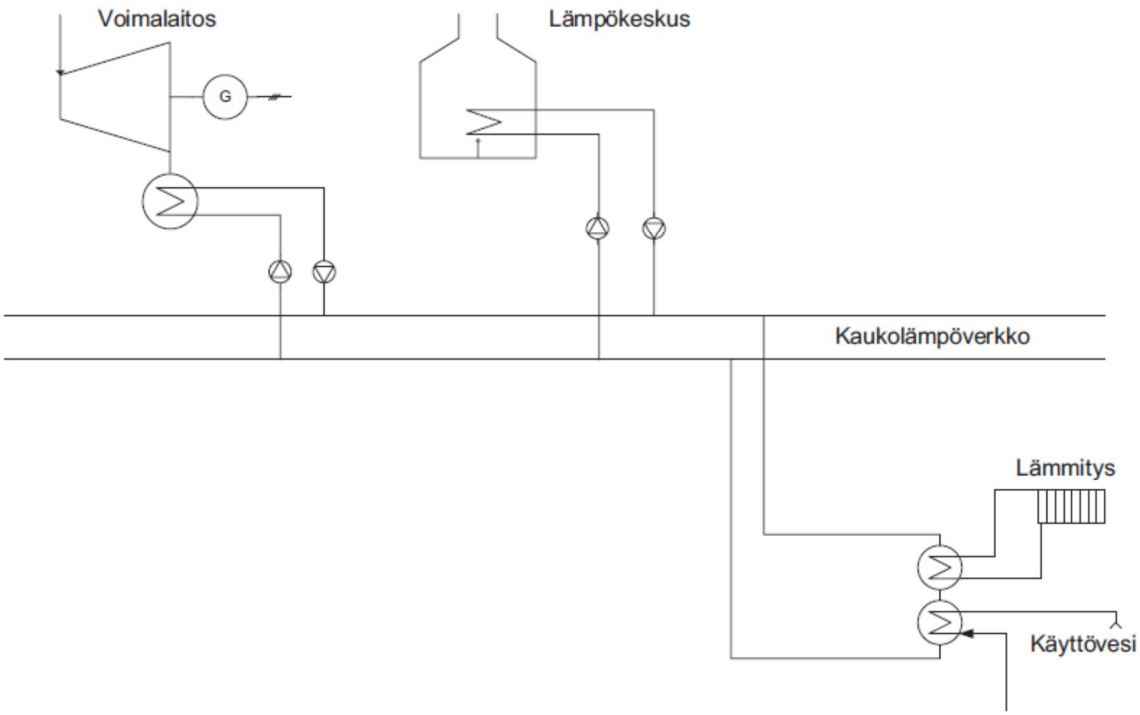
Suonenjoen uuden lämpölaitoksen yhteyteen tullaan rakentamaan savukaasupesuri lämmöntalteenotolla. Näin myös Suonenjoella olisi mahdollista tehostaa lämmöntalteenottoa uudella biolämpökeskuksella alentamalla kaukolämmön paluuveden lämpötilaa. Tästä syystä Suonenjoki on valittu tarkasteltavien paikkakuntien joukkoon.

4 KAUKOLÄMPÖJÄRJESTELMÄN TOIMINTAPERIAATE

Kaukolämmitys on rakennusten ja käyttöveden lämmittämiseen tarvittavan lämmön keskitettyä tuotantoa ja jakelua kaukolämpöverkoston avulla asiakkaina oleville kiinteistöille. Kaukolämmityksestä saatavia hyötyjä ovat sen energiatehokkuus ja ympäristöystävällisyys, käyttövarmuus sekä helppokäyttöisyys asiakkaan kannalta. Lisäksi kaukolämmön tuotanto voidaan jakaa tehokkaasti eri tuotantomuotojen kesken, sekä sen varakapasiteetti on yhteisessä käytössä.

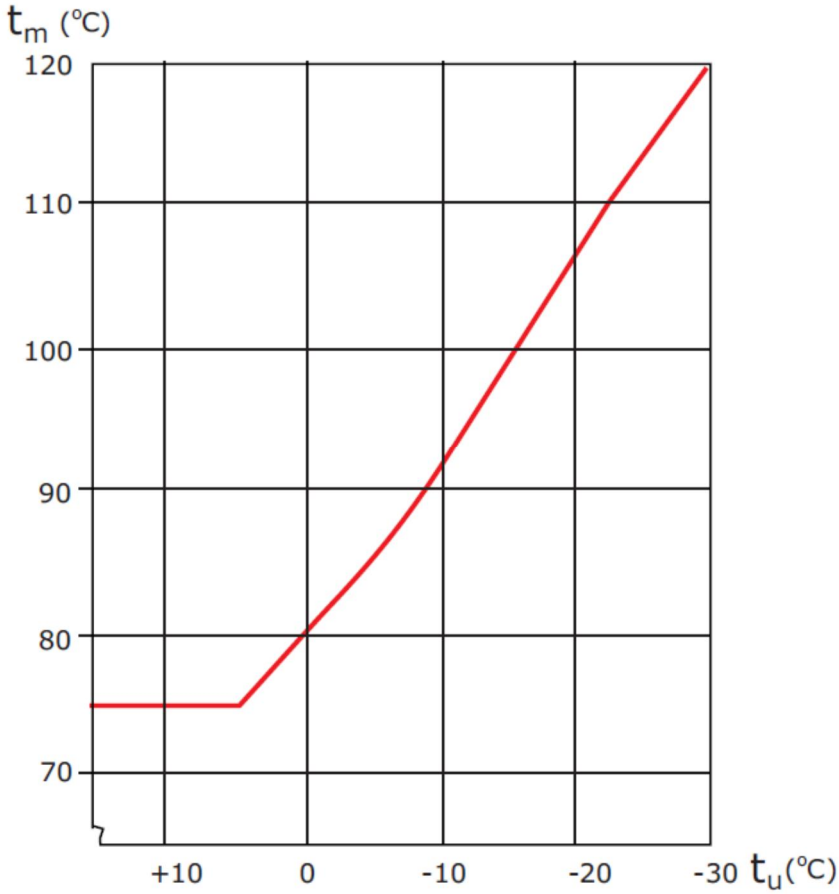
Suomessa käytössä olevassa vesikaukolämmityksessä lämpö siirtyy putkissa kiertävän veden mukana. Kaukolämpöverkko on suljettu piiri, jossa sama vesi palaa asiakkaalta lämmitettäväksi uudelleen energiantuotantolaitoksella. Energiantuotantolaitokselta kuuma vesi pumpataan jälleen asiakkaan käytettäväksi kaukolämpöverkkoa pitkin. Yleisesti lämmön siirtoon käytetään yhtä meno- ja yhtä paluuputkea, jotka ovat samankokoisia ja muodostavat yhdessä kaukolämpöjohdon.

Vesikaukolämpöjärjestelmä muodostuu kolmesta osa-alueesta eli lämmöntuotannosta, kaukolämmön siirtoverkosta sekä asiakkaan lämmön vastaanottoon tarkoitetuista asiakaslaitteista. Järjestelmän tehokkaan toiminnan kannalta on tärkeää, että jokainen kolmesta osa-alueesta toimii suunnitellusti. Kaukolämpövettä kierrätetään kaukolämpöverkossa kaukolämpöpumppujen avulla. Kaukolämpövettä lämmitetään energiantuotantolaitoksen kaukolämmönsiirtimissä tai suoraan lämmityslaitosten kattiloissa. Kaukolämpövesi jäähtyy kierron aikana asiakaslaitteissa luovuttaen lämpönsä tyypillisesti rakennusten ja käyttöveden lämmitykseen. Kaukolämpöä voidaan myös käyttää eri teollisuuskohteissa joissa kaukolämmön lämpötilatasot riittävät. Kaksiputkisen vesikaukolämpöjärjestelmän periaatekuva on esitetty kuvassa 4. Kuvassa on esitetty kaukolämpöpumput ennen ja jälkeen lämmityslaitoksen, mutta yleisesti pumppaus suoritetaan vain ennen laitosta.



Kuva 4. Vesikaukolämpöjärjestelmän periaatekuva (Energiateollisuus 2006, 43).

Vesikaukolämpöjärjestelmän kiertovedestä on puhdistettu mekaaniset epäpuhtaudet, etteivät ne pääsisi kerrostumaan putkiston sisälle. Mekaanisten epäpuhtauksien lisäksi yleensä happi ja muut kaasut poistetaan kaukolämpövedestä korroosion estämiseksi. Tuotantolaitokselta lähtevää menoveden lämpötilaa säädetään ulkolämpötilan mukaan vastaamaan asiakkaan tarpeita. Menolämpötila pyritään pitämään mahdollisimman alhaisena lämpöhäviöiden pienentämiseksi. Menolämpötila vaihtelee ulkolämpötilan mukaan välillä 115 - 70 °C. Menolämpötila on korkeimmillaan talven kovilla pakkasilla. Yksi esimerkki menolämpötilasta ulkolämpötilan funktiona on esitetty kuvassa 5, mutta menolämpötilan säätökäyrä on yleensä paikkakuntakohtainen ja voi poiketa kuvassa esitetystä. (Energiateollisuus 2006, 44.)



Kuva 5. Esimerkki menolämpötilan säätökäyrästä ulkolämpötilan mukaan (Energiateollisuus 2006, 336).

Kaukolämpöverkossa ylläpidetään riittävän korkeaa keskipainetta, jotta kaukolämpövesi ei pääse höyrystymään missään verkon osissa. Kaukolämpöverkon menoputken painetta korotetaan tuotantolaitoksen kaukolämpöpumpuilla, sekä tarvittaessa välipumppaamoilla niin, että pumppauksilla katetaan verkossa ja asiakaslaitteissa tapahtuvat painehäviöt. Pumppauksella taataan myös verkon kauimmaisessa osassa olevalle asiakkaalle riittävä paine-ero meno- ja paluulinjan välillä asiakaslaitteiden säätöä varten. (Energiateollisuus 2006, 44.) Minimi paine-ero asiakkaalla tulee olla 0,6 bar. Kaukolämpöverkon suunnittelu- ja maksimipaine on 16 bar.

Asiakaslaitteissa lämpö luovutetaan asiakkaan käyttöön erillisissä lämmönsiirtimissä. Lämpö luovutetaan asiakkaan omiin nestekiertopiireihin, joita ovat asuinrakennuksissa lämmitys-, ilmanvaihto- ja käyttövesipiirit. Nykyään asennettavissa lämmönjakokeskuksissa on jokaiselle piirille oma lämmönsiirrin, mutta vanhoissa lämmönjakokeskuksissa voi lämmitys- ja ilmanvaihtopiirin lämmitys tapahtua samassa

lämmönsiirtimessä. Lämmönjakokeskuksen automatiikka säätää kaukolämpöveden virtauksen säätöventtiilin avulla lämmönsiirrinten läpi, jotta tarvittava lämpötila jokaiselle piirille saavutetaan. Kaukolämpövesi jäähtyy asiakaslaitteissa noin 40 – 55 °C, ja palaa paluuputkea pitkin takaisin lämmöntuotantolaitokselle keskimäärin noin 50 °C:n lämpötilassa.

5 KAUKOLÄMPÖVEDEN JÄÄHTYMÄN PARANEMISEN VAIKUTUKSET

Kaukolämpöveden paremmalla jäähdytyksellä on monia kustannusvaikutuksia sekä energiantuotannossa että kaukolämpöverkossa. Nämä vaikutukset ovat laitos- ja verkkokohtaisia, joten ne on tutkittava paikkakuntakohtaisesti erikseen, jotta tarkat vaikutukset saadaan selvitettyä. Luvussa 5.1 on esitetty yleisesti kaukolämpöveden paremman jäähtymän vaikutukset energiantuotannossa sekä luvussa 5.2 jäähtymän vaikutukset yleisellä tasolla kaukolämmön siirtoverkossa. Luvussa 7 on taas vaikutuksia tarkasteltu tarkemmin Iisalmessa, Pielavedellä ja Suonenjoella.

5.1 Vaikutukset energiantuotannossa

5.1.1 Lämmön talteenotto ja polttoaineen säästö

Käytettäessä energiantuotantolaitoksella lämmöntalteenottosavukaasupesuria, saadaan kaukolämmön paluuveden lisäjäähtymästä osa ilmaiseksi pesurista. Mitä alempi kaukolämmön paluuveden lämpötila on, sitä alemmaksi saadaan myös savukaasujen lämpötilaa laskettua pesurin jälkeen, jolloin suurempi osa savukaasujen kosteudesta lauhtuu ja näin suurempi osa savukaasujen sisältämästä energiamäärästä vapautuu hyödynnettäväksi kaukolämpönä. Käytetyn polttoaineen kosteus määrää savukaasuista talteen otettavissa olevan energiamäärän. Kuivempien polttoaineiden savukaasuissa on vähemmän kosteutta, joten niistä talteen otettavissa oleva lämmön määrä on pienempi. Savukaasujen täytyy jäähtyä alle kylläisen lämpötilan, jotta kosteutta alkaa lauhtua. Mikäli savukaasujen kosteutta ei saada lauhdutettua, jää jäähtymän parantumisen seurauksena

savukaasuista hyödyksi saatava energiamäärä hyvin pieneksi. Esimerkiksi polttoaineen kosteuden ollessa 50 %, on savukaasujen kylläinen lämpötila noin 64 °C. (Pöyry 2010, 6.)

Myös kondenssikattiloiden hyötysuhde paranee savukaasujen lämmöntalteenoton paranemisen seurauksena, mikäli kaukolämmön paluuveden lämpötilaa alennetaan. Lämmöntalteenoton paranema kondenssikattiloissa perustuu samaan asiaan, kuin käytettäessä savukaasupesuria, eli veden höyrystymislämpöä saadaan tehokkaammin talteen. (Heinikainen 2001, 29.)

Jäähdytyksen paranemisen seurauksena polttoaineen säästöä syntyy verkoston lämpöhäviöiden pienenemisen vuoksi. Lämpöhäviöiden pienenemistä tarkastellaan tarkemmin luvussa 5.2.1. Polttoaineen säästöä syntyy myös lämmöntalteenoton paranemisen seurauksena kaukolämpötehon pysyessä samana. Tässä työssä ei kuitenkaan jatkossa puhuta polttoaineen säästöstä lämmöntalteenoton paranemisen yhteydessä.

5.1.2 Sähkön ja lämmön yhteistuotanto

Tuotettaessa lämpöä CHP-voimalaitoksessa, saadaan kaukolämmön paluulämpötilan alentamisella lisättyä voimalaitoksen rakennusastetta eli laitoksesta saatavan sähkön määrää suhteessa kaukolämmön määrään. Jotta kaukolämpöteho pysyy vakiona, on polttoainetehoa on kasvatettava. Rakennusasteen kasvaminen vaatii kuitenkin sen, että kaukolämpö tuotetaan vähintään kahdella lämmönsiirtimellä, joista esimerkiksi toinen on kytketty turbiinin väliottoon ja toinen turbiinin vastapaineeseen. Hyöty sähköntuotannossa muodostuu turbiinin läpäisevän massavirran kasvamisesta sekä siitä, että vastapainehöyry saadaan paisumaan pidemmälle vastapaineisesta höyrystä siirrettävän energiamäärän pysyessä samana. Paluuveden lämpötilan alentamisella saatava sähkötehon lisäys on noin 0, 1 % paluuveden jäähdytettyä astetta kohti. (Pöyry 2010, 8.)

Mikäli kaukolämpöteho otetaan vain vastapainehöyryn avulla, sähköteho riippuu kaukolämpöverkon menolämpötilasta, koska höyryn paisunta lopetetaan turbiinissa menolämpötilan vaatimaan pisteeseen. Tämän takia puhtaassa vastapainekäytössä

paluuveden lämpötilan alentamisella ei ole vaikutusta saatavaan sähkötehoon kaukolämpötehon pysyessä samana.

Voimalaitoksen käydessä täydellä teholla, pienentää sähkötehon lisäys saatavaa lämpötehoa, mikä taas lisää huippukattiloiden käyttöä. Huippukattiloissa käytettävän polttoaineen hinta voi olla yli sähkön arvon, joten saatavan hyödyn kokonaisvaikutus voi olla negatiivinen, mikäli voimalaitoksella menetetty lämpöteho tuotetaan huippukattiloilla. (Pöyry 2010, 8.)

Mikäli paluulämpötila laskee alle suunnittelulämpötilojen laitoksissa joissa kaukolämpövesi lämmitetään vähintään kahdessa vaiheessa, tulee turbiinin ja lämmönsiirtimen mitoitus tarkistaa. Höyryn paisunta turbiinissa alle turbiinin mitoituspaineen saattaa johtaa kosteuspisaroiden tiivistymiseen turbiinin viimeisissä vaiheissa ja näin aiheuttaa vaurioita turbiinin siivistöön. Höyryn pidemmän paisunnan aiheuttamat ongelmat ovat kuitenkin epätodennäköisiä CHP-tuotannossa.

5.1.3 Lämmön varastointi

Kaukolämpöverkoissa käytettyjen lämpöakkujen varastointikyky on suoraan riippuvainen kaukolämmön meno- ja paluulämpötilojen erosta. Paluuveden lämpötilan alentaminen vähentää näin lämpöakun investoinnin suhdetta varastoitavan lämmön määrään. Paineettomassa akussa paluulämpötilan alentaminen viidellä asteella lisää lämpöakun varastointikapasiteettia noin 10 %. (Pöyry 2010, 9.)

5.1.4 Matalalämpöiset lämmönlähteet

Kaukolämpöverkon paluulämpötilan alentaminen lisää teollisuuden hukkalämpöjen hyödyntämismahdollisuuksia kaukolämmityksessä, sillä hukkalämpö on yleensä matalalämpötilaista. Mitä alhaisempi kaukolämpöveden paluulämpötila on, sitä enemmän matalalämpötilaista energiaa on mahdollista ottaa kaukolämpöverkkoon. (Heinikainen 2001, 30.)

Myös moottorivoimalaitoksella paluuveden lämpötilan alentaminen lisää mahdollisuuksia matalalämpöisten lämmönlähteiden, kuten esimerkiksi voiteluöljyn jäähdytyksen lämmön hyödyntämiselle. Paluuveden lämpötilan lasku 60 °C:sta 40 °C:een lisää moottorivoimalaitoksen lämmöntuotantoa noin 12 %. (Pöyry 2010, 9.)

5.2 Vaikutukset kaukolämmön siirtoverkossa

5.2.1 Verkoston lämpöhäviöt

Kaukolämpöverkon paluulämpötilan alentaminen vähentää verkoston lämpöhäviöitä. Lämpöhäviöön vaikuttaa lämpövastus kaukolämpöveden ja ympäröivän maan välillä sekä näiden välinen lämpötilaero. Lämpövastus muuttuu vain vähän lämpötilatason pienen muutoksen seurauksena ja näin lämpöhäviöt ovat lähes suoraan verrannolliset kaukolämpöveden ja kaukolämpöputkea ympäröivän maan väliseen lämpötilaeroon. Alentamalla paluuveden lämpötilaa yhdellä celsiusasteella, pienenevät lämpöhäviöt noin 0,75 %.

Asiakkaan jäähtymän parantumisen vaikutus lämpöhäviöihin riippuu kuitenkin merkittävästi asiakkaan sijainnista kaukolämpöverkossa. Lämmöntuotantolaitoksen läheisyydessä sijaitsevan asiakkaan jäähtymän parantumisen vaikutus lämpöhäviöihin on huomattavasti pienempi, kuin verkoston latvaosalla sijaitsevan asiakkaan jäähtymän paranemisen vaikutus.

Nykyään lähes kaikkien asennettavien kaukolämpöputkien eristeenä olevan polyuretaanin lämmönjohtavuus riippuu kaukolämpöveden lämpötilasta. Mitä alhaisempi käyttölämpötila on, sitä pienempi on polyuretaanin lämmönjohtavuus ja tätä kautta sen eristyskyky paranee toimintalämpötilan laskiessa. Lämpötilavälillä 20 – 120 °C, uuden polyuretaanieristeen lämmönjohtavuus pienenee noin 5 % jos lämpötila alenee 10 °C. (Heinikainen 2001, 32.)

5.2.2 Pumppauskustannukset

Kaukolämpöveden jäähtymällä on myös vaikutusta kaukolämpöveden pumppauskustannuksiin. Kaukolämpöverkon kiertovesipumppujen tehontarpeeseen vaikuttaa kaukolämpöveden virtaus, tarvittava paine-ero sekä pumpun hyötysuhde. Parantamalla kaukolämpöveden jäähtymää saadaan virtausta pienennettyä, sillä pienemmästä vesimäärästä saadaan sama kaukolämpöteho lämpötilaeron kasvaessa. Pienentynyt vesivirta pienentää myös painehäviöitä kaukolämpöverkossa. Affiniteettisääntöjen perusteella pumpun tehontarpeen muutos on suoraan verrannollinen tilavuusvirran kuutioon. Parantamalla kaukolämpöveden jäähtymää yhdellä asteella, säästetään pumppauskustannuksissa noin 6 % (Pöyry 2010, 9).

5.2.3 Kaukolämpöverkon siirtokapasiteetti

Kaukolämmön paluuveden lämpötilan alentaminen pienentää vesivirtaa ja mahdollistaa näin saman kaukolämpötehontehon siirtämisen pienemmissä putkissa. Putkikokoja on kuitenkin vain standardivälein, joten yksittäisen pienen asiakkaan parempi jäähtymä ei kuitenkaan vielä mahdollista pienempien kaukolämpöputkien käyttöä. Myös olemassa olevan verkon siirtokapasiteettia voidaan lisätä parantamalla jäähtymää. Siirtokapasiteetin kasvulla voidaan lykätä laajennusinvestointeja niissä verkon osissa, joissa kaukolämmön siirtokapasiteetti on jäämässä pieneksi.

Mikäli paluuvettä käytettäisiin rakennusten lämmityksessä, kasvaisivat liittymisjohtojen koot pienemmän lämpötilaeron vaikutuksesta. Runko- ja siirtojohtoihin paluuveden käytöllä rakennusten lämmityksessä on kuitenkin pienentävä vaikutus.

5.2.4 Kaukolämpöverkon lämpöjännitykset

Nykyään asennettavat kiinnivaahdotetut kaukolämpöputket kiinnitetään paikoilleen maan kitkalla esilämmityslämpötilassa siten, ettei kaukolämpöputki pääse liikkumaan kaukolämpöveden lämpötilan aiheuttamien lämpölaajenemisten mukaan. Vanhoissa putkirakenteissa putket on kiinnitetty kiintopisteillä ja kiintopisteiden väliin on asennettu

jokin rakenne, joka ottaa vastaan putken lämpölaajenemisen aiheuttamat jännitykset. Mikäli kaukolämpöveden paluulämpötila laskee radikaalisti, se lisää lämpöjännityksiä paluuputkessa, koska lämpötilaero esilämmityslämpötilaan kasvaa. Normaali kaukolämpöverkko kestää lisääntyneet jännitykset lämpötilaeron kasvaessa esijännityslämpötilaan. Normaalit kaukolämpöputket kestävät jännitykset, jotka aiheutuvat 60 °C:n lämpötilaerolla esilämmityslämpötilaan. (Pöyry 2010, 51.)

6 LASKENNAN PERUSTEET

Tässä luvussa esitellään energia- ja kustannussäästöjen laskentaperusteet eri osa-alueille. Luvussa käsitellään vain ne osa-alueet luvusta 5 jotka vaikuttavat tuotantokustannuksiin tarkasteltavilla paikkakunnilla. Työn laskennassa on käytetty paikkakuntien kaukolämpöverkkojen keskimääräisiä toiminta-arvoja.

6.1 Jäähtymätermi

Jäähtymätermillä tarkoitetaan paluuvettä jäähdyttävää energiamäärää kohti saatavaa rahallista hyötyä. Säästöjen laskennassa lasketaan saatavat säästöt jäähdytettyä astetta kohti, mutta jäähtymätermin avulla säästö voidaan ilmaista jäähdytettyä energiamäärää kohti. Jäähtymätermin avulla voidaan vertailla paremmin eri verkoissa saatavia säästöjä jäähtymän parantamisella sillä säästöt astetta kohti riippuvat kaukolämpöverkon koosta. Yhden asteen jäähtymään keskimäärin vuodessa tarvittava energiamäärä saadaan laskettua yhtälön 1 avulla.

$$E_{\circ C} = \dot{m}_{klv} \cdot c_p \cdot t \tag{1}$$

missä, $E_{\circ C}$ = yhden asteen jäähtymään tarvittava lämpöenergia [MWh]

$\dot{m}_{klv}$ = kaukolämpöveden keskimääräinen massavirta vuodessa [$\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{h}}$]

c_p = veden ominaislämpökapasiteetti [$\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kgK}}$]

t = aika [h].

Tiedettäessä yhden asteen jäähtymään tarvittava lämpöenergia voidaan jäähtymäterni laskea yhtälön 2 avulla.

$$J = \frac{S_{\circ C}}{E_{\circ C}} \tag{2}$$

missä, J = jäähtymätermi $[\frac{€}{\mathrm{MWh}}]$

$S_{\circ C}$ = yhden asteen jäähtymästä saatava säästö jäähdyttävältä ajalta $[\frac{€}{\circ \mathrm{C}}]$.

6.2 Pumppaustehon pienenemisen määritys

Parantamalla kaukolämpöveden jäähdytystä säästetään kaukolämpöveden pumppauskustannuksissa. Kaukolämpöveden meno- ja paluuveden lämpötilojen eron kasvaessa saadaan pienemmällä kaukolämpöveden virtauksella siirrettyä yhtä suuri määrä lämpöenergiaa.

Kaukolämpöveden pumppaukseen käytettyjen keskipakopumppujen tehontarve riippuu kaukolämpöveden tilavuusvirrasta, tarvittavasta paine-erosta sekä pumpun hyötysuhteesta yhtälön 3 osoittamalla tavalla. (Energiateollisuus 2006, 171.)

$$P_{klvp} = \frac{\dot{V}_{klv} \cdot \Delta p}{\eta} = \frac{\dot{V}_{klv} \cdot \rho_{klv} \cdot g \cdot H}{\eta} = \frac{\dot{m}_{klv} \cdot g \cdot H}{\eta} \tag{3}$$

missä, P_{klvp} = kaukolämpöpumpun tehontarve [W]

$\dot{V}_{klv}$ = kaukolämpöveden tilavuusvirta $[\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}}]$

Δp = tarvittava paine-ero pumpun yli [Pa]

η = pumppauksen hyötysuhde [%]

ρ_{klv} = kaukolämpöveden tiheys $[\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}]$

g = putoamiskiihtyvyys = 9,81 $[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}]$

H = tarvittava nostokorkeus [m].

Pumppaustekniikan perusteista on johdettu joukko yhtälöitä, jotka kertovat keskipakopumpun pyörimisnopeudenmuutoksen vaikutuksesta veden tilavuusvirtaan, nostokorkeuteen ja tehontarpeeseen. Näitä yhtälöitä kutsutaan affiniteettisäännöiksi. Affiniteettisääntöjen edellytyksenä on se, ettei pumpun hyötysuhde muutu. Pumpun toiminta-arvojen muuttuessa vain vähän, säilyy hyötysuhde lähes vakiona. Affiniteettisäännöt on esitetty yhtälöissä 4, 5 ja 6. Yhtälöissä alaindeksi 1 viittaa alkutilaan ja alaindeksi 2 muutostilaan. Tilavuus- ja massavirran riippuvuus pyörimisnopeudesta on esitetty yhtälössä 4. (Energiateollisuus 2006, 172.)

$$\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} = \frac{n_1}{n_2} \tag{4}$$

missä, n = keskipakopumpun pyörimisnopeus [$\frac{1}{s}$].

Nostokorkeuden ja paine-eron riippuvuus keskipakopumpun pyörimisnopeudesta on esitetty yhtälössä 5. (Energiateollisuus 2006, 172.)

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = \left(\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2}\right)^2 = \left(\frac{\dot{m}_1}{m_2}\right)^2 = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \tag{5}$$

Tehon riippuvuus keskipakopumpun pyörimisnopeudesta on taas esitetty yhtälössä 6. (Energiateollisuus 2006, 172.)

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\Delta p_1 \cdot \dot{V}_1}{\Delta p_2 \cdot \dot{V}_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \tag{6}$$

Saman kaukolämpötehon syöttämiseksi kaukolämpöverkkoon pätee alku- ja muutostilan välille yhtälö 7.

$$P_{kl} = \dot{V}_1 \cdot \rho_1 \cdot c_{p1} \cdot \Delta T_1 = \dot{V}_2 \cdot \rho_2 \cdot c_{p2} \cdot \Delta T_2 \tag{7}$$

missä, P_{kl} = kaukolämpöteho [W]

c_p = kaukolämpövedenveden ominaislämpökapasiteetti [$\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kgK}}$]

ΔT = meno- ja paluulämpötilan ero [°C].

Koska lämpötilat alku- ja muutostilanteen välillä muuttuvat vain vähän, voidaan kaukolämpöveden tiheyden ja ominaislämpökapasiteetin muutos jättää huomioimatta. Nyt saadaan alku- ja muutostilanteen lämpötilaeron ja tilavuusvirran välille yhtälön 8 osoittama yhteys.

$$\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} = \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \tag{8}$$

Kaukolämpöpumpun tehontarpeelle muutostilanteessa saadaan nyt johdettua yhtälö 9.

$$P_2 = P_1 \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)^3 \tag{9}$$

Tiedettäessä kaukolämmön alkuperäinen pumppausteho sekä alku- ja muutostilanteen kaukolämpöveden lämpötilat, voidaan laskea muutostilanteen pumppausteho yhtälön 9 avulla. Tässä työssä kaikilta tarkasteltavilta paikkakunnilta ei ole saatavissa tarkkoja kaukolämmön pumppaustehoja, joten tehot tullaan osin laskemaan arvioimalla tarvittava paine-ero. Kaukolämpöveden virtaukset sen sijaan on saatavissa kaukolämpöasiakkaiden laskutustietojen pohjalta. Näissä kaukolämpöveden määrän tiedoissa ei kuitenkaan näy verkoston vuodot, jotka lisäävät kaukolämpöveden virtausta pumppauksessa ja näin myös tarvittava pumppausteho kasvaa. Kaukolämpöveden keskimääräinen alkutilanteen jäähtymä saadaan osin lämpökeskusten mittauksista. Tarkkoja meno- ja paluulämpötiloja ei kuitenkaan ole koko vuodelta 2010 saatavissa, joten jäähtymä joudutaan myös osin arvioimaan.

Tämän työn kannalta ei ole olennaista saada laskettua tarkkoja pumppaustehoja vaan tärkeämpää on saada pumppaustehojen ero alku ja muutostilanteen välillä. Tätä kautta saadaan paremman jäähdytyksen tuoma säästö pumppauskustannuksissa. Pumppaustehojen eron laskennassa saadaan kuitenkin hyvin tarkkoja arvoja vaikka paine-ero jouduttaisiinkin arvioimaan, koska virhe pumppaustehossa ei aiheuta suurta virhettä pumppaustehojen eron laskennassa.

Pumppaussähkön hintana käytetään kaikilla paikkakunnilla arvoa 57 €/MWh, joka on Suomen alueen keskihinta vuodelta 2010 NordPoolissa eli pohjoismaisessa sähköpörssissä. Samaa arvoa käytetään myös Iisalmen voimalaitoksessa tapahtuvassa pumppauksessa, vaikka pumppaukseen tarvittava sähkö saadaan tuotettua suuremmin osan vuotta voimalaitoksella. Käytetyn sähkön arvo on kuitenkin yhtä suuri kuin myyntihinta, koska se vähentää osaltaan myytävän sähkön määrää.

6.3 Lämpöhäviöiden pienenemisen määritys

Parantamalla kaukolämpöveden jäähtymää, alenevat lämpöhäviöt kaukolämpöveden paluuputkesta paluulämpötilan alenemisen seurauksena. Kaukolämpöverkon lämpöhäviöt ovat lähes suoraan verrannolliset lämpötilatason muutokseen. Tarkasteltavilta paikkakunnilta on saatavissa mittaustietoja lämpöhäviöistä, mutta lämpöhäviöt saadaan laskettua myös melko tarkasti luomalla mallit eri putkityyppien ja kokojen lämpöhäviöille taulukkolaskentaohjelmalla. Paikkakuntien kaukolämpöverkkojen sisältämien eri putkityyppien ja –kokojen pituudet ovat saatavilla. Verkon tietojen, lämpöhäviömallien ja lämpötilatasojen avulla saadaan verkon nykyiset lämpöhäviöt ja lämpöhäviöiden muutokset jäähtymän parantumisen jälkeen määritettyä melko tarkasti. Laskenta suoritetaan mitattujen lämpöhäviöiden avulla, mikäli mittausten antamat arvot ovat suuruusluokaltaan uskottavia. Jos kaukolämmön tuotantolaitosten sekä asiakastietojen avulla lasketut lämpöhäviöt eivät ole uskottavan suuruisia suoritetaan laskenta luodun mallin avulla.

Pienissä kaukolämpöverkoissa keskimääräisen putkikoon ollessa noin DN50 lämpöhäviöt ovat luokkaa 10-20 %, kun taas suuremmissa kaukolämpöverkoissa keskimääräisen putkikoon ollessa DN150 lämpöhäviöt ovat luokkaa 4-10 %. Pienten kaukolämpöverkkojen suhteellisesti suuremmat lämpöhäviöt johtuvat suuremmasta vaippapinta-alasta suhteessa siirtokykykyyn. (Energiateollisuus 2006, 203.)

Tässä työssä lämpöhäviömallit on määritetty betonielementtikanaville sekä yksi- ja kaksiputkielementtikanaville. Ainoastaan liikkuvin teräsputkin varustetun

muovisuojakuorijohdon tapauksessa lämpöhäviöiden määrityksessä käytettiin suoraan valmistajan antamia lämpöhäviöarvoja putkipituutta kohti, sillä mallin kehittäminen tälle johtotyypille olisi ollut erittäin monimutkaista. Tätä johtotyyppiä on Savon Voimalla hyvin vähän käytössä kaukolämpöverkoissa, joten tällä toimenpiteellä ei aiheuteta suurta virhettä laskennan lopputulokseen.

Suurimmat vaikuttajat lämpöhäviöiden suuruuteen ovat johtojen eristyspaksuus, eristeiden lämmönjohtavuus sekä lämpötilatasot. Kaukolämpöjohtojen peittosyvyydellä tai maan lämmönjohtavuudella ei sen sijaan ole suurta merkitystä. Eristeen lämmönjohtavuuden kasvaessa 10 %, kasvaa lämpöhäviöt noin 8,5 %. Peittosyvyyden pieneneminen 10 % aiheuttaa vain noin 0,25 %:n kasvun lämpöhäviöissä.

Laskennassa käytetään kaikille johtotyypeille yhteisenä lähtöarvona maan lämmönjohtavuudelle 1,7 W/mK. Samaa lämmönjohtavuutta käytetään myös betonin lämmönjohtavuutena betonielementtikanavien laskennassa. Betonielementtikanavien lämpöhäviöiden laskennassa käytetään mineraalivillaeristeen lämmönjohtavuutena 0,046 W/mK ja polyuretaanikourueristeelle 0,042 W/mK. Yksi- ja kaksiputkielementtikanavien polyuretaanieristeen lämmönjohtavuutena käytetään arvoa 0,027 W/mK. (Meuronen 2002, 5.1.)

Eri johtotyyppien ja kokojen mittoina on käytetty Lämpölaitosyhdistyksen ja Energiateollisuuden antamia suositusarvoja. Näitä arvoja ovat elementtikanavien mitat, johtojen peittosyvyydet ja eristyspaksuudet sekä johtojen etäisyydet toisiinsa.

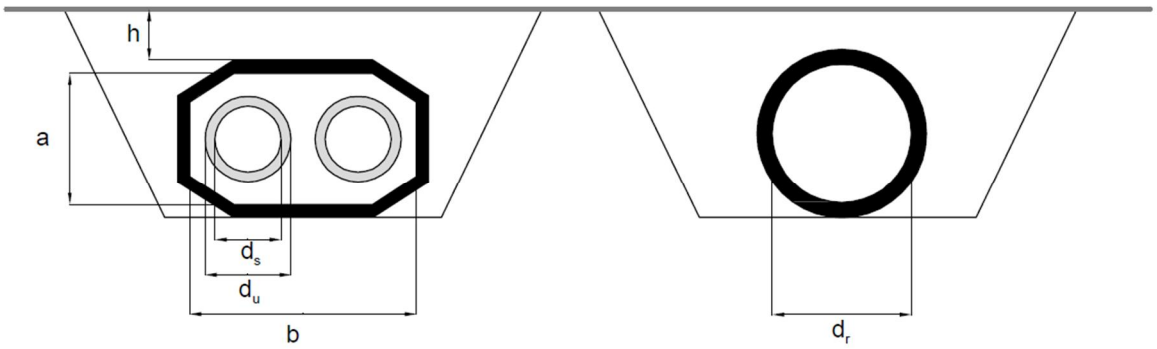
Kaukolämpöveden lämpötiloista on saatavissa vain osittain tilastotietoja. Tämän takia meno- ja paluulämpötilat osin arvioidaan laskennassa. Lämpöhäviöiden määrityksessäkin tavoitteena on saada selville saavutettavat säästöt jäähtymän parantamisen seurauksena, joten lopputulokseen lämpötilatasojen arviointi ei aiheuta suurta virhettä. Lisäksi laskennassa oletetaan maan pinnan lämpötila samaksi kuin ulkoilman lämpötila. Ulkoilman lämpötiloina käytetään todellisia Kuopiossa mitattuja keskiarvoja.

Huippulämpökeskusten käydessä vähentää lämpöhäviöiden pienentyminen niiden tehoa eli säästetty lämpö on huippulämpökeskusten tuottaman lämmön hintaista. Kun taas koko paikkakunnan lämpökuorma tuotetaan biopolttoaineilla, on säästetyn lämmön hinta biopolttoaineella tuotetun lämmön hintaista. Lämpöhäviöiden pienentymisellä saatavien rahallisten säästöjen määrityksessä käytetään huippulämpökeskuksilta saatavia käyntiaikoja ja niiden avulla laskettua keskimääräistä säästetyn lämmön hintaa. Lämpöhäviöt ovat suurimmillaan kovilla pakkasilla, jolloin myös huippulämpökeskukset ovat päällä. Tämän seurauksena todellinen keskimääräinen säästetyn lämmön hinta on hieman laskennassa käytettyä korkeampi.

6.3.1 Betonielementtikanavien laskenta

Betonielementtikanavien (Emv) lämpöhäviölaskenta on suoritettu lähteen Meuronen 2002 perusteella.

Betonielementtikanavan rakenne on esitetty kuvassa 6. Lämpöhäviölaskennan yksinkertaistamiseksi betonielementtikanavan muoto redusoidaan ympyräksi kuvan 6 osoittamalla tavalla.



Kuva 6. Betonielementtikanavan rakenne ja sen redusoiminen ympyrän muotoiseksi.

Elementin redusoitu halkaisija d_r saadaan laskettua yhtälön 10 avulla.

$$d_r = 2 \cdot \sqrt{\frac{a \cdot b}{\pi}} \tag{10}$$

missä, d_r = elementin redusoitu halkaisija [m]

a = elementin korkeus [m]

b = elementin leveys [m].

Meno- ja paluuputken lämpöhäviövirrat yhtyvät kanavan ilmatilassa. Kanavan ilmatilan ja maanpinnan välinen lämpövastus pituusyksikköä kohti voidaan laskea yhtälön 11 avulla.

$$R_u = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{gb}} \cdot \ln\left[\frac{2 \cdot h}{d_r} + \sqrt{\left(\frac{2 \cdot h}{d_r}\right)^2 - 1}\right] \tag{11}$$

missä, R_u = ilmatilan ja maan välinen lämpövastus [$\frac{\mathrm{mK}}{\mathrm{W}}$]

h = kanavan peittosyvyys [m]

λ_{gb} = maan ja betonin yhteinen lämmönjohtavuus [$\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{mK}}$].

Meno- ja paluuputken lämpövastus pituusyksikköä kohti saadaan laskettua yhtälön 12 avulla.

$$R_{m/p} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_e} \cdot \ln \frac{d_u}{d_s} \tag{12}$$

missä, $R_{m/p}$ = meno/paluuputken lämpövastus [$\frac{\mathrm{mK}}{\mathrm{W}}$]

λ_e = eristeen lämmönjohtavuus [$\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{mK}}$]

d_u = eristeen ulkohalkaisija [m]

d_s = eristeen sisähalkaisija [m].

Sähköverkkoanalogiaa käyttäen saadaan ratkaistua lämpöhäviöteholle pituusyksikköä kohden yhtälö 13.

$$\emptyset'_{kok} = \frac{1}{1 + \frac{R_u}{R_m} + \frac{R_u}{R_p}} \left(\frac{T_m - T_u}{R_m} + \frac{T_p - T_u}{R_p}\right) \tag{13}$$

missä, $\emptyset'_{kok}$ = lämpöhäviöteho pituusyksikköä kohti [$\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}}$]

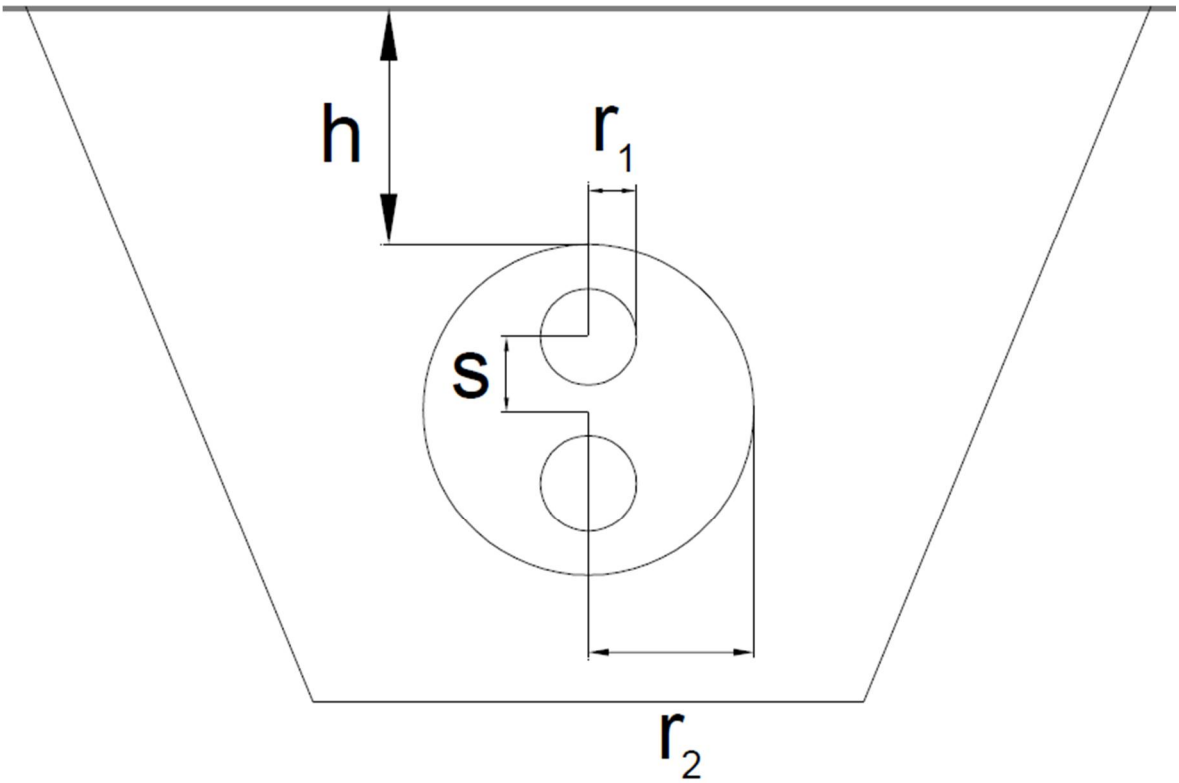
T_m = menoveden lämpötila [°C]

T_p = paluuveden lämpötila [°C]

T_u = ulkolämpötila [°C].

6.3.2 Kaksiputkielementtikanavien laskenta

Kaksiputkielementtikanavassa (Mpuk) sekä meno-, että paluuputki on sijoitettu saman suojaputken sisälle. Kaksiputkielementtikanavan rakenne on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Kaksiputkielementtikanavan (Mpuk) rakenne.

Kaksiputkielementtikanavan lämpöhäviötehon laskennassa on käytetty lähdettä Huovilainen ja Koskelainen 1982.

Lämpöhäviötehon määrityksessä tarvittava kokonaislämpövastus on elementin kokonaisvastuksen ja maasta aiheutuvan lämpövastuksen summa.

Yhden epäkeskeisesti sijoitetun putken lämpökonduktanssi pituusyksikköä kohden voidaan laskea yhtälön 14 avulla.

$$G_1' = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda_e}{\ln \frac{A+B}{A-B}} \tag{14}$$

missä, G_1' = epäkeskeisesti sijoitetun putken lämpökonduktanssi pituusyksikköä kohti [$\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{mK}}$].

Yhtälöön 14 tarvittava tekijä A saadaan laskettua yhtälön 15 avulla.

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

missä, r_1 = virtausputken säde [m]

r_2 = suojaputken säde [m]

s = virtausputken keskikohdan ja suojaputken keskikohdan välinen etäisyys [m].

Yhtälöön 14 tarvittava tekijä B saadaan taas yhtälön 16 avulla.

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

Kahden putken välinen lämpökonduktanssi saadaan laskettua yhtälön 17 avulla.

$$G_2' = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda_e}{arcosh\left[2 \cdot \left(\frac{s}{r_1}\right)^2 - 1\right]} \tag{17}$$

missä, G_2' = kahden putken välinen lämpökonduktanssi [$\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{mK}}$].

Kokonaislämpökonduktanssi kaksiputkielementille saadaan nyt laskettua yhtälön 18 avulla.

$$G'_{kok} = 2 \cdot G'_1 - 0{,}5 \cdot G'_2 \tag{18}$$

missä, G'_{kok} = kokonaislämpökonduktanssi [$\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{mK}}$].

Maasta aiheutuva lämpövastus johtopituutta kohti voidaan laskea yhtälön 19 avulla.

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

missä, R_g = maan aiheuttama lämpövastus [$\frac{\mathrm{mK}}{\mathrm{W}}$]

λ_g = maan lämmönjohtavuus [$\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{mK}}$].

Maan ja elementin aiheuttama kokonaislämpövastus saadaan laskettua nyt yhtälön 20 avulla.

$$R = \frac{1}{G'_{kok}} + R_g \tag{20}$$

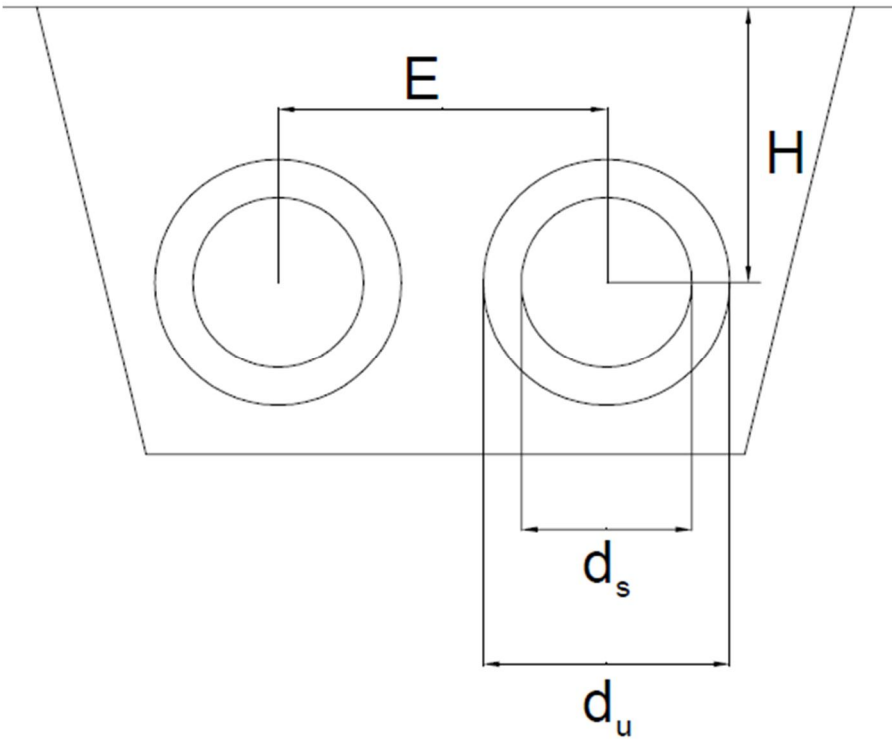
missä, R = kokonaislämpövastus [$\frac{\mathrm{mK}}{\mathrm{W}}$].

Lämpöhäviöteho pituusyksikköä kohti kaksiputkielementille saadaan nyt laskettua yhtälön 21 avulla.

$$\emptyset'_{kok} = \frac{\frac{T_m + T_p}{2} - T_u}{R} \tag{21}$$

6.3.3 Yksiputkielementtikanavien laskenta

Yksiputkielementtikanavassa (2Mpuk) meno- ja paluuputki on sijoitettu eri suojaputken sisälle. Yksiputkielementtikanava on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Yksiputkielementtikanava (2Mpuk).

Yksiputkielementtikanavan lämpöhäviötehon laskenta on suoritettu lähteen Energiateollisuus 2006 mukaisesti.

Yhden putken lämpövastus pituusyksikköä kohti saadaan yhtälön 22 avulla.

$$R_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_e} \ln \frac{d_u}{d_s} \tag{22}$$

missä, R_1 = yhden putken lämpövastus [$\frac{\mathrm{mK}}{\mathrm{W}}$].

Maaperän aiheuttama lämpövastus saadaan laskettua yhtälön 23 avulla.

$$R_g = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_g} \ln \frac{4 \cdot H}{d_u} \tag{23}$$

missä, R_g = maaperän lämpövastus [$\frac{\mathrm{mK}}{\mathrm{W}}$]

H = putkien upotussyvyys [m].

Putkien keskinäisen vaikutuksen huomioon ottava lämpövastus saadaan laskettua yhtälön 24 avulla.

$$R_m = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_g} \ln\left[\left(1 + \frac{2 \cdot H}{E}\right)^2\right] \tag{24}$$

missä, R_m = putkien keskinäisen vaikutuksen huomioiva lämpövastus [$\frac{\mathrm{mK}}{\mathrm{W}}$]

E = putkien keskikohtien välinen etäisyys [m].

Pituusyksikköä kohti määritettyjen lämmönläpäisylukujen K_1 ja K_2 erotus saadaan laskettua yhtälön 25 avulla.

$$K_1 - K_2 = \frac{1}{R_g + R_i + R_m} \tag{25}$$

missä, K = lämmönläpäisyluku [$\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{mK}}$].

Lämpöhäviö johtopituutta kohti saadaan laskettua nyt yhtälön 26 avulla.

$$\emptyset'_{kok} = 2 \cdot (K_1 - K_2)\left[\frac{T_m + T_p}{2} - T_g\right] \tag{26}$$

6.3.4 Muovisuojakuorijohto liikkuvin teräsputkin

Muovisuojakuorijohdon liikkuvin teräsputkin (Mpul) johtorakenteen muodostaa polyuretaanieristeellä kiinteästi yhteen liitetty polyeteenisuojakuori ja virtausputkien lasikuituiset suojaputket. Virtausputket on tarkoitettu asennettavaksi näihin tuuletettaviin suojaputkiin, jolloin ne pääsevät liikkumaan vapaasti lämpöliikkeen vaikutuksesta. Johtorakenteeseen kuuluu myös erillinen vuotovesiputki. Tätä johtotyyppiä on rakennettu myös jonkin verran erillisinä meno- ja paluujohtona. Mpul-johtoa ei ole asennettu enää vuoden 1990 jälkeen. Sen huonoina puolina voidaan pitää johdon ympärillä tapahtuvien

maan painaumien vaikutusta johdon toimintaan sekä suojaputken tai eristeen rikkoutumisesta johtuvan virtausputken korroosion leviämistä koko kaivovälille vuotovesiputkesta huolimatta. (Energiateollisuus 2006, 145.)

Muovisuojakuorijohdon liikkuvin teräsputkin (Mpul) lämpöhäviöiden laskennassa käytetään valmistajien antamia keskimääräisiä lämpöhäviöitä putkipituutta kohti. Tätä johtorakennetta on vielä käytössä vähäisissä määrin Savon Voiman kaukolämpöverkoissa, mutta johtorakenne tullaan uusimaan lähitulevaisuudessa kaukolämpöverkkojen uusimisten yhteydessä. Mpul-johtojen vähäisestä määrästä johtuen ei lämpöhäviölaskennassa tehdä suurta virhettä käyttämällä valmistajien antamia keskimääräisiä arvoja lämpöhäviöille.

6.3.5 Lämpöhäviöiden pienentymä tuotanto- ja myyntitietojen perusteella

Mikäli paikkakunnalta on saatavissa luotettavat mittaukset tuotetun lämmön määrästä saadaan verkoston lämpöhäviöt laskettua tuotetun ja myydyn lämmön erotuksena. Tiedettäessä lämpöhäviöiden suuruus vuodessa saadaan kaukolämpöveden lämpötilatason muutoksen vaikutus lämpöhäviöihin yksinkertaisesti, kun ei oteta huomioon esimerkiksi lämpötilatason vaikutusta polyuretaanin eristyskykyyn. Verkoston lämpöhäviöt kaukolämpöveden muutosten jälkeen voidaan laskea yhtälön 27 avulla. Yhtälössä alaindeksi 1 viittaa lähtötilanteeseen ja alaindeksi 2 muutoksen jälkeiseen tilanteeseen.

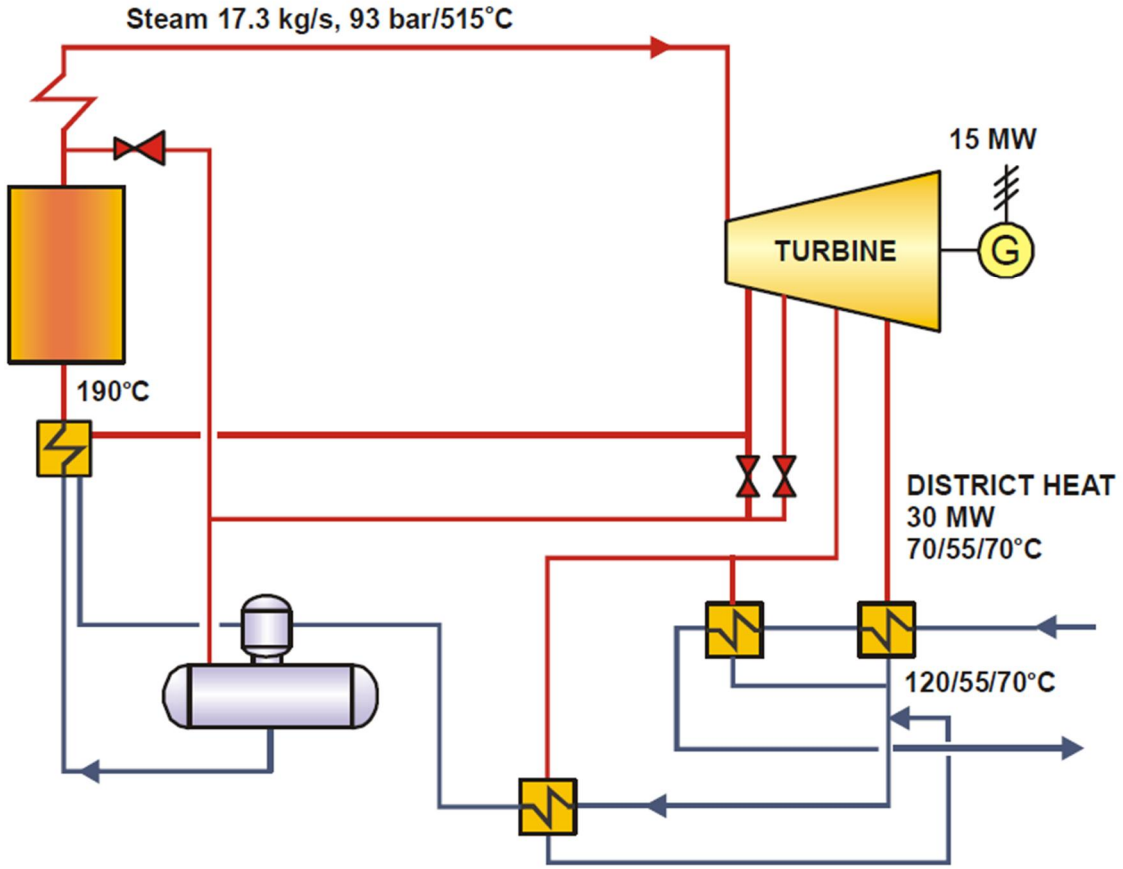
$$\emptyset_{kok,2} = \emptyset_{kok,1} \cdot \left(\frac{\frac{T_{m2}-T_{p2}}{2} - T_u}{\frac{T_{m1}-T_{p1}}{2} - T_u} \right) \tag{27}$$

missä, $\emptyset_{kok}$ = Kaukolämpöverkoston lämpöhäviöt [MWh].

6.4 Sähköntuotannon lisääntymisen määritys

Kaukolämpöveden paremmalla jäähtymällä saadaan sähköntuotantoa lisättyä voimalaitoksella, jossa kaukolämpöveden lämmitys tapahtuu vähintään kahdessa vaiheessa. Sähköntuotannon lisääntyminen tarkoittaa voimalaitoksen rakennusasteen kasvua. Työssä tarkasteltavassa tapauksessa kaukolämpöteho pidetään vakiona, joten

laitoksen polttoainetehoa on kasvatettava. Iisalmessa kaukolämpöveden lämmitys tapahtuu kahdessa lämmönsiirtimessä, joista toinen kaukolämmön lämmönsiirrin on kytketty turbiinin väliottoon ja toinen lämmönsiirrin turbiinin vastapaineeseen. Lämmönsiirtimeen menevän höyryn paineen määrää lämmönsiirtimestä poistuvan kaukolämpöveden lämpötila ja lämmönsiirrosta riippuva lämpötilaero fluidien välillä. Höyry lauhtuu lämmönsiirtimen asteisuuden verran kaukolämpövettä korkeammassa lämpötilassa, paine puolestaan määräytyy lauhtumislämpötilan perusteella. Kaukolämmön paluuveden lämpötilaa alentamalla saadaan vastapainelämmönsiirtimen jälkeistä kaukolämpöveden lämpötilaa alennettua. Näin myös vastapaine pienenee ja höyry paisuu turbiinissa pienempään paineeseen. Tämä vastapaineosan pidempi paisunta turbiinissa lisää sähköntuotantoa. Paremman jäähtymän aiheuttama vastapaineen alentuma ja siitä johtuva kosteampi höyry turbiinin loppuosassa ei aiheuta ongelmia Iisalmen voimalaitoksella. Käytännössä paluuveden alempi lämpötila ja kasvanut polttoaineteho vaikuttavat myös välioton painetasoon sekä turbiinin läpäisevään massavirtaan. Välioton painetta paluuveden alempi lämpötila ei muuta sillä sen paineen määrää menoveden lämpötila. Ottaen huomioon työssä vaadittavan laskennan vähäinen tarkkuus, sähköntuotannon lisääntyminen määritetään yksinkertaistetulla laskennalla, jossa välioton paineen oletetaan pysyvän vakiona ja turbiinin massavirran muutoksen aiheutuvan ainoastaan vastapainehöyryn määrän muuttumisesta. Laskennan oikeellisuuden tarkistuksessa käytetään kuitenkin simulointiohjelmistolla laadittua prosessimallia Iisalmen voimalaitoksesta. Prosessikaavio Iisalmen voimalaitoksesta on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Prosessikuva Iisalmen voimalaitoksesta (OPET 2004, 3).

Laskenta aloitetaan määrittämällä höyryn massavirta vastapaineosalle alkutilanteessa. Tämän tilanteen arvot on otettu prosessitietokoneen näytöstä otetusta tilannekuvasta, joten niitä voidaan pitää luotettavina. Tiedettäessä kaukolämmön paluu- ja menolämpötila sekä kaukolämpöveden lämpötila vastapaine- ja väliottolämmönsiirrinten välissä, saadaan määritettyä tarvittavat höyryn painetasot lämmönsiirtimiin. Kaukolämpöveden oletetaan lämpenevän molemmissa lämmönsiirtimissä yhtä paljon. Vastapainelämmönsiirtimeen tulevan höyryn tulee olla siinä paineessa, jossa sen kylläinen lämpötila on lämmönsiirtimen asteisuuden verran lämmönsiirtimestä poistuvaa kaukolämpövettä suurempi. Vastapaineelle pätee yhtälö 28.

$$p_{vp} = p''(T_{kl,v} + \Delta T_{vpls,as}) \tag{28}$$

missä, p_{vp} = vastapaine [bar]

p'' = kylläisen höyryn paine [bar]

$T_{kl,v}$ = kaukolämpöveden lämpötila vastapainelämmönsiirtimen jälkeen [°C]

$\Delta T_{vpls,as}$ = vastapainelämmönsiirtimen asteisuus [°C].

Välioton paine saadaan märitettyä vastaavalla tavalla. Tiedettäessä kaukolämpöveden menolämpötila pätee välioton paineelle yhtälö 29.

$$p_{vo} = p''(T_{kl,m} + \Delta T_{vols,as}) \tag{29}$$

missä, p_{vo} = turbiinin välioton paine [bar]

p'' = kylläisen höyryn paine [bar]

$\Delta T_{vols,as}$ = väliottolämmönsiirtimen asteisuus [°C].

Tiedettäessä tuorehöyryn paine ja lämpötila sekä väliotto- ja vastapainehöyryn paine, saadaan määritettyä väliotto- ja vastapainehöyryn isentrooppisen paisunnan jälkeiset entalpiat. Todellisen paisunnan jälkeiset entalpiat saadaan laskettua turbiinin isentrooppisen hyötysuhteen avulla yhtälöllä 30.

$$h_2 = h_1 - (h_1 - h_{2s}) \cdot \eta_s \tag{30}$$

missä, h_2 = todellisen paisunnan lopputilanteen höyryn entalpia [$\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}}$]

h_1 = paisunnan alkutilanteen höyryn entalpia [$\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}}$]

h_{2s} = isentrooppisen paisunnan lopputilanteen höyryn entalpia [$\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}}$]

η_s = turbiinin isentrooppinen hyötysuhde [%].

Lämmönsiirtimeen tulevan höyryn oletetaan lauhtuvan kylläiseksi vedeksi. Lämmönsiirtimeen tarvittavan höyryn massavirran määrittämiseksi tarvitaan kylläisen veden entalpiat lämmönsiirrinten paineessa. Tiedettäessä kylläisen veden entalpia vastapaineessa saadaan laskettua vastapainelämmönsiirtimeen tarvittavan höyryn massavirta yhtälön 31 avulla.

$$q_{m,vph} = \frac{P_{vpls}}{(h_{vp} - h'_{vp})} \tag{31}$$

missä, $q_{m,vph}$ = tarvittavan vastapainehöyryn massavirta [$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$]

P_{vpls} = vastapainelämmönsiirtimen teho [W]

h_{vp} = vastapainehöyryn entalpia [$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$]

h'_{vp} = kylläisen veden entalpia vastapaineessa [$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$].

Nyt saadaan laskettua turbiinin vastapaineosan sähköteho yhtälön 32 avulla. Yhtälössä 32 turbiinin sähkömekaaninen hyötysuhde sisältää turbiinin mekaanisen hyötysuhteen sekä generaattorin hyötysuhteen.

$$P_{e,vp} = q_{m,vph} \cdot (h_{vo} - h_{vp}) \cdot \eta_t \tag{32}$$

missä, $P_{e,vp}$ = turbiinin vastapaineosan sähköteho [W]

h_{vo} = höyryn entalpia väliotossa [$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$]

h_{vp} = vastapainehöyryn entalpia [$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$]

η_t = turbiinin hyötysuhde [%].

Tiedettäessä turbiinin kokonaissähköteho saadaan laskettua vastapaineosan sähköntuotannon osuus kokonaissähkötehosta. Työn laskennassa kokonaissähköteho saadaan prosessitietokoneen näytöstä saadusta tilannekuvasta.

Seuraavaksi lasketaan kaukolämmön paluulämpötilan vaikutus vastapaineosan sähköntuotantoon. Laskennassa oletetaan, että kaukolämpöteho pysyy vakiona, joten oletetaan että kattilan tehoa nostetaan kattilan polttoainetehon määrällä, joka saadaan jakamalla sähkötehon muutos turbiinin sähkömekaanisella hyötysuhteella ja kattilahyötysuhteella. Koska oletuksena oli, että kaukolämpövesi lämpenee molemmissa kaukolämmönsiirtimissä saman verran, on kaukolämpöveden lämpötilan alennus lämmönsiirrinten välissä puolet kaukolämmön paluuveden lämpötilan laskusta. Näin esimerkiksi paluuveden lämpötilan laskiessa yhden asteen, laskee kaukolämpöveden

lämpötila lämmönsiirrinten välissä 0,5 °C. Näin myös vastapainehöyryltä tarvittava kylläinen lämpötila laskee 0,5 °C. Uuden tilanteen vastapaine voidaan määrittää yhtälön 28 avulla. Turbiinin välioton paine sen sijaan pysyy vakiona, koska kaukolämmön menolämpötila ei muutu. Uusi vastapainehöyryn entalpia voidaan taas laskea yhtälön 30 avulla. Koska uusi vastapainehöyryn entalpia on pienempi kuin alkuperäisessä tilanteessa, on tarvittavan vastapainehöyryn massavirta suurempi vastapainelämmönsiirtimen kaukolämpötehon pysyessä vakiona. Uuden tilanteen vastapainehöyryn massavirta saadaan laskettua yhtälön 31 avulla.

Sähköntuotannon lisääntyminen turbiinissa perustuu siis kasvaneeseen höyryn massavirtaan turbiinin läpi sekä höyryn pidempään paisuntaan turbiinin vastapaineosassa. Sähkötuotannon lisäys voidaan nyt laskea yhtälön 33 avulla. Yhtälössä alaindeksi 1 tarkoittaa lähtötilannetta ja alaindeksi 2 muuttunutta tilannetta kaukolämmön paluuveden lisäjäähdytyksen jälkeen.

$$\Delta P_e = \Big(\big(q_{m,vph2} - q_{m,vph1}\big) \cdot (h_{th} - h_{vo}) + ((q_{m,vph2} \cdot (h_{vo} - h_{vp2})) - (q_{m,vph1} \cdot (h_{vo} - h_{vp1}))\Big) \cdot \eta_t \tag{33}$$

missä, ΔP_e = sähkötehon muutos [W].

Sähköntuotannon lisääntyminen vähentää tuotetun kaukolämmön määrää ellei kattilatehoa nosteta. Laskennassa oletetaan kattilatehon nousevan, mutta tämän oletuksen vaikutus lopputulokseen on vähäinen. Mikäli kattilateho pysyisi vakiona, eli olisi jo valmiiksi huipussaan, sähköntuotannon lisääntymisellä saavutettaisiin taloudellista hyötyä vain mikäli oletetaan sähkön hinta korkeammaksi kuin lämmön hinta. Käytännössä sähköntuotannon lisääntyminen aiheuttaa lämmöntuotannon laskua vain ajettaessa kattilaa täydellä kuormalla. Tässä tilanteessa sähköntuotannon lisääntyminen lisää huippukuormalaitosten käyttöä joiden polttoaineena Iisalmessa on öljy tai vanhan biolämpökeskuksen ollessa käynnissä turve ja hake. Vanhan biolämpökeskuksen käynnistämisen kannattavuus vaatii kuitenkin vähintään noin viikon -10 °C pakkasen. Öljyn hinta on keskimäärin korkeampi kuin sähkön hinta, joten sähköntuotannon

lisääntymisestä ei saada taloudellista hyötyä siinä tilanteessa kun voimalaitos käy jo täydellä kuormalla ja lämmöntuotannon laskua korvataan öljyllä tuotetulla lämmöllä.

6.5 Lämmöntalteenoton paranemisen määritys

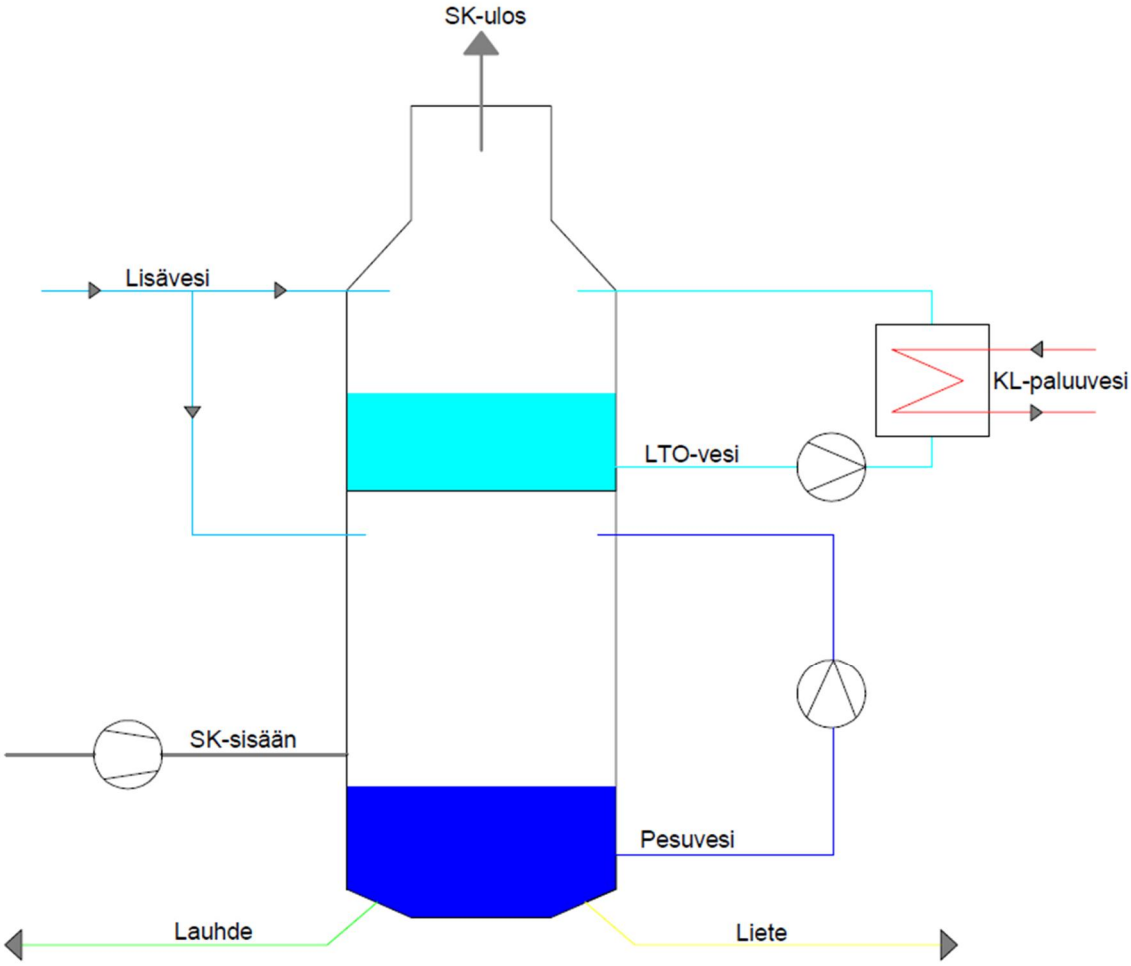
Lämmöntalteenoton paraneminen perustuu tarkasteltavilta paikkakunnilta Pielavedellä ja Suonenjoella biolämpölaitoksen yhteydessä olevaan savukaasujen lämmöntalteenottopesuriin. Lämmöntalteeottopesurin tehokkuus perustuu siihen, että sen avulla saadaan savukaasujen lämpötila laskettua alle savukaasujen kastepisteen. Tämän seurauksena savukaasuissa oleva kosteus alkaa lauhtua ja samalla lämpöä vapautuu hyödynnettäväksi kaukolämpönä.

Lämmöntalteenottopesurista saatavalla kuumalla vedellä lämmitetään kaukolämmön paluuvettä ennen kaukolämpöveden johtamista varsinaiseen lämpökeskuksen kaukolämmönsiirtimeen. Kaukolämmön paluuveden lämpötilaa laskemalla saadaan kaukolämmönsiirtimeltä pesurille palaavan veden lämpötilaa alennettua ja näin myös savukaasujen lämpötilaa saadaan laskettua tehokkaammin.

Savukaasupesuri voidaan jakaa kahteen vaiheeseen. Pesurin ensimmäisessä osassa savukaasut puhdistetaan epäpuhtauksista, jotta savukaasut olisivat mahdollisimman puhtaita johdettaessa ne pesurin toiseen osaan eli niin sanottuun lämmöntalteenotto-osaan. Ennen pesuria savukaasut puhdistetaan Pielavedellä multisyklonilla ja Suonenjoen uudella laitoksella sähkösuotimella, jotta savukaasut voidaan tarvittaessa johtaa piippuun ohi savukaasupesurin. Pesurin puhdistusosassa savukaasut virtaavat vastavirtaan puhdistusveden virtaukseen nähden. Savukaasut virtaavat pesurissa alhaalta ylöspäin ja pesuvesi ruiskutetaan pesuvaiheen yläosasta, josta se valuu painovoiman vaikutuksesta alaspäin. Pesuvesi kerääntyy pesuosan alaosaan, mistä se pumpataan taas pesuosan yläosaan. Pielavedellä pesuosan alaosaan saostunutta lietettä pumpataan määrätyin väliajoin pois pesurista. Suonenjoen uudella biolaitoksella liete saostetaan erillisessä saostusaltaassa, jonne pesuvesi pumpataan pesurin alaosasta.

Savukaasujen puhdistuksella ennen lämmöntalteenotto-osaa ehkäistään savukaasujen epäpuhtauksien aiheuttavma ongelmia. Liialliset epäpuhtaudet likaisivat lämmönsiirtimen lämmönsiirtopintoja ja heikentäisivät lämmönsiirto-ominaisuuksia. Epäpuhtaudet voisivat myös tukkia lämmönsiirtimen kokonaan. Savukaasujen lämpötila esimerkiksi Pielaveden biolämpökeskuksella olevassa pesurissa on noin 65 °C niiden virratessa lämmöntalteenotto-osaan. Näin poltettaessa polttoainetta, jonka kosteus on 50 %, savukaasut ovat saavuttaneet yleensä kastepistelämpötilan jo pesuosassa. Myös lämmöntalteenotto-osassa savukaasut virtaavat alhaalta ylöspäin ja kiertovesi ruiskutetaan LTO-vaiheen yläosasta. Ruiskutetun veden ansiosta savukaasut jäähtyvät ja niistä lauhtuu kosteutta kiertoveden sekaan lämmittäen kiertovettä. Lämmöntalteenotto-osassa on täytekappalekerros, jonka läpi savukaasut ja kiertovesi virtaavat. Täytekappalekerros lisää lämmönsiirtopinta-alaa savukaasujen ja lämmönsiirtonesteen välillä.

Savukaasuissa olevan vesihöyryn lauhtuminen muodostaa suurimman osan talteenotettavasta lämpöenergiasta savukaasujen jäähtyessä. Jäähdytettäessä savukaasuja joiden lämpötila on 50 °C, vesihöyryn lauhtumisesta saatava lämpöenergia muodostaa kosteilla polttoaineilla noin 90 % vapautuvasta lämmöstä. Tätä kuumemmilla savukaasun lämpötiloilla osuus on vieläkin suurempi. LTO-vaiheen yläosasta ruiskutettu vesi kerääntyy lämmenneenä LTO-vaiheen alaosaan, josta se pumpataan levylämmönsiirtimeen. Levylämmönsiirtimen toisiopuolella kiertää kaukolämpöverkon paluuvesi, jolle kiertovesi luovuttaa lämpönsä. Kaukolämmönsiirtimestä kiertovesi virtaa takaisin pesuriin ruiskutettavaksi savukaasujen sekaan täytekerroksen päältä LTO-vaiheen yläosasta. Savukaasut virtaavat LTO-vaiheen jälkeen pisaranerotuksen kautta savupiippuun. Savukaasupesurin toimintaperiaate on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10. LTO-savukaasupesurin toimintaperiaate.

Savukaasupesurin lämmöntalteenoton laskenta aloitetaan suorittamalla laitoksella käytettävälle polttoaineelle palamislasku. Näin määritetään savukaasun massavirta sekä savukaasun eri komponenttien osuudet savukaasuissa. Tiedettäessä savukaasun eri komponenttien mooliosuudet sekä osapaineet, saadaan savukaasuille määritettyä kastepistelämpötila. Kastepistelämpötila on se lämpötila, jonka kylläisen höyryn paine on sama kuin savukaasujen sisältämän vesihöyryn osapaine. Kastepistelämpötilalle pätee yhtälö 34.

$$T_{kp,sk} = T(p''_{H2O}) \tag{34}$$

missä, $T_{kp,sk}$ = savukaasujen kastepistelämpötila [°C]

$T(p''_{H2O})$ = savukaasujen vesihöyryn osapaineen kylläinen lämpötila [°C].

Jäähdytettäessä savukaasuja kastepistelämpötilaa kylmemmillä lämpötiloilla, vesihöyryn lauhtumisesta saatava lämpöteho voidaan laskea yhtälön 35 avulla.

$$P_{tiiv} = q_{m,tiiv} \cdot [h''(T_{ka}) - h'(T_{ka})] \tag{35}$$

missä, P_{tiiv} = vesihöyryn lauhtumisesta vapautuva lämpöteho [W]

$q_{m,tiiv}$ = lauhtuvan vesihöyryn määrä [$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$]

$h''(T_{ka})$ = kylläisen vesihöyryn entalpia jäähtymän keskimääräisessä lämpötilassa [$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$]

$h'(T_{ka})$ = kylläisen veden entalpia jäähtymän keskimääräisessä lämpötilassa [$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$].

Lauhtuvan vesihöyryn määrä saadaan taas laskettua yhtälön 36 avulla. Yhtälössä alaindeksi 1 viittaa jäähtymän alkutilanteeseen ja alaindeksi 2 lopputilanteeseen.

$$q_{m,tiiv} = M_{H2O} \cdot (p''(T_1) \cdot \dot{n}_{sk,1} - p''(T_2) \cdot \dot{n}_{sk,2}) \tag{36}$$

missä, M_{H2O} = veden moolimassa [$\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$]

$p''(T)$ = kylläisen vesihöyryn paine [bar]

$\dot{n}_{sk}$ = savukaasujen moolivirta [$\frac{\text{mol}}{\text{s}}$].

Savukaasujen sisältämä kosteus ei pienene lineaarisesti savukaasujen jäähtyessä. Savukaasuista lauhdutettavissa oleva kosteus astetta kohti pienenee savukaasujen jäähtyessä ja näin myös jäähtymästä saatava energiamäärä pienenee. Savukaasuista vapautuvan energian määrä jäähtyvää astetta kohti tietyllä lämpötilalla ei riipu poltettavan polttoaineen kosteudesta siinä tapauksessa että kastepistelämpötila on saavutettu. Tämä johtuu siitä, että kylläisen höyryn osapaine ja näin myös mooliosuus savukaasuissa tietyllä lämpötilalla on vakio. Poltettaessa kosteampaa polttoainetta savukaasupesurissa on

talteenotettavissa oleva kokonaislämpöenergia kuitenkin suurempi kuin poltettaessa kuivempaa polttoainetta. Tämä johtuu siitä, että kosteamman polttoaineen savukaasujen kastepistelämpötila on korkeampi ja vesihöyryn lauhtuminen alkaa korkeammassa lämpötilassa.

Muu savukaasujen jäähtymästä vesihöyryn lauhtumisen lisäksi vapautuva lämpöteho saadaan laskettua yhtälön 37 avulla. Yhtälössä alaindeksi 1 viittaa jäähtymän alkutilanteeseen ja alaindeksi 2 lopputilanteeseen.

$$P_{muu} = \sum(q_{m,i} \cdot c_{p,i} \cdot (T_{sk,1} - T_{sk,2})) \tag{37}$$

missä, P_{muu} = savukaasujen jäähtymästä vesihöyryn lauhtumisen lisäksi vapautuva lämpöteho [W]

$q_{m,i}$ = savukaasukomponentin massavirta [$\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}}$]

$c_{p,i}$ = savukaasukomponentin ominaislämpökapasiteetti [$\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kgK}}$]

T_{sk} = savukaasujen lämpötila [K].

Nyt kun tiedetään lisäjäähtymästä saatava lisälämpö ilman polttoaineen kulutuksen lisäystä, voidaan jäähtymätermi määrittää. Jäähtymätermiin vaikuttaa eniten lisälämmöllä säästetyn polttoaineen hinta.

Kaukolämpöveden jäähtymän parantamisesta saatavan hyödyn laskentaa yksinkertaistaa huomattavasti se, että savukaasuista saatavan energian osuus jäähdytettyä energiamäärää kohti on sama polttoaineen kosteudesta riippumatta kastepistelämpötilan alittamisen jälkeen seuraavilla oletuksilla. Pielaveden pesurilta saatujen mittausten perusteella oletetaan laskennassa savukaasupesurin lämmöntalteenoton asteisuuden eli kaukolämmön paluuveden ja savukaasujen loppulämpötilan eron, olevan 2 °C. Laskennassa oletetaan lisäksi ettei kattilahyötysuhde riipu kattilakuormasta. Savukaasujen laskennassa käytettävänä polttoainesekoituksena käytetään laitosten keskimääräistä polttoaineiden suhdetta vuodelta 2010. Suonenjoen tulevan biolämpökeskuksen tapauksessa on käytetty suunnitteluarvoja. Koska kaukolämpöveden paluulämpötila on tarkasteltavilla

paikkakunnilla noin 50 - 55 °C, on savukaasujen kastepistelämpötila alitettu nykytilanteessa savukaasupesurissa poltettaessa biopolttoaineita.

Lämmöntalteenoton laskemiseen tarvittavaa kattilan savukaasuvirtaa laskettaessa käytetään kattilan tehoa sekä käytetyn kostean polttoaineen tehollista lämpöarvoa. Koko laitoksen kaukolämpötehoa ei voida käyttää käytettäessä palamislaskussa kostean polttoaineen tehollista lämpöarvoa, koska lämmöntalteenotossa osa polttoaineen sisältämästä kosteudesta lauhtuu. Laitoksen kokonaistehon ja kaukolämpöveden massavirran määrityksessä tarvittavan lämmöntalteenoton kokonaistehon laskennassa oletetaan lämmöntalteenoton tehon olevan suoraan verrannollinen kattilan kaukolämpötehoon. Lämmöntalteenoton tehon oletetaan olevan 26 % kattilan kaukolämpötehosta.

7 LASKENNAN TULOKSET

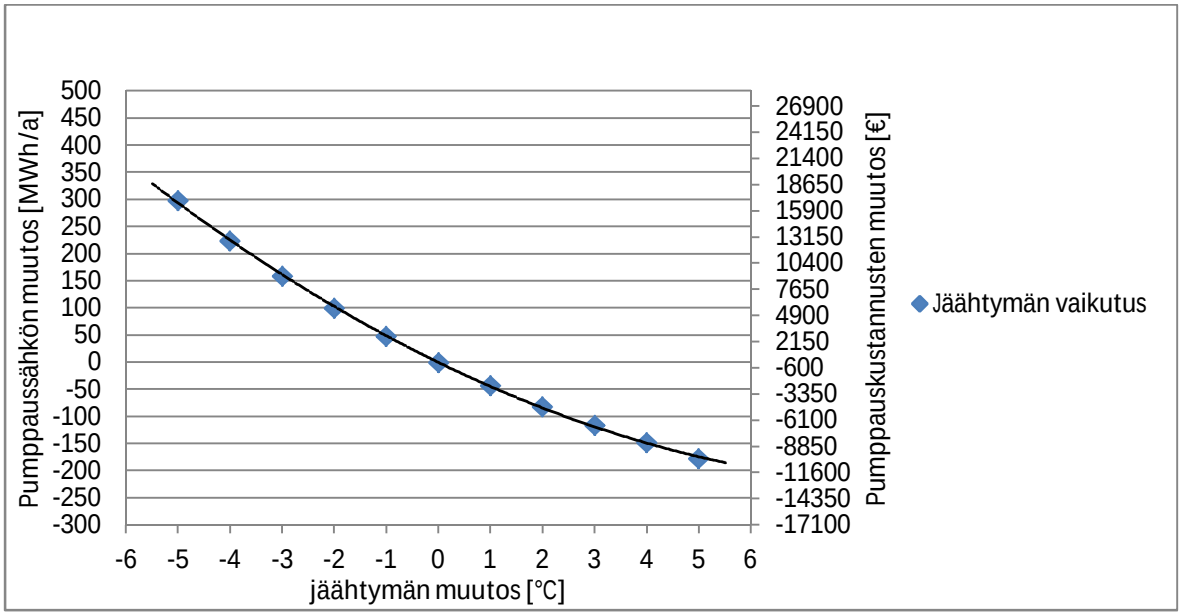
Työn tässä luvussa esitetään laskennan tulokset jäähtymän paranemisen aiheuttamista energia- ja kustannussäästöistä työhön valituilla paikkakunnilla.

7.1 Iisalmi

7.1.1 Pumppauskustannukset

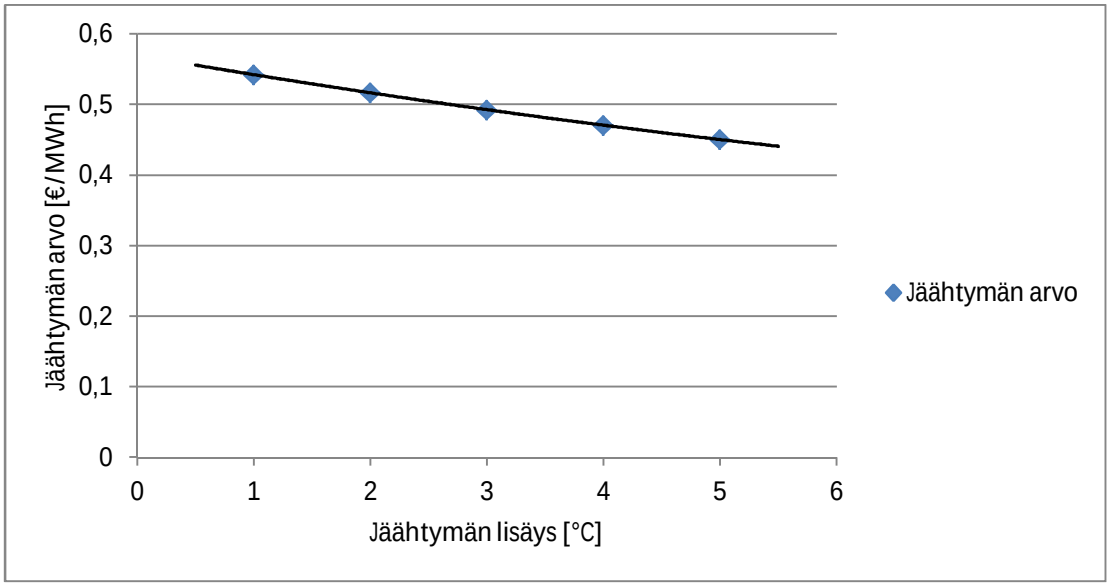
Iisalmesta ei ole saatavissa tarkkoja mittauksia kaukolämpöveden pumppaussähkön kulutuksesta. Asiakastiedoista saatavien kuukausittaisten kaukolämpöveden virtausmäärien sekä pumppauksen paine-eron mittauksen avulla saadaan laskettua Iisalmen kaukolämpöveden pumppaussähkön kulutukseksi vuonna 2010 noin 584 MWh. Laskennassa käytetään Iisalmen keskimääräisenä kaukolämpöveden jäähtymänä 39 astetta. Laskennassa saatujen tulosten perusteella paluuveden lämpötilan alentaminen yhdellä asteella vähentäisi pumppaussähkön kulutusta Iisalmessa 7 % eli noin 65 MWh ja viiden asteen jäähtymän parantamisella saavutettaisiin jo 30 %:n eli 271 MWh:n säästö pumppaussähkön kulutuksessa. Näin yhden asteen jäähtymän parantamisella saatava rahallinen säästö olisi 3590 €/a ja viiden asteen jäähtymän parantamisella saatava säästö 14 900 €/a. Kaukolämpöveden jäähtymän paranemisen vaikutus Iisalmessa pumppaussähkön

kulutukseen sekä pumppauskustannuksiin on esitetty kuvassa 11. Kuvassa negatiivinen jäähtymän muutos tarkoittaa jäähtymän huonontumista.



Kuva 11. Jäähtymän vaikutus kaukolämpöveden pumppaussähkön kulutukseen sekä pumppauskustannuksiin Iisalmessa.

Pumppauskustannuksista saatava säästö jäähdyttävää energiamäärää kohti eli jäähtymätermi on Iisalmessa jäähtymän parantuessa yhden asteen 0,55 €/MWh. Mikäli jäähtymä paranee viisi astetta nykytasosta, jäähtymätermi olisi 0,45 €/MWh. Ottaen huomioon laskennan epävarmuudet valitaan pumppauskustannuksista muodostuvan jäähtymätermin arvoksi 0,5 €/MWh. Pumppauskustannuksista saatava jäähtymän arvo on esitetty kuvassa 12.



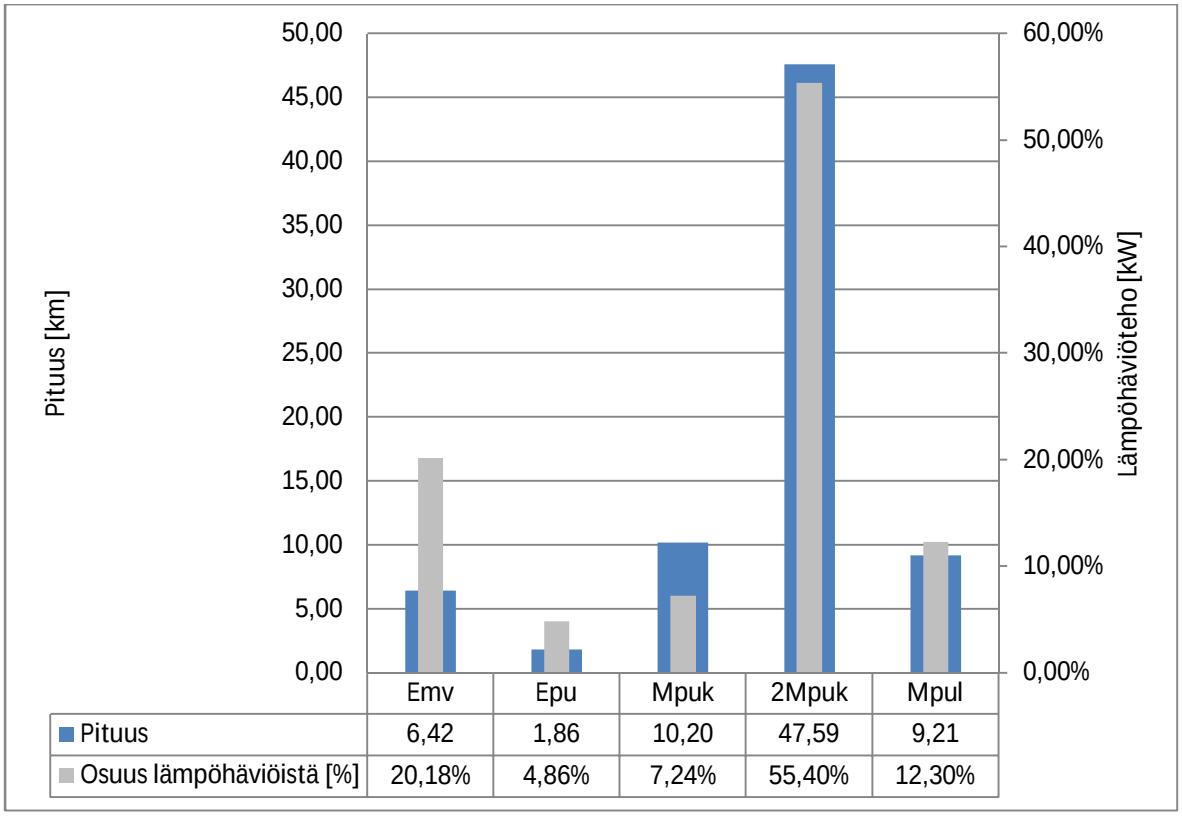
Kuva 12. Pumppauskustannuksista saatava jäähtymätermi Iisalmessa.

7.1.2 Lämpöhäviöt

Iisalmessa lämpökeskuksilta kaukolämpöverkkoon syötetty lämpömäärä vuonna 2010 on mittausten mukaan ollut 203 031 MWh ja tilastojen mukaan myyty kaukolämmön määrä on ollut 178 467 MWh. Myydyn lämmön lisäksi apujäähdyttimen ottama lämpömäärä on ollut vuonna 2010 yhteensä 1654 MWh. Näiden tilastojen mukaan Iisalmen kaukolämpöverkon lämpöhäviöt ovat olleet vuonna 2010 22 745 MWh eli 11,2 %. Kaukolämpöverkosta luodun laskentamallin mukaan lämpöhäviöt ovat olleet vuonna 2010 20 030 MWh eli 9,9 %. Esimerkiksi kaukolämpöputkien eristeiden eristyskyvyn huononeminen ikääntyessä aiheuttaa todellisten lämpöhäviöiden suuremman arvon mallin laskemaan verrattuna. Laskennassa käytetäänkin lähtötilanteen lämpöhäviöinä tuotantotiedoista laskettuja lämpöhäviöitä.

Laskennassa käytetään lähtötilanteen kaukolämpöveden vuoden keskimääräisenä menolämpötilana 87 astetta ja paluulämpötilana 48 astetta. Keskimääräisenä ulkolämpötilana käytetään 2,4 astetta, mikä on Ilmatieteen laitoksen mittaama keskimääräinen ulkolämpötila Kuopiossa vuonna 2010. Kuopion keskimääräistä ulkolämpötilaa käytetään laskennassa, koska mitattuja lämpötiloja ei ole käytettävissä Iisalmesta.

Kuvassa 13 on esitetty Iisalmen kaukolämpöverkon rakenne vuonna 2010 putkityypeittäin sekä putkityyppien aiheuttamien lämpöhäviöiden osuudet. Kuvasta nähdään myös Iisalmen betonielementtikanavien aiheuttama suuri lämpöhäviöteho suhteessa niiden pituuteen. Näin vanhojen betonielementtikanavien uusinnalla saavutetaan säästöjä kaukolämpöverkon lämpöhäviöissä. Yksi ongelmallisimmista betonielementtikanavista Iisalmessa on sen pääväylän Pohjolankadun vieressä keskellä kaupunkia kulkeva DN300 kokoa oleva Emv-johto. Kyseinen johto on rakennettu vuonna 1977. Myös korvaamalla Mpul-johdot Mpuk tai 2Mpuk johtorakenteella saadaan lämpöhäviöitä pienennettyä.



Kuva 13. Iisalmen kaukolämpöverkon putkityyppien pituudet ja keskimääräiset lämpöhäviötehot.

Iisalmessa lämpöhäviötehon pienentymä vuositasolla kaukolämmön paluuveden keskimääräisen lämpötilan laskiessa yhden asteen on 174 MWh/a, mikä tarkoittaa 0,77 %:n lämpöhäviöiden pienentymistä. Iisalmessa on vuonna 2010 ollut öljylämpökeskus päällä noin 51 % ajasta. Tällä öljylämpökeskuksen käyntiajalla saavutettaisiin 6640 €:n säästöä vuodessa, mikäli paluuveden keskimääräinen lämpötila laskisi yhden asteen. Lämpöhäviöistä saatavan jäähtymätermin suuruudeksi Iisalmessa saadaan 1,7 €/MWh.

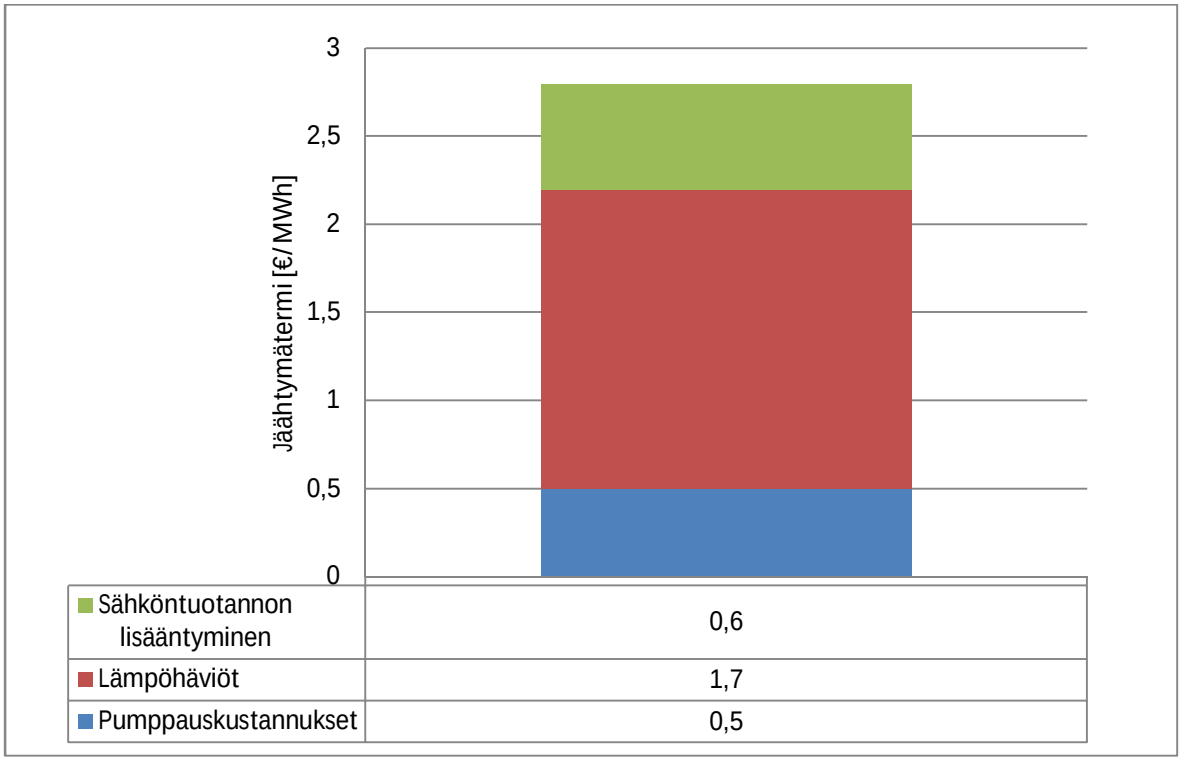
7.1.3 Sähköntuotanto

Sähköntuotannon lisäys paluuveden jäähdytettyä astetta kohti on lähes vakio lisäjäähdytyksen suuruudesta riippumatta. Laskennan tuloksena saadaan sähköntuotannon lisäykseksi paluuveden lisäjäähdytettyä astetta kohti 0,14 %. Tälle tulokselle tukea antaa prosessisimulaattoriohjelmalla testattu paluuveden lämpötilan vaikutus Iisalmen voimalaitoksen sähkötehon lisäykseen. Simulaattoriohjelmalla saatiin samansuuruisia tuloksia kuin luvussa 6.4 esitetyllä mekaanisella laskennalla. Paluuveden vaikutus kokonaissähkötehoon on pieni, sillä paluuveden lämpötila vaikuttaa ainoastaan turbiinin vastapaineosaan. Turbiinin vastapaineosan sähköteho on vain noin 5 % turbiinin kokonaissähkötehosta.

Iisalmen voimalaitoksen sähköntuotanto on vuodessa noin 63 000 MWh. Näin kaukolämmön keskimääräisen paluulämpötilan laskiessa yhden asteen, lisääntyisi sähköntuotanto vuodessa 87 MWh. Tämä tarkoittaisi rahallista tuottoa vuodessa 4980 €/a jos sähkön keskimääräinen hinta on 57 €/MWh. Jäähtymätermiksi sähköntuotannon lisääntymisestä saadaan 0,6 €/MWh. Tässä on otettu huomioon se, että voimalaitos on käynnissä vain osan vuodesta. Lisäksi laskennassa on otettu huomioon se, että osa lisääntyneestä sähköntuotannosta vähentää voimalaitoksen lämmöntuotantoa, jota korvataan öljyä käyttävillä huippulämpökeskuksilla.

7.1.4 Kokonaisvaikutus

Laskennan lopputuloksena saadaan Iisalmessa nykytasosta tapahtuvan lisäjäähtymän arvoksi 2,8 €/MWh. Suurin osa, 1,7 €/MWh, lisäjäähtymän rahallisesta hyödystä saadaan kaukolämpöverkon lämpöhäviöiden pienentymisestä. Kaukolämpöveden pumppauskustannusten pienentymisestä saatava hyöty on 0,5 €/MWh ja sähköntuotannon lisääntymisestä saadaan hyötyä 0,6 €/MWh. Nämä arvot eivät ole kuitenkaan muiden paikkakuntien tapaan täysin luotettavia monien oletusten takia. Tarkempien arvojen määrityksessä täytyisi olla käytettävissä tarkempia ja aukottomia mittauksia esimerkiksi kaukolämpöveden lämpötiloista sekä kaukolämpöveden pumppauksen sähkötehoista. Kuvassa 14 on esitetty jäähtymätermin suuruus ja sen osatekijät Iisalmessa.



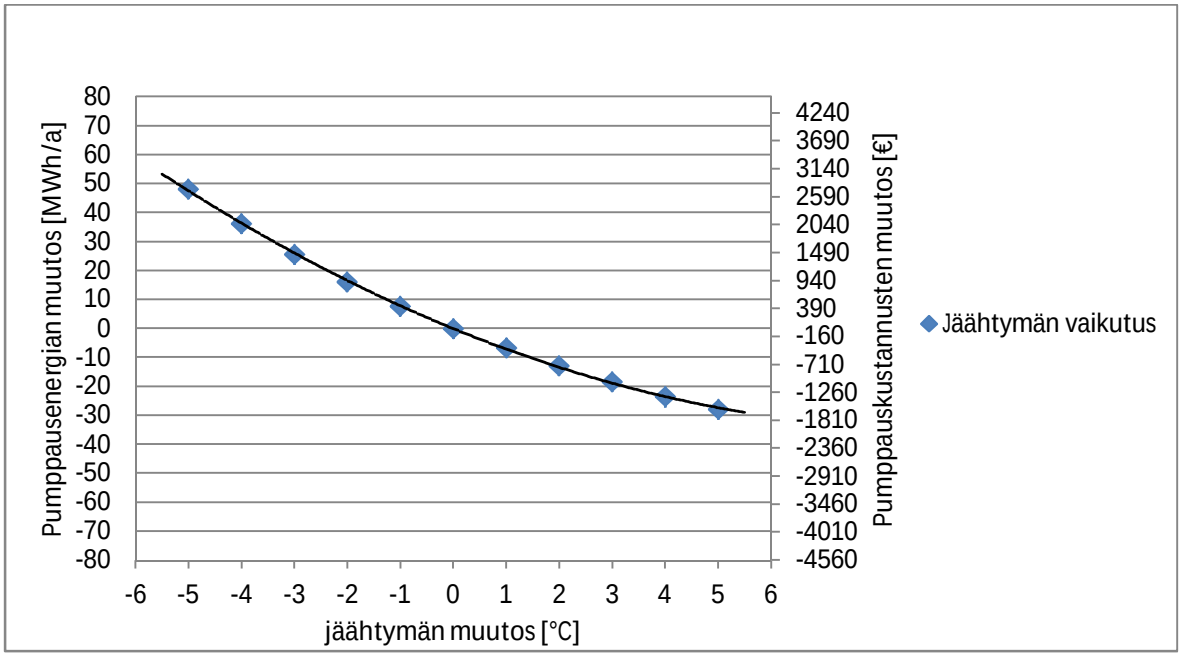
Kuva 14. Kokonaisjäähtymätermi Iisalmessa.

7.2 Pielavesi

7.2.1 Pumppauskustannukset

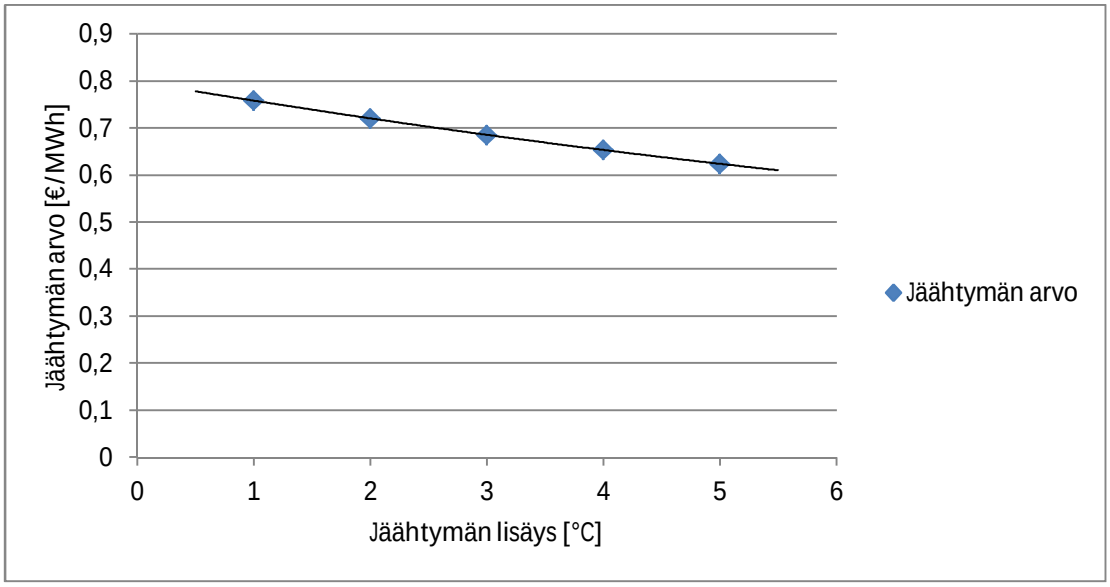
Pielavedeltä ei ole Iisalmen tapaan saatavissa tarkkoja mittauksia kaukolämpöveden pumppaussähkön kulutuksesta. Asiakastiedoista saatavien kuukausittaisten kaukolämpöveden virtausmäärien sekä pumppauksen paine-eron mittauksen avulla saadaan laskettua Pielaveden kaukolämpöveden pumppaussähkön kulutukseksi vuonna 2010 noin 88 MWh. Laskennassa käytetään Pielaveden keskimääräisenä kaukolämpöveden jäähtymänä 37 astetta. Laskennassa saatujen tulosten perusteella paluuveden lämpötilan alentaminen yhdellä asteella vähentäisi pumppaussähkön kulutusta Pielavedellä 8 % eli noin 7 MWh ja viiden asteen jäähtymän parantamisella saavutettaisiin jo 34 %:n eli 28 MWh:n säästö pumppaussähkön kulutuksessa. Näin yhden asteen jäähtymän parantamisella saatava rahallinen säästö olisi 387 €/a ja viiden asteen jäähtymän parantamisella saatava säästö 1593 €/a. Kaukolämpöveden jäähtymän paranemisen vaikutus Pielavedellä pumppaussähkön kulutukseen sekä pumppauskustannuksiin on

esitetty kuvassa 15. Kuvassa negatiivinen jäähtymän muutos tarkoittaa jäähtymän huonontumista.



Kuva 15. Jäähtymän vaikutus kaukolämpöveden pumppaussähkön kulutukseen sekä pumppauskustannuksiin Pielavedellä.

Pumppauskustannuksista saatava säästö jäähdyttävää energiamäärää kohti Pielavedellä on jäähtymän parantuessa yhden asteen 0,75 €/MWh. Mikäli jäähtymä paranee viisi astetta nykytasosta, jäähtymätermi olisi 0,62 €/MWh. Näin pumppauskustannuksista muodostuvaksi jäähtymätermiksi valitaan 0,7 €/MWh. Pumppauskustannuksista saatava jäähtymän arvo on esitetty kuvassa 16.



Kuva 16. Pumppauskustannuksista saatava jäähtymätermi Pielavedellä.

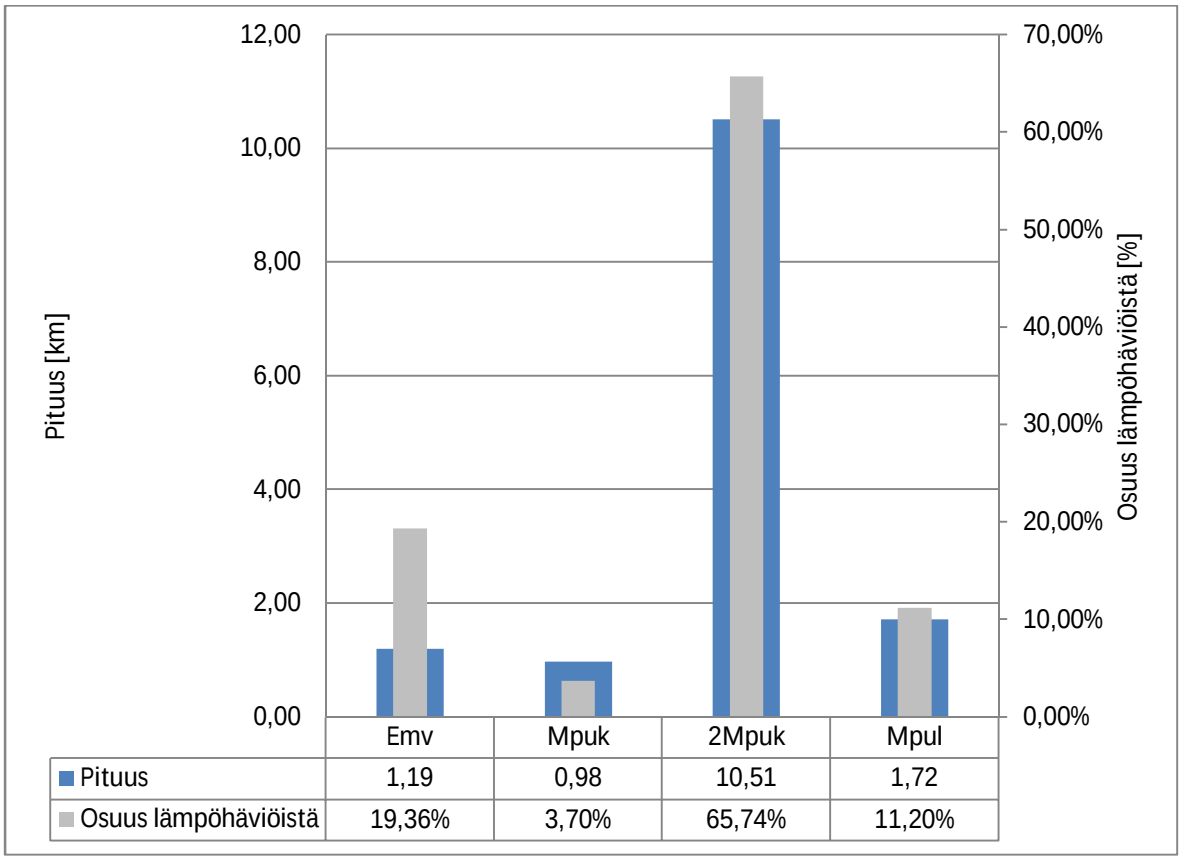
7.2.2 Lämpöhäviöt

Pielavedellä lämpökeskuksilta kaukolämpöverkkoon syötetty lämpömäärä vuonna 2010 on mittausten mukaan ollut 26 913 MWh ja tilastojen mukaan myyty kaukolämmön määrä on ollut 21 843 MWh. Näiden tilastojen mukaan Pielaveden kaukolämpöverkon lämpöhäviöt ovat olleet vuonna 2010 5069 MWh eli 18,8 %. Kaukolämpöverkosta luodun laskentamallin mukaan lämpöhäviöt ovat olleet vuonna 2010 3660 MWh eli 13,6 %. Kaukolämpöputkien eristeiden eristyskyvyn huononeminen ikääntyessä aiheuttaa todellisten lämpöhäviöiden suuremman arvon mallin laskemaan arvoon verrattuna. Laskennassa käytetäänkin lähtötilanteen lämpöhäviöinä tuotantotiedoista laskettua lämpöhäviötä.

Laskennassa käytetään lähtötilanteen kaukolämpöveden keskimääräisenä menolämpötilana 87 astetta ja paluulämpötilana 50 astetta. Keskimääräisenä ulkolämpötilana käytetään 2,4 astetta, mikä on Ilmatieteen laitoksen mittaama keskimääräinen ulkolämpötila Kuopiossa vuonna 2010.

Kuvassa 17 on esitetty Pielaveden kaukolämpöverkon rakenne vuonna 2010 putkityypeittäin sekä putkityyppien aiheuttamien lämpöhäviöiden osuudet. Kuvasta nähdään Pielaveden betonielementtikanavien aiheuttama suuri lämpöhäviöteho suhteessa

niiden pituuteen. Näin vanhojen betonielementtikanavien uusinnalla saavutetaan säästöjä kaukolämpöverkon lämpöhäviöissä. Pielavedellä betonielementtikanavien osuus kaukolämpöverkosta on kuitenkin pienempi kuin Iisalmessa ja Suonenjoella. Myös Mpul johtojen korvaamisella Mpuk tai 2Mpuk johtorakenteella saadaan lämpöhäviöitä pienennettyä. Eristyskyvyltään hyvän 2Mpuk-johdon osuus Pielaveden kaukolämpöverkosta on 73 %.

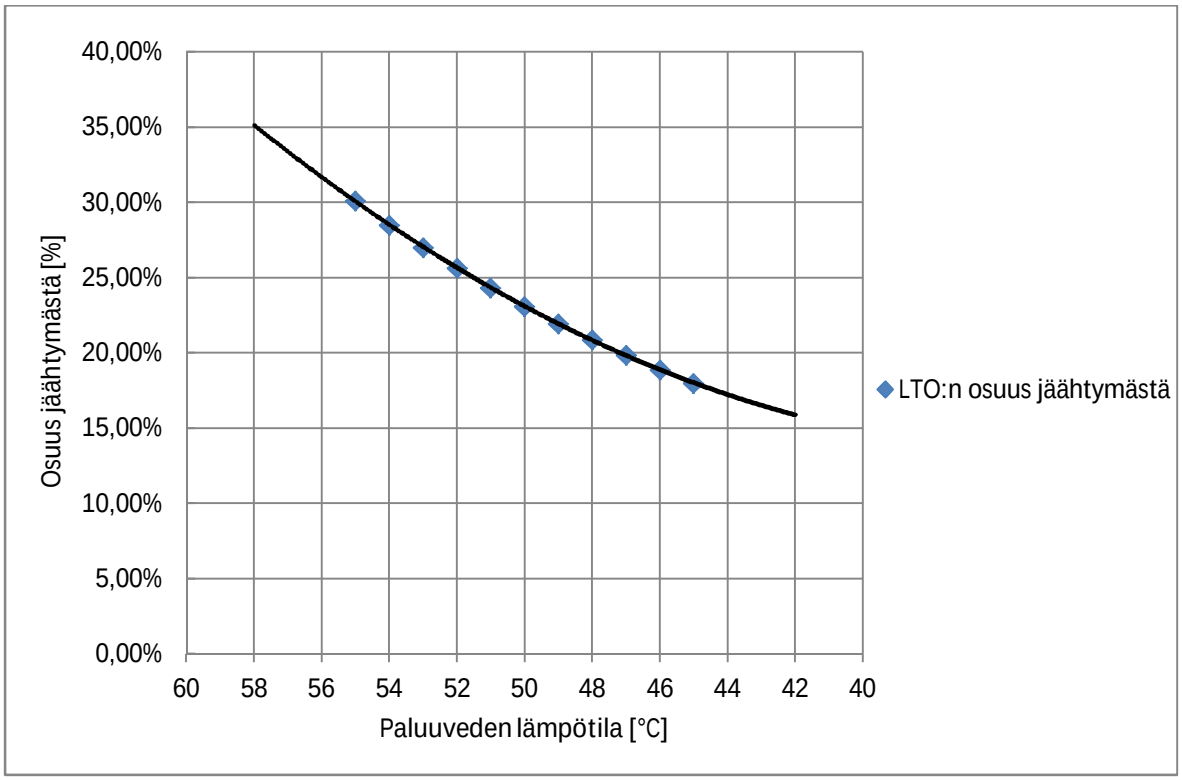


Kuva 17. Pielaveden kaukolämpöverkon putkityyppien pituudet ja keskimääräiset lämpöhäviötehot.

Pielavedellä lämpöhäviötehon pienentymä vuositasolla kaukolämmön paluuveden keskimääräisen lämpötilan laskiessa yhden asteen on 38 MWh/a, mikä tarkoittaa 0,76 %:n lämpöhäviöiden pienentymistä. Pielavedellä on vuonna 2010 ollut öljylämpökeskus päällä noin 38 % ajasta. Tällä öljylämpökeskuksen käyntiajalla saavutettaisiin 1490 €:n säästöä vuodessa, mikäli paluuveden keskimääräinen lämpötila laskisi yhden asteen. Lämpöhäviöistä saatavan jäähtymätermin suuruudeksi Pielavedellä saadaan 2,9 €/MWh.

7.2.3 Lämmön talteenotto

Savukaasuista lauhdutettavissa oleva kosteus astetta kohti pienenee savukaasujen jäähtyessä. Näin lämmöntalteenotosta saatavissa oleva lämpö paluuveden jäähdytettyä astetta kohti pienenee kaukolämmön paluuveden jäähtyessä. Näin lisäjäähtymästä saatava hyöty lämmöntalteenotolla on suurempi korkeammilla paluuveden lämpötiloilla. Kuvassa 18 on esitetty Pielaveden biolämpökeskuksen lämmöntalteenoton osuus lisäjäähtymästä paluuveden lämpötilan funktiona. Osuus kertoo sen lämpömäärän, joka saadaan LTO:sta, mikäli paluuvesi jäähtyy yhden asteen kyseiseen lämpötilaan. Kuva pätee tilanteelle, jossa savukaasujen kastepistelämpötila on alitettu. Esimerkiksi polttoaineiden keskimääräisellä kosteudella 50 % kastepistelämpötila on noin 65 °C.



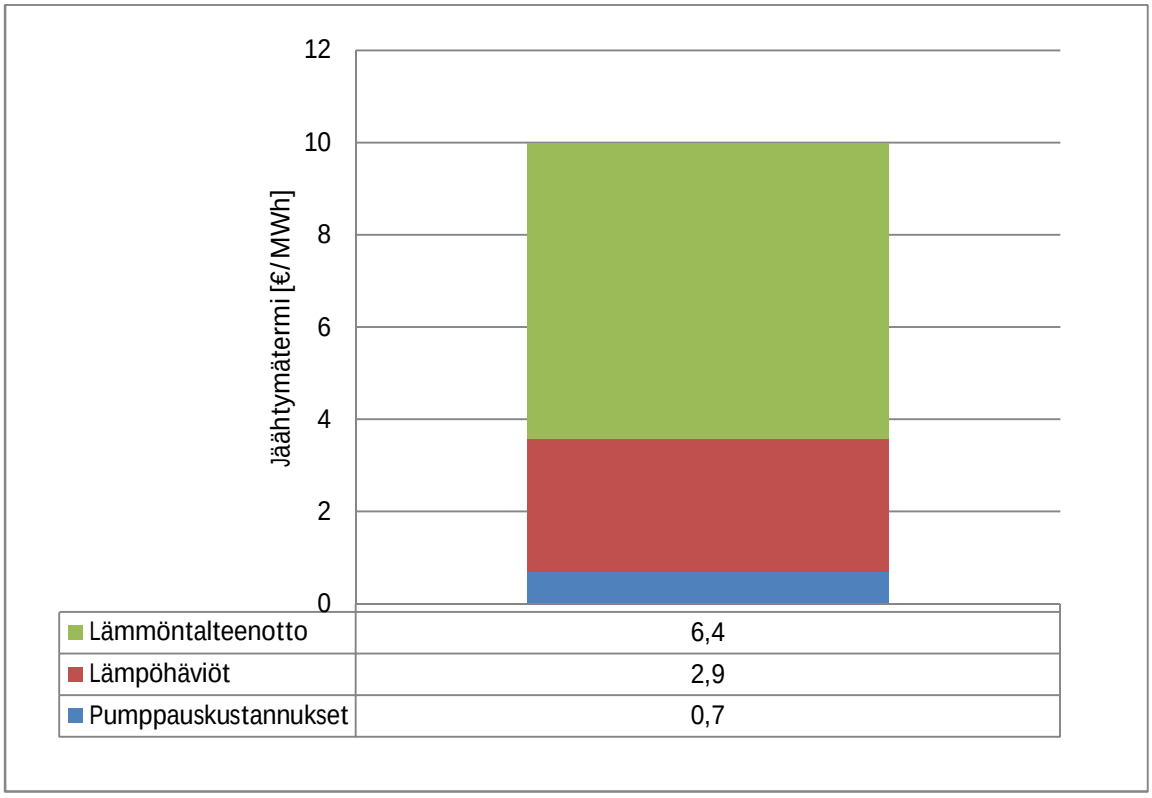
Kuva 18. LTO:sta saatavan lämmön osuus yhden asteen lisäjäähtymästä Pielaveden biolämpökeskuksella.

Paluuveden lämpötilan vuoden 2010 keskiarvo on Pielavedellä ollut 50 astetta. Mikäli paluulämpötilan vuosikeskiarvoa saataisiin alennettua yhdellä asteella, saataisiin lisäjäähtymästä ilmaiseksi LTO:sta 23,1 %. Tämä tarkoittaisi rahallista säästöä jäähtymää kohti 8,7 €/MWh, mikäli oletetaan lämmöntalteenoton avulla säästetyn polttoaineen olevan

35 % öljyä ja loput biopolttoainetta. Öljylämpökeskuksen ollessa käynnissä yhtä aikaa bion kanssa säästetty polttoaine on öljyä ja pelkän bion ollessa käynnissä säästetty polttoaine on taas biopolttoainetta. Lämmöntalteenotto ei kuitenkaan ole päällä ympäri vuoden lämpökeskuksen käyttökatkoksista johtuen ja näin tätä rahallista hyötyä ei saada koko vuoden ajalta. Jos oletetaan laitoksen savukaasupesurin olevan käytössä 6500 h vuodessa, saadaan jäähtymätermiksi 6,4 €/MWh.

7.2.4 Kokonaisvaikutus

Laskennan lopputuloksena saadaan Pielavedellä nykytasosta tapahtuvan lisäjäähtymän arvoksi 10 €/MWh. Suurin osa, 6,4 €/MWh, lisäjäähtymän rahallisesta hyödystä saadaan biolämpökeskuksen savukaasupesurin lämmöntalteenotosta. Lämpöhäviöiden pienentymisestä saadaan hyötyä 2,9 €/MWh ja pumppauskustannusten pienenemisestä 0,7 €/MWh. Nämä arvot eivät ole kuitenkaan muiden paikkakuntien tapaan täysin luotettavia monien oletusten takia. Tarkempien arvojen määrityksessä täytyisi olla käytettävissä tarkempia ja aukottomia mittauksia esimerkiksi kaukolämpöveden lämpötiloista sekä kaukolämpöveden pumppauksen sähkötehoista. Kuvassa 19 on esitetty jäähtymätermin suuruus ja sen osatekijät Pielavedellä.

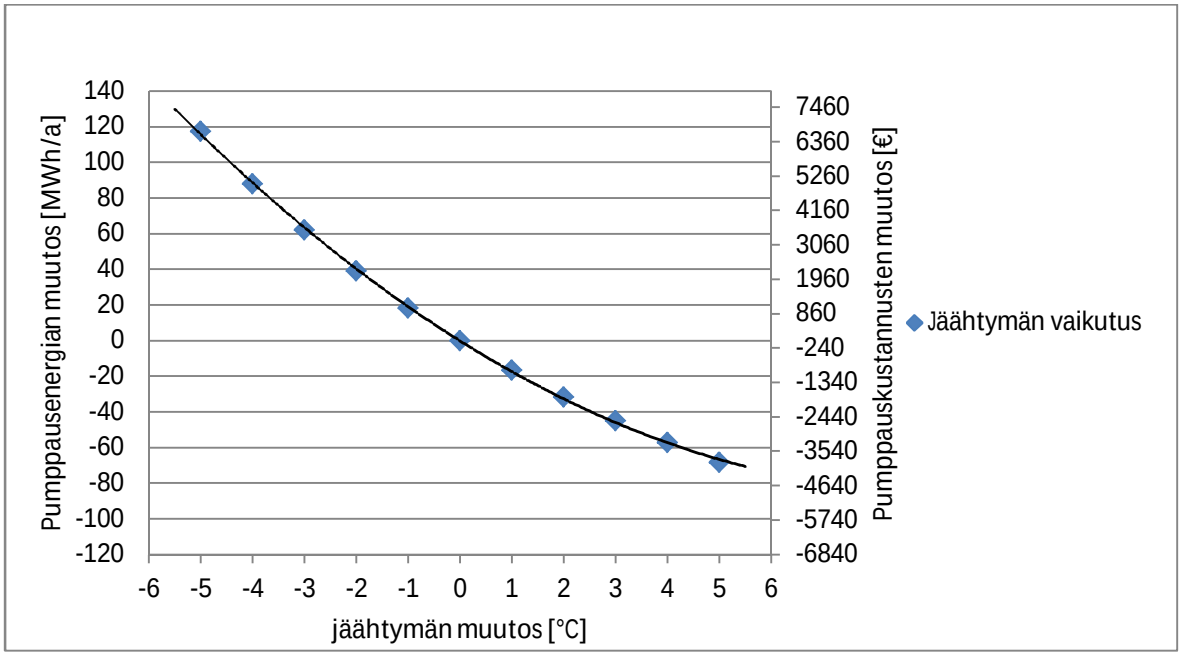


Kuva 19. Kokonaisjäähtymätermi Pielavedellä.

7.3 Suonenjoki

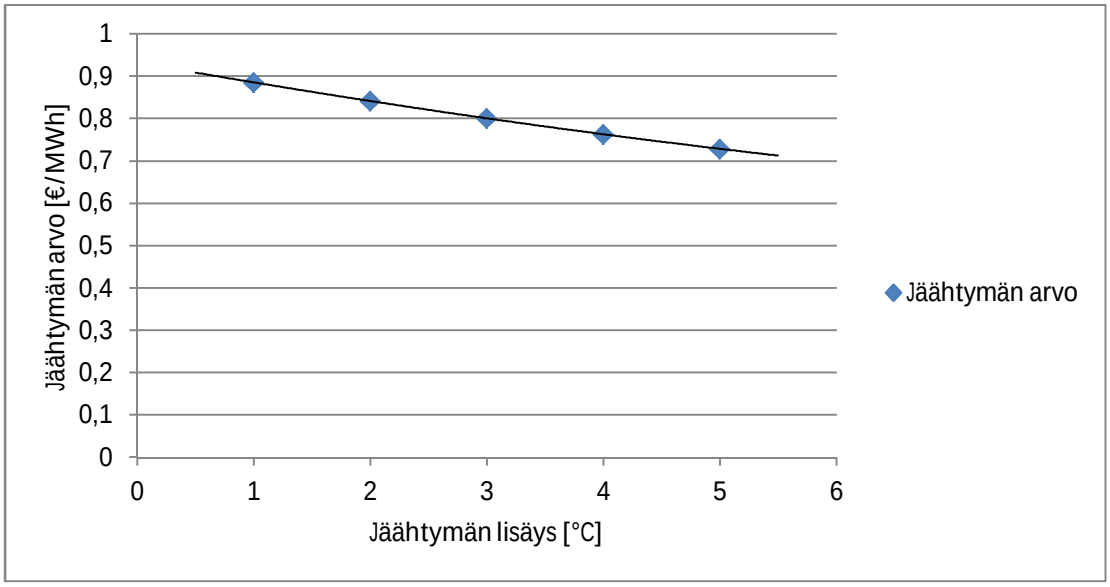
7.3.1 Pumppauskustannukset

Suonenjoki oli tarkasteltavista paikkakunnista ainoa, josta oli saatavissa kaukolämpöpumppujen sähkönkulutuksesta mittaustietoja. Näiden mittaustietojen perusteella laskettu kaukolämpöpumppujen vuosittainen pumppaussähkön kulutus vuonna 2010 on ollut noin 217 MWh. Laskennassa käytetään Suonenjoen keskimääräisenä kaukolämpöveden jäähtymänä 37 astetta. Laskennassa saatujen tulosten perusteella paluuveden lämpötilan alentaminen yhdellä asteella vähentäisi pumppaussähkön kulutusta Suonenjoella 8 % eli noin 17 MWh ja viiden asteen jäähtymän parantamisella saavutettaisiin jo 34 %:n eli 68 MWh:n säästö pumppaussähkön kulutuksessa. Näin yhden asteen jäähtymän parantamisella saatava rahallinen säästö olisi 943 €/a ja viiden asteen jäähtymän parantamisella 3880 €/a. Kaukolämpöveden jäähtymän paranemisen vaikutus Suonenjoella pumppaussähkön kulutukseen sekä pumppauskustannuksiin on esitetty kuvassa 20. Kuvassa negatiivinen jäähtymän muutos tarkoittaa jäähtymän huonontumista.



Kuva 20. Jäähtymän vaikutus kaukolämpöveden pumppaussähkön kulutukseen sekä pumppauskustannuksiin Suonenjoella.

Pumppauskustannuksista saatava säästö jäähdyttävää energiamäärää kohti eli jäähtymätermi on Suonenjoella jäähtymän parantuessa yhden asteen 0,88 €/MWh. Mikäli jäähtymä paranee viisi astetta nykytasosta, olisi jäähtymätermi 0,72 €/MWh. Näin pumppauskustannuksista muodostuvaksi jäähtymätermiksi valitaan 0,8 €/MWh. Pumppauskustannuksista saatava jäähtymän arvo on esitetty kuvassa 21.



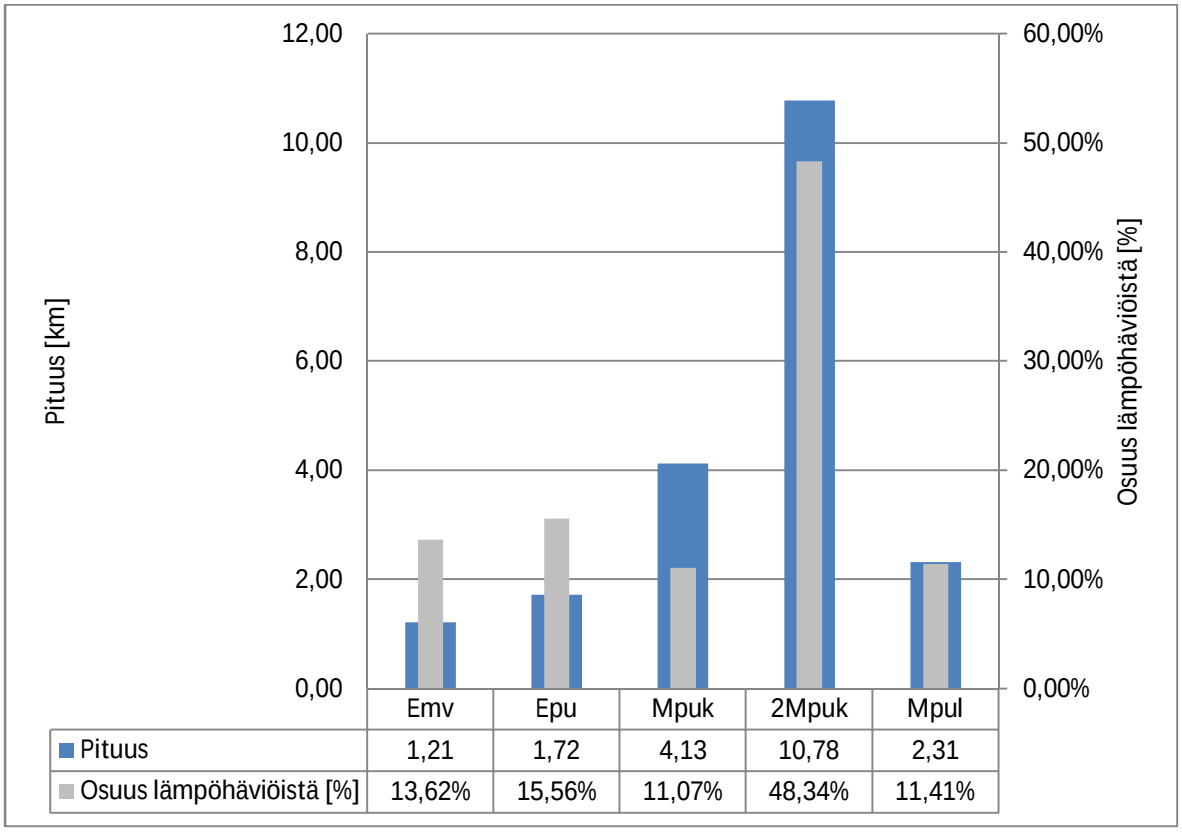
Kuva 21. Pumppauskustannuksista saatava jäähtymätermi Suonenjoella.

7.3.1 Lämpöhäviöt

Suonenjoella lämpökeskuksilta kaukolämpöverkkoon syötetty lämpömäärä mittausten mukaan on ollut 43 461 MWh ja tilastojen mukaan myyty kaukolämmön määrä on ollut 41 119 MWh. Näiden tilastojen mukaan Suonenjoen kaukolämpöverkon lämpöhäviöt ovat olleet vuonna 2010 vain 5,4 %, kun normaalisti Suonenjoen kokoisissa kaukolämpöverkoissa lämpöhäviöt ovat noin 10-15 %. Voidaankin olettaa että mittaukset tai tilastoidut lämpömäärät eivät ole täysin luotettavia. Näin laskennassa käytetään suoraan taulukkolaskentaohjelmaan luotua mallia Suonenjoen kaukolämpöverkoston lämpöhäviöistä. Laskennassa käytetään lähtötilanteen kaukolämpöveden keskimääräisenä menolämpötilana 87 astetta ja paluulämpötilana 50 astetta. Keskimääräisenä ulkolämpötilana käytetään 2,4 astetta, mikä on ilmatieteen laitokselta saatu Kuopion keskimääräinen lämpötila vuodelta 2010. Näiden lähtötietojen perusteella laskettu lämpöhäviö on vuonna 2010 ollut 5300 MWh, joka on 12,5 % tilastojen mukaan kaukolämpöverkkoon syötetystä lämpömäärästä.

Kuvassa 22 on esitetty Suonenjoen kaukolämpöverkon rakenne vuonna 2010 putkityypeittäin sekä putkityyppien aiheuttamat keskimääräiset lämpöhäviötehot. Kuvasta nähdään betonielementtikanavien aiheuttama suuri lämpöhäviöteho suhteessa niiden

pituuteen. Näin vanhojen betonielementtikanavien uusinnalla saavutetaan merkittäviä säästöjä kaukolämpöverkon lämpöhäviöissä.

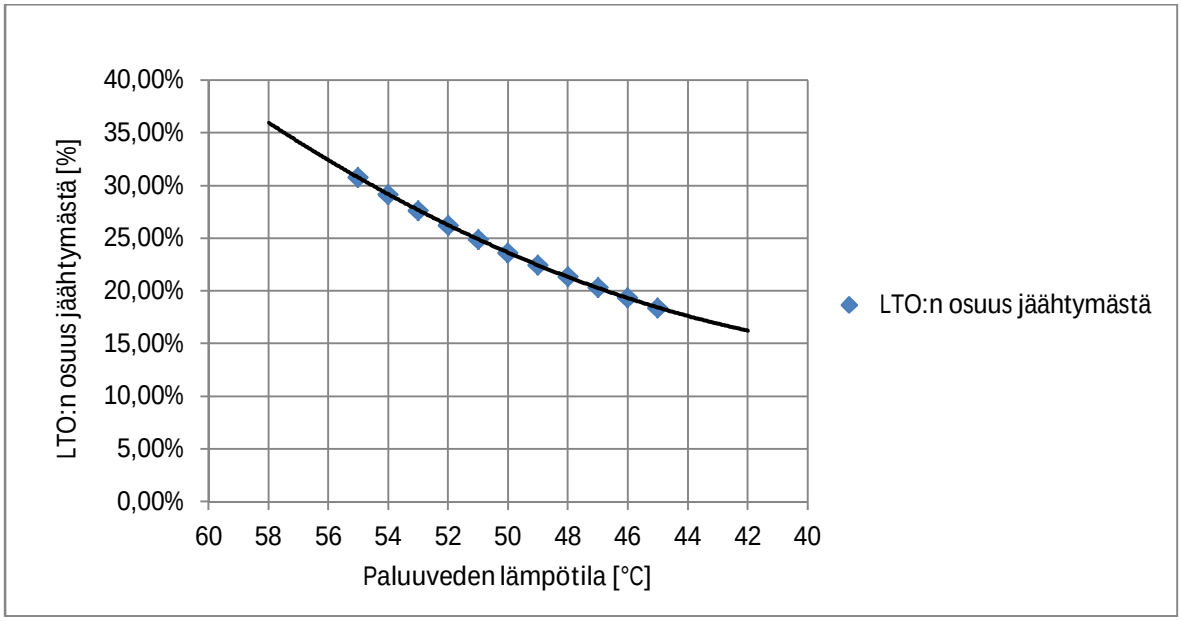


Kuva 22. Suonenjoen kaukolämpöverkon putkityyppien pituudet ja keskimääräiset lämpöhäviötehot.

Suonenjoella lämpöhäviötehon pienentymä kaukolämmön paluuveden jäähdytettyä astetta kohti on 4,1 kW/°C, mikä tarkoittaa 0,67 %:n lämpöhäviöiden pienentymistä. Vuositasolla yhden asteen jäähtymän parannus pienentää lämpöhäviöitä 36 MWh. Suonenjoella on vuonna 2010 ollut joko öljy- tai nestekaasulämpökeskus päällä noin 55 % ajasta. Uuden biolämpökeskuksen valmistumisen jälkeen öljy- tai nestekaasulämpökeskusten käyntiajat tulevat kuitenkin pienentymään. Laskennassa oletetaan öljy- ja nestekaasulämpökeskusten käyvän 40 % vuodesta. Näillä oletuksilla saavutettaisiin 1440 €:n säästöä vuodessa, mikäli paluuveden keskimääräinen lämpötila laskisi yhden asteen. Lämpöhäviöistä saatavan jäähtymätermin suuruudeksi Suonenjoella saadaan 1,5 €/MWh.

7.3.3 Lämmön talteenotto

Suonenjoella lämmöntalteenotosta saatavissa oleva lämpö poikkeaa hieman Pielaveden tapauksesta sen erilaisen polttoainesekoituksen takia. Kuvassa 23 on esitetty Suonenjoen uuden biolämpökeskuksen lämmöntalteenoton osuus lisäjäähtymästä paluuveden lämpötilan funktiona. Osuus kertoo sen lämpömäärän, joka saadaan LTO:sta, mikäli paluuvesi jäähtyy yhden asteen kyseiseen lämpötilaan. Laskennassa käytettiin Suonenjoen uuden biolämpökeskuksen polttoainesuhteena 50 % puuta ja 50 % turvetta. Kuva pätee tilanteelle, jossa savukaasujen kastepistelämpötila on alitettu. Esimerkiksi polttoaineiden keskimääräisellä kosteudella 50 % kastepistelämpötila on noin 65 °C.

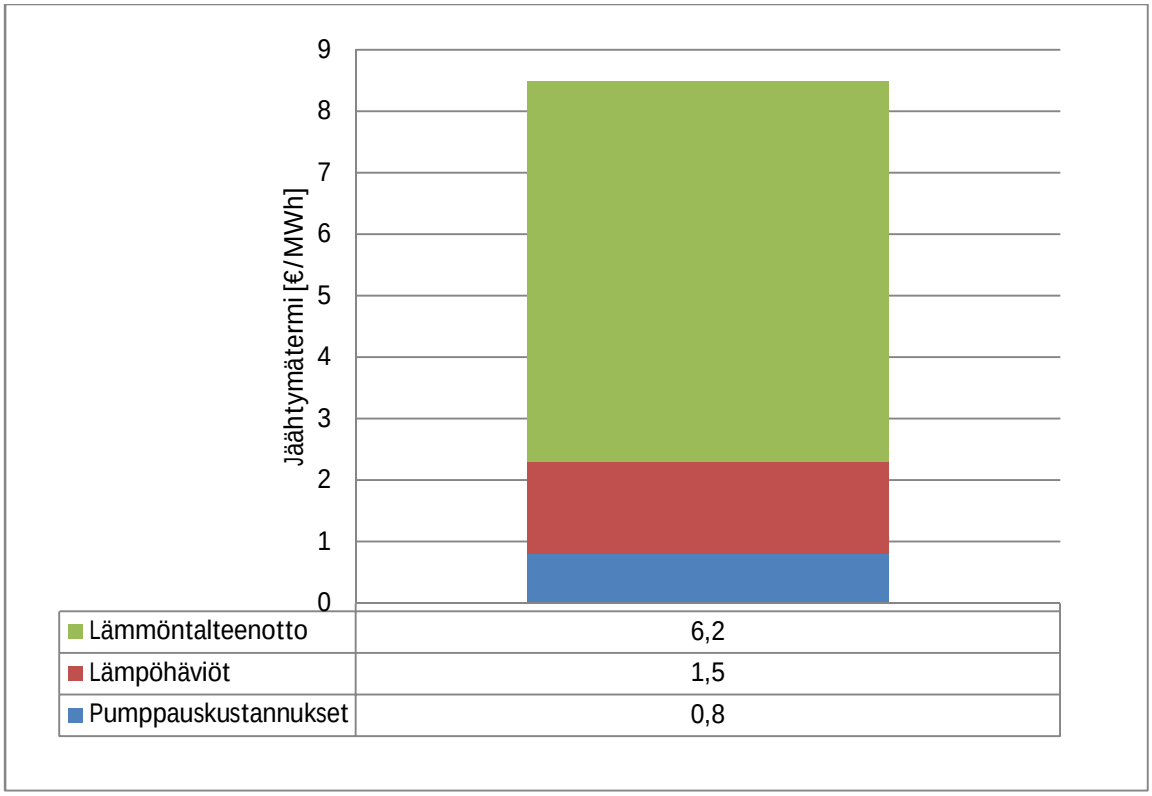


Kuva 23. LTO:sta saatavan lämmön osuus yhden asteen lisäjäähtymästä Suonenjoen uudella biolämpökeskuksella.

Paluuveden lämpötilan vuoden 2010 keskiarvo on Suonenjoella ollut noin 50 astetta. Mikäli paluulämpötilan vuosikeskiarvoa saataisiin alennettua yhdellä asteella, saataisiin lisäjäähtymästä ilmaiseksi LTO:sta 23,1 %. Tämä tarkoittaisi rahallista säästöä jäähtymää kohti 8,4 €/MWh, mikäli oletetaan lämmöntalteeoton avulla säästetyn polttoaineen olevan 30 % öljyä ja loput biopolttoainetta. Lämmöntalteenotto ei kuitenkaan ole päällä ympäri vuoden lämpökeskuksen käyttökatkoksista johtuen ja näin tätä rahallista hyötyä ei saada koko vuoden ajalta. Jos oletetaan savukaasupesurin olevan käytössä 6500 tuntia vuodessa, saadaan jäähtymätermiksi 6,2 €/MWh.

7.3.4 Kokonaisvaikutus

Laskennan lopputuloksena saadaan Suonenjoella nykytasosta tapahtuvan lisäjäähtymän arvoksi 8,5 €/MWh. Suurin osa, 6,2 €/MWh, lisäjäähtymän rahallisesta hyödystä saadaan uuden biolämpökeskuksen savukaasupesurin lämmöntalteenotosta. Lämpöhäviöiden pienentymisestä saadaan hyötyä 1,5 €/MWh ja pumppauskustannusten pienenemisestä 0,8 €/MWh. Nämä arvot eivät ole kuitenkaan täysin luotettavia monien oletusten takia. Tarkempien arvojen määrityksessä täytyisi olla käytettävissä tarkempia ja aukottomia mittauksia esimerkiksi kaukolämpöveden lämpötiloista sekä kaukolämpöveden pumppauksen sähkötehoista. Kuvassa 24 on esitetty jäähtymätermin suuruus ja sen osatekijät Suonenjoella.



Kuva 24. Kokonaisjäähtymätermi Suonenjoella.

8 PALUUVEDEN KÄYTTÖ LÄMMITYKSESSÄ

Työn tässä luvussa esitellään paluuveden käyttöä rakennusten lämmityksessä matalalämpötilakohteissa. Luvussa esitellään mahdolliset kytkentävaihtoehdot sekä niiden rakentamiskustannukset verrattuna normaaliin kaukolämpöliittymään. Lisäksi tarkastellaan kytkentämuutoksen kustannuksia ja mielekkyyttä jos vanha asiakas vaihtaisi normaalista kaukolämmöstä paluuvesilämmitykseen.

8.1 Yleistä

Kaukolämmön paluuveden käytön järkevyys lämmityksessä perustuu sen tehokkaaseen kaukolämmön paluulämpötilaa alentavaan vaikutukseen. Paluuveden lisäjäähdytyksellä taas saavutetaan luvussa 7 esitettyjä säästöjä lämmöntuotannossa. Paluuveden käyttöä voitaisiin harkita varsinkin niissä kohteissa, joissa lämmitysratkaisuna toimii matalassa lämpötilassa toimiva järjestelmä. Tällainen järjestelmä on esimerkiksi lattialämmitys, jonka kiertonesteen maksimilämpötila on yleensä noin 35 °C. Tälle lämpötilatasolle kaukolämmön paluulämpötila, joka on Savon Voimalla keskimäärin 50 °C, riittää hyvin. Ainoastaan käyttöveden lämmitykseen määräysten mukaiseen lämpötilaan, joka on 58 °C, paluuveden lämpötilatasot eivät riitä, joten lopullinen käyttöveden lämpötilan priimaus täytyisi hoitaa lisälämmönlähteellä. Eri vaihtoehtoja lämpötilan priimaukseen on esitetty luvussa 8.3 kytkentävaihtoehtojen esittelyjen yhteydessä.

Juuri matalalämpötilakohteissa erilaiset lämpöpumppuratkaisut ovat nousseet vakaviksi kilpailijoiksi kaukolämmön rinnalle. Erilaisten lämpöpumppuratkaisuiden lämpökerroin (COP), eli suhdeluku joka kertoo tuotetun lämmön ja tarvittavan sähkön suhteen, on sitä korkeampi, mitä matalampaa lämpöä lämpöpumpulla tarvitsee tuottaa. Yleensä lämpöpumpun lämpökerroin on tasolla 1-3 (Pöyry 2010, 3). Tästä johtuen juuri matalalämpötilakohteissa lämpöpumppu on lämmitysratkaisuna varteenotettava vaihtoehto kaukolämmön rinnalla.

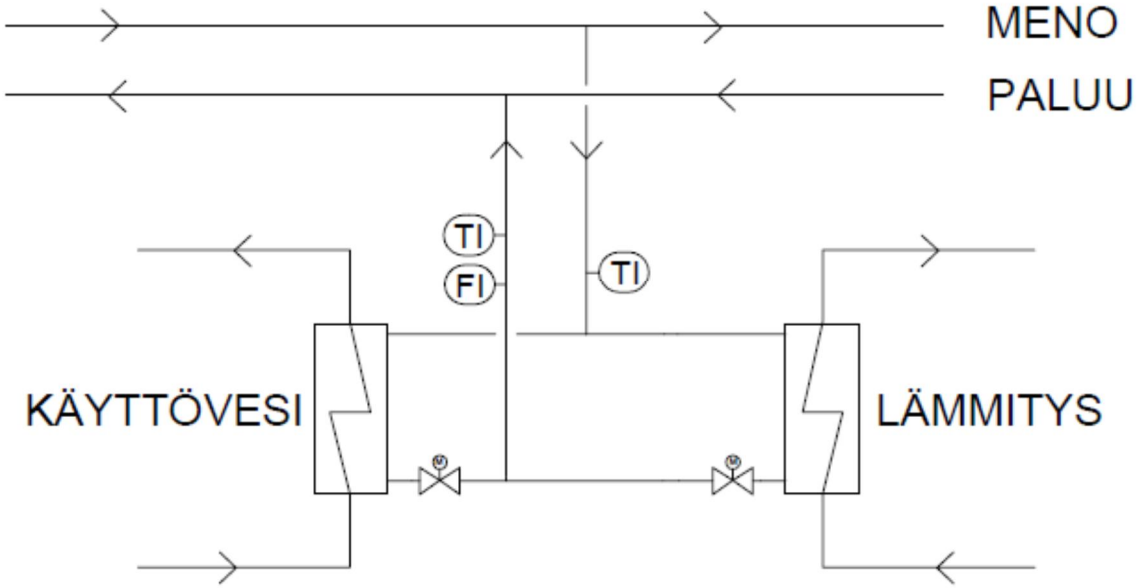
Lämpöasiakkaan kannalta on yhdentekevää missä lämpötilassa lämpö hänelle toimitetaan, kunhan käyttövesi on riittävän kuumaa ja huonelämpötilat pysyvät riittävän lämpiminä.

Näin matalalämpötilakohteissa normaalin kaukolämmön sijasta voitaisiin hyvin käyttää kaukolämmön paluuvettä rakennusten lämmityksessä. Paluuveden käytön houkuttelevuutta ja kilpailukykyä lämpöpumppuja vastaan voitaisiin lisätä muodostamalla kuluttajan jäähtymän huomioiva myyntitariffi. Paluuveden käyttäjälle hyvitettäisiin lämpölaskussa erillinen jäähtymähyvitys. Jäähtymän huomioivaa myyntitariffia käsitellään tarkemmin luvussa 9.

Käytettäessä paluuvettä rakennusten lämmityksessä, täytyy paluuveden kierrätykseen asiakaslaitteiden läpi käyttää pumppua, koska normaalin kaukolämpökytkennän paine-ero meno- ja paluuputken välillä puuttuu. Tämä pumppaus aiheuttaa luonnollisesti sähkönkulutusta, mutta sen osuus on hyvin pieni tarkasteltaessa lämmön kokonaiskustannuksia.

8.3 Kytkentävaihtoehdot

Tässä luvussa esitellään eri kytkentävaihtoehdot paluuveden käytölle rakennusten lämmityksessä. Kytkentävaihtoehtojen 1, 3 ja 4 malleina on käytetty lähteen Pöyry 2010 esittämiä kytkentävaihtoehtoja. Näihin kytkentöihin on tehty tarvittavia muutoksia niiden toiminnan varmistamiseksi ja yksinkertaistamiseksi. Kytkentävaihtoehdot perustuvat kaukolämmön peruskytkentään 2, joka on esitetty kuvassa 25.



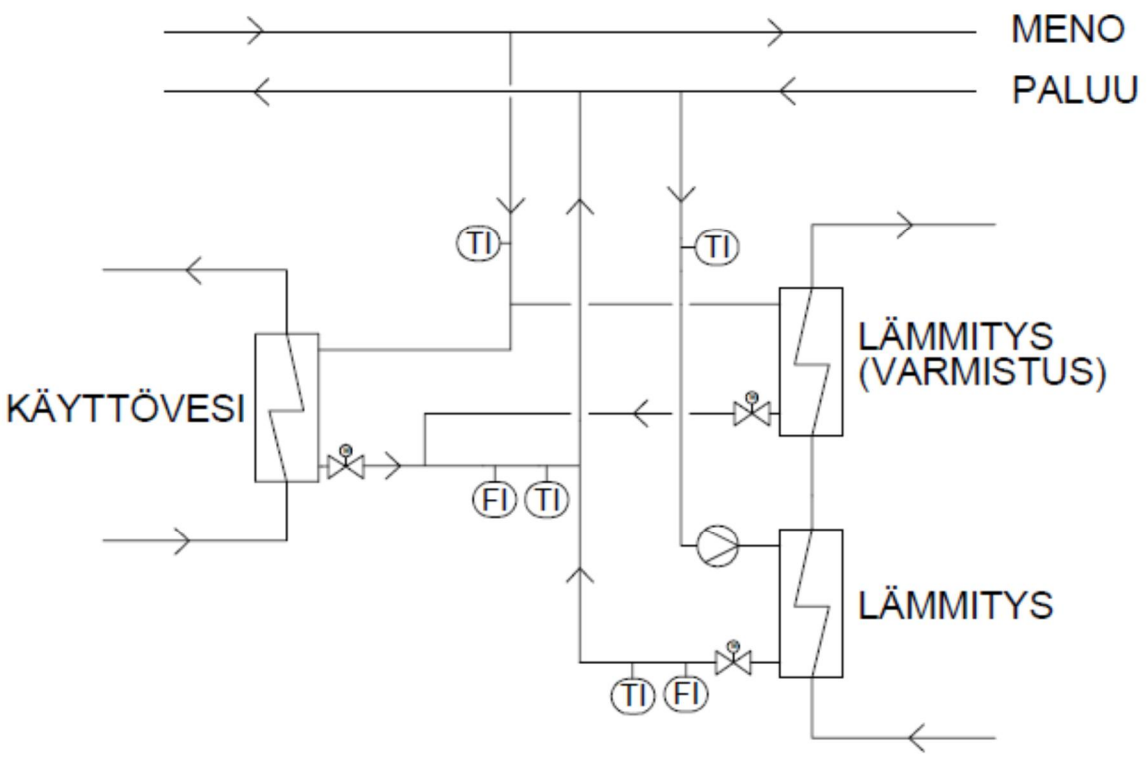
Kuva 25. Kaukolämmön peruskytkennän 2 periaate.

8.2.1 Kytkentävaihtoehto 1

Kytkentävaihtoehdossa 1 paluuveden käytölle lämmityksessä lämpimän käyttöveden lämmitys toteutetaan normaalin kytkennän tapaan kaukolämmön menovedellä. Itse kiinteistön lämmitys sen sijaan hoidetaan kaukolämmön paluuvedellä. Näin kiinteistöön tulee rakentaa kaksi tulojohtoa, yksi kaukolämpöverkon menoputkesta sekä yksi paluuputkesta. Kaukolämpöveden paluuvirtaus sen sijaan hoidetaan yhdellä johdolla paluuputkeen. Paluuveden kierrätys lämmityksen lämmönsiirtimen läpi tapahtuu kiertopumpulla. Kiertopumpun säätö tapahtuu taajuusmuuttajalla, joka pitää pumpun yli vakiopaine-eroa, säätöventtiilin säätäessä virtausta. Lähteen Pöyry 2010 mukaan kaukolämmön paluuveden virtaus lämmönsiirtimen läpi voitaisiin hoitaa taajuusmuuntajasäädetyllä pumpulla mutta lähteen Hintsala 2011 mukaan paremman säädön saavuttamiseksi on asennettava säätöventtiili. Lisäksi paluuvettä saattaa kiertää paluuvesilämmityslenkissä jatkuvasti ilman pumppuakin, joten virtauksen pysäyttämiseksi tarvitaan säätöventtiili.

Kytkentävaihtoehto 1:ssä lämmönsaanti lämmityspuolelle on helppo varmistaa käyttöveden lämmitykseen menevästä menojohdosta. Lämmitykseen asennetaan toinen lämmönsiirrin jonka ensiöpuolen vetenä virtaa normaali tulovesi. Tässä kytkentävaihdolle

on asennettava kaksi mittauskeskusta, jotta käyttöveden lämmityksen ja lämmityspuolen varmistuksen käyttämä menoveden lämpö ja lämmityksen käyttämä paluuveden lämpö voidaan mitata ja laskuttaa erikseen. Kytkentävaihtoehdon 1 periaate on esitetty kuvassa 26.

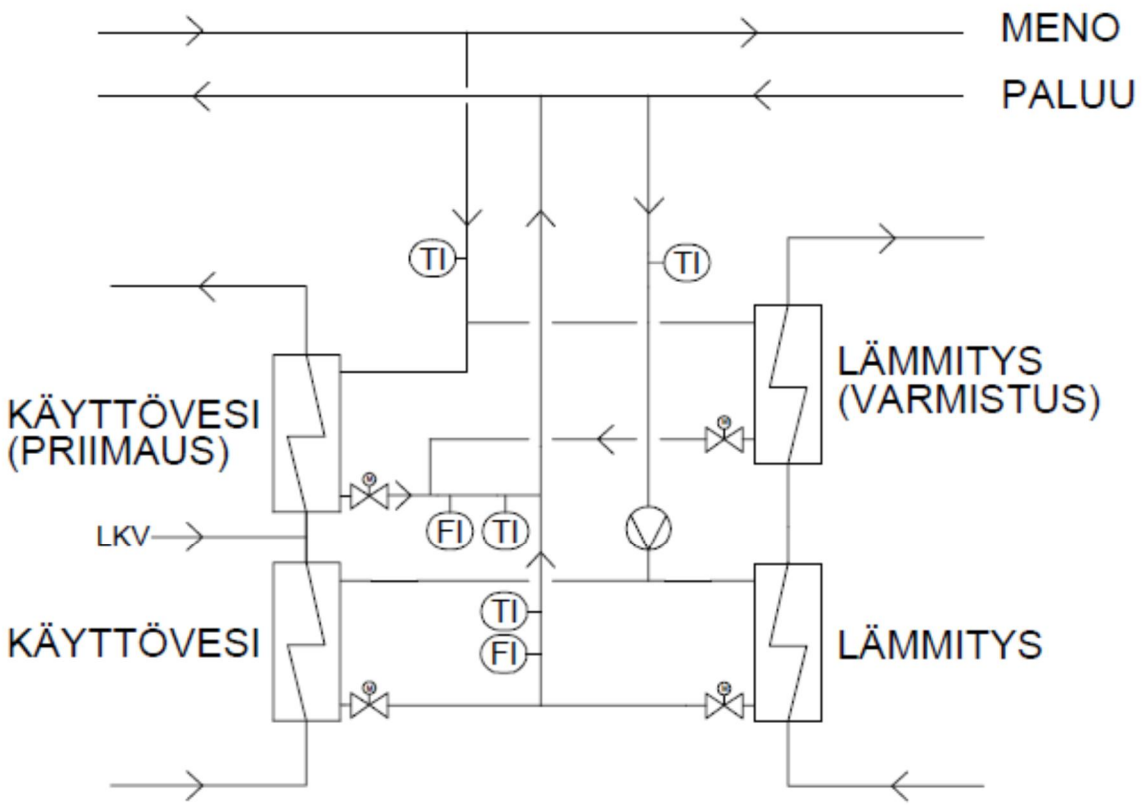


Kuva 26. Kytkentävaihtoehto 1.

Lämmityksen varmistuksen säätöventtiilin toimintaan löytyy jo valmista tekniikkaa. Lämmityksen molemmat säätöventtiilit kytketään samaan säätökeskukseen. Paluuveden säätöventtiili on ajojärjestyksessä ensimmäisenä ja mikäli tämä säätöventtiili on täysin auki eikä riittävää lämpötilaa toisiopiirin menovedelle saavuteta, lähtee tulovedellä toimivan lämmönsiirtimen säätöventtiili avautumaan.

8.2.2 Kytkentävaihtoehto 2

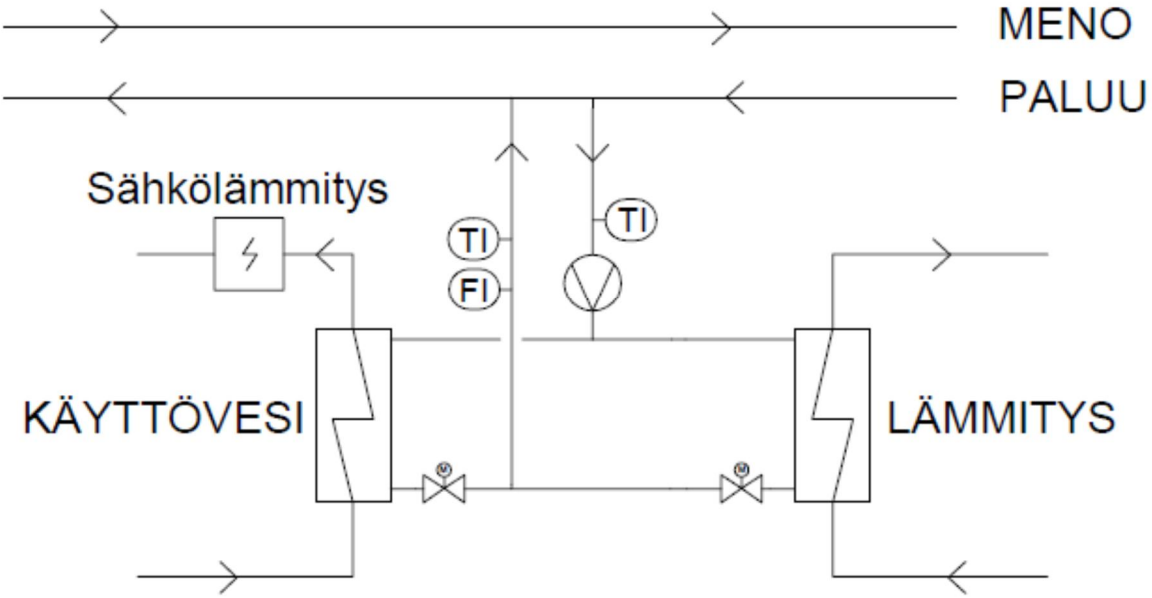
Kytkentävaihtoehdon 2 lämmityspuoli toimii samalla tavalla kuin kytkentävaihtoehto 1:ssä. Sen sijaan käyttöveden lämmitys hoidetaan kytkentävaihtoehto 1:stä poiketen samalla periaatteella kuin lämmityspuolen lämmitys eli käyttöveden lämmityksessä on myös kaksi lämmönsiirrintä. Toinen lämmönsiirrin on paluuvedelle ja toinen normaalille tulovedelle. Paluuvedellä lämmitetään käyttövesi mahdollisimman korkeaan lämpötilaan. Käytännössä kaukolämpöverkon paluuvesi on yleisesti noin 50 – 55 astetta, joten sillä ei vielä voida saavuttaa käyttöveden lämpötilan ohjearvoa, joka on 58 °C. Paluuvesilämmönsiirtimen jälkeen käyttövesi priimataan haluttuun lämpötilaan tulovedellä. Näiden lämmönsiirrinten säätöventtiilit on kytketty myös samaan säätökeskukseen ja niiden säätö tapahtuu samalla periaatteella kuin lämmityspuolella eli paluuvesilämmönsiirtimen säätöventtiili on ajojärjestyksessä ensimmäisenä. Savon Voimalla on myös normaalista poikkeavia paikkakuntia, joiden kaukolämpöverkon paluuvesi on normaalista kuumempaa erikoisasiakkaiden takia. Esimerkiksi Lapinlahdella voi kaukolämpöverkon paluuvesi olla kesäisin jopa yli 70 asteista, joten paluuveden lämpötilataso riittäisi pelkästään käyttöveden lämmitykseen haluttuun lämpötilaan. Kytkentävaihtoehdon 2 lämmönjakokeskuksen kytkentäkuva on esitetty kuvassa 27.



Kuva 27. Kytkentävaihtoehto 2.

8.2.3 Kytkentävaihtoehto 3

Kytkentävaihtoehdossa 3 käytetään myös käyttöveden sekä lämmityspiirin lämmityksessä kaukolämmön paluuvettä. Tässä kytkentävaihtoehdossa käyttöveden lämpötila priimataan sähköllä haluttuun lämpötilaan. Lisäksi lämmityspiirin lämmönsaantia ei varmisteta normaalilla tulovedellä. Näin tässä kytkentävaihtoehdossa tarvitaan vain kaksi liittymisputkea kaukolämpöverkosta. Yksi putki toimii paluuveden tuloputkena ja yksi putki paluuveden paluuputkena. Lisäksi lämmönmittaukseen riittää yksi mittauskeskus, koska lämmönjakokeskus käyttää pelkästään paluuvesilämpöä.. Kytkentävaihtoehdon 3 periaate on esitetty kuvassa 28.



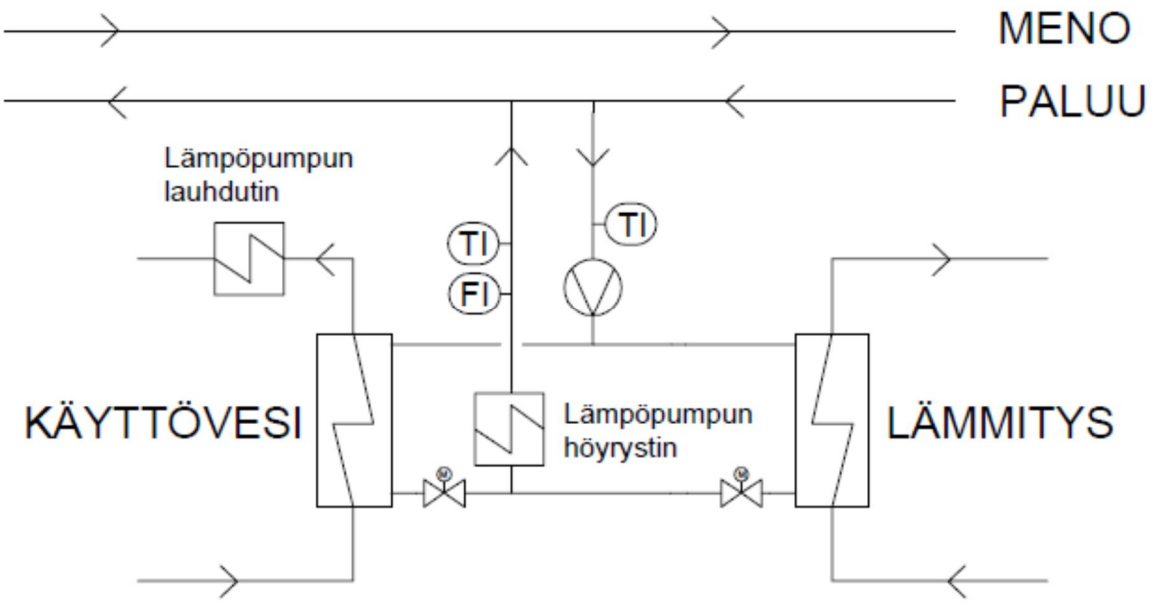
Kuva 28. Kytkentävaihtoehdon 3 periaate.

Lämpimän käyttöveden kierron paluuvesi on yleisesti yli 50 asteista eikä sitä kannata enää yrittää lämmittää kaukolämmön paluuvedellä. Lämpimän käyttöveden kierto voitaisiin yhdistää näin lämpimän käyttöveden menoputkeen paluuvesilämmönsiirtimen ja sähkölämmityksen väliin. Kaukolämmön paluuvesi on Savon Voimalla keskimäärin noin 50 asteista ja näin paluuvesi voisi jopa jäähdyttää lämpimän käyttöveden kierrosta palaavaa vettä. Näin lämpimän käyttöveden kierron vesi lämmitettäisiin takaisin tarvittavaan lämpötilaan ainoastaan sähkön avulla.

Käyttöveden lämmityksen sähkövastuksen mitoitus aiheuttaa ongelmia tässä kytkentävaihtoehdossa. Esimerkiksi kerrostaloon, jonka käyttöveden mitoitusvirtaama on 1,3 kg/s, tarvittaisiin 43 kW:n vastus käyttöveden 8 asteen lämpötilan priimaukseen. Tällöin tarvittavien vastusten koot kasvavat kohtuuttoman suuriksi ja priimaukseen tarvittaisiin oma varaava sähkökattila tai varaaja. Tämä taas lisää merkittävästi investointikustannuksia. Lisäksi tämän kytkentävaihtoehdon mielekkyyttä vähentää se, ettei lämmityksen lämmönsaantia ole varmistettu normaalilla tulovedellä.

8.2.4 Kytkentävaihtoehto 4

Kytkentävaihtoehto 4:sen periaate on muuten sama kuin kytkentävaihtoehto 3:sen, mutta käyttöveden lopullinen lämmittäminen halutulle tasolle tapahtuu sähkövastuksen sijaan lämpöpumpulla. Lämpöpumpun höyrystin on sijoitettu lämmityksen ja käyttöveden lämmityksen yhteiseen kaukolämmön paluulinjaan ja lämpöpumpun lauhdutin kaukolämmönsiirtimen jälkeiseen käyttövesilinjaan. Myös tässä kytkennässä lämpimän käyttöveden kierto yhdistettäisiin paluuvesilämmönsiirtimen ja lämpöpumpun lauhduttimen väliin. Kytkentävaihtoehdon 4 periaate on esitetty kuvassa 29.



Kuva 29. Kytkentävaihtoehdon 4 periaate.

Myös tämän kytkentävaihtoehdon mielekkyyttä vähentää kytkentävaihtoehto 3:sen tapaan lämpöpumpun tuoma ylimääräinen tekniikka lämmönjakokeskukseen. Myös lämmityspiirin lämmönsaannin varmistamattomuus normaalilla tulovedellä vähentää tämän vaihtoehdon järkevyyttä.

8.2.5 Kytkentävaihtoehtojen paremmuus

Kytkentävaihtoehdoista vaihtoehto 1 on järkevin. Sen kytkentä säilyy riittävän yksinkertaisena, eikä se vaadi ylimääräistä tekniikkaa lämpimän käyttöveden priimaukseen. Erillisen lämpöpumpun tai sähkökattilan asennus lämpimän käyttöveden lämpötilan priimaukseen ei ole mielekästä. Nämä kasvattaisivat investointikustannuksia ja lisäisivät lämmönjakokeskuksen huollontarvetta. Myös kytkentävaihtoehto 2 on energiatehokkuuden kannalta järkevä, mutta ylimääräisen lämmönsiirtimen kustannukset tekevät normaalissa lämmönkäyttöpaikassa siitä kannattamattoman. Lämmönkäyttöpaikassa, jossa lämpimän käyttöveden tarve on suurta, voisi kytkentävaihtoehto 2 olla kannattava. Verrattaessa eri kytkentävaihtoehtojen taloudellisuutta, on kytkentävaihtoehto 1 kokonaiskustannuksiltaan halvin (Pöyry 2010, 25). Jatkossa tässä työssä tehtävissä laskelmissa tarkastellaankin pääasiassa kytkentävaihtoehto 1:stä, mutta työssä määritetään kannattavuuden reunaehdot myös kytkentävaihtoehdolle 2.

8.3 Ongelmat

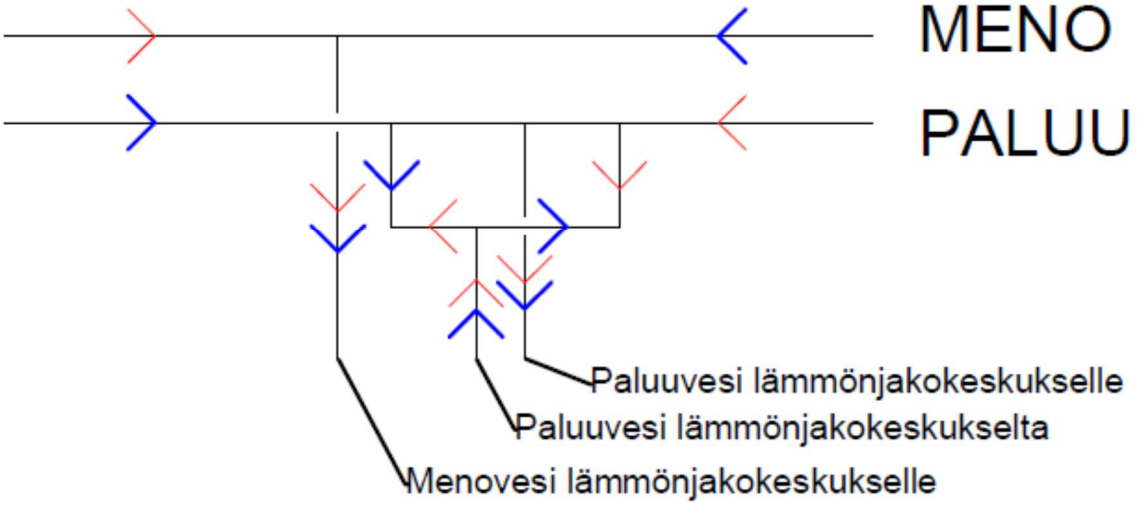
Kaukolämmön paluuveden käyttöön rakennusten lämmityksessä liittyy monia ongelmia, jotka täytyy ottaa huomioon liitettäessä asiakasta paluuvesilämmitykseen. Asiakkaan tulee sijaita verkossa sellaisessa kohdassa, jotta paluuveden virtaus on aina riittävän suuri tarvittavan lämmön saamiseksi. Ongelmallisimpia paikkoja virtauksen suhteet ovat kaukolämpöverkoston silmukat ja latvaosat. Virtaukset tulisi tutkia mallinnuksen avulla aina harkittaessa asiakkaan liittämistä paluuvesilämmitykseen. Savon Voimalla tämä mallinnus voidaan tehdä vuoden 2012 alusta lähtien Grades Heating – kaukolämpöverkkojen virtauslaskentaohjelman avulla, johon on mallinnettu kaikki Savon Voiman kaukolämpöverkot. Epävarmoissa kohdissa lämmönsaanti tulisi varmistaa esimerkiksi kaukolämmön menoputkesta, kuten kytkentävaihtoehdoissa 1 ja 2 tehdään. Suurimmat ongelmat aiheutuvat kesäöinä, jolloin kaukolämmön kulutus on pientä ja paluuvettä lämmitykseen käyttävä asiakas vaatii suuren tehon kaukolämpötehon. Talvella vaaditaan paluuvedeltä suurimmat virtaukset, mutta tällöin kaukolämmön kulutus on luonnollisesti suurta ja näin myös paluuveden virtaukset ovat suuria kaukolämpöverkon

lähes joka kohdassa lukuun ottamatta aivan verkoston latvaosia ja silmukkajohtojen keskikohtia.

Mahdollisia kytkentävaihtoehtoja mietittäessä ongelmia aiheuttaa myös kaukolämpöverkon silmukkajohtojen virtaussuunta. Hyödynnettäessä kaukolämmön paluuvettä lämmityksessä liitetään runkojohdon paluuputkeen kaksi putkea, joista toinen toimii paluuveden tulojohtona kiinteistöön ja toinen paluujohtona kiinteistöstä kaukolämpöverkkoon. Näistä johdoista tulojohdon täytyy sijaita kaukolämpöveden virtaussuunnassa ensimmäisenä. Mikäli paluujohto kiinteistöstä sijaitsisi virtaussuunnassa ensimmäisenä, virtaisi samaa kaukolämmön paluuvettä, jota jo kerran on virrannut kiinteistön laitteiden läpi, takaisin tuloputken suulle, josta se imeytyisi jälleen kiinteistön kaukolämpölaitteisiin. Näin syntyisi niin sanottu ”hullun kierto”, minkä seurauksena kiinteistöön virtaava kaukolämmön paluuvesi ei mahdollisesti olisi riittävän lämmintä kiinteistön lämmöntarpeen tyydyttämiseksi. Kaukolämpöveden virtaussuunta voi vaihdella silmukkajohdoissa, joissa kaukolämpövettä syötetään silmukan molemmista päistä. Virtaussuunta voi vaihdella luonnollisista syistä asiakkaan sijaitessa lähellä silmukkajohdon sitä pistettä, jossa silmukkajohdon molemmista päistä syötettävät virtaukset kohtaavat. Virtaussuunta voi myös vaihtua lähellä silmukkajohdon päitä siinä tapauksessa, jossa virtaus estetään silmukkajohdon toisesta päästä sulkuventtiilien avulla esimerkiksi kaukolämpöverkoston huolto tai korjaustoimenpiteiden yhteydessä. Virtauksen suunta voi myös vaihdella verkoissa, joissa lämmöntuotantolaitoksia sijaitsee verkon molemmissa päissä.

Tämä virtaussuunnan vaihtelu voidaan ratkaista tai vaikutusta voidaan ainakin pienentää kytkemällä kiinteistön paluuvesiputki kahteen eri kohtaan kaukolämpöverkon paluuputkeen. Nämä kytkentäkohdat sijaitsevat molemmin puolin paluuveden ottojohdon kytkentäkohtaa. Näin paluuvesi virtaa automaattisesti oikealle puolelle paluuveden ottokohtaa. Näin voidaan ehkäistä ”hullun kierron” syntyminen. Tämä erikoiskytkentä on esitetty kuvassa 30. Kuvassa eriväriset nuolet kuvaavat virtaukset eri paluuvesivirtauksen suunnilla. Mahdollista tässä kytkennässä on se, että paluuvesivirtaus jakaantuu molempiin paluupisteisiin. Näin osa paluuvedestä joutuisi hullunkiertoon, mutta vaikutus vähenisi vain osan paluuveden paluuvedestä virratessa takaisin asiakkaan laitteisiin. Liittämällä paluuputket hieman viistosti verkon paluuputkeen saadaan virtaussuunnan vaihtumisen

vaikutusta tehostettua. Viistosti liittäminen ei onnistu nykyisillä poraventtiileillä, jotka eivät vaadi runkoputken tyhjentämistä. Näin viistosti liittäminen täytyisi tehdä vanhalla hitsausmenetelmällä, joka vaatii runkoputken tyhjentämisen liitoskohdalta.



Kuva 30. Kaukolämpöverkon virtaussuunnan huomioiva kytkentä kaukolämpöverkkoon.

Lisäksi jos runkojohdon virtaus on huomattavasti suurempi kuin talojohdon paluuveden virtaus, ei syntyvällä hullunkierrolla ole suurta vaikutusta, koska paluuvesi sekoittuu tehokkaasti runkojohdon veteen. Tässä tilanteessa erikoiskytkentä kaukolämpöverkkoon voitaisiin jättää tekemättä eikä ylimääräisiä lisäkustannuksia aiheutuisi liittymälle.

Paluuvettä hyödyntäviä kaukolämpöasiakkaita ei myöskään voida liittää liikaa samaan verkoston haaraan. Kaukolämmön paluuvesi jäähtyy aina lisää osan paluuvettä virratessa asiakkaan laitteiden kautta ja sekoittuessa jälleen muuhun kaukolämpöveden paluuvirtaukseen. Myös tämän ongelman selvittäminen vaatii kaukolämpöverkon mallintamista, jotta virtaukset eri haaroissa voidaan selvittää. Virtausten avulla voidaan taas selvittää lämpömäärä, joka paluuvedestä on tehokkaasti otettavissa niin, että jokaisen paluuvettä käyttävän kaukolämpöasiakkaan lämmöntarve tulisi tyydytettyä.

9 JÄÄHDYTYKSESTÄ PALKITSEVA TARIFFI

Savon Voiman tämänhetkinen kaukolämpötariffi koostuu liittymismaksusta, perusmaksusta ja energiamaksusta. Liittymismaksun asiakas maksaa kaukolämpöön liittymisen yhteydessä Perusmaksua asiakas maksaa tilaustehonsa mukaan ja energiamaksua käyttämänsä lämpöenergian mukaan. Jotta kaukolämmön paluuveden käyttö olisi asiakkaan kannalta järkevää, tulisi hänen saada hyvitystä käyttämästään paluuvesilämmöstä. Tässä luvussa on käsitelty kuinka paremmasta jäähtymästä palkitseminen sisällytettäisiin kaukolämpötariffiin.

9.1 Jäähtymähyvitys

Kaukolämmön paluuvettä lämmityksessä käyttävälle kaukolämpöasiakkaalle hyvitettäisiin tämän aiheuttama jäähtymä paluuveteen energiamaksun yhteydessä. Asiakkaalle myytävä paluuvesienergia olisi jäähtymähyvityksen verran halvempi normaaliin kaukolämpöenergiaan verrattuna. Luvussa 8.3 esitellyistä kytkentävaihtoehdoista järkevin vaihtoehto paluuveden käytölle on kytkentävaihtoehto 1. Tässä kytkentävaihtoehdossa asiakas käyttää normaalia menoveden lämpöä käyttöveden lämmitykseen sekä varmistaakseen lämmönsaannin lämmitykseen. Tämä lämpöenergia sekä lämmityksen varmistuksen käyttämä lämpö mitataan erikseen ja laskutetaan normaalin kaukolämmön energiamaksun mukaan. Paluuvedestä lämmitykseen otettu lämpöenergia mitattaisiin taas erikseen ja laskutettaisiin jäähtymähyvityksen verran pienemmällä energiamaksulla.

Luvussa 7 laskettua jäähtymähyötyä paikkakunnilla ei voida vähentää suoraan asiakkaan paluuvesienergian hinnasta. Paluuvesienergian käytön ajankohta vaikuttaa todelliseen hyötyyn jota saadaan asiakkaan aiheuttamasta paremmasta paluuveden jäähtymästä ja näin tämä vaihtelu on otettava huomioon asiakkaalle myönnettävässä jäähtymähyvityksessä. Esimerkiksi asiakkaan käyttämästä paluuvesienergiasta ei luonnollisesti saada savukaasupesurin hyötyä jos pesuri ei ole päällä. Asiakas käyttää kuitenkin paluuvesienergiaa kytkentävaihtoehto 1:ssä talvella, jolloin Suonenjoen ja Pielaveden biolämpökeskukset ja niiden pesurit ovat päällä. Pesurin käyntiajat on kuitenkin otettu huomioon luvussa 7 kertomalla jäähtymähyöty pesurin käyntiajan vuosittaisella

prosenttiosuudella. Lisäksi lämpöhäviöistä saatavaan hyötyyn vaikuttaa suuresti paluuvesilämpöä käyttävän asiakkaan sijainti verkossa. Laskennassa on oletettu, että asiakkaan aiheuttama jäähtymä alentaa koko kaukolämpöverkon paluulämpötilaa.

Asiakkaalle annettavan jäähtymähyvityksessä täytyy ottaa huomioon myös mahdollinen lämmön tuotantorakenteen muutos paikkakunnilla. Öljyn käyttö vaihtelee vuosittain ja tämä aiheuttaa vaihtelua jäähtymähyvitykseen. Taulukossa 1 on esitetty työn laskennassa vuoden 2010 tuotantorakenteella laskettu jäähtymähyöty sekä jäähtymähyöty mikäli kaikki lämpö tuotettaisiin biopolttoaineilla.

Taulukko 1. Jäähtymähyödyt vuoden 2010 lämmön tuotantorakenteella sekä jäähtymähyöty mikäli kaikki lämpö tuotettaisiin biopolttoaineilla.

	Jäähtymähyöty vuoden 2010 lämmön tuotantorakenteella [€/MWh]	**Jäähtymähyöty mikäli kaikki lämpö tuotettaisiin biopolttoaineilla [€/MWh]**
Pielavesi	10	6,7
Suonenjoki	8,5	5,5
Iisalmi	2,8	2,4

Ottaen huomioon jäähtymähyödyn suuruuteen vaikuttavat riskit, olisi jäähtymähyvityksen suuruus asiakkaalle noin puolet työn laskennan jäähtymähyödystä. Myös Savon Voiman täytyy saada jonkinasteinen rahallinen hyöty paluuvesilämmityksestä sen aiheuttaman lisätyön takia esimerkiksi liittymän suunnittelun puolella sekä mahdollisen laskutuksen monimutkaistumisen takia. Myös asiakkaan kannalta on parempi, että pystymme lupaamaan asiakkaalle tämän liittyessä paluuvesilämmitykseen jäähtymähyvityksen, joka on voimassa vähintään investoinnin takaisinmaksuajan. Asiakkaan kannalta paluuvesilämmitysratkaisu ei olisi houkutteleva, mikäli muuttaisimme jäähtymähyvitystä vuosittain lämmön tuotantorakenteen sekä polttoaineiden hintojen muutoksen mukaan. Savon Voimalla täytyisi olla kuitenkin oikeus muuttaa jäähtymähyvityksen arvoa radikaalien tuotantokustannusten muutosten takia. Taulukossa 2 on työn laskennan pohjalta asiakkaalle annettava jäähtymähyvitys käytetystä paluuvesilämmöstä tarkastelluilla paikkakunnilla.

Taulukko 2. Asiakkaalle annettavan jäähtymähyvityksen suuruus.

	Jäähtymähyvitys asiakkaalle {€/MWh]
Pielavesi	5
Suonenjoki	4
Iisalmi	1,5

9.2 Jäähtymähyvityksen käyttö Savon Voiman hinnoittelumallissa

Savon Voimalla on käytössä tällä hetkellä kaukolämpöpaikkakunnilla yhtenäishinnoittelu. Tähän hinnoitteluun ei kuitenkaan voida lisätä paluuvesilämmityksen tarvitsemaa jäähtymähyvitystä, sillä paluuvesilämmityksestä saatava rahallinen hyöty riippuu suuresti paikkakunnasta. Paluuvesilämmön hinta täytyisi olla paikkakuntakohtainen ja näin sitä ei voitaisi lisätä nykyiseen yhtenäishinnoitteluun. Mikäli Savon Voima siirtyy kaukolämmössä paikkakuntakohtaiseen hinnoitteluun, olisi jäähtymähyvityksen lisääminen hinnoitteluun selkeää.

Yksittäisten asiakkaiden lisääminen paluuvesilämmitykseen onnistuisi myös yhtenäishinnoittelulla, tekemällä asiakkaan kanssa erillinen sopimus paluuveden lämpöenergian hinnasta. Paluuvesilämmityksen laajempi käyttöönotto vaatisi kuitenkin paikkakuntakohtaisen hinnoittelun.

9.3 Jäähtymän huomioiva kaukolämpötariffi nykyisille asiakkaille

Savon Voiman kaukolämmön hinnoittelu perustuu tällä hetkellä kolmeen komponenttiin eli liittymismaksuun, perusmaksuun sekä energiamaksuun. Liittymismaksun tarkoituksena on kattaa liittymisestä aiheutuvat kustannukset, mutta käytännössä liittymismaksu kattaa vain osan yhtiölle aiheutuneista investointikustannuksista. Perusmaksulla pyritään taas kattamaan lämmöntuotannon kiinteät kustannukset, mutta käytännössä perusmaksunkaan suuruus ei riitä kattamaan lämmöntuotannon kiinteitä kustannuksia. Energiamaksun tarkoituksena on taas kattaa lämmöntuotannon muuttuvat kustannukset, mutta koska liittymis- ja perusmaksut eivät kata niille tarkoitettuja kustannuksia, katetaan energiamaksulla liittymismaksusta ja perusmaksusta jäävää vajetta. Tämä hinnoittelu on asiakkaan kannalta hyvä, sillä se mahdollistaa asiakkaalle suurempien säästöjen

saavuttamisen omalla energiatehokkuudella. Tässä luvussa tarkastellaan erilaisten hintakomponenttien sopivuutta nykyisen asiakkaan jäähtymän parantamisen ohjaukseen.

9.3.1 Tilausteho

Savon Voimalla perusmaksu perustuu tilaustehoon, joka kertoo asiakkaan käyttöön varatun suurimman tuntisen lämpötehon. Tilaustehon määrittäminen ja tarkistaminen on yksinkertaista, joten sen ylläpitäminen ja tarkistaminen on helppoa. Myös asiakkaan kannalta tilausteho on läpinäkyvä ja helppo ymmärtää. Tilaustehon heikkoutena on se, ettei sen kannusta asiakasta huolehtimaan omien kaukolämpölaitteiden kunnosta. Asiakas saa kaukolämpöverkosta tarvitsemansa tehon, vaikka laitteiston toiminta ei ole suunnitelmien mukaista. Näin asiakkaan kaukolämpölaitteiden jäähtymällä ei ole vaikutusta perusmaksuun.

9.3.2 Tilausvesivirta

Monessa kaukolämpöyhtiössä on käytössä perusmaksun perusteena tilausvesivirta. Tilausvesivirralla tarkoitetaan suurinta asiakkaan käyttöön varattua tuntista kaukolämpöveden virtausta. Tilausvesivirran laskemisessa otetaan huomioon kaukolämpöasiakkaan tarvitseman lämpötehon lisäksi kaukolämpöveden jäähtymä. Tilausvesivirran laskentasuositusten mukaan se voidaan laskea yhtälön 38 avulla (Heikkilä 2011, 28).

$$V_{til} = \frac{\emptyset}{c_p \cdot \rho \cdot (t_m - t_p)} \tag{38}$$

missä, V_{til} = tilausvesivirta [$\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}$].

Yhtälöstä 38 nähdään että tilausvesivirta on kääntäen verrannollinen kaukolämpöveden jäähtymään. Näin jäähtymällä on vahva ohjaava vaikutus asiakkaan perusmaksun suuruuteen ja sitä kautta se motivoi pitämään kaukolämmön asiakaslaitteet kunnossa hyvän jäähtymän varmistamiseksi. Tilausvesivirran tarkastamiseen tarvittavan jäähtymän

seuraaminen on kuitenkin koettu aikaisemmin työlääksi ja näin perusmaksun tarkastaminen asiakaskohtaisesti on ollut vähäistä. Etäluenta mahdollistaa kuitenkin mitattujen tuntisten tietojen perusteella suoritettavan tilausvesivirran tarkastamisen ilman erillisiä mittausjärjestelyitä ja näin tilausvesivirran tarkastaminen olisi teoriassa yksinkertaista. Käytännössä kuitenkin jäähtymän muutoksesta aiheutuvan tilausvesivirran muutoksen tekeminen vaatii paljon hallinnollista työtä. (Heikkilä 2011, 29.) Asiakkaalle on myös annettava aikaa reagoida tilanteeseen ja korjata jäähtymän huononemisen aiheuttama vika ennen perusmaksun korotusta. Asiakas ei välttämättä tee tarvittavia korjaustoimenpiteitä pelkän perusmaksun korotuksen uhan avulla, mutta voi välittömästi perusmaksun konkreettisen korotuksen jälkeen tehdä korjaustoimenpiteitä jäähtymän suhteen ja vaatia perusmaksun uudelleentarkastamista. Tämä taas vaatii lämpöyhtiöltä lisää hallinnollista työtä.

Tilausvesivirran määrittäminen asiakkaan liittyessä kaukolämpöverkkoon voi olla haastavaa ja vaatii usein lämmitysjärjestelmän toiminnan ja mittauslukemiin vaikuttavien tekijöiden tuntemusta. Näin tilausvesivirran määritys ei ole yksiselitteistä ja perusmaksun suuruus voi vaihdella suuresti sen määrittäjästä riippuen. Tilausvesivirtaan perustuva perusmaksu asettaa myös asiakkaita epätasa-arvoiseen asemaan niiden sijainnista riippuen. Kaukolämpöverkon latvaosilla sijaitsevan asiakkaan kohdalla kaukolämmön menovesi on kylmempää kuin aivan lämpökeskuksen vieressä sijaitsevan asiakkaan laitteisiin tuleva menovesi. Näin myös jäähtymä jää verkon latvaosilla sijaitsevalla asiakkaalla huonommaksi kuin lämpökeskuksen vieressä sijaitsevalla asiakkaalla. Tämä taas tarkoittaa suurempaa kaukolämpöveden virtausta asiakaslaitteiden läpi saman energiamäärän saamiseksi. Tämä korostuu etenkin kesällä, tilanteessa jossa lämmönkäyttö on kiinteistössä erittäin vähäistä ja näin kaukolämmön menovesi voi jäähtyä verkoston latvaosilla sijaitsevassa talojohdossa jopa 50 asteiseksi. Tämän takia tilausvesivirran tarkastamisessa ei tulisi ottaa huomioon kesäajan virtausmääriä.

9.3.3 Vesivirtamaksu

Yksi mahdollisuus tariffiin lisättävästä maksusta, joka ottaa huomioon asiakkaan jäähtymän, on vesivirtamaksu. Vesivirtamaksu on energiamaksun kaltainen maksu eli se

perustuu toteutuneeseen kulutukseen. Vesivirtamaksulla laskutetaan kuukausittain lämpömäärämittarin läpi virranneen kaukolämpövesi. Vesivirtamaksu reagoi jatkuvasti kaukolämpöveden toteutuneeseen jäähdytykseen, kun taas tilausvesivirta ottaa huomioon ainoastaan suurinta tuntista vesivirtaa vastaavan jäähdytyksen.

Kaukolämpöyhtiön kannalta vesivirtamaksu on hyvä kannustin asiakkaan suuntaan pitää kaukolämpölaitteet kunnossa. Se on yhtiön kannalta vaivaton ja jäähtymän huononeminen lisää automaattisesti vesivirtamaksun määrää ja näkyy heti kaukolämpöasiakkaan laskussa. Myös asiakkaan on helppo ymmärtää että vesivirtamaksua maksetaan sitä vähemmän, mitä tehokkaammin hänen kaukolämpölaitteensa kaukolämpövettä jäähdyttävät. Lisäksi korjaustoimenpiteet näkyvät välittömästi seuraavassa kaukolämpölaskussa.

Myös vesivirtamaksuun liittyy sama asiakkaita epätasa-arvostava ongelma kuin tilausvesivirtaan. Kaukolämmön menoveden lämpötila vaihtelee verkoston eri osissa ja näin verkoston latvaosilla sijaitsevat asiakkaat ovat huonompaan asemaan muiden käyttöpaikkojen kanssa niiden alhaisemman menolämpötilan takia. Kesällä vähäisen lämmönkäytön aikaan vesivirtamaksua ei yleensä peritä, kaukolämmön menolämpötilan suuren vaihtelun takia (Heikkilä 2011, 36).

9.3.4 Jäähtymähyvitys nykyiselle asiakkaalle

Tilausvesivirran ja vesivirtamaksun aiheuttavien asiakkaita epätasa-arvoistavien ongelmien ratkaisu vaatisi monimutkaista laskentaa, jolla alempi kaukolämmön menoveden lämpötila otettaisiin huomioon. Näin niiden käyttöönotto Savon Voiman kaukolämpötariffissa olisi hankalaa. Nykyinen perusmaksun perusteena toimiva tilausteho on selkeä ja yksinkertainen sekä yhtiön, että asiakkaan kannalta. Näin sitä ei kannata lähteä muuttamaan, joten jäähtymän huomioon ottamiseksi tariffiin olisi lisättävä jokin muu uusi tekijä. Tämän tekijän tulisi perustua asiakkaan kaukolämpöveden paluulämpötilaan, etteivät pelkän konkreettisen jäähtymän huomioon ottamisen tuomat epätasa-arvoistavat tekijät tuottaisi ongelmia. Lisäksi sen tulisi olla riittävän yksinkertainen, jotta se pystyttäisiin helposti liittämään nykyiseen tai tulevaan laskutusjärjestelmään, eikä se aiheuttaisi merkittävästi lisää töitä. Tällä hetkellä kaukolämmön laskutuksessa työskentelee 1-2 henkilöä, joten

mahdollisten uudistuksien aiheuttaman lisätyön tulisi olla hyvin vähäistä, jotta uudistuksesta selvittäisiin ilman lisähenkilökunnan palkkaamista.

Yksi mahdollinen ratkaisu asiakkaan motivoimiseksi laitteiden hyvään kunnossapitoon voisi perustua samanlaiseen jäähtymähyvitykseen kuin paluuvettä lämmitykseen käyttävälle asiakkaalle maksetaan. Jäähtymähyvitys maksettaisiin siltä lämpöenergian osalta, jonka asiakas ottaa jäähdyttäessään paluuveden lämpötilaa alle sovitus referenssilämpötilan. Asiakas siis maksaisi normaalin kaukolämmön hinnan siltä lämpöenergian osalta, jonka hän ottaa jäähdyttäessään paluuveden lämpötilan referenssilämpötilaan, joka voisi olla esimerkiksi 50 astetta. Mikäli asiakas jäähdyttäisi paluulämpötilan alle tämän lämpötilan, saisi hän tältä lämpöenergian osalta jäähtymähyvityksen. Tällaisen hyvitysmallin käyttöönottaminen ja ylläpito olisi kuitenkin mahdollisesti hankalaa ja työlästä. Lisäksi hyvityksen määrä jäisi erittäin pieneksi, eikä välttämättä motivoisi asiakasta parantamaan jäähtymää., mutta antaisi kuitenkin pienen palkinnon hyville jäähdyttäjille. Esimerkiksi kerrostalon jonka lämmönkulutus vuodessa on 150 MWh ja keskimääräinen paluulämpötila 45 °C, olisi referenssilämpötilan arvolla 50 °C ja jäähtymähyvityksellä 5 €/MWh hyvitys vuodessa vain noin 90 €.

Tällaisen jäähtymähyvityksen sitominen paikkakunnan paluuveden keskilämpötilaan ei olisi järkevää, sillä kaukolämmön paluulämpötila ei mahdollisesti muuttuisi nykytilanteesta jäähtymähyvityksen käyttöönoton jälkeen, vaan ainoastaan nykyäänkin hyvän jäähtymän omaavat asiakkaat alkaisivat saada hyvitystä hyvästä jäähtymästä. Jäähtymähyvityksen suuruus olisikin järkevämpää sitoa esimerkiksi asiakkaan keskimääräiseen paluulämpötilaan ennen jäähtymähyvityksen käyttöönottoa. Näin asiakas saisi jäähtymähyvitystä vasta parantaessaan omaa jäähtymää. Samalla myös Savon Voima saisi rahallista hyötyä paremmasta jäähtymästä, josta osa voitaisiin antaa asiakkaalle.

9.3.5 Lisämaksu huonosta jäähtymästä

Tehokkaampi keino asiakkaan motivoimiseksi laitteiden kunnossapitoon olisi lisämaksu huonosta jäähtymästä. Nykyisissä kaukolämmön liittymis- ja myyntiehdoissa velvoitetaan asiakasta jäähdyttämään kaukolämmön paluuvesi vähintään 65 °C lämpötilaan. Mikäli

asiakkaan kaukolämmön keskimääräinen paluulämpötila laskutusjaksolla ylittäisi tämä arvon, voitaisiin hänen lämpölaskuun lisätä asiakkaan energiamaksun määrään sidottu lisämaksu. Lisämaksun määrä voisi olla esimerkiksi 10 % energiamaksun kokonaissummasta. Näin se lisäisi esimerkiksi 150 MWh lämpöä käyttävän kerrostalon lämpölaskua 900 € vuositasolla.

Havaittaessa huono jäähtymä asiakkaalle tulisi kuitenkin antaa ensin huomautus asiasta ja antaa aikaa reagoida tilanteeseen. Lisämaksua voitaisiin alkaa laskuttamaan esimerkiksi kaksi kuukautta huomautuksen jälkeen, mikäli asiakkaan paluuveden keskilämpötila laskutusjaksolla on edelleen yli 65 °C. 65 asteen raja paluulämpötilassa on kohtuullinen ja sen alle täytyy toimivan asiakaslaitteiston jäähdyttää kaukolämmön paluuvesi myös kesäaikaan, jolloin lämmönkäyttö on hyvin vähäistä, ja lämpimän käyttöveden kierto aiheuttaa normaalia huonomman jäähtymän. Tällaisen lisämaksun lisääminen laskutusjärjestelmään olisi helppoa, mutta vaatisi jälleen lisätyötä nykyiseen tilanteeseen verrattuna. Myöskään tällainen ”sakko” ei olisi hyvä Savon Voiman imagon ja sen tarjoaman kaukolämmön houkuttelevuuden kannalta.

Kaukolämmönmyyjien internetsivuilta 31.10.2011 löytyneiden kaukolämmön hinnastojen mukaan Helsingin Energia, Porvoon Energia, Tornion Energia ja Vaasan Sähkö huomioivat asiakkaan jäähtymän siten, että mikäli asiakkaan kaukolämpöveden jäähtymä on alle 15 °C, voidaan energiamaksu laskea siten, että jäähdytyksenä käytetään 15 astetta. Tässäkään laskennassa ei oteta huomioon asiakkaan mahdollisesti alhaista kaukolämpöveden tulolämpötilaa. Paras ratkaisu lisämaksun laskentatavalle olisi laskenta, jossa otettaisiin huomioon asiakkaan paluulämpötila sekä kokonaisjäähtymä. Laskennan rajoina käytettäisiin kaukolämmön liittymis- ja myyntiehdoissa määritettyä laskutusjakson vähimmäisjäähtymää 25 °C sekä asiakkaan kaukolämmön paluulämpötilan enimmäisarvoa 65 °C. Mikäli asiakkaan paluulämpötila olisi yli 65 astetta, laskettaisiin energiamaksu siten, että kaukolämpövesi olisi jäähtynyt 65 asteeseen. Laskennassa käytetty laskennallinen jäähtymä olisi kuitenkin enintään vaadittu 25 °C. Esimerkiksi kaukolämmön tulolämpötilalla 95 °C, velvoitettaisiin asiakkaan paluulämpötilan olevan enintään 70 °C.

Myös tässä laskentatavassa tulisi asiakkaalle lähettää ensin huomautus huonosta jäähtymästä ja antaa aikaa reagoida tilanteeseen. Lisämaksua voitaisiin tässäkin tapauksessa alkaa laskuttamaan esimerkiksi kaksi kuukautta huomautuksen jälkeen, mikäli asiakkaan paluuveden keskilämpötila laskutusjaksolla on edelleen yli 65 °C. Tälle lisämaksulle olisi selkeät perusteet kaukolämmön liittymis- ja myyntiehtojen perusteella. Lisämaksu aiheuttaisi varmasti negatiivista palautetta asiakkaiden puolelta, mutta tämä lisämaksu kohdistuisi ainoastaan huonojen jäähdyttäjien ääripäähän. Kaukolämmön houkuttelevuuden kannalta tällaisella lisämaksulla olisi lisämaksun ensimmäisen vaihtoehdon tapaan huono vaikutus. Tällainen lisämaksu aiheuttaisi luonnollisesti lisätyötä laskutuksen puolelle, mutta toimisi erinomaisena kannustimena asiakaspäässä sillä lisämaksun suuruus talven kylmimpinä kuukausina voisi nousta suurilla kaukolämpöasiakkailla jopa tuhansiin euroihin kuukaudessa.

10 PALUUVESILÄMMITYKSEN TALOUDELLISUUS

Tässä luvussa tarkastellaan paluuvesilämmityksen taloudellisuutta verrattuna normaaliin kaukolämpökytkentään. Tarkasteltavina kytkentävaihtoehtoina ovat vaihtoehdot 1 ja 2. Luvussa 10.1 käsitellään kytkentävaihtoehtojen investointikustannuksia verrattuna normaaliin kaukolämpökytkentään, luvussa 10.2 kytkentävaihtoehdon 1 kannattavuutta esimerkkikohteissa, luvussa 10.3 paluuvesilämmityksen kannattavuuden reunaehtoja. Lisäksi luvussa 10.4 tarkastellaan kytkentämuutoksen kannattavuutta vanhoilla asiakkailla sekä luvussa 10.5 tarkastellaan paluuvesilämmityksen taloudellista kannattavuutta todellisessa kohteessa, joka on mahdollisesti liittymässä lähitulevaisuudessa kaukolämpöön.

10.1 Investointikustannukset asiakkaalle

10.1.1 Liittymismaksun suuruus

Paluuvesilämmitykseen liittyvän asiakkaan liittymismaksu tulisi olemaan vähintään normaalin kaukolämpöliittymän liittymismaksun verran. Lisämaksun tarpeellisuus liittymismaksuun paluuvesilämmitykseen liittämisestä täytyy tutkia asiakaskohtaisesti.

Myös Savon Voima saa rahallista hyötyä asiakkaan käyttämästä paluuvesilämmöstä ja näin asiakas voi saada paluuvesilämmityksen mahdollistavan kaukolämpöliittymän samaan hintaan kuin normaalin kaukolämpöliittymän, mikäli paluuvesilämmityksestä saatu rahallinen hyöty maksaa Savon Voimalle liittymän lisäkustannukset takaisin halutussa ajassa. Laskelmissa on käytetty liittymän korollisena takaisinmaksuaikana Savon Voimalle 7 vuotta. Tämä on hieman lyhyempi aika kuin normaalilta kaukolämpökytkennältä vaadittu takaisinmaksuaika. Lyhyempi takaisinmaksuaika johtuu paluuvesilämmitykseen liittyvistä riskeistä ja rahallisen hyödyn vaihtelusta vuosittain lämmön tuotantorakenteen ja polttoainehintojen mukaan. Asiakkaalta perittävän liittymismaksun suuruus on siis lisäkustannusten ja Savon Voiman takaisinmaksuaikana saaman rahallisen hyödyn nykyarvon erotus. Mikäli Savon Voiman saaman rahallisen hyödyn nykyarvo seuraavan seitsemän vuoden ajalta on suurempi kuin liittymän lisäkustannukset, ei asiakkaan liittymismaksu olisi kuitenkaan pienempi kuin normaalin liittymän liittymismaksu. Toisaalta antamalla asiakkaalle hyvitystä liittymismaksussa normaaliin kaukolämmön liittymismaksuun verrattuna, saataisiin paluuvesilämmityksen kannattavuutta parannettua. Työssä oletetaan kuitenkin liittymismaksun olevan vähintään normaalin liittymismaksun suuruinen.

Tähän liittymismaksun suuruuden laskemiseen liittyy se riski, että Savon Voiman saama rahallinen hyöty vaihtelee vuodesta riippuen ja liittymän takaisinmaksuaika voi olla oletetusta pidempi. Esimerkiksi savukaasupesurin ollessa vikaantumisen takia poissa käytöstä talvella, on asiakkaalle annettava rahallinen hyöty suurempi kuin mitä paluuvesilämmönkäytön aiheuttama todellinen hyöty on. Myös öljynkäytön korvaaminen halvemmilla polttoaineilla, kuten esimerkiksi pelletillä, alentaa jäähtymähyödyn suuruutta ja tämän seurauksena Savon Voiman saama rahallinen hyöty laskee, mikäli asiakkaan jäähtymähyvitystä ei pienennetä. Näin liittymän takaisinmaksuaika voi venyä laskettua pidemmäksi.

Normaali kaukolämmön talojohdon rakentaminen, joka sisältää yhden meno- ja yhden paluuputken maksaa noin 150 €/m. Tämä kustannus voidaan jakaa karkeasti tasan kolmeen osaan maanrakennus-, materiaali- ja työkustannusten kesken (Pitkänen, keskustelu 23.9.2011). Näin jokainen näistä tekijöistä kustantaa noin 50 €/m. Paluuvesikytkennän

mahdollistavan liittymän rakentamisen maanrakennuskustannukset ovat samansuuruiset kuin normaalissa kaukolämpökytkennässä. Sen sijaan yhden lisäputken rakentaminen lisää materiaali- ja työkustannuksia puolella. Näin paluuvesiliittymän rakennuskulut ovat noin 50 €/m kalliimmat verrattuna normaaliin kaukolämpökytkentään. Liittymän lisäkustannuksia nostaa myös ylimääräinen mittauskeskus, jotta menolämmön ja paluulämmön erillinen mittaus olisi mahdollista. Ylimääräinen mittauskeskus maksaa noin 1000 €.

Paluuvesikytkentään joudutaan mahdollisesti rakentamaan myös niin sanottu lisäsilmukka paluuvesijohtoon, jonka avulla ehkäistään mahdollisen runkojohdon paluuputken virtaussuunnan vaihtumisen tuomat ongelmat. Tämä lisäsilmukka on esitelty luvussa 8.3. Lisäsilmukan kustannukset ovat noin 2500 € jos talojohtojen liittäminen runkojohtoon tapahtuu poraventtiileillä (Pitkänen, keskustelu 23.9.2011). Kytkentävaihtoehdoissa 1 ja 2 virtaussuunnan vaihtumisen aiheuttama niin sanottu hullun kierto ei aiheuta kuitenkaan lämmön loppumista kiinteistössä, sillä lämmönsaanti on varmistettu normaalilla tulovedellä. Tästä syystä lisäsilmukkaa ei kannata rakentaa jos virtaussuunnan vaihtuminen on vain teoriassa mahdollista mutta tapahtuu käytännössä kuitenkin erittäin harvoin. Lisäsilmukan mahdollistama paluuveden lämmönkäyttö jää harvoin tapahtuvassa virtaussuunnan vaihtumisessa pieneksi ja ei näin maksa itseään takaisin. Kannattavuuslaskelmissa ei ole otettu huomioon mahdollisen lisäsilmukan tuomia kustannuksia.

10.1.2 Lämmönjakokeskuksen kustannukset

Paluuvesilämmityksen mahdollistavan lämmönjakokeskuksen lisäkustannukset tulevat kokonaan asiakkaan maksettavaksi. Suurimman lisähinnan paluuvesilämmityksen mahdollistavaan lämmönjakokeskukseen kytkentävaihtoehdossa 1 verrattuna normaaliin lämmönjakokeskukseen aiheuttaa kolmas lämmönsiirrin. Tämä aiheuttaa noin 50 %:n hinnannousun normaaliin lämmönjakokeskukseen verrattuna. Muun ylimääräisen tekniikan tuoma lisäkustannus on noin 20 %. Näin kytkentävaihtoehto 1:n periaatteella valmistettu lämmönjakokeskus maksaa noin 1,7 kertaa normaalin lämmönjakokeskuksen verran

(Pakarinen, sähköpostiviestit 12.10. – 21.10.2011). Nämä hintatiedot on saatu pyytämällä tarjouksia eri lämmönjakokeskuksista Oy Danfoss Ab:ltä.

Kytkentävaihtoehdon 2 kustannukset sen sijaan nousevat jo noin kaksinkertaiseksi verrattuna normaaliin lämmönjakokeskukseen (Pakarinen, sähköpostiviestit 12.10. – 21.10.2011). Tässäkin kytkennässä suurimman lisäkustannuksen aiheuttavat ylimääräiset lämmönsiirtimet. Käytännössä kytkentävaihtoehdossa 2 on yhdistetty kaksi normaalia lämmönjakokeskusta ja tämä selittää kaksinkertaiset kustannukset verrattuna normaaliin lämmönjakokeskukseen.

Paluuvesilämmityksen mahdollistavan lämmönjakokeskuksen kustannukset laskevat kytkentävaihtoehto 1:stä siinä tapauksessa, mikäli on mahdollista että lämmitys ei tarvitsisi varmistusta normaalilla tulovedellä. Tällaisia kohteita voisi olla esimerkiksi katulämmityskohteet. Myös varmistus voidaan hoitaa samassa lämmönsiirtimessä paluuveden kanssa johtamalla normaali tulovesi paluuveden tuloputkeen ennen lämmönsiirrintä. Tässä kytkentävaihtoehdossa ongelmaksi tulee paluu- ja menolämmön yhtäaikaisessa käytössä lämpöenergian mittaus. Kun paluu- ja menovesi sekoittuvat ennen lämmönsiirrintä, mitataan niiden paluulämpötila lämmönsiirtimen jälkeen samalla lämpötila-anturilla. Tässä tapauksessa on mahdollista, että paluuveden lämpötila lämmönsiirtimen jälkeen on korkeampi, kuin paluuveden tulolämpötila ennen lämmönsiirrintä, joka on mitattu ennen normaalin tuloveden sekoitusta paluuveden sekaan. Tästä johtuen paluuvesienergiamittari mittaa paluuveden lämpöenergian käytölle negatiivista arvoa ja menovesienergian mittari mittaa liian suurta lämpötehoa, sillä menovesi luovuttaa osan lämmöstään paluuvedelle. Tällainen varmistus voitaisiin tehdä siinä tapauksessa, että varmistuksen tarve normaalilla tulovedellä olisi erittäin epätodennäköistä.

10.2 Kannattavuus

Tässä luvussa esitettävät kannattavuuslaskelmat on tehty kytkentävaihtoehdolle 1. Paluuvesilämmityksen kannattavuustarkasteluun on valittu kaksi kerros-

/rivitaloesimerkkikohdetta. Esimerkkikohteiden perustiedot on esitetty taulukossa 3. Taulukon 3 lämmönjakokeskusten kustannukset on saatu lähteeltä Pakarinen 2011.

Taulukko 3. Esimerkkikohteiden perustiedot.

	Pienkerrostalo	**Kerrostalo**
Vuosittainen lämmönkäyttö [MWh]	100	300
- **Käyttöveden lämmönkäyttö [MWh]**	25	75
- **Lämmityksen lämmönkäyttö [MWh]**	75	225
Liittymismatka [m]	50	50
Käyttöveden maksimiteho [kW]	160	360
Lämmityksen maksimiteho [kW]	38	115
Normaalin lämmönjakokeskuksen kustannukset [€]	5400	8300
Kytkentävaihtoehdon 1 kustannukset [€]	9100	14 100
Normaalin kaukolämpöliittymän liittymismaksu [€]	5550	10 400

Liittymismatkaksi on valittu esimerkkikohteille 50 metriä. Tämän matkan aiheuttama lisäkustannus on 2500 € kun lisäkustannus on noin 50 €/m. Lisäksi liittymälle aiheutuu ylimääräisestä mittauskeskuksesta 1000 €:n lisäkustannus. Näin paluuvesilämmityksen mahdollistava liittymä on 3500 € kalliimpi verrattuna normaaliin kaukolämpöliittymään.

Kannattavuuslaskennassa käytetään kaukolämmön verottomana lämpöenergian hintana 52,2 euroa. Laskennan korkokanta on 5 % sekä vuosittaisten lämmityskustannusten laskennassa kaukolämpölaitteiden takaisinmaksuaikana 20 vuotta. Liittymän takaisinmaksuaikana Savon Voimalle on käytetty 7 vuotta, jonka ajalta saadun rahallisen hyödyn nykyarvo vähennetään liittymisen lisäkustannuksista liittymismaksua määritettäessä luvun 10.1.1 mukaisesti. Asiakkaan on oletettu ottavan kaiken lämmityksen lämmöntarpeen paluuvedestä, joten asiakas saa jäähtymähyvitystä koko lämmityksen

käyttämästä lämpöenergiasta. Taulukossa 4 on esitetty kannattavuuslaskennassa käytettyjä perustietoja.

Taulukko 4. Kannattavuuslaskennan perustietoja.

	Pienkerrostalo	**Kerrostalo**
Perusmaksut vuodessa [€/a]	1100	3200
Normaalin kaukolämpökytkennän lämpöenergian vuosikustannukset [€/a]	5220	15 660
Normaalin kaukolämpökytkennän investoinnin vuosikustannukset [€/a]	879	1501
Normaalin kaukolämpökytkennän lämmityksen vuosittaiset kokonaiskustannukset [€/a]	7199	20 361
Normaalin kaukolämpökytkennän lämpöenergian kokonaishinta [€/MWh]	72,0	67,9
Jäähtymähyvitykseen oikeuttava lämpömäärä [MWh]	75	225
Paluuveden kiertopumpun käyttämän sähkön kustannukset kytkentävaihtoehdossa 1 [€/a]	23	70

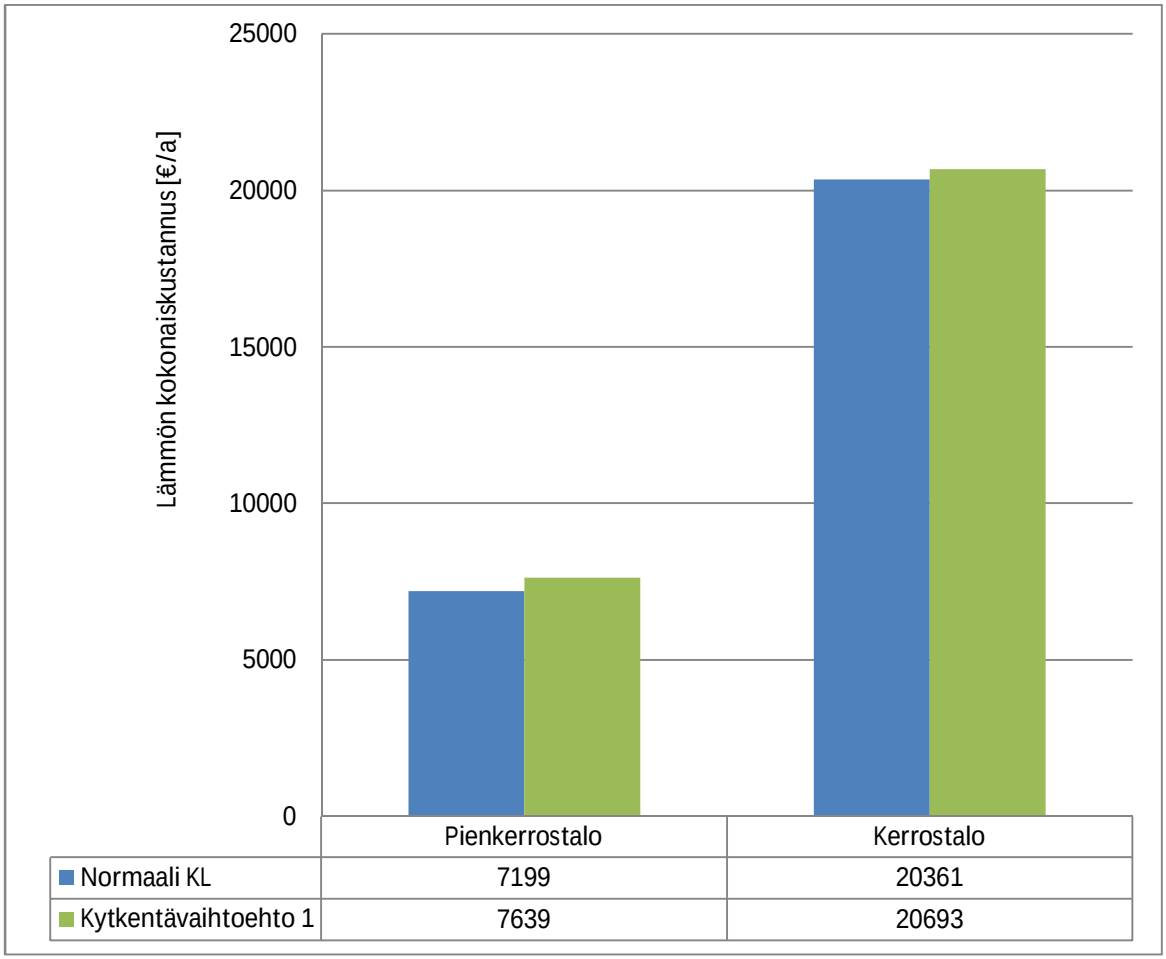
10.2.1 Iisalmi

Jäähtymähyvityksenä Iisalmessa on laskennassa käytetty 1,5 €/MWh. Saman verran on oletettu Savon Voiman saavan hyötyä asiakkaan paluuvesilämmön käytöstä. Taulukossa 5 on esitetty Iisalmen kannattavuuslaskennan oleelliset tulokset. Lämpöenergian kustannuksiin on kytkentävaihtoehdossa 1 lisätty paluuveden kiertopumpun käyttämän sähköenergian kustannukset.

Taulukko 5. Paluuvesilämmityksen kannattavuuslaskennan tuloksia Iisalmessa.

	Pienkerrostalo	**Kerrostalo**
Jäähtymähyvityksen suuruus vuodessa asiakkaalle [€/a]	112,5	337,5
Liittymismaksu suurempi kytkentävaihtoehdossa 1 verrattuna normaaliin kytkentään [€]	2849	1953
Kytkentävaihtoehdon 1 investoinnin vuosikustannukset [€/a]	1404	2090
Kytkentävaihtoehdon 1 lämpöenergian vuosikustannukset [€/a]	6924	17 787
Kytkentävaihtoehdon 1 lämpöenergian kokonaishinta [€/MWh]	76,4	69,0

Kuvassa 31 on esitetty vertailuna normaalin kaukolämmön ja kytkentävaihtoehdon 1 lämmityksen kokonaisvuosikustannukset. Kuvasta 31 voidaan todeta, ettei paluuvesilämmitys ole kannattava esimerkkikohteissa Iisalmessa. Iisalmen jäähtymähyvityksen suuruus ei riitä kattamaan paluuvesilämmityksen aiheuttamia lisäinvestointeja. Liittymismaksu on jaettu lämmönjakokeskuksen investoinnin tavoin 20 vuoden takaisinmaksuajalle 5 %:n laskentakorolla. Paluuvesilämmityksen vuosikustannukset Iisalmessa olisivat pienkerrostalossa noin 440 € ja kerrostalossa noin 330 € kalliimmat verrattuna normaaliin kaukolämpöratkaisuun.



Kuva 31. Kaukolämmityksen vuosittaisten kokonaiskustannusten vertailu Iisalmessa.

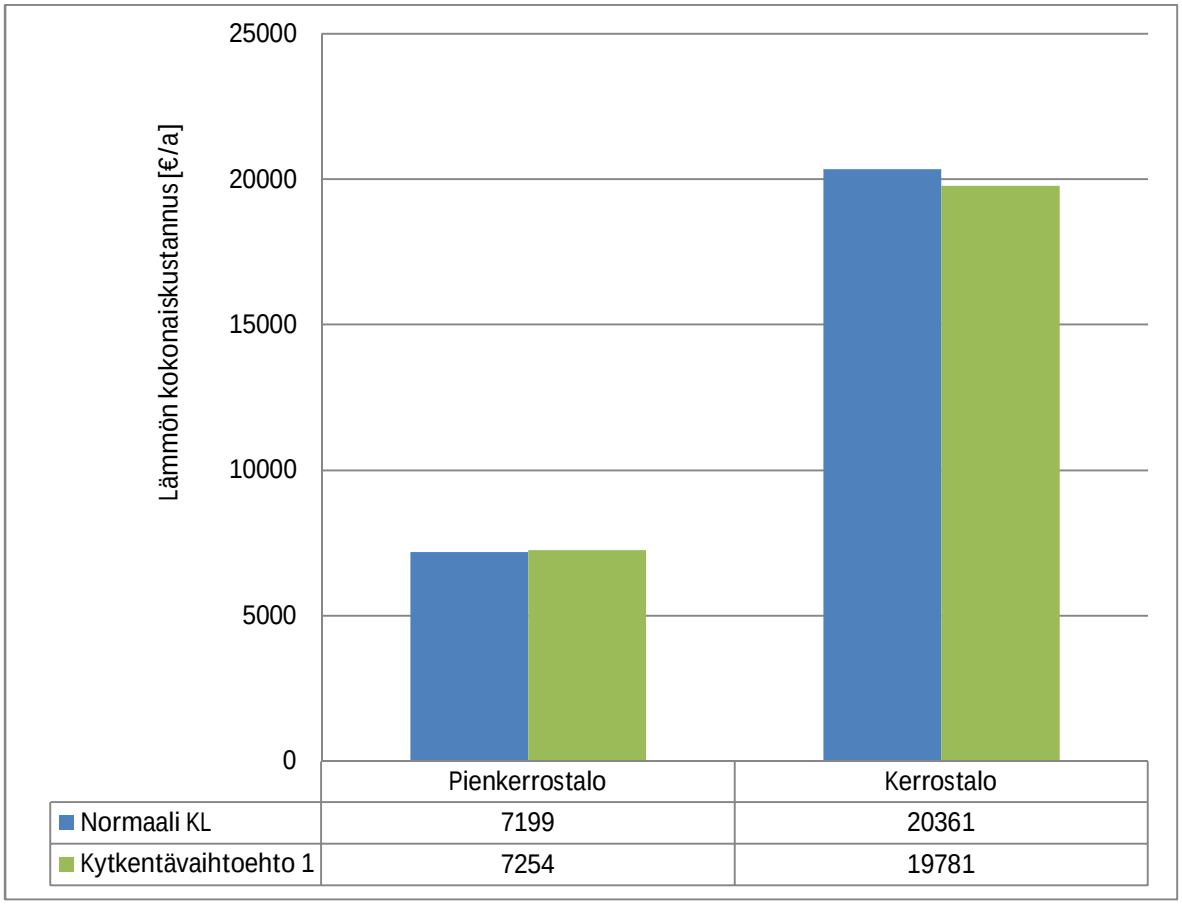
10.2.2 Pielavesi

Jäähtymähyvityksenä Pielavedellä on laskennassa käytetty 5 €/MWh. Saman verran on oletettu Savon Voiman saavan hyötyä asiakkaan paluuvesilämmön käytöstä. Taulukossa 6 on esitetty Pielaveden kannattavuuslaskennan oleelliset tulokset. Lämpöenergian kustannuksiin on kytkentävaihtoehdossa 1 lisätty paluuveden kiertopumpun käyttämän sähköenergian kustannukset.

Taulukko 6. Paluuvesilämmityksen kannattavuuslaskennan tuloksia Pielavedellä.

	Pienkerrostalo	**Kerrostalo**
Jäähtymähyvityksen suuruus vuodessa asiakkaalle [€]	375	1125
Liittymismaksu suurempi kytkentävaihtoehdossa 1 verrattuna normaaliin kytkentään [€]	1330	0
Kytkentävaihtoehdon 1 investoinnin vuosikustannukset [€/a]	1282	1966
Kytkentävaihtoehdon 1 lämpöenergian vuosikustannukset [€/a]	4872	14 616
Kytkentävaihtoehdon 1 lämpöenergian kokonaishinta [€/MWh]	72,5	67,4

Kuvassa 32 on esitetty vertailuna normaalin kaukolämmön ja kytkentävaihtoehdon 1 lämmityksen kokonaisvuosikustannukset Pielavedellä. Kuvasta 32 voidaan todeta, ettei paluuvesilämmitys olisi kannattava pienkerrostalossa, mutta isommassa kerrostalokokoluokassa paluuvesilämmitys olisi taloudellisesti kannattava. Näin Pielaveden tapauksessa laskettu jäähtymähyvitys riittäisi kattamaan paluuvesilämmityksestä aiheutuneet lisäkustannukset laskennan takaisinmaksuajalla suuremmassa kerrostalokokoluokassa. Paluuvesilämmityksen vuosikustannukset Pielavedellä olisivat pienkerrostalossa noin 50 euroa korkeammat ja kerrostalossa noin 580 € halvemmat verrattuna normaaliin kaukolämpöratkaisuun.



Kuva 32. Kaukolämmityksen vuosittaisten kokonaiskustannusten vertailu Pielavedellä.

Kytkentävaihtoehdon 1 korolliseksi takaisinmaksuajaksi suuremmassa kerrostalokokoluokassa saadaan 5 %:n laskentakorolla 6,7 vuotta. Asiakkaan kannalta paluuvesikytkennän investointi olisi houkutteleva, mikäli korollinen takaisinmaksuaika on noin 5 vuotta. Näin tämä 6,7 vuoden takaisinmaksuaika ei houkuttele kaikkia asiakkaita investoimaan kalliimpaan paluuvesilämmitysjärjestelmään. Paluuvesilämmitysinvestointi voisi kiinnostaa kuitenkin asiakasta, joka ei mieti pelkästään investoinnin rahallista hyötyä vaan myös sen energiatehokkuutta.

Jäähtymähyvityksen määrä on suoraan verrannollinen käytettyyn paluuvesienergiaan, mutta lämmönjakokeskuksen hinta ei kuitenkaan nouse samassa suhteessa. Näin mitä suurempi lämmönkäyttäjä on, sitä kannattavampi on paluuvesilämmitysinvestointi. Näin riittävän suuri paluuvesilämmönkäyttäjä pääsisi Pielavedellä tavoiteltuun 5 vuoden takaisinmaksuaikaan. Tarkempia reunaehtoja on tarkasteltu luvussa 10.3.

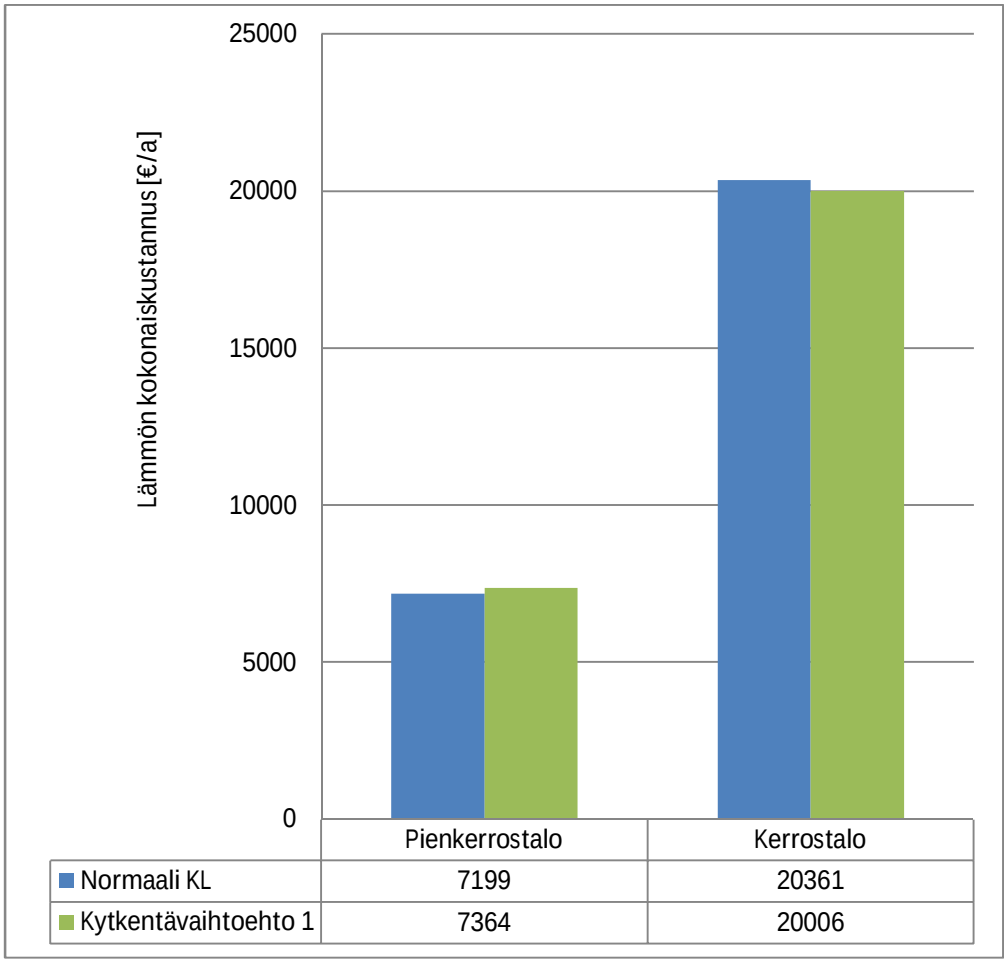
10.2.3 Suonenjoki

Jäähtymähyvityksenä suuruutena Suonenjoella on laskennassa käytetty 4 €/MWh. Saman verran on oletettu Savon Voiman saavan hyötyä asiakkaan paluuvesilämmön käytöstä. Taulukossa 7 on esitetty Suonenjoen kannattavuuslaskennan oleelliset tulokset. Lämpöenergian kustannuksiin on kytkentävaihtoehdossa 1 lisätty paluuveden kiertopumpun käyttämän sähköenergian kustannukset.

Taulukko 7. Paluuvesilämmityksen kannattavuuslaskennan tuloksia Suonenjoella.

	Pienkerrostalo	**Kerrostalo**
Jäähtymähyvityksen suuruus vuodessa asiakkaalle [€]	300	900
Liittymismaksu suurempi kytkentävaihtoehdossa 1 verrattuna normaaliin kytkentään [€]	1764	0
Kytkentävaihtoehdon 1 lämpöenergian vuosikustannukset [€/a]	4947	14 841
Kytkentävaihtoehdon 1 lämpöenergian kokonaishinta [€/MWh]	73,6	68,2

Kuvassa 33 on esitetty vertailuna normaalin kaukolämmön ja kytkentävaihtoehdon 1 lämmityksen kokonaisvuosikustannukset Suonenjoella. Kuvasta 33 voidaan Pielaveden tavoin todeta, ettei paluuvesilämmitys olisi kannattava pienkerrostalossa, mutta isommassa kerrostalokokoluokassa paluuvesilämmitys olisi taloudellisesti kannattava. Näin Suonenjoen jäähtymähyvityksen taso riittäisi kattamaan paluuvesilämmityksestä aiheutuneet lisäkustannukset laskennan takaisinmaksuajalla suuremmassa kerrostalokokoluokassa. Paluuvesilämmityksen vuosikustannukset Suonenjoella olisivat pienkerrostalossa noin 160 € korkeammat ja kerrostalossa noin 350 € halvemmat verrattuna normaaliin kaukolämpöratkaisuun.



Kuva 33. Kaukolämmityksen vuosittaisten kokonaiskustannusten vertailu Suonenjoella.

Kytkentävaihtoehdon 1 korolliseksi takaisinmaksuajaksi suuremmassa kerrostalokokoluokassa saadaan 5 %:n laskentakorolla 9 vuotta. Asiakkaan kannalta paluuvesikytkennän investointi olisi houkutteleva, mikäli korollinen takaisinmaksuaika on noin 5 vuotta. Näin tämä 9 vuoden takaisinmaksuaika on reilusti yli tavoitellun takaisinmaksuajan. Kuten Pielaveden tapauksessakin todettiin, saattaisi paluuvesilämmitysinvestointi kiinnostaa tässä kokoluokassa Suonenjoella rakentajia, jotka miettivät myös lämmitysratkaisun energiatehokuutta. Paluuvesilämmitysinvestoinnin takaisinmaksuaika lyhenee lämmönkäyttäjän kasvaessa, joten riittävän suurella paluuveden lämmönkäytöllä päästään myös Suonenjoella 5 vuoden takaisinmaksuaikaan.

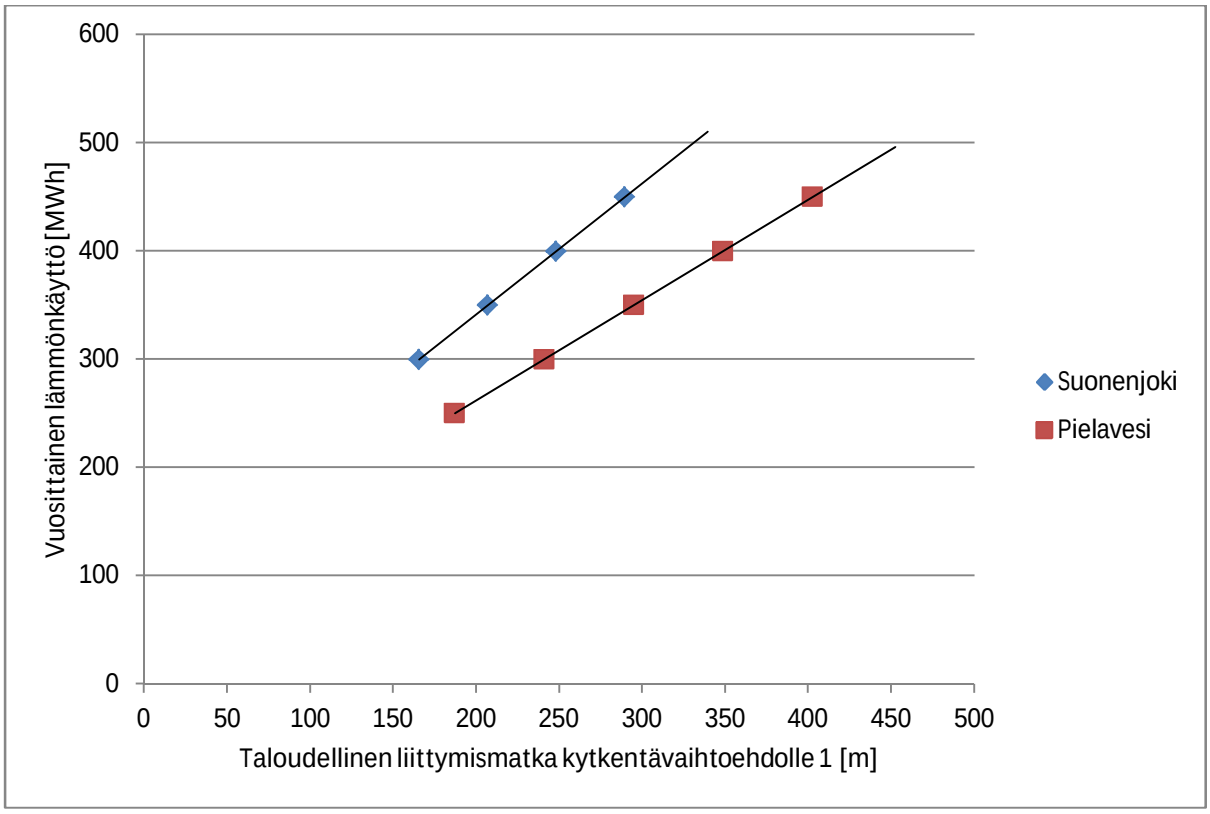
10.3 Paluuvesilämmityksen kannattavuuden reunaehdot

Työn tässä luvussa määritetään karkeasti paluuvesilämmityksen taloudellisen kannattavuuden reunaehdot tarkasteltavilla paikkakunnilla. Reunaehdot määritellään kytkentävaihtoehdoille 1 ja 2. Laskettujen reunaehtojen toteutuminen vaatii sen, että myös normaali kaukolämpö olisi kannattavaa reunaehdot täyttävässä kohteessa. Lisäksi reunaehtojen määrityksessä ei ole otettu huomioon paluuvesilämmönjakokeskuksen kiertopumppujen käyttämän sähköenergian kustannuksia.

Laskennan tavoitteelliseksi takaisinmaksuajaksi suunniteltiin 5 vuotta ja laskentakoroksi 5 %. 5 vuoden korolliseen takaisinmaksuaikaan pääsevää investointia voidaan pitää asiakkaan kannalta houkuttelevana. Laskennassa käytettiin jäähtymähyvityksinä samoja arvoja kuin esimerkkikohteiden kannattavuuslaskennassa. Valittu jäähtymähyvitys on siis Iisalmessa 1,5 €/MWh, Pielavedellä 5 €/MWh, ja Suoenjoella 4 €/MWh. Laskennassa määritettyjen liittymismaksujen suuruuksien laskennassa on oletettu Savon Voiman saavan samansuuruiset jäähtymähyödyt paluuvesilämmön käytöstä. Lasketut paluuvesilämmityksen kannattavuuden reunaehdot ovat vuosittainen lämmönkäyttö sekä asiakkaan liittymismatka. Laskenta suoritettiin määrittämällä erisuuruisille paluuvesilämmönkäyttäjille pisin mahdollinen liittymismatka, jotta asiakkaan investoinnin takaisinmaksuaika olisi haluttu 5 vuotta.

Takaisinmaksuajaksi valittu 5 vuotta osoittautui ongelmallisen lyhyeksi paluuvesilämmityksen kannattavuuden kannalta asiakkaalle koituvan suuren lämmönjakokeskusinvestoinnin takia. Iisalmessa asiakkaalle myönnettävissä oleva jäähtymähyvitys on niin pieni, ettei paluuvesilämmitykseen liittyminen ole taloudellisesti kannattavaa edes 1000 MWh vuodessa lämpöä käyttävälle asiakkaalle. Myös Pielavedellä ja Suonenjoella kannattavuuden alaraja paluuvesienergian vuosikäytölle on korkea. Pielavedellä lämpöenergian vuosikäytön tulisi olla noin 450 MWh ja Suonenjoella noin 800 MWh, jotta kytkentävaihtoehto 1 toteuttamisen takaisinmaksuaika olisi 5 vuotta, kun oletetaan että paluuvesienergian osuus olisi 75 % kokonaislämmönkäytöstä. Loppu 25 % lämmöstä otettaisiin normaalista tulovedestä käyttöveden lämmitykseen.

Mikäli korollisen takaisinmaksuajan vaatimus asiakkaalle asetetaan 8 vuoteen, on kytkentävaihtoehto 1 kannattava Pielavedellä noin 250 MWh:n ja Suonenjoella noin 300 MWh:n vuosittaisella lämmönkäytöllä, kun oletetaan paluuvesienergian osuuden olevan 75 % kokonaislämmönkäytöstä. Sen sijaan Iisalmessa paluuvesilämmitys ei ole kannattavaa pidemmälläkään takaisinmaksuajalla. Kuvassa 34 on esitetty paluuvesilämmön vuosikäytön ja liittymismatkan reunaehdot kannattavuudelle 8 vuoden korollisella takaisinmaksuajalla. Kuvaaja alkaa lämmön vuosikäytön reunaehdon kohdalta. Kuvasta voidaan lukea x-akselilta taloudellinen liittymismatka lämmönkäytön reunaehdon ylittäville asiakkaille.

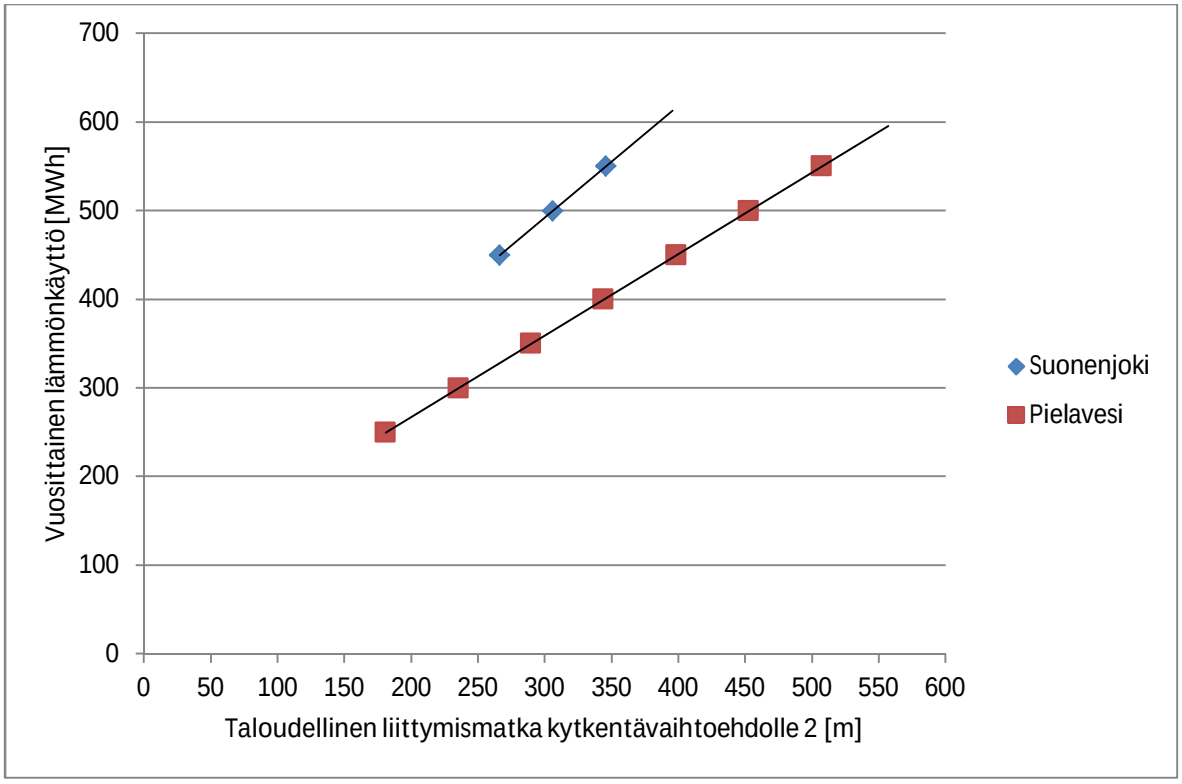


Kuva 34. Kytkentävaihtoehto 1. taloudellisen kannattavuuden reunaehtoja 8 vuoden korollisella takaisinmaksuajalla asiakkaalle.

Taloudellisen paluuvesilämmön käyttäjän lämmöntarve on suuri, joten Suonenjoen ja Pielaveden kaukolämpöverkoissa niiden tulee sijaita ison runkoputken varrella, jotta paluuvesivirtaus on riittävän suuri paluuputkessa lämmityksen lämmöntarpeen tyydyttämiseksi paluuvesilämmöllä. Lämmön vuosikäytön reunaehdon toteuttaville asiakkaille taloudelliset liittymismatkat ovat pitkiä. Liittymismatkan reunaehdon

toteutumiselle on kuitenkin ehtona se, että myös normaalin kaukolämpöliittymän rakentaminen olisi kannattavaa kyseisellä liittymismatkalla.

Tarkasteltaessa kytkentävaihtoehto 2:sen kannattavuutta huomataan, ettei 5 vuoden korollista takaisinmaksuaikaa voida saavuttaa edes Pielavedellä lämmönjakokeskuksen suuren investoinnin takia. Sen sijaan tavoiteltaessa 10 vuoden korollista takaisinmaksuaikaa olisi kytkentävaihtoehto 2 taloudellista rakentaa Pielavedellä 250 MWh:n ja Suonenjoella 450 MWh:n vuosittaisella lämpöenergian käytöllä, kun on oletettu paluuvesienergian osuuden olevan 90 % kokonaislämmönkäytöstä. Loput 10 % lämmönkäytöstä otetaan normaalista kaukolämmön tulovedestä käyttöveden lämpötilan priimaukseen. Vuosittaisen lämpöenergian ja liittymismatkan reunaehdot kytkentävaihtoehto 2:sen taloudellisuudelle on esitetty kuvassa 35.



Kuva 35. Kytkentävaihtoehdon 2 taloudellisen kannattavuuden reunaehtoja 10 vuoden korollisella takaisinmaksuajalla asiakkaalle.

Kytkentävaihtoehdossa 2 lisäkustannuksia aiheuttaa ylimääräinen lämmönsiirrin käyttöveden lämmitykseen, joka mahdollistaa käyttöveden esilämmittämisen kaukolämmön paluuvedellä. Investointi käyttöveden esilämmitykseen täytyy tarkastella

tapauskohtaisesti, mutta kytkentävaihtoehto 2 on verrattuna kytkentävaihtoehto 1:seen niin paljon kalliimpi, ettei tämä investointi kannata normaalin asuinrakennuksen käyttöveden lämmönkäytöllä, joka on noin 25 % kokonaislämmönkäytöstä.

10.4 Kytkentämuutos vanhoille asiakkaille

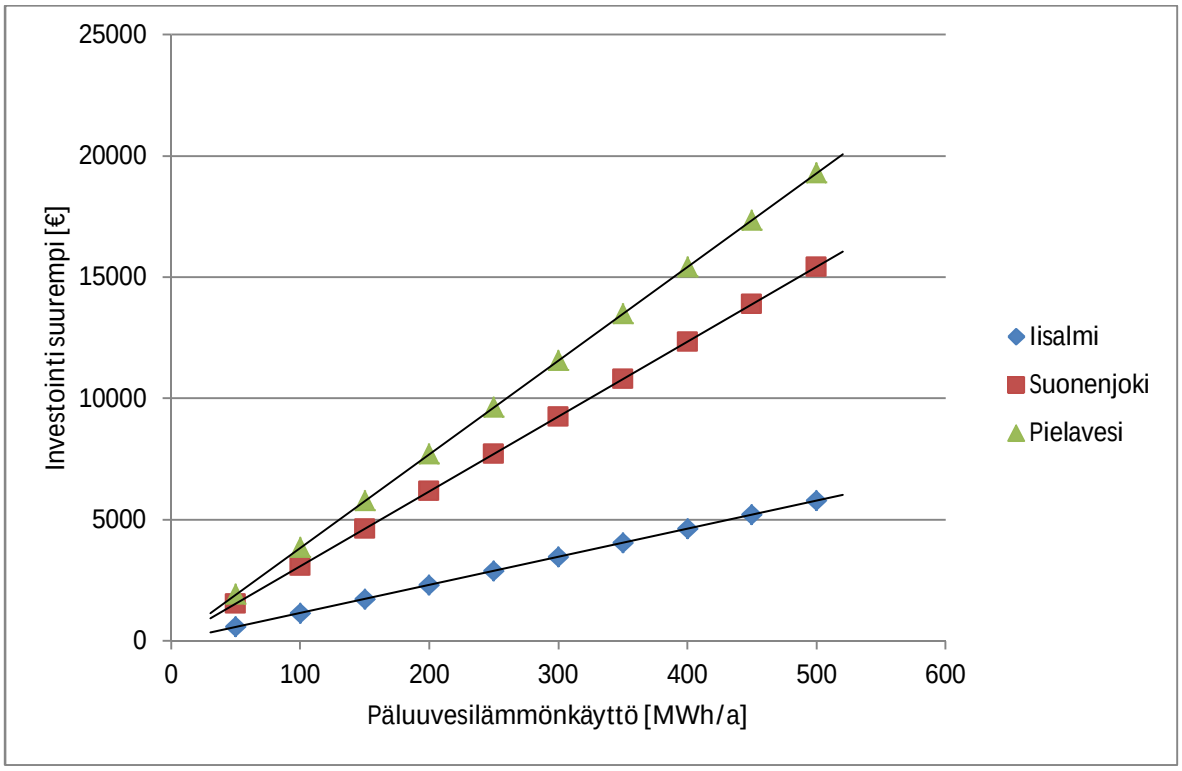
Paluuvesilämmityksen mahdollistava kytkentämuutos olisi järkevää tehdä asiakkaan lämmönjakokeskussaneerauksen yhteydessä. Lisäkustannuksia verrattuna normaaliin lämmönjakokeskussaneeraukseen aiheutuu paluuvesilämmityksen mahdollistavan lämmönjakokeskuksen korkeammasta hinnasta. Lisäksi kytkentämuutos vanhoille asiakkaille vaatisi toisen paluuvesijohdon rakentamisen kaukolämpöveden paluujohdosta kiinteistöön. Tämä vaatisi samat maanrakennustyöt kuin normaalissa kaukolämpökytkennässä. Lisäksi kustannuksia aiheutuisi uuden paluuvesiputken rakennus- ja materiaalikustannuksista. Näin kytkentämuutoksesta aiheutuvien liittymän rakennuskustannusten suuruus on noin 50-70 % normaalin kaukolämpökytkennän suuruudesta. Uusi johto olisi paluuveden paluujohto verkkoon, sillä se täytyy mitoittaa suurentuneen paluuvesivirtauksen takia isommaksi kuin alkuperäinen paluujohto. Näin vanha paluujohto toimisi paluuveden tuloputkena kiinteistöön.

Mikäli vanhan paluujohdon koko ei riitä lämmitykseen tarvittavalle paluuveden tulovirtaukselle, rakennetaan myös paluuvedelle uusi tuloputki. Vanhaa tuloputkea voitaisiin käyttää normaalin yhä normaalin kaukolämmön menoveden tuloputkena. Näin uusia putkia tulisi rakentaa kaksi kappaletta ja liittymiskustannukset olisivat normaalin kaukolämpöliittymän suuruiset.

Kannattavuuslaskelmissa uuden johdon rakentamiskustannuksina käytetään kuitenkin uuden paluuvesilämmitysliittymän rakentamiskustannuksia sillä vanhan saneerattavan kohteen kaukolämpöputket kannattaa todennäköisesti vaihtaa kerralla kokonaan uusiin.

Paras vaihtoehto paluuvesilämmityksen mahdollistavalle lämmönjakokeskukselle on kytkentävaihtoehto 1, jossa lämpimän käyttöveden lämmitys hoidetaan normaalisti kaukolämmön menovedellä ja lämmityspiirin lämmitys hoidetaan paluuvedellä.

Asiakkaan kannalta investointi voisi olla kiinnostava, mikäli sen takaisinmaksuaika verrattuna normaaliin lämmönjakokeskussaneeraukseen olisi 5 vuotta. Kuvassa 36 on esitetty kuvaajat tarkasteltaville paikkakunnille kuinka paljon paluuvesilämmityksen mahdollistava lämmönjakokeskussaneeraus saa asiakkaalle maksaa enemmän kuin normaali lämmönjakokeskussaneeraus, jotta takaisinmaksuaika olisi 5 vuotta. Laskennassa käytetty laskentakorko on 5 % ja jäähtymähyvityksen arvot samoja kuin luvussa 10.2.



Kuva 36. Kuvaajat tarkasteltaville paikkakunnille kuinka paljon paluuvesilämmityksen mahdollistava lämmönjakokeskussaneeraus saa asiakkaalle maksaa enemmän kuin normaali lämmönjakokeskussaneeraus 5 vuoden takaisinmaksuajalla.

Kuvasta 37 näkyvät summat, kuinka paljon paluuvesilämmitysinvestointi saa maksaa enemmän verrattuna normaaliin lämmönjakokeskussaneeraukseen, riittävät Suonenjoen ja Pielaveden tapauksessa noin 250 MWh:n paluuvesilämmön käytöstä ylöspäin kalliimman lämmönjakokeskuksen hinnan kattamiseen kytkentävaihtoehto 1:ssä. Todellisuudessa asiakas joutuu maksamaan myös osan liittymän uudelleenrakentamisesta koituvista kuluista ja näin saneerauksen yhteydessä ei päästä 5 vuoden korolliseen takaisinmaksuaikaan. Vanhoissa lämmitysjärjestelmissä on yleisesti käytetty korkean lämpötilatason lämmitysratkaisua, joten myös lämmitysjärjestelmä täytyisi uusia

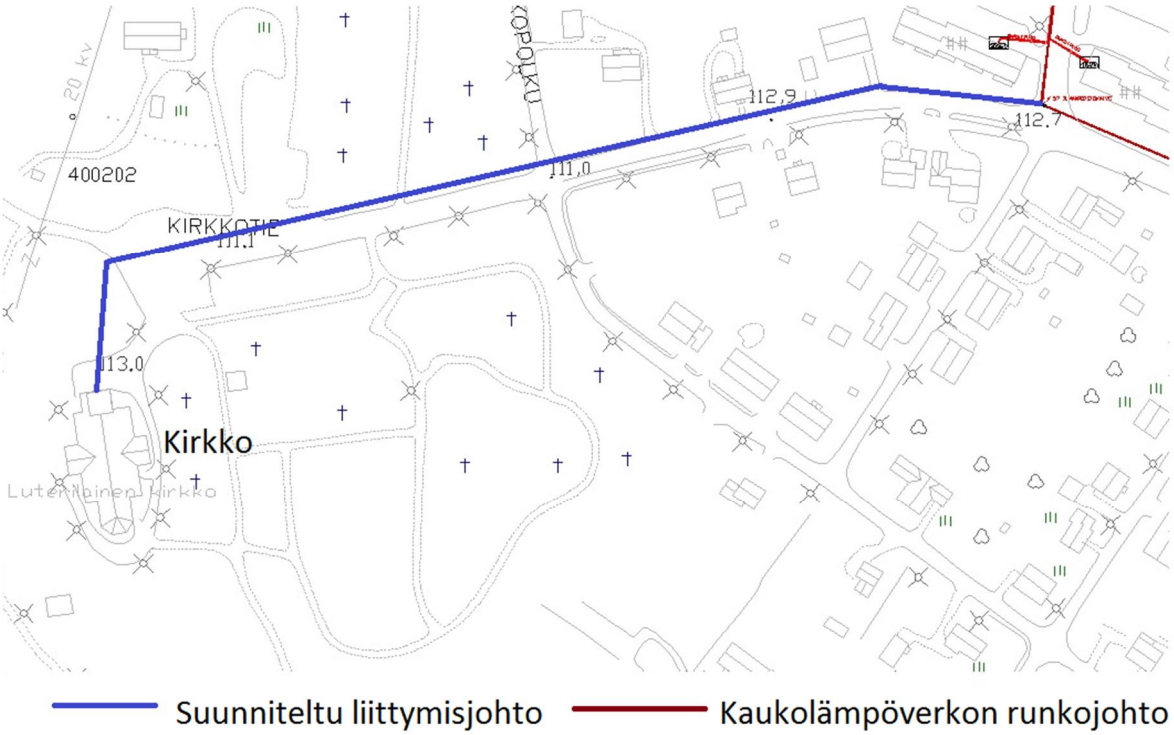
paluuvesilämmityksen mahdollistamiseksi. Tästä aiheutuvat kustannukset lisäävät myös paluuvesilämmityksen kustannuksia, ellei lämmitysjärjestelmää uusittaisi paluuvesilämmitysinvestoinnista huolimatta.

Kerrostaloesimerkkikohteessa Pielavedellä, jonka kokonaislämmönkäyttö on 300 MWh vuodessa, saadaan korolliseksi takaisinmaksuajaksi paluuvesilämmitykseen liittymiselle lämmönjakokeskussaneerauksen yhteydessä 15 vuotta. Laskennassa kytkentävaihtoehto 1 aiheuttaa lisäkustannuksia lämmönjakokeskuksen osalta. Liittymän uudelleenrakentamisesta aiheutuu kuluja asiakkaalle noin 6000 €. Liittymän uudelleenrakentamisen kuluista on vähennetty Savon Voiman 5 vuoden ajalta saaman säästön nykyarvo. Laskentakorkona laskennassa on käytetty 5 %. Laskelmassa ei ole otettu huomioon mahdollista lämmitysjärjestelmän uusimista.

Mikäli asiakas tavoittelisi paluuvesilämmitykseen liittymisellä 10 vuoden takaisinmaksuaikaa, voisi investointi olla kannattava Pielaveden ja Suonenjoen tapauksessa noin 400 MWh:n vuosittaisella paluuvesilämmönkäytöllä, mikäli lämmitysjärjestelmän vaihtamisesta ei aiheutuisi kustannuksia. Yleisesti voidaan kuitenkin todeta, ettei nykyisen asiakkaan liittäminen paluuvesilämmitykseen ole kannattavaa normaalissa tapauksessa. Ison lämmönkäyttäjän tapauksessa kannattavuutta kannattaa kuitenkin tarkastella yksityiskohtaisemmin.

10.5 Case-tarkastelu, Pielaveden kirkko

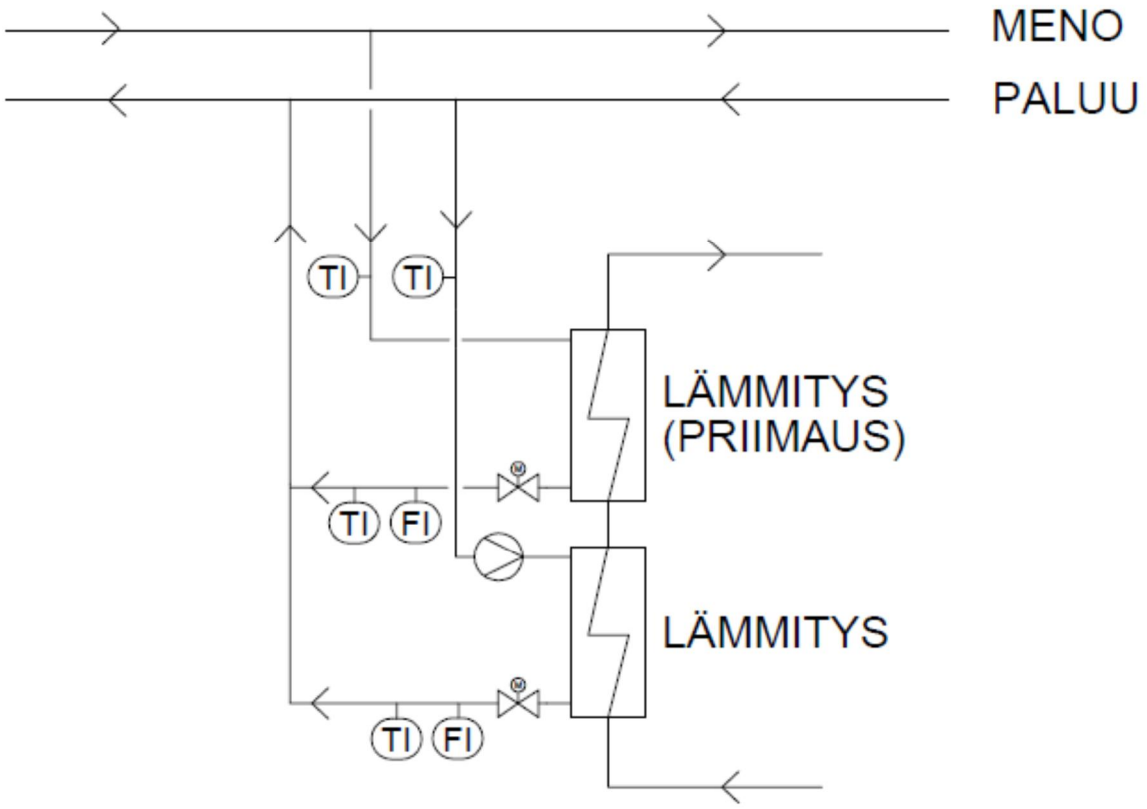
Työhön on valittu esimerkkikohteeksi mahdollisesti lähitulevaisuudessa kaukolämpöön liittymässä oleva Pielaveden kirkko. Tässä luvussa tarkastellaan paluuvesilämmityksen taloudellisuutta verrattuna normaaliin kaukolämpökytkentään kyseisessä kohteessa. Pielaveden kirkko sijaitsee hankalassa paikassa Pielaveden kaukolämpöverkkoon nähden. Sen etäisyys lähimmästä runkojohdosta on noin 400 metriä ja näin sen liittymiskustannukset nousevat korkeaksi ja samalla myös paluuvesilämmityksen vaatima ylimääräisen kolmannen liittymisputken rakentamiskustannukset ovat korkeat. Pielaveden kirkon sijainti Pielaveden kaukolämpöverkkoon nähden sekä mahdollinen liittymisjohdon reitti on esitetty kuvassa 37.



Kuva 37. Pielaveden kirkon sijainti kaukolämpöverkkoon nähden sekä mahdollinen liittymisjohdon reitti.

Alustavien tietojen mukaan kirkkoon on suunniteltu ilmalämmitystä, jonka kiertonesteen maksimi lämpötilataso olisi 60 °C. Näin kaukolämpöverkon paluuveden keskimääräinen lämpötila ei riittäisi tyydyttämään kirkon lämmöntarvetta kovimmilla pakkaskeleillä, jolloin lämmöntarve on suurimmillaan. Näin talven kylmimmillä keleillä käytettäisiin paluuveden rinnalla myös kaukolämmön tulovettä lämmityksessä riittävän korkean lämpötilatason saavuttamiseksi lämmityksen kiertonesteelle. Kirkossa on lämpimän käyttöveden tarve hyvin vähäistä, joten lämpimän käyttöveden lämmitystä ei todennäköisesti tulla liittämään kaukolämpöön. Paluuvesilämmityksen mahdollistava kytkentäkuva Pielaveden kirkon lämmönjakokeskuksesta on esitetty kuvassa 38. Kuvassa näkyvät sarjaan kytketyt lämmönsiirtimet, joista ensimmäisenä on paluuvedellä toimiva lämmönsiirrin ja viimeisenä kaukolämmön tulovedellä toimiva lämmönsiirrin, jolla voidaan toisiopiirin nesteen lämpötila priimata haluttuun lämpötilaan, mikäli kiertonesteen lämpötila ei ole riittävän korkea paluuvesilämmönsiirtimen jälkeen. Kuvassa näkyvät kaukolämpöveden säätöventtiilit voidaan asentaa saman säätökeskuksen alle sarjaan, jolloin paluuveden säätöventtiili avautuu ensimmäisenä ja mikäli toisiopiirin kiertoneste ei saavuta haluttua lämpötilaa tämän säätöventtiilin ollessa täysin auki, lähtee tuloveden

säätöventtiili avautumaan. Paluuveden kiertopumppu on taajuusmuuntajasäädetty ja se pitää vakio paine-eroa pumpun yli.



Kuva 38. Paluuvesilämmityksen mahdollistava lämmönjakokeskuskytkentä Pielaveden kirkkoon.

Pielaveden kirkon lämmitettävä tilavuus on 14 200 m^3. Lämmityksen lämmönsiirtimeltä vaadittava teho tulisi olemaan noin 25 W/m^3, joten lämmönsiirtimien huipputehoksi tulee 355 kW. Lämmönsiirtimen ominaistehona on käytetty hieman normaalista suurempaa arvoa kirkon huonon lämpöeristyksen takia sekä lämmityksentarpeen jaksottaisuuden takia. Kirkko tultaisiin todennäköisesti pitämään arkipäivisin viileämmässä lämpötilassa kuin viikonloppuisin. Kun kirkkoa aletaan lämmittää viikonloppuna haluttuun lämpötilaan, vaaditaan lämmönsiirtimeltä suurempaa tehoa kuin siinä tapauksessa, jos sisälämpötila pidettäisiin tasaisena läpi viikon. Paluuvettä käyttävää lämmönsiirrintä ei tarvitse mitoittaa koko tälle huipputeholle, sillä paluuveden lämpötilataso ei kuitenkaan riitä suurimman tehontarpeen aikaan. Sen sijaan tulovedellä toimiva lämmönsiirrin mitoitetaan huipputeholle, jotta sillä voidaan pelkästään kattaa lämmöntarve. Paluuveden

hyödyntämisen mahdollistavasta lämmönjakokeskuksesta pyydetyn tarjouksen perusteella sen hinta olisi noin 10 900 € (Pakarinen 2011). Sen sijaan normaalin pelkästään tulovettä käyttävän lämmönjakokeskuksen hinta-arvio on noin 6000 € (Pakarinen 2011).

Ylimääräisestä liittymisputkesta tulee lisäkustannuksia liittymiskustannuksiin noin 50 €/m eli kokonaissummaksi liittymän lisäkustannuksille 400 metrin liittymismatkalle tulee 20 000 €. Pielaveden liittymisjohto sijaitsee kaukolämpöverkon rengasjohdossa, joten sen liitynnässä kaukolämpöverkkoon täytyisi käyttää luvussa 8.3 esitettyä lisäsilmukkaa, jonka lisäkustannukseksi on arvioitu 2500 €. (Pitkänen 2011) Liittymiskustannuksia lisää myös tarvittava ylimääräinen mittauskeskus, joka aiheuttaa lisäkustannuksia noin 1000 €. Näin liittymiskustannukset ovat noin 23 500 € suuremmat kuin normaalissa kaukolämpöliittymässä. Tätä koko summaa ei kuitenkaan tultaisi perimään asiakkaan liittymismaksussa, sillä myös Savon Voima saa osan paluuvesilämmön tuomasta rahallisesta hyödystä.

Pielaveden kirkon lämmöntarve on vuodessa noin 420 MWh. Koska kylmimmillä keleillä osa lämmöntarpeesta tullaan kattamaan normaalilla menovesikaukolämmöllä, ei koko tälle lämmönkäytölle saada jäähtymähyvitystä. Laskelmissa on arvioitu, että noin 85 % lämmöntarpeesta voitaisiin kattaa paluuvesilämmöllä eli noin 357 MWh. Pielavedellä asiakkaalle myönnettävissä olevalle jäähtymätermin suuruudeksi on työn aikaisemmissa laskelmissa saatu 5 €/MWh. Näin asiakkaan lämpöenergiakustannukset olisivat vuodessa 1785 € alhaisemmat, kuin käytettäessä normaalia kaukolämpökytkentää. Myös Savon Voima saisi nykyisellä lämmön tuotantorakenteella samansuuruisen rahallisen hyödyn asiakkaan käyttämästä paluuvesilämmöstä.

Paluuvesilämmityksen mahdollistavan liittymän rakentamiselta vaadittavaksi korolliseksi takaisinmaksuajaksi Savon Voimalle valitaan 8 vuotta. Korkokantana laskennassa käytettään 5 %:a. Tänä aikana Savon Voima saaman rahallisen hyödyn nykyarvo paluuvesilämmön käytöstä on 11 540 €. Asiakkaalta perittävä liittymismaksu tulisi olemaan paluuvesilämmityksen mahdollistavan liittymän lisäkustannusten ja Savon Voiman takaisinmaksuaikana saaman rahallisen hyödyn erotuksen verran suurempi, kuin

normaalissa kaukolämpökytkennässä. Näin liittymismaksu tulisi olemaan asiakkaalle noin 11 960 € kalliimpi, kuin normaalissa kaukolämpöliitynnässä.

Lisäkustannuksia asiakkaalle aiheuttaa myös kalliimpi lämmönjakokeskus yhteensä 5900 €. Näin paluuvesilämmityksen mahdollistava investointi olisi yhteensä 17 860 € kalliimpi kuin normaali kaukolämpökytkentä. Asiakkaan saaman rahallisen hyödyn ollessa 1785 €/a, jää investoinnin korolliseksi takaisinmaksuajaksi 5 %:n korkokannalla 14,2 vuotta. Näiden laskelmien perusteella voidaankin todeta, ettei paluuvesilämmitysinvestointi ole taloudellisesti kannattava Pielaveden kirkossa eikä Savon Voiman kannata lähteä tarjoamaan asiakkaalle kyseistä ratkaisua.

Pielaveden kirkon pitkä liittymismatka kaukolämpöverkkoon tekee paluuvesilämmitysinvestoinnista kannattamattoman. Pitkän liittymismatkan takia lisäputken aiheuttamat kustannukset nousevat liian suureksi kannattavan paluuvesilämmitysratkaisun kannalta. Mikäli liittymismatka olisi 200 metriä, saataisiin vastaavalla laskentatavalla korolliseksi takaisinmaksuajaksi 5,1 vuotta. Näin paluuvesilämmitysratkaisu olisi myös asiakkaan kannalta mieluisa ja sitä voitaisiin tarjota asiakkaalle.

11 POTENTIAALI ENERGIA- JA KOKONAISKUSTANNUSSÄÄSTÖILLE

Paluuvesilämmityksen toteuttaminen voisi olla kohteesta riippuen taloudellisesti kannattavaa Suonenjoella ja Pielavedellä. Myös Leppävirralle on mahdollisesti tulossa lähitulevaisuudessa savukaasupesuri lämmöntalteenotolla lämpökeskusinvestoinnin yhteydessä. Näin paluuvesilämmityksen potentiaalia pyrittiin arvioimaan näillä paikkakunnilla.

Kuten luvussa 10.4 todettiin, ei nykyisen asiakkaan liittäminen paluuvesilämmitykseen ole normaalitapauksessa kannattavaa. Asiakkaan vuotuisen lämmönkäytön tulisi olla riittävän suuri ja lämmitysjärjestelmän tulisi myös olla sopiva paluuvesilämmitykseen, jotta paluuvesilämmitykseen liittyminen olisi taloudellista lämmönjakokeskuksen uusinnan

yhteydessä. Vanhemmissa kohteissa lämmitysjärjestelmät ovat kuitenkin yleisesti korkean lämpötilatason lämmitysjärjestelmiä, joten esimerkiksi kerrostalotapauksessa paluuvesilämmitykseen siirtyminen vaatisi täydellistä kohteen saneerausta, jossa myös lämmitysjärjestelmä vaihdettaisiin esimerkiksi patterilämmityksestä lattialämmitykseen. Näin potentiaalisen kohteen löytyminen mahdollisilta paikkakunnilta on erittäin hankalaa, eikä nykyisistä asiakkaista pystytä arvioimaan potentiaalia energia- ja kokonaiskustannussäästöille. Paluuvesilämmityksestä tulisi kuitenkin kertoa asiakkaille, jotka ovat suunnittelemassa lämmitysjärjestelmän uusimista, jolloin uusimisen yhteydessä paluuvesilämmitysvaihtoehdon taloudellisuus voitaisiin tarkastaa yksityiskohtaisemmin.

Mahdollisilla paluuvesilämmityspaikkakunnilla ei ole tiedossa suunniteltavia uudiskohteita, joissa paluuvesilämmitys olisi mahdollista. Tällaisia kohteita voisivat olla suuret asuinrakennukset, teollisuushallit tai mahdollisesti myös lämmitettävät kadut ja nurmikentät. Mikäli kyseisille paikkakunnille ryhdytään suunnittelemaan uudiskohdetta kaukolämmöllä, täytyy Savon Voiman heti suunnittelun alussa tarjota asiakkaalle paluuvesilämmitysvaihtoehtoa, jolloin sen taloudellisuus voidaan selvittää ja kohteen lämmitysjärjestelmän suunnittelussa voidaan ottaa huomioon matalan lämpötilatason lämmitysjärjestelmän tarve. Näin myös uusien asiakkaiden kohdalla potentiaalin arviointi on erittäin hankalaa.

12 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämä diplomityön tavoitteena oli määrittää kaukolämpöverkon paluuveden hyödyntämismahdollisuudet rakennusten lämmityksessä Savon Voima Oyj:n kaukolämpöpaikkakunnilla. Työssä tarkasteltiin paremman kaukolämpöveden jäähtymän vaikutuksia kaukolämpöverkkoon sekä laskettiin esimerkkipaikkakunnilla Iisalmessa, Pielavedellä ja Suonenjoella kaukolämmön paluuveden lämpötilan alentumisen tuomat rahalliset hyödyt. Näiden avulla määritettiin paluuvesilämmön käytöstä asiakkaalle myönnettävissä oleva jäähtymähyvitys. Työssä kehitettiin myös Pöyryn tutkimuksen pohjalta paluuvesilämmityksen mahdollistavien lämmönjakokeskusten kytkentöjä ja tarkasteltiin niiden investointikustannuksia verrattuna normaaliin kaukolämpökytkentään. Investointikustannusten ja jäähtymähyvitysten perusteella tarkasteltiin

paluuvesilämmityksen taloudellisuutta esimerkkipaikkakunnilla ja määritettiin paluuvesilämmityksen taloudelliselle kannattavuudelle karkeat reunaehdot. Lisäksi työssä pohdittiin kaukolämpöveden jäähtymän huomioivaa kaukolämpötariffia nykyisille asiakkaille.

Asiakkaan käyttämän paluuvesilämmön aiheuttaman paremman jäähtymän seurauksena rahallista säästöä syntyy kaikissa kaukolämpöverkoissa lämpöhäviöiden sekä pumppauskustannusten pienenemisen seurauksena. Työssä tarkastelluilla paikkakunnilla pumppauskustannuksissa paluuvettä jäähdyttävästä energiasta saatu hyöty on Iisalmessa 0,5 €/MWh, Pielavedellä 0,7 €/MWh sekä Suonenjoella 0,8 €/MWh. Lämpöhäviöiden pienenemisestä saatu rahallinen hyöty vaihtelee enemmän paikkakunnittain ollen Iisalmessa 1,7 €/MWh, Pielavedellä 2,9 €/MWh ja Suonenjoella 1,5 €/MWh. Iisalmessa paluuvettä jäähdyttävästä energiasta saadaan hyötyä myös voimalaitoksen sähköntuotannon lisääntymisenä 0,7 €/MWh. Suurin jäähtymähyöty saadaan Pielaveden nykyisellä ja Suonenjoen uudella biolämpökeskuksella savukaasupesurin lämmöntalteenotosta. Pielavedellä tästä saatu rahallinen hyöty on 6,4 €/MWh ja Suonenjoella 6,1 €/MWh.

Paluuvesilämpöä voitaisiin myydä asiakkaalle jäähtymähyvityksen verran alhaisempaan hintaan. Tämä jäähtymähyvitys tulisi olemaan noin puolet tässä työssä lasketusta paikkakunnan kokonaisjäähtymähyödystä, sillä jäähtymähyöty vaihtelee suuresti lämmön tuotantorakenteen ja polttoaineen hinnan vaihteluiden seurauksena. Lisäksi pesuripaikkakunnilla pesurin vikaantuessa jää suurin osa paikkakunnan jäähtymähyödystä todellisuudessa saamatta. Näillä perusteilla jäähtymähyvityksen suuruudeksi Iisalmessa jää 1,5 €/MWh, Pielavedellä 5 €/MWh ja Suonenjoella 4 €/MWh.

Parhaaksi vaihtoehdoksi paluuvesilämmön hyödyntämiseksi osoittautui työssä käsitelty kytkentävaihtoehto 1, jossa käyttövesi lämmitettäisiin normaalisti kaukolämmön tulovedellä. Lämmityspiirin lämmitys sen sijaan hoidettaisiin paluuvedellä. Myös lämmityspiirin lämmönsaanti varmistettaisiin tulovedellä, asentamalla lämmityspiirin lämmitykseen paluuvesilämmönsiirtimen kanssa sarjaan tulovesilämmönsiirrin. Tämän lämmönjakokeskuksen kustannus on noin 1,7 kertainen verrattuna normaaliin

lämmönjakokeskukseen. Lämmönjakokeskuksen lisäksi asiakkaalle koituu mahdollisesti lisäkustannuksia paluuvesilämmityksestä korkeampana liittymismaksuna verrattuna normaaliin kaukolämpöliittymään ylimääräisen liittymisputken takia. Paluuvesilämmitykseen liitettävässä kiinteistössä tulisi myös olla matalalämpötilainen lämmitysjärjestelmä, jotta paluuveden lämpötilataso riittäisi lämmitysjärjestelmän kiertonesteen lämmittämiseen.

Asiakasta ei voida myöskään liittää paluuvesilämmitykseen verkon kaikissa osissa. Paluuvesivirtauksen tulee olla riittävän suuri runkojohdossa, jotta siitä on otettavissa riittävä määrä lämpöä paluuvesilämmityksen pienemmällä lämpötilaerolla. Riittävän virtauksen takaamiseksi tulisi jokaisen paluuvesilämmitykseen liitettävän asiakkaan liittymiskohdan virtaukset verkossa mallintaa. Myös mahdollinen virtaussuunnan vaihtuminen aiheuttaa ongelmia paluuveden hyödyntämisessä, mutta tämän ongelman ratkaisemiseen voidaan käyttää työssä esiteltyä paluuputken lisäsilmukkaa.

Työssä käsitellyn esimerkkikerrostalon, jonka vuosittainen lämmönkäyttö on 300 MWh, paluuvesilämmityksen korollinen takaisinmaksuaika olisi Pielavedellä 6,7 vuotta ja Suonenjoella 9 vuotta. Sen sijaan Iisalmessa paluuvesilämmitys ei ole taloudellisesti kannattavaa pesurista saatavan hyödyn puuttumisen takia. Mikäli paluuvesilämmityksellä tavoiteltaisiin 8 vuoden korollista takaisinmaksuaikaa, tulisi vuosittainen lämmönkäyttö kiinteistössä olla Pielavedellä noin 250 MWh ja Suonenjoella noin 300 MWh.

Paluuveden paremmalla jäähtymällä saatavia säästöjä on mahdollista saavuttaa myös kannustamalla nykyisiä normaalia tulovesilämpöä käyttäviä asiakkaita pitämään kaukolämpölaitteistaan huolta ja säilyttämään kaukolämpöveden jäähtymä kohtuullisella tasolla. Nykyinen Savon Voiman kaukolämpötariffi ei kannusta asiakasta millään tavoin kiinnittämään huomiota omaan jäähtymään. Parhaaksi vaihtoehdoksi tähän osoittautui kaukolämmön liittymis- ja myyntiehtoihin perustuva energiamaksun lisäys, jossa energiamaksun osuus laskettaisiin vähintään liittymis- ja myyntiehdoissa velvoitettavalla kaukolämpöveden jäähtymällä. Sen sijaan työssä tarkasteltu mahdollinen jäähtymähyvitys jäisi nykyiselle asiakkaalle niin pieneksi, ettei se kannustaisi kaikkia asiakkaita kiinnittämään huomiota jäähtymään. Mahdollinen lisämaksu kohdistuisi vain huonojen

jäähdyttäjien ääripäähän ja sen käytön tarve tulisi olemaan harvinaista. Lisämaksu toimisi lähinnä kannustimen huonoille jäähdyttäjille, jotka huonontavat merkittävästi kaukolämmönjakelun ja -tuotannon energiatehokkuutta.

Työn lopputulosten perusteella voidaan todeta, että ilman paikkakunnan kaukolämmön tuotannossa olevaa lämmöntalteenottosavukaasupesuria, ei paluuvesilämmitys ole kannattavaa. Kaikilla kaukolämpöpaikkakunnilla paremmasta kaukolämpöveden jäähtymästä saatava hyöty pumppauskustannusten ja lämpöhäviöiden pienentymisen seurauksena on rahallisesti niin pieni, ettei se riitä kattamaan paluuvesilämmityksestä asuinkiinteistölle koituvia suurempia investointikuluja. Ainoastaan lämmönjakokeskusratkaisu, jossa riittäisi pelkkä paluuvesilämpö eikä ylimääräistä liittymisputkea tai ylimääräisiä laitteita kiertovesipumppua lukuun ottamatta tarvittaisi, voisi olla taloudellisesti kannattava kaukolämpöverkossa jossa ei kaukolämmöntuotannon yhteydessä ole lämmöntalteenottosavukaasupesuria.

Paluuvesilämmityksen taloudellisuus vaatisi myös riittävän suuren vuosittaisen paluuveden lämmönkäytön. Paluuvesilämmityksen kannattavuus riippuu myös suuresti halutusta takaisinmaksuajasta. Jotta kytkentävaihtoehdolla 1 päästäisiin 5 vuoden takaisinmaksuaikaan, tulisi vuosittaisen lämmönkäytön olla Pielavedellä 450 MWh. Sen sijaan 8 vuoden takaisinmaksuaikaan päästäisiin Pielavedellä jo 250 MWh:n lämpöenergian vuosikäytöllä. Nykyisen kaukolämpöasiakkaan liittäminen paluuvesilämmitykseen ei ole taas kannattavaa kuin erityistapauksissa uuden liittymisjohdon rakentamiskustannusten takia.

Koko työn tulosten pohjalta voidaan todeta, ettei paluuvesilämmityksestä synny tulevaisuudessa Savon Voimalle kaukolämpötuotetta, jota ryhdyttäisiin yleisesti markkinoimaan. Sen sijaan uusille suurille kaukolämpöasiakkaille voidaan paluuvesilämmitysvaihtoehtoa tarjota paikkakunnilla, joissa on käytössä kaukolämmöntuotannossa lämmöntalteenottosavukaasupesuri. Myös mahdollisissa uusissa erikoiskohteissa, kuten esimerkiksi katulämmityksissä, voidaan paluuvesilämmitystä tarjota asiakkaalle muillakin paikkakunnilla. Jokaisen uuden paluuvesilämmitysasiakkaan

kohdalla täytyy kuitenkin kannattavuus tarkastella erikseen. Myös asiakkaan sijainnin sopivuus kaukolämpöverkossa paluuvesilämmitykseen täytyy tarkastaa tapauskohtaisesti.

LÄHTEET

Energiateollisuus. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki: Energiateollisuus. 566 s. ISBN 952-5615-08-1.

Heikkilä Timo. 2011. Kaukolämmön hinnoittelurakenteet. Opinnäytetyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu, talotekniikka.41 s. Saatavissa: http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2011060310816

Heinikainen Iikka. 2001. Kaukolämpöveden jäähdytyksen parantaminen. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Energiatekniikan osasto. Lappeenranta. 97 s.

Hintsala Eino. 2011. Hallituksen puheenjohtaja, Ouman Oy. Puhelinkeskustelu 18.10.2011.

Huovilainen R T, Koskelainen L. 1982. Kaukolämmitys. Ensimmäinen painos. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. 187 s. ISBN 951-763-209-6.

Meuronen Vesa. 2002. Kaukolämmitys. Opetusmoniste. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Energia- ja ympäristötekniikan osasto. Opetusmoniste EN C-156. ISBN 951-764-721-2.

OPET. 2004. High cogeneration performance by innovative steam turbine for biomassa-fired CHP plant in Iisalmi, Finland. OPET Finland, VTT Processes. 3s. [Viitattu 24.8.2011]. Saatavissa: http://www.opet-chp.net/download/wp3/iisalmifinland.pdf

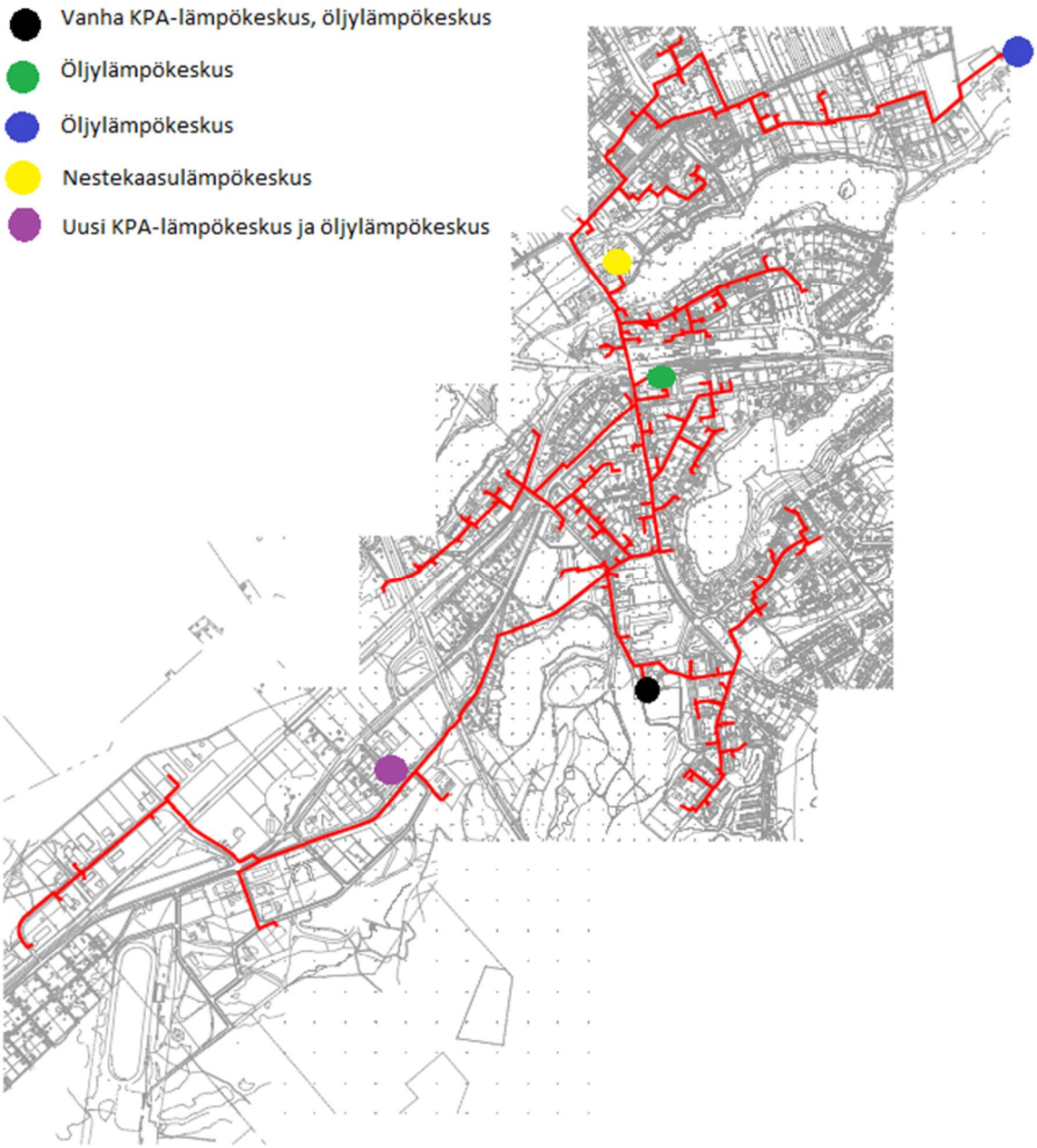
Pakarinen Jouni. 2011. Piiripäällikkö, Oy Danfoss Ab. [Sähköpostiviestit 12.10. – 21.10.2011].

Pitkänen Aki. 2011. Insinööri; kaukolämpöverkostoinsinööri, Savon Voima Oyj. Siilinjärvi. Keskustelu.

Pöyry. 2010. Kaukolämpöjärjestelmän paluuveden hyväksikäyttö kiinteistöjen lämmityksessä. Pöyry Finland Oy. 53 s. Viite 60N50162.01-E0001. Saatavissa: http://www.energia.fi/sites/default/files/paluuvesilammitys_loppuraportti_20100224.pdf

Savon Voima Oyj 2011. Yritysesittely Savon Voima Oyj:n www-sivuilla. [Viitattu 15.8.2011]. Saatavissa: http://www.savonvoima.fi/Yritysesittely/Konserni/Sivut/konserni.aspx

Iisalmen kaukolämpökartta

Pielaveden kaukolämpökartta

Suonenjoen kaukolämpökartta