

Saara Mäkäräinen

KAUKOLÄMMÖN TEHOMAKSUN TARKASTAMINEN

Tilaustehon ja tilausvesivirran määrittäminen
tuntiluontatiedoista

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Kandidaatintyö
Marraskuu 2020

TIIVISTELMÄ

Saara Mäkäräinen: Kaukolämmön tehomaksun tarkastaminen: Tilaustehon ja tilausvesivirran määrittäminen tuntiluentatiedoista

Revision of district heating standing costs: Determining supply power and supply water flow from hourly-metered data

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Tekniikan ja luonnontieteiden TkK -tutkinto-ohjelma, ympäristö- ja energiatekniikka

Lokakuu 2020

Kaukolämmön osuus suomalaisilla lämpömarkkinoilla on suuri ja se on edelleen suosittu valinta lämmitysmuodoksi uudisrakennuksissa. Siitä huolimatta kaukolämmön kilpailukyky on heikentynyt. Kilpailukykyä voi parantaa esimerkiksi kehittämällä kaukolämmön hinnoittelua kustannusvastaavampaan suuntaan, jossa energiatehokkuus näkyy asiakkaille edullisina hintoina. Tämä puolestaan edellyttää hinnoitteluperusteena olevien suureiden tarkastamisen automatisointia.

Tässä työssä tutkitaan kaukolämpötariffien tehomaksun muodostumista ja tehomaksun perusteena käytettävien suureiden määrittämistä tasejärjestelmän tuntiluentatiedoista siten, että laskenta voidaan tulevaisuudessa automatisoida dynaamisen hinnoittelun mahdollistamiseksi. Lisäksi työssä tarkastellaan yleisesti kaukolämpöhinnoittelun ominaisuuksia ja kustannusvastaavuutta. Työ ja siihen kuuluva laskentaosio tehdään toimeksiantona Loiste Lämpö Oy:lle. Laskentoihin käytetty aineisto koostuu Loisteen energiatiedonhallintajärjestelmästä kerätyistä tuntiluentatiedoista.

Hinnoittelumallien ominaisuuksien vertailussa huomattiin, että tärkeimpiä hinnoittelun piirteitä ovat kustannusvastaavuus, ymmärrettävyys ja asiakkaan mahdollisuus vaikuttaa itse toiminnallaan maksujen suuruuteen. Tämän vuoksi syvällisempään tarkasteluun valittiin dynaaminen ja tilausvesivirtapohjainen hinnoittelu, koska sen etuina ovat kustannusvastaavuus ja se, että asiakkaalla on hyvät mahdollisuudet vaikuttaa kaukolämmön tehomaksun suuruuteen energiatehokkuustoimenpiteillä.

Tutkimuksessa tilausvesivirta määritetään neljällä eri tavalla. Ensimmäinen laskenta perustuu tuntiluentatietojen regressiolaskentaan. Toinen tapa perustuu suurimman tuntisen vesivirran avulla muunnettuun tilausvesivirran arvoon. Kolmas ja neljäs laskenta perustuvat siihen, että tilausvesivirta lasketaan tuntiluentatiedoista lineaarisella regressiolla määritettyjen tehon ja jäähtymän avulla.

Kaikissa laskennoissa tilausvesivirtojen arvot muuttuivat suhteellisen paljon. Suurimpaan tuntiseen tehoon tai vesivirtaan perustuvaa laskentatapaa ei suositella käytettäväksi, jos suureiden määrittäminen halutaan automatisoida, sillä kyseinen laskenta aiheuttaa liian suuren virheen johtuen yksittäisistä, ulkolämpötilasta riippumattomista kulutuspiikeistä. Regressiolaskennassa 95 % käyttäjäpaikoista sai tulokseksi tilausvesivirran, joka oli pienempi, kuin suurin toteutunut tuntinen virtaama kyseisillä käyttäjäpaikoilla. Tämä johtui osittain siitä, että vuonna 2019 Kajaanissa mitattiin mitoitusulkolämpötilaa kylmempiä ulkolämpötiloja.

Regressiolaskentaa tulisi jatkossa soveltaa myös leutoina vuosina ja tulevaisuudessa sitä tulisi kehittää siten, että se huomioisi myös ne käyttäjäpaikat, joiden energiantarve on vähemmän riippuvainen ulkolämpötilasta. Menoveden lämpötilan huomiointi hinnoittelussa on myös eräs kehityskohde kaukolämmön tehomaksuihin. Meno- ja paluuv veden lämpötilojen huomiointi hinnoittelussa on edellytys asiakkaiden tasapuoliselle kohtelulle, minkä vuoksi tilaustehon ja -vesivirran määrittämisen lisätutkimukselle on tulevaisuudessa tarvetta.

Avainsanat: Kaukolämpö, tariffi, tehomaksu, tilausteho, tilausvesivirta

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on toteutettu osana tekniikan kandidaatin tutkintoa Tampereen yliopistossa. Työ toteutettiin toimeksiantona Loiste Lämpö Oy:lle ollessani kesätyösuhteessa Loiste-konsernilla. Aihe valikoitui työsuhteen alussa Loisteen tarpeesta uudistaa kaukolämmön perusmaksutariffi, mikä loi hyvän pohjan kandidaatintyön tekemiselle.

Kandidaatintyön ohjaajana ja suurena apuna työn tekemisessä toimi Marko Saviniemi, jota haluan kiittää tästä mahdollisuudesta. Markon asiantuntijuus ja kaukolämpöosaaminen olivat kriittisessä osassa työn onnistumisen kannalta. Työn edetessä Markon ohjauksessa oma kaukolämpöosaaminenkin kehittyi.

Lisäksi haluan kiittää koko Loisteen innostavaa ja mukavaa henkilökuntaa ja työtovereita, jotka motivoivat työn tekemiseen.

Tampereella, 01.11.2020

Saara Mäkäpäinen

SISÄLLYSLUETTELO

| | |
|--|----|
| 1. JOHDANTO | 1 |
| 2. LÄMPÖ KAUKOLÄMPÖLIIKETOIMINNASSA..... | 3 |
| 2.1 Lämmönsiirto kaukolämpöverkossa | 3 |
| 2.2 Lämpöhäviöt kaukolämpöverkossa | 4 |
| 2.3 Lämmönvaihtimet kaukolämpöverkossa..... | 4 |
| 2.4 Lämmönsiirto ja lämpöhäviöt hinnoittelussa | 6 |
| 3. HINNOITTELUMALLIEN OMINAISUUKSIA | 7 |
| 3.1 Hyvän hinnoittelumallin piirteitä | 7 |
| 3.2 Teho- ja virtaamapohjaisen kaukolämpötariffin vertailu | 9 |
| 4. TEHOMAKSUTARIFFIT | 11 |
| 4.1 Hinnoittelussa käytettävien suureiden määrittäminen | 11 |
| 4.1.1 Regressiolaskenta ja mitoitusulkolämpötila | 12 |
| 4.1.2 Tilausteho | 12 |
| 4.1.3 Jäähtymä | 15 |
| 4.1.4 Tilausvesivirta | 17 |
| 4.1.5 Menolämpötilan vaikutus tilausvesivirran suuruuteen..... | 17 |
| 4.2 Tehomaksutariffien hintamallit..... | 18 |
| 4.2.1 Tilaustehoon pohjautuva tehomaksu..... | 18 |
| 4.2.2 Tilausvesivirtaan pohjautuva tehomaksu..... | 19 |
| 5. TULOKSET: CASE LOISTE LÄMPÖ OY | 20 |
| 5.1 Tilaustehon määrityksen tulokset | 20 |
| 5.2 Tilausvesivirran määrityksen tulokset..... | 22 |
| 5.3 Taloudellisten vaikutusten alustava arviointi..... | 24 |
| 6. JOHTOPÄÄTÖKSET | 26 |
| LÄHTEET | 28 |

LYHENTEET JA MERKINNÄT

| | | |
|-----------------|--|-------------------------|
| A | lämmönsiirtopinta-ala | [m ²] |
| a | regressiosuoran kulmakerroin | - |
| b | regressiosuoran leikkauspiste | - |
| c_p | veden ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa | [J/(kg°C)] |
| K_1 | lämmönjohtavuus menoputken ja maaperän välillä | [W/(m°C)] |
| K_2 | lämmönjohtavuus meno- ja paluuputkien välillä | [W/(m°C)] |
| \dot{m} | massavirta | [kg/s] |
| P | tilausteho | [kW] |
| S | lämmitystarveluku | [°Cd] |
| T_{DOT} | mitoituskolämpötila | [°C] |
| T_g | maan lämpötila putkisyvyydellä | [°C] |
| T_m | menoputken lämpötila | [°C] |
| T_p | paluuputken lämpötila | [°C] |
| $T_{t,m}$ | toisiopuolen menoputken lämpötila | [°C] |
| $T_{t,p}$ | toisiopuolen paluuputken lämpötila | [°C] |
| TM_P | tilaustehoon perustuva tehomaksu | [€] |
| TM_V | tilausvesivirtaan perustuva tehomaksu | [€] |
| ΔT_{LM} | logaritminen keskilämpötilaero | [°C] |
| U | lämmönläpäisykerroin | [W/(m ² °C)] |
| V | tilausvesivirta | [m ³ /h] |
| \dot{V} | tilavuusvirta | [dm ³ /s] |
| Φ | lämpövirta | [W] |
| Φ'_m | menoputken häviölämpövirta | [W/m] |
| Φ'_p | paluuputken häviölämpövirta | [W/m] |
| Φ'_{tot} | kokonaishäviölämpövirta putkipituutta kohti | [W/m] |
| ρ | tiheys | [kg/m ³] |

1. JOHDANTO

Kaukolämpö on lämmitysmuoto, jossa lämpö tuotetaan yleensä keskitetysti voimalaitoksissa ja jaetaan asiakkaille kaukolämpöverkoston avulla. Kaukolämpöverkosto koostuu eristetyistä kaukolämpöputkista, joissa energia kulkee väliaineeseen, yleensä veteen, sitoutuneena lämpönä. (Mäkelä 2015) Kaukolämmön osuus asuin- ja palvelurakennusten lämmitykseen käytetystä energiasta on 46 %. Kaukolämmön osuus uudisrakennusten lämmitysmuodoista oli 65 % vuonna 2019. (Energiateollisuus ry 2020) Suomalaisten kokonaisenergiankulutuksen määrä oli 384 TWh vuonna 2018, josta kaukolämmön osuus oli 34,8 TWh, eli noin 9 % (Tilastokeskus 2019).

Vaikka kaukolämmön osuus lämpömarkkinoilla on suuri, kaukolämmön hinnoittelu ja kilpailukyky luovat sille tulevaisuudessa suuria haasteita (Paiho & Saastamoinen 2018, s. 671). Esimerkiksi lämpöpumppu- ja hybridiratkaisujen suosio kasvaa teknologian kehittymisen myötä voimakkaasti. Samanaikaisesti polttoaineiden hintojen nousu ja lämmöntuotannon verotuksen korotus luovat haasteita kaukolämmölle. (Korjus 2016, s. 12, 22, 81; Pöyry 2016, s. 22) Näiden lisäksi ilmastotavoitteiden aiheuttamat poliittiset paineet vähähiiliselle energialle ovat suuret, joten kaukolämmöntuotannon tulee kehittyä vastamaan tätä kysyntää (Työ- ja elinkeinoministeriö 2014).

Kaukolämmön pysyminen kilpailukykyisenä lämmitysmuotona edellyttää toimivaa ja kustannusvastaavaa hinnoittelua. Kaukolämmön hinnoittelutrendit ovat siirtyneet kohti asiakaslähtoisempää hinnoittelua, mikä parantaa kilpailukykyä, mutta tekee toisaalta hinnoittelusta monimutkaisempaa (Larsson 2010). Kaukolämmön myynti tapahtuu paikallisesti suoraan kaukolämpöverkosta loppukuluttajalle ja hintatariffit ovat verkkokohtaisia. Hinnanvaihtelua ei tapahdu saman kaukolämpöverkon sisällä, mutta vaihtelua tapahtuu asiakkaiden välillä kulutetun lämpömäärän mukaan. Kaukolämmön hinta määräytyy kustannusten perusteella laadittujen hintatariffien mukaan. (Energiatehokkuuslaki 2014)

Kaukolämmön hinta muodostuu tyypillisesti kolmesta osasta, joita ovat liittymismaksu, energiamaksu ja tehomaksu. (Li et al. 2015, s. 58; Paiho & Saastamoinen 2018, s. 670) Energiankäyttöön perustuvalla muuttuvalla energiamaksulla katetaan pääasiassa polttoainekustannuksia ja lämmönliiketoiminnan muuttuvia kustannuksia. Tehomaksulla kate-

taan pääasiassa lämpöliiketoiminnan kiinteitä kustannuksia. Tehomaksu maksetaan tyyppillisesti kerran vuodessa ja sen osuus asiakkaan vuotuisista kaukolämpömaksuista on 10–50 %. (Energiateollisuus ry 2014, s. 3)

Kaukolämmön hinnoittelua käsittelevässä tutkimuksessa todetaan, että kustannusvastaavuuden säilymiseksi energiankulutukseen perustuvan muuttuvan komponentin osuus tulisi olla maksimissaan 60 % kaukolämmön kokonaishinnoittelusta. Tämä johtuu siitä, että asiakkaan käyttämän energian määrä ei ole täysin verrannollinen asiakkaasta aiheutuviin kustannuksiin. (Rydén et al. 2013, s. 217) Kustannusvastaavuutta pyritään lisäämään kaukolämmön tehomaksukomponentilla, minkä vuoksi se on merkittävä osa kaukolämpöhinnoittelua.

Kaukolämmön hinnoittelun ja hinnoittelumallien tutkimukseen, raportointiin ja kehittämiseen on panostettu kunnolla vasta viime vuosikymmenen aikana (Larsson 2011; Sarvaranta 2012; Rydén et al. 2013; Aarnio 2014; Li et al. 2015; Sarma 2016; Pöyry Management Consulting Oy 2016; Paiho & Saastamoinen 2018). Monet kaukolämpöyhtiöt ovat havahtuneet hinnoittelumallien puutteisiin ja yhtiöiden malleja päivitetään kilpailukyvyyn ja energiatehokkuuden parantamiseksi. Eräät kaukolämpöyhtiöt ovat siirtyneet dynaamisiin hinnoittelumalleihin, joissa kaukolämmön maksuperusteet tarkastetaan tietyn ajan välein (Tampereen Sähkölaitos Oy 2017; Fortum Oy 2020). Tämä on mahdollista etäluettavien mittareiden avulla (Sarvaranta 2012, s. 21), joilla kerättyjä tuntiluentatietoja hyödynnetään tässä tutkimuksessa.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on tarkastella, miten tehomaksukomponentin hinnoittelussa käytetyt suureet määritetään siten, että määrittäisperusteita voidaan käyttää tulevaisuudessa lähtökohtana dynaamiselle hinnoittelulle. Lisäksi on tarkoitus selvittää alustavasti, millaisia vaikutuksia erilaisilla laskentatavoilla on asiakkaisiin ja lämpöliiketoimintaan. Maksuperusteiden määrittäytapojen hyötyjä, haittoja ja toimivuutta pyritään arvioimaan esimerkiverkon avulla suorittamalla sille hinnoitteluun käytettyjen suureiden tarkastuslaskennat. Laskennoissa tarvittavat tuntiluentatiedot kerätään lämpöyhtiön käyttämästä Generis-tiedonhallintajärjestelmästä.

Luvussa 2 käsitellään lämpöoppia ja luvussa 3 käsitellään hinnoittelumallien ominaisuuksia. Luvussa 4 käsitellään, miten hinnoittelussa käytettävät suureet määritetään ja miten tyyppilliset tilausteho- ja tilausvesivirtapohjaiset tariffit muodostuvat. Luvussa 5 sovelletaan luvun 4 laskentoja esimerkkiyritykseen. Luvussa 6 käsitellään johtopäätökset tilaustehon ja tilausvesivirran määrittäyksestä ja pohditaan hinnoittelun ja määrittäyksen kehityskohteita.

2. LÄMPÖ KAUKOLÄMPÖLIKETOIMINNASSA

Kaukolämmön hinnoittelu perustuu lämpöverkoston fysikaalisiin ominaisuuksiin, jotka puolestaan perustuvat lämpö- ja virtausoppiin. Tärkeimpiä kaukolämpöverkon toimintaan liittyviä suureita ovat muun muassa lämpömäärä, lämmitysteho, lämpötila, tilavuusvirta ja paine. Tyypillisesti kaukolämmön tehomaksu perustuu johonkin fysiikan suureeseen, kuten tehoon tai tilavuusvirtaan. (Koskelainen et al. 2006, s. 470) Jotta tehomaksu voidaan muodostaa näiden avulla, on tärkeää ymmärtää, miten nämä fysikaaliset ilmiöt vaikuttavat kaukolämpöverkossa.

2.1 Lämmönsiirto kaukolämpöverkossa

Energia siirtyy kaukolämpöverkossa väliaineeseen sitoutuneena lämpöenergiana. Tätä väliainetta taas pumpataan verkostoa pitkin käyttöpaikoille, eli asiakkaille. Väliaineena käytetään vettä muun muassa sen korkean ominaislämpökapasiteetin vuoksi. Kaukolämpöputkistossa kulkeva kuuma vesi virtaa asiakkaille, jossa veden lämpö luovutetaan asiakkaan käyttö- ja lämmitysveden lämmöksi lämmönvaihtimien avulla. Jäähdytynyt vesi palaa lämmöntuotantolaitokselle uudelleenlämmitettäväksi. (Koskelainen et al. 2006, s. 43)

Kaukolämpöputkistossa virtaavan veden voidaan olettaa virtaavan vakiopaineessa, kun kyseessä on lyhyt tarkasteluväli. Todellisuudessa veden tiheys ja ominaislämpökapasiteetti muuttuvat lämpötilan muuttuessa. Tämän työn tulosten kannalta näiden vaikutus on kuitenkin niin pieni, ettei niitä tarvitse huomioida. (Koskelainen et al. 2006, s. 113)

Asiakkaan kaukolämmitysteho määritetään asiakkaalle veden mukana siirtyvän lämpövirran avulla. Asiakkaalle siirtyvän lämpövirran suuruus saadaan yhtälöstä

$$\Phi = c_p \dot{m} (T_m - T_p), \quad (2.1)$$

jossa Φ on lämpövirta [W], c_p on veden ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa [J/(kg°C)], \dot{m} on veden massavirta [kg/s] ja T_m on veden lämpötila menoputkessa [°C] ja T_p on veden lämpötila paluuputkessa [°C]. Veden massavirta voidaan esittää myös tiheyden ja tilavuusvirran avulla ($\dot{m} = \rho \dot{V}$), jolloin yhtälö tulee muotoon

$$\Phi = c_p \rho \dot{V} (T_m - T_p), \quad (2.2)$$

jossa ρ on veden tiheys [kg/m³] ja \dot{V} on tilavuusvirta [dm³/s].

Yhtälöstä (2.2) voidaan johtaa kaava kaukolämmön tilavuusvirralle lämpövirran sekä kaukolämpöputkien meno- ja paluueden lämpötilojen funktiona. Tällöin yhtälö esitetään muodossa

$$\dot{V} = \frac{\Phi}{c_p \rho \Delta T}, \quad (2.3)$$

jossa ΔT kuvastaa kaukolämpöveden meno- ja paluueden lämpötilojen erotusta, eli jäähtymää [°C]. Myöhemmin, kun tässä tutkielmassa puhutaan jäähtymästä, tarkoitetaan tätä meno- ja paluueden lämpötilojen erotusta. (Koskelainen et al. 2006, s. 113)

2.2 Lämpöhäviöt kaukolämpöverkossa

Kaukolämpöverkon lämpöhäviöt ovat noin 4–10 %, kun kyseessä on suuri verkko. Pie-nempien verkkojen häviöt ovat suuremmat, noin 10–20 %, koska pienempien verkkojen vaippapinta-ala on siirtokykyyn suhteutettuna suurempi. Kaukolämpöputkesta tapahtuu lämpöhäviöitä pääasiassa johtumalla maahan, mutta myös menoputkesta paluuputkeen. (Koskelainen et al. 2006, s. 203)

Symmetristen kaukolämpöputkien kokonaislämpöhäviöt voidaan kirjoittaa muodossa

$$\Phi'_{tot} = \Phi'_m + \Phi'_p = 2(K_1 - K_2) \left[\frac{T_m + T_p}{2} - T_g \right], \quad (2.4)$$

jossa Φ'_{tot} on kokonaishäviölämpövirta [W/m], Φ'_m on menoputken häviölämpövirta [W/m], Φ'_p on paluuputken häviölämpövirta [W/m], K_1 on lämmönjohtavuus menoputken ja maaperän välillä [W/(m°C)], K_2 on lämmönjohtavuus meno- ja paluuputken välillä [W/(m°C)] ja T_g on maan lämpötila putkien syvyydessä [°C]. Lämmönjohtavuudet K_1 ja K_2 riippuvat maaperän, eristeen ja vaipan lämpövastuksista. (Koskelainen et al. 2006, s. 204–205)

2.3 Lämmönvaihtimet kaukolämpöverkossa

Rakennusten kaukolämpölaitteet ja lämmityslaitteet ovat laitteita, jotka säätelevät ja jakavat kaukolämpöveden ja lämpöenergian siirtoa käyttökohteessa. Näiden toiminnalla on oleellinen merkitys kaukolämpöenergian hyödyntämisen ja kaukolämpöveden jäähtymän kannalta. Kaukolämpöverkoston osista puhuttaessa käytetään termejä ensiö- ja toisiopuoli. Ensiöpuoli kattaa ne laitteistot, joissa kaukolämpövesi virtaa. Toisiopuoli kattaa puolestaan ne laitteet, joissa kaukolämpövedellä lämmönvaihtimissa lämmitettävä vesi virtaa. (Energiateollisuus ry 2013, s. 2)

Kaukolämpöveden lämpö siirretään rakennuksen lämmitysverkostoon lämmönvaihtimilla. Lämpövirta kaukolämpöverkoston ensiöpuolelta toisiopuolelle voidaan ilmaista kaavalla

$$\Phi = UA\Delta T_{LM}, \quad (2.5)$$

jossa Φ on lämpövirta [W], U on lämmönläpäisykerroin [$W/(m^2 \text{ } ^\circ\text{C})$], A on lämmönsiirron pinta-ala [m^2] ja ΔT_{LM} on logaritminen keskilämpötilaero [$^\circ\text{C}$]. (Mäkelä 2015, s. 74)

Logaritminen keskilämpötilaero, eli LMTD määritellään

$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}, \quad (2.6)$$

jossa $\Delta T_1 = T_m - T_{t,m}$ on lämpötilojen ero lämmönvaihtimen alkupäässä [$^\circ\text{C}$] ja $\Delta T_2 = T_p - T_{t,p}$ on lämpötilojen erotus lämmönvaihtimen loppupäässä [$^\circ\text{C}$], kun kyseessä on vastavirtavaihdin. Myötävirtavaihtimen tapauksessa yhtälöt ovat $\Delta T_1 = T_m - T_{t,p}$ ja $\Delta T_2 = T_p - T_{t,m}$. Yhtälöissä T_m on kaukolämmön menoveden lämpötila [$^\circ\text{C}$], T_p on kaukolämmön paluulämpötila [$^\circ\text{C}$], $T_{t,m}$ on toisiopuolen menoveden lämpötila [$^\circ\text{C}$] ja $T_{t,p}$ on toisiopuolen paluulämpötila [$^\circ\text{C}$]. (Mäkelä 2015, s. 74)

Kaukolämmön menoveden lämpötilan ja logaritmisen keskiarvolämpötilan suhdetta voidaan tarkastella derivoimalla yhtälöä (2.6). Yhtälön (2.6) osoittajan derivaatta kaukolämmön menoveden lämpötilan suhteen on

$$\frac{d}{dT_m}(\Delta T_1 - \Delta T_2) = 1 \quad (2.7)$$

ja yhtälön nimittäjän derivaatta menoveden lämpötilan suhteen on

$$\frac{d}{dT_m}\left(\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)\right) = \frac{1}{\Delta T_1}. \quad (2.8)$$

Laitteiden toimiessa normaalisti $\Delta T_1 > 1$, jolloin yhtälön (2.6) osoittaja pienenee nopeammin kuin sen nimittäjä, kun kaukolämmön menoveden lämpötila laskee. Täten kaukolämmön menoveden lämpötilan laskiessa LMTD pienenee. Yhtälöstä (2.5) voidaan nähdä, että lämpövirta ja LMTD ovat suoraan verrannollisia keskenään. Täten menoveden lämpötilan laskiessa lämpövirtakin pienenee, kun muut arvot pysyvät vakioina.

Kun lämmönvaihtimen lämpövirta pienenee, virtaaman täytyy kasvaa, jotta siirtyneen lämpöenergian määrä saadaan pidettyä vakiona. Virtaaman kasvu puolestaan johtaa siihen, että vesi viipyy vähemmän aikaa lämmönvaihtimessa, jolloin se myös jäähtyy vähemmän. Tällöin paluueden lämpötila nousee. Tästä voidaan päätellä, että menoveden lämpötilan lasku johtaa pienempään jäähtymän arvoon. (Wiltshire 2015, s. 227)

2.4 Lämmönsiirto ja lämpöhäviöt hinnoittelussa

Kaukolämmön jakelussa yksi suurimmista käyttökustannuseristä tulee lämpöhäviöiden kustannuksista. Kaavasta (2.4) voidaan nähdä, että häviölämpövirran suuruuteen vaikuttavat maaperän lämpötilan ja ominaisuuksien sekä putkien ominaisuuksien lisäksi ai-noastaan meno- ja paluuveden lämpötilojen suuruus. Lisäksi kaavassa häviöt ovat ilmaistu putkipituutta kohti, jolloin kokonaislämpöhäviön suuruus kasvaa etäisyyksien kasvaessa. Tämän vuoksi kaukolämpö on suosittu lämmitysmuoto tiheään asutuilla alueilla kuten kaupungeissa, varsinkin kerrostaloalueilla (Koskelainen et al. 2006, s. 26).

Uutta kaukolämpöverkkoa rakennettaessa on tärkeää kohdistaa lämpöhäviöiden minimoitointitoimenpiteet muun muassa materiaaleihin, mitoitukseen, eristystyöhön ja muihin putkiston ja lämpöverkon ominaisuuksiin. Vanhojen verkkojen lämpöhäviöihin voidaan vaikuttaa jonkin verran korjaus- ja huoltotoimenpiteillä, mutta kustannussyistä ei ole kannattavaa uusia putkistoja pelkästään lämpöhäviöiden pienentämiseksi. (Koskelainen et al. 2006, s. 209–210) Edellä mainituin perustein toimenpiteet lämpöhäviöiden pienentämiseen tulee kohdistaa verkon käyttölämpötiloihin. Kaavasta (2.4) nähdään, että lämpöhäviöt pienenevät, kun lasketaan sekä meno- että paluuveden lämpötilaa.

Lämmöntoimittaja pystyy vaikuttamaan kaukolämmön menopotken lämpötiloihin suorilla toimenpiteillä, mutta kaukolämmön paluuvesien lämpötilojen suuruudet riippuvat asiakkaiden kaukolämpölaitteistoiden toiminnasta (Koskelainen et al. 2006, s. 449). Asiakkaan energiatehokkuustoimenpiteiden näkyminen kaukolämmön hinnoittelussa on näistä syistä suotavaa, sillä ne tasapainottavat toimenpiteistä johtuvia investointikuluja ja lisäävät kaukolämmön kilpailukykyä. Kaukolämmön käyttölämpötilojen pienentäminen sekä asiakkaiden motivoiminen suurempiin jäähtymiin ovat eräitä kaukolämpöjärjestelmien merkittävimpiä parannuskohteita nyt ja tulevaisuudessa (Lund et al. 2014, s. 5, 8), minkä takia monet kaukolämpöyhtiöt ovat siirtyneet tehopohjaisista hinnoittelumalleista yhtälön (2.3) mukaisiin vesivirtapohjaiseen hinnoitteluun.

Menoveden lämpötila vaikuttaa asiakkaan lämmönvaihtimien lämmönsiirtotehoon. Asiakas ei voi vaikuttaa kaukolämmön menoveden lämpötilaan, joten se tulisi huomioida hinnoittelussa. Tilavuusvirran suuruus riippuu jäähtymästä, joka puolestaan on riippuvainen kaukolämmönvaihtimien toiminnasta. Jos kaukolämmönvaihtimille saapuva kaukolämpövesi on kylmempää joillakin asiakkailla, niiden kaukolämmönvaihtimien lämmönsiirtokyky heikkenee (Wiltshire 2015, s. 227), mikä puolestaan johtaa huonompiin jäähtymiin. Eräät kaukolämpöyhtiöt ottavat tämän huomioon käyttämällä lämmöntuotantolaitoksen menoveden lämpötilan ajokäyrän mukaista lämpötilaa jäähtymän määrittämisessä. (Energiateollisuus ry 2014, s. 13)

3. HINNOITTELUMALLIEN OMINAISUUKSIA

Kaukolämmön hinnoittelumallien toimivuuden arviointi on haastavaa, koska esimerkiksi energiayhtiöiden liiketoimintamallit, verkkojen koko ja rakenne sekä kustannusten muodostuminen vaihtelevat paljon yhtiöiden välillä. Tutkimuksissa (Larsson 2010; Rydén et al. 2013; Li et al. 2015; Gåverud et al. 2016; Song et al. 2017) on kuitenkin huomattu joitakin ominaisuuksia, jotka korreloivat muun muassa asiakastyytyvyyden, energiatehokkuuden ja kilpailukyvyn kanssa, kun taas toisaalta niissä on myös huomattu tiettyjen hinnoittelumallien puutteita. Seuraavaksi käsitellään kaukolämpöhinnoittelun hyviä ominaisuuksia, joihin hinnoittelussa käytettävien suureiden määrityksellä voidaan vaikuttaa.

3.1 Hyvän hinnoittelumallin piirteitä

Ihanteellinen hinnoittelumalli kannustaa energiatehokkuuteen ja tuo taloudellista hyötyä yritykselle ja sen osakkaille. Samaan aikaan sen tulee olla tarpeeksi yksinkertainen, ymmärrettävä, kustannusvastaava ja kilpailukykyinen (Larsson 2010). Aiemmin tässä tutkimuksessa on argumentoitu vesivirtapohjaisten hintamallien vaikuttavan positiivisesti energiatehokkuuteen hintaohjauksen kautta. Ei voida kuitenkaan olettaa tämän toteutuvan automaattisesti pelkästään muuttamalla tariffeja vesivirtapohjaiseksi. Hinnoittelumallin täytyy olla sellainen, että se tarjoaa todellisen kannusteen energiankulutuksen vähentämiseen.

Gåverud et al. (2016, s. 71) huomasivat hintamallien tutkimuksessa, että hintaohjaus tehomaksujen kautta edellyttää sitä, että asiakas ymmärtää, mitä tehomaksukomponentti tarkoittaa ja mitä se pitää sisällään. Asiakkaiden toiminnan kannalta oli myös tärkeää, että energiatehokkuustoimenpiteistä seuraavat hyödyt olivat tarpeeksi suuria. Larssonin (2010) mukaan hintaohjaus vaatii toteutuakseen sen, että asiakas ymmärtää, mitä käytännön toimenpiteitä tulee tehdä lämmitysmaksujen pienentämiseksi.

Etäluennan käyttöönotto on mahdollistanut asiakkaan kaukolämmön kulutustietojen helpon luennan ja hallinnan, mikä helpottaa kustannusvastaavan hinnoittelumallin kehitystä. Tämä luo hyvän perustan hinnoittelumallille, jossa asiakas maksaa käyttämästään kaukolämpökapasiteetista, sillä etäluenta helpottaa maksuperusteiden tarkastamista. (Rydén et al. 2013, s. 213)

Song et al. (2017) huomasivat kulutukseen perustuvan hintamallin lisäävän läpinäkyvyyttä, joka puolestaan paransi kaukolämmön kilpailukykyä. Maksimikulutukseen perustuva tehomaksu koettiin tutkimuksen mukaan toimivaksi tavaksi toteuttaa tämä käytännössä.

Toisaalta Gåverud et al. (2016, s. 72) mukaan tehon määrittäminen yksittäisen suurimman tuntisen tehon perusteella aiheutti asiakkaissa epävarmuutta, sillä asiakkaat eivät kokee, että heillä oli mahdollisuutta vaikuttaa yksittäisiin kulutuspiikkeihin. Tämä epävarmuus ei poistunut niiltäkään asiakkailta, joiden tehomaksuosuus kokonaishinnasta oli pieni. Tällöin tehomaksukomponentin aiheuttama epävarmuus aiheutti sen, että asiakkaille jäi vähemmän tilaa taktikointiin ja tehopiikkien ennustaminen, sekä niiden suuruuden arviointi haittasi asiakkaiden budjetointia.

Gåverud et al. (2016) huomasivat myös, että asiakkaat eivät arvostaneet valinnanvapautta hinnoittelussa. Tämä johtuu todennäköisesti monesta tekijästä, mutta yksi syy tälle on tutkijoiden arvion mukaan se, että se lisää asiakkaiden epävarmuutta. Tällöin asiakas joutuu valinnan eteen, eikä kukaan halua valita itselleen epäedullista vaihtoehtoa. Tällainen hinnoittelumalli edellyttäisi asiakkailta ymmärrystä kaukolämpökustannusten rakenteesta, sekä ylipäättään pääsyä tähän tietoon. Samalla tämä vaikeuttaisi kaukolämpöyhtiön työtä, sillä asiakkaan kouluttaminen ja tiedottaminen erilaisista hinnoittelumahdollisuuksista vaatisivat suuria panostuksia asiakasviestinnässä. Tämän vuoksi hinnoittelun tulisi olla yksiselitteinen, samanlaiset asiakasprofiilit maksaisivat samoin perustein, mikä lisää myös hinnoittelun oikeudenmukaisuutta. (Gåverud et al. 2016, s. 76)

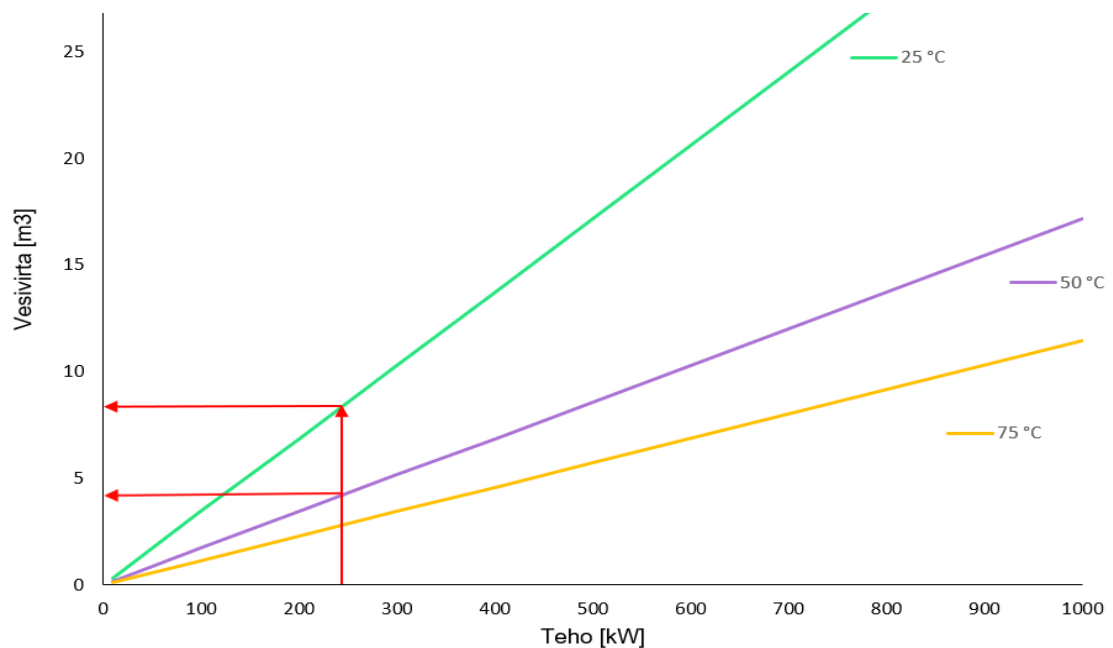
Tutkijoiden (Rydén et al. 2013; Li et al. 2015) mukaan monikomponenttinen kaukolämmön tariffimalli on haluttu kustannusvastaavuuden vuoksi. Tällä hetkellä ihanteellisin hinnoittelumalli koostuu kahdesta osasta, joista toinen on muuttuva energiamaksu ja toinen kiinteä tehomaksu. Tehomaksu perustuisi todelliseen energiantarpeeseen. (Rydén et al. 2013) Kustannusvastaavuuden näkökulmasta yksinkertainen hinnoittelu on vaikeaa, koska tuotantokustannukset riippuvat muun muassa polttoaineiden ja sähkön hinnasta. Tämän vuoksi hinnoittelu on jaettu muuttuvaan ja kiinteään osaan. Tällainen hinnoittelu toisaalta johtaa yli- tai alihinnoitteluun pitkällä aikavälillä, minkä vuoksi maksuperusteiden tarkastaminen on tärkeää. (Li et al. 2015, s. 63–64) Monikomponenttista kaukolämpöhinnittelua voidaan soveltaa myös avoimessa ja kaksisuuntaisessa kaukolämpöverkossa, jossa asiakkaat voivat itse tuottaa lämpöä kaukolämpöverkkoon. Tämä puolestaan edistää tulevaisuudessa hukkalämpövirtojen hyödyntämistä. (Pöyry 2016; s. 14)

3.2 Teho- ja virtaamapohjaisen kaukolämpötariffin vertailu

Tehoon perustuvan kaukolämpötariffin eduksi voidaan luokitella esimerkiksi yksinkertainen laskentatapa, sillä tilaustehon määrittäminen voidaan yksinkertaisimmillaan tehdä suoraan tehon mittausdatasta, eikä se vaadi esimerkiksi jäähtymän määrittästä. Se ei yksinkertaisuutensa vuoksi vaadi myöskään järjestelmiltä paljoa. Laskentatavan etuna on myös se, että se kohtelee asiakkaita tasa-arvoisesti kaukolämpöverkon varrella, koska se ei riipu jäähtymästä, johon etäisyys saattaa vaikuttaa.

Tehoon perustuvan kaukolämmön tehomaksutariffin haittoiksi voidaan sanoa hintaohjauksen puuttuminen, mikä laskee huomattavasti kaukolämmön kilpailukykyä. Tämä johtuu siitä, että asiakkaan mahdollisuudet vaikuttaa maksujen suuruuteen ovat rajalliset, kun hinta muodostuu tilaustehon perusteella. Tämän takia tehopohjaisen kaukolämpötariffin kustannusvastaavuus heikkenee, sillä hinnoittelumalli ei ota huomioon asiakkaan päässä tapahtuvia energiatehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä. (Energiateollisuus ry 2014, s. 4)

Kustannusvastaavuuden paraneminen ja energiatehokkuuden vaikutukset hintoihin ovat eräitä syitä, miksi tilavuusvirtaan perustuva tehomaksutariffi on otettu käyttöön. (Energiateollisuus ry 2014, s. 5) Virtaamapohjainen tariffi ei tule suoraan asiakkaan käyttämän energian määrästä, vaan siitä, miten tehokkaasti asiakas hyödyntää kaukolämpöveden lämpöenergiaa. Luvun 2.1 kaavassa (2.3) voidaan nähdä, miten jäähtymän suuruus vaikuttaa virtaavan vesivirran suuruuteen lämpötehon pysyessä vakiona. Samaa on havainnollistettu kuvassa 1.



Kuva 1: Jäähtymän vaikutus tarvittavaan vesivirtaan. Kuvaajat laskettiin kaavalla (2.3).

Kuvassa 1 punaisilla nuolilla on merkitty, miten pienilläkin tehoilla jäähtymän vaikutus veden virtaamaan on suuri. Vesivirran pienentäminen lisää energiatehokkuutta, sillä pienempi vesivirta vastaa suurempaa jäähtymää tehon pysyessä vakiona. Jäähtymän kasvaminen taas pienentää kaukolämpöveden lämpötilaa paluuputkessa, mikä puolestaan kaavan (2.4) mukaan pienentää lämpöhäviöitä, jolloin verkon hyötysuhde paranee. Lisäksi pienemmillä virtauksilla tarvittavan pumppausenergian määrä on pienempi, mikä näkyy siltä osin pienempinä kustannuksina. (Energiateollisuus ry 2014, s. 5)

Vesivirtaan perustuvan tehomaksukomponentin huonoiksi puoliksi voidaan sanoa monimutkaisempi laskenta, sillä vesivirran määrittäminen ja tarkastaminen vaatii yleensä joka tapauksessa tilaustehon määrittystä ja sen lisäksi myös jäähtymän määrittystä. Tämä tekee laskennasta monimutkaisempaa, lisää virheen mahdollisuutta ja luo haasteita käytössä oleville järjestelmille. Vesivirtapohjaisen tariffin huonoiksi puoliksi voidaan sanoa myös se, että asiakkaan näkökulmasta vesivirta hinnan määrittävänä tekijänä saattaa olla vaikeampi ymmärtää kuin teho, mikä saattaa heikentää kilpailukykyä. (Energiateollisuus ry 2014, s. 5)

4. TEHOMAKSUTARIFFIT

Tässä luvussa käsitellään kaukolämmön tehomaksukomponenttien laskennassa käytettävien suureiden määrittäystä mittausdatasta. Kaukolämmön tehomaksuilla pyritään kattamaan lämpöliiketoiminnasta aiheutuvia kiinteitä kustannuksia. Tehomaksulla varmistetaan, että asiakkaan tehontarpeeseen pystytään vastaamaan ympäri vuoden, minkä vuoksi tehomaksun suuruus on perinteisesti verrannollinen asiakkaan tarvitsemaan kaukolämpökapasiteettiin. (Mäkelä 2015, s. 122)

4.1 Hinnoittelussa käytettävien suureiden määrittäminen

Yleisimpiä kaukolämpötariffien tehomaksujen laskennassa käytettyjä suureita ovat teho, vesivirta ja jäähtymä. Tässä työssä ei eritellä sopimustehoa ja -vesivirtaa laskutuksesta ja -vesivirrasta, koska näiden määritelmät eroavat kaukolämpöyhtiöiden välillä (Energiateollisuus ry 2014, s. 4). Tästä eteenpäin tehosta ja vesivirrasta puhutaan tilaustehona ja tilausvesivirtana, jotka kuvastavat suurinta tuntista asiakkaalle mitoitettua tehon ja vesivirran suuruutta.

Lämpöyhtiö varaa tilaustehon ja tilausvesivirran suuruiset tehon ja vesivirran arvot asiakkaan käyttöön kaikkina mahdollisina aikoina. Tilausteho ja -vesivirta pyritään tämän vuoksi määrittämään vastaamaan mahdollisimman tarkasti asiakkaan huipputehon tarvetta, jotta kustannusvastaavuus säilytetään. (Mäkelä 2015, s. 122) Suurin osa suomalaisista kaukolämpöyhtiöistä käyttää hinnoittelussaan rakennusten mitoitettua tilaustehoa ja -vesivirtaa (Kontu et al. 2020, s. 2). Tämä tarkoittaa sitä, että suurta osaa maksuperusteista ei ole koskaan tarkistettu mittausdatasta, mikä huonontaa näiden suureiden kustannusvastaavuutta.

Toisaalta laskenta halutaan pitää yksinkertaisena, jotta se on helppo automatisoida. Tämä puolestaan heikentää omalta osaltaan kustannusvastaavuutta. Tämä on kuitenkin välttämätöntä, koska dynaamiseen hinnoitteluun siirryttäessä jokaisen asiakkaan tehomaksujen määrätymisperusteet tulee yhtenäistää käyttöpaikkojen suuren lukumäärän takia.

Tilaustehon ja -vesivirran määrittäminen usealle käyttöpaikalle kerralla onnistuu kaukolämpöyhtiön käytössä olevien energiatiedonhallintajärjestelmien mittausaikasarjoista. Nämä tiedot sisältävät tuntisen keskiarvotehon ja -vesivirran arvot, sekä kaukolämmön menon ja paluuvien lämpötilan tuntisina keskiarvoina. Lämpöyhtiö mittaa myös paikkakunnan ulkolämpötilaa tuntisena keskilämpötilana.

4.1.1 Regressiolaskenta ja mitoitusulkolämpötila

Eräs tapa määrittää tilausteho ja -vesivirta on sovittaa mittausdataan lineaarinen regressiosuora ja laskea tämän suoran avulla toteutuneen tehon ja vesivirran arvo mitoitusulkolämpötilassa. (Energiateollisuus ry 2014, s. 13) Mitoitusulkolämpötila on paikkakunta-kohtainen lämpötila, jonka oletetaan olevan matalin lämpötila kyseisellä säävyöhykkeellä.

Taulukko 1: Suomen säävyöhykekohtaiset mitoitusulkolämpötilat. (Energiateollisuus ry 2014, s. 3)

| | Mitoittavat ja keskimääräiset ulkoilman lämpötilat eri säävyöhykkeillä | |
|------------|--|---|
| Säävyöhyke | Mitoittava ulkoilman lämpötila | Vuoden keskimääräinen ulkoilman lämpötila |
| I | -26 °C | 5,3 °C |
| II | -29 °C | 4,6 °C |
| III | -32 °C | 3,2 °C |
| IV | -38 °C | -0,4 °C |

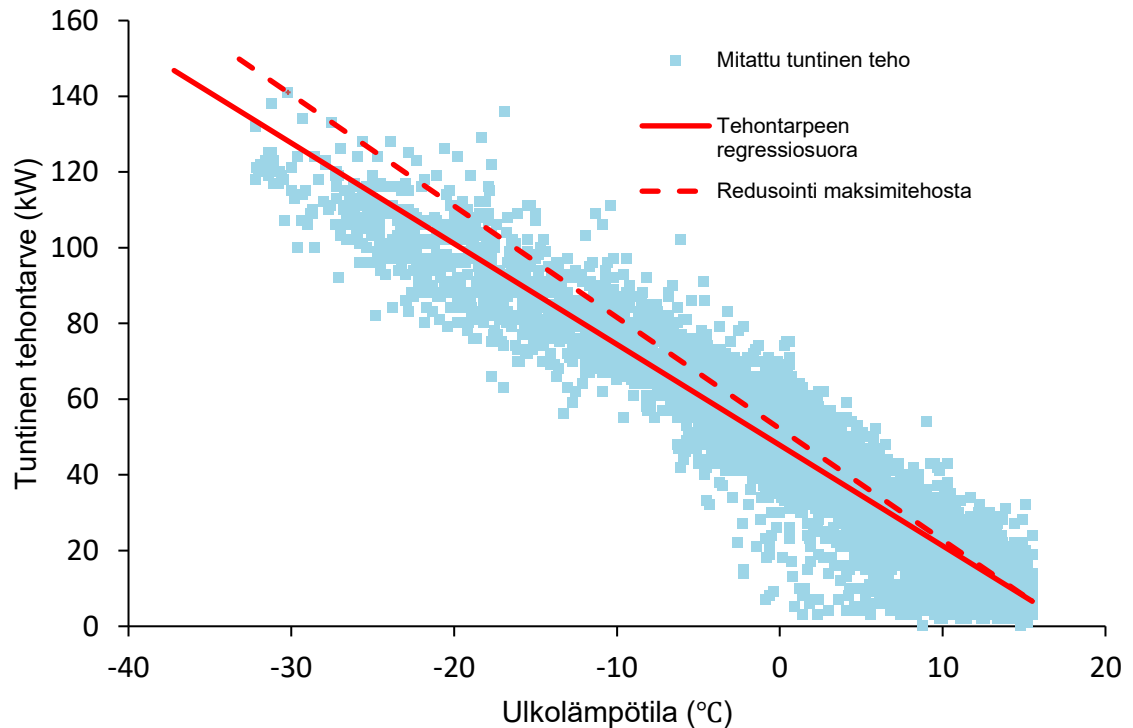
Mitoitusulkolämpötilassa tuntinen lämmitystehon tarve on suurimmillaan. Tämän tutkimuksen luvussa 5 määritetään erään kaukolämpöyhtiön hinnoittelussa käytettyjen suureiden arvot, joiden määrittämiseen tarvitaan mitoitusulkolämpötilaa. Kyseinen kaukolämpöyhtiö sijaitsee Kajaanissa, joka kuuluu säävyöhykkeeseen III, jolloin mitoittava ulkoilman lämpötila on -32 °C. (Energiateollisuus ry 2014, s. 3)

Toinen vaihtoehto tilaustehon ja -vesivirran määrittämiseen on tarkastaa tasejärjestelmän aikasarjatiedoista mittausaikavälin suurin toteutunut tuntinen teho tai vesivirta, joka muutetaan vertailuarvon avulla mitoitusulkolämpötilaa vastaavaan arvoon. Vertailuarvona toimii tässä työssä asiakkaan toteutunut sääriippumaton teho tai vesivirta. Seuraavassa alaluvussa käydään tarkemmin molemmat laskentatavat.

4.1.2 Tilausteho

Tilausteho tulee määrittää jo liittymisvaiheessa mahdollisimman tarkasti kustannusvastaavuuden takaamiseksi. Laskennalliset tulokset, eli rakennusten kaukolämpösuunnitelmien mukaiset mitoitetut arvot ovat kuitenkin vain suuntaa antavia, tarkempi tilaustehon arvo saadaan mittausdatasta. Suurin osa suomalaisista kaukolämpöyhtiöiden hinnoittelussa käytetyistä suureista ovat näitä kyseisiä rakennusten laskennallisia arvoja (Kontu et al. 2020, s. 2), eivätkä tällöin vastaa aina todellisuutta. Tässä työssä tarkastellaan kahta eri menetelmää, joilla tilausteho määritetään kerralla koko asiakaskunnalle tuntiluentatietojen perusteella.

Laskentatavoista ensimmäinen on muodostaa regressiosuora mittausdatasta, josta tilaustehon arvo voidaan määrittää mitoitusulkolämpötilassa (Energiateollisuus ry 2014, s. 13). Toinen tilaustehon määrittystapa on suurimman tuntisen tehon arvon määrittäminen tietyltä aikaväliltä, joka määrittämisen jälkeen muunnetaan mitoitusulkolämpötilaan käyttöpaiikkakohtaisen sääriippumattoman tehon avulla. Aikaväli kannattaa molemmissa laskennoissa valita siten, että se ylittää edellisen pakkasjakson yli, mutta on pisimmillään korkeintaan vuoden mittainen. Määrittystavat ovat havainnollistettu kuvassa 2.



Kuva 2: Tilaustehon määrittäminen regressiosuorasta ja maksimiteholla

Kuvassa 2 on erään asiakkaan tehon tuntiset keskiarvot ulkolämpötilan funktiona, joista tilausteho voidaan laskea. Suoran kulmakertoimesta a ja leikkauspisteestä b voidaan määrittää tehon arvo mitoitusulkolämpötilassa. Tilausteho lasketaan kaavalla

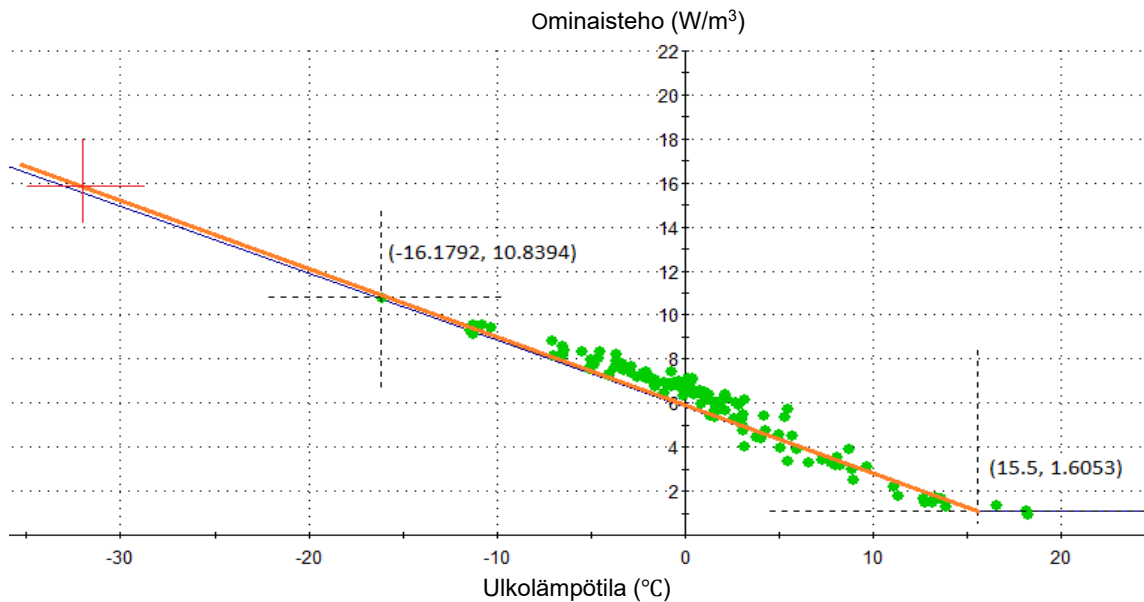
$$P = aT_{DOT} + b, \quad (4.1)$$

jossa P on tilausteho, eli tehon suuruus mitoitusulkolämpötilassa (*design outdoor temperature*) [kW], T_{DOT} on taulukon 1 mukainen mitoitusulkolämpötila ja a ja b ovat suoran kulmakerroin ja leikkauspiste. Samaa kaavaa voidaan käyttää molemmissa laskutavoissa, ainoastaan luvut a ja b muuttuvat käyttöpaikan ja laskentatavan mukaan.

Laskentaa voidaan helpottaa siten, ettei kuvan 2 tapaisia suoria tarvitse piirtää. Kuvan 2 mukaisen regressiosuoran arvot on laskettu Excel-taulukkolaskentaohjelmassa. Kulmakerroin a määritetään SLOPE()-komennolla ja leikkauspiste b määritetään INTER-

CEPT(-)komentoilla. Komentoihin syötetään parametreiksi x-akselin arvot, eli ulkolämpötilat ja y-akselin arvot, eli ulkolämpötilaa vastaavan tehon arvo. Laskenta perustuu lineaariseen regressioon.

Maksimitehon redusointilaskennan periaate on havainnollistettu kuvassa 2, mutta tarkastellaan sitä vielä tarkemmin kuvan 3 avulla. Kuva 3 on ladattu Generis-tiedonhallintajärjestelmästä. Kuvassa on erään kaukolämmön käyttöpaikan ominaisteho ulkolämpötilan funktiona.



Kuva 3: Tilaustehon määrittäminen maksimitehon ja sääriippumattoman tehon avulla. Kuvaaja ladattu lämpöyhtiön Generis-tiedonhallintajärjestelmästä.

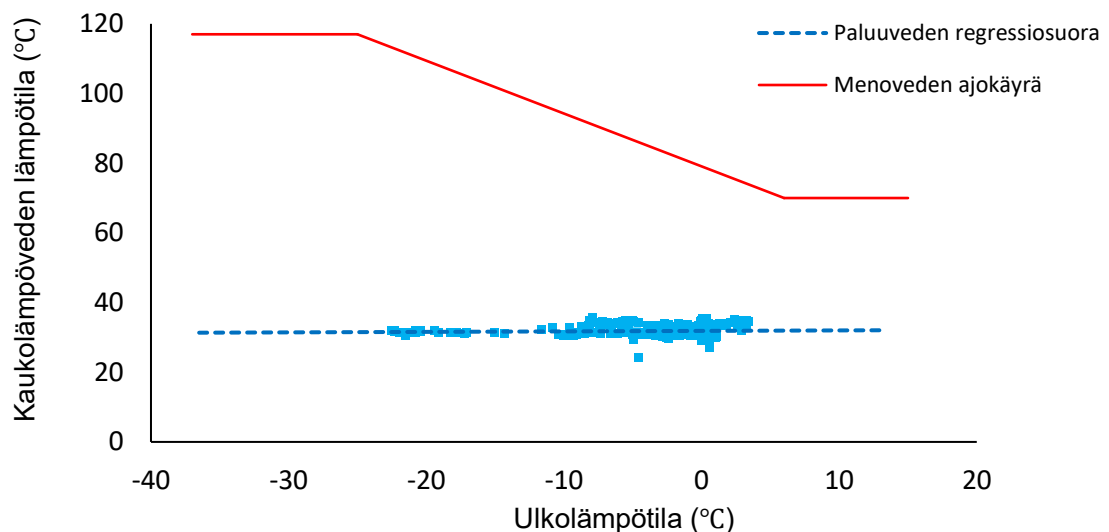
Katkoviivoilla kuvaan on merkitty piste, jossa käyttöpaikan suurin tuntinen teho esiintyy mittausaikavälillä ja piste, jossa saavutetaan sääriippumaton teho. Sääriippumaton teho on se teho, joka tulee käyttöpaikalle ilman sisätilojen lämmitystarvetta. Kyseessä on siis teho, joka vastaa sitä ulkolämpötilaa, jolloin lämmitystarveluku S saa arvon 0 [°Cd].

Tyypillisesti tämä lämmitystarvelukua vastaava lämpötila on Suomessa 17 °C (Ilmatieteenlaitos 2019), mutta tässä esimerkissä on käytetty Euroopan Unionin yleistä lämmitystarpeen vertailulämpötilaa $15,5$ °C (EEA 2019). Toisin sanoen, kun lämmitystarveluku $S = 0$ °Cd, ulkolämpötila on sama kuin lämmitystarpeen vertailulämpötila, eli tässä tapauksessa $15,5$ °C, oletetaan, ettei sisätiloja tarvitse lämmittää. Tällä alueella kaukolämpökäyttöpaikan tehontarve on vakio lämpötilan noustessa. Tehon tarve mitoitussuhteellisuudessa ratkaistaan siten, että pisteiden välille piirretään suora, josta katsotaan tehon arvo taulukon 1 mukaisessa mitoitussuhteellisuudessa, joka riippuu tarkastelussa olevasta säävyöhykkeestä.

Tässä alaluvussa käsitellyt laskentatavat ovat valittu siitä syystä, että ne ovat yksinkertaisia ja molemmissa tavoite on määrittää asiakkaan tehontarve silloin, kun ulkolämpötila on kylmin mahdollinen. Laskennoissa ovat kuitenkin eri lähtökohdat. Regressiolaskentaan perustuvassa menetelmässä oletetaan, että asiakkaan kulutus on tiukasti sääriipuvainen ja se sallii yksittäiset tehopiikit. Tässä työssä käytetty regressiolaskenta on dynaamiseen laskentaan sovellettu versio Energiateollisuus ry:n suosituksen esimerkkilaskennasta (Energiateollisuus ry 2014, s. 13–14). Regressiolaskennan lisäksi käsitellään suurimpaan tuntiseen tehoon perustuva laskentatapa. Tässä laskennassa lähtöoletuksena on se, että asiakkaan suurin tarvitsema teho on asiakkaan suurin toteutunut teho muunnettuna paikkakunnan kylmimpään mahdolliseen lämpötilaan. Tällöin regressiosuoran muodostamiseen tarvittavat arvot saadaan kuvassa 3 mukaisesti tuntiluentatiedoista.

4.1.3 Jäähtymä

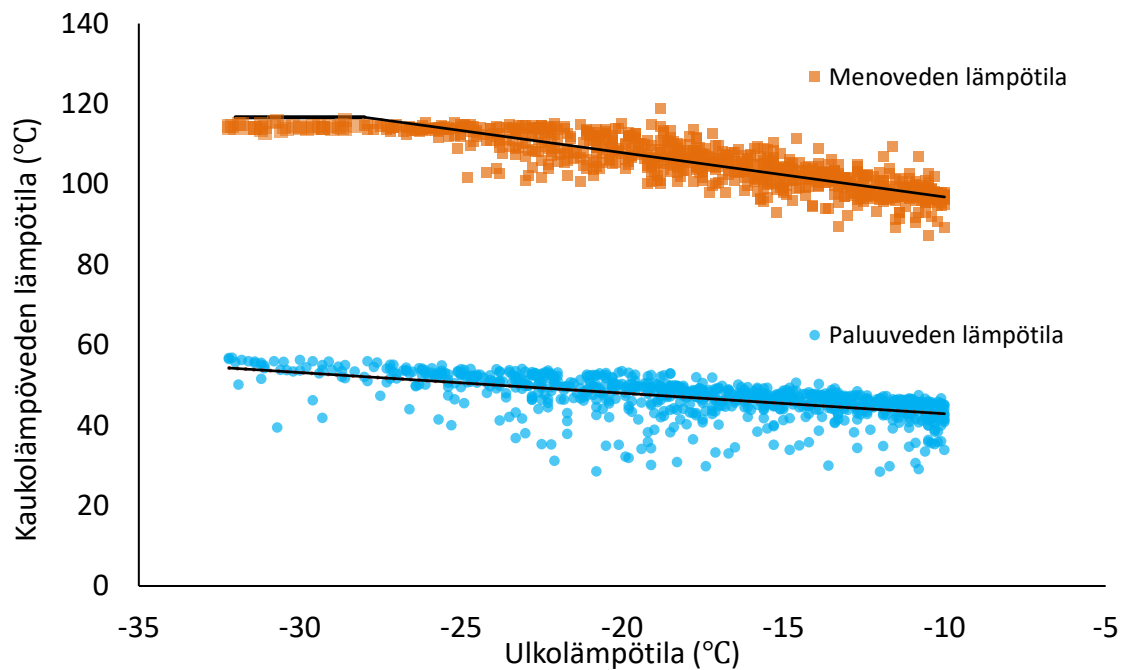
Osa tariffilaskennoista perustuu jäähtymään, eli kaukolämmön meno- ja paluuvirtauksien lämpötilojen erotukseen. Esimerkiksi tilausvesivirtaa määritettäessä kaavan (2.3) mukaisesti tarvitaan jäähtymän arvo. Jäähtymän arvo tilausvesivirran laskentaa varten määritetään samanlaisella regressiolaskennalla, kuin on esitetty edellisen kappaleen kuvassa 2. Laskenta suoritetaan käyttöpaikan paluuvien lämpötilalle, jonka jälkeen sen arvo tarkistetaan mitoitusulkolämpötilassa. Kuvassa 4 on havainnollistettu jäähtymän määrittäminen regressiosuoran ja kaukolämpöveden ajokäyrän menolämpötilan avulla. Kaukolämpöveden ajokäyrä kuvastaa lämmöntuotantolaitoksesta lähtevän kaukolämpöveden lämpötilaa ulkolämpötilan funktiona. (Energiateollisuus ry 2014, s. 14)



Kuva 4: Esimerkkiasiakkaan jäähtymän määrittäminen. Kaukolämpöveden ajokäyrän ja paluuvien lämpötilojen regressiosuoran arvot tarkistetaan mitoitusulkolämpötilassa.

Kuvassa 4 esitettyä jäähtymän määrittystä käytetään yksinkertaistamisen vuoksi. Kyseistä arvoa käytetään kompensoimaan menolämpötilasta aiheutuvaa jäähtymän pienenemistä, joka on perusteltu luvussa 2. Arvo on kuitenkin hyvin karkea arvio, eikä se vastaa todellista arvoa.

Jäähtymän todellisen arvon voi myös määrittää, mutta se vaatii järjestelmiltä enemmän laskentatehoa ja vaikeuttaa automatisointia. Kuvassa 5 on käsitelty todellisen jäähtymän määrittelyn periaate.



Kuva 5: Todellisen jäähtymän määrittys kaukolämmön meno- ja paluueden lämpötiloista regressiolaskennalla.

Kuvassa 5 on esitetty menoveden ja paluueden lämpötilat ulkolämpötilan funktiona eräälle todelliselle kaukolämmön käyttöpaikalle. Kuvaajiin on huomioitu ainoastaan kaukolämpöveden lämpötilat, jotka esiintyvät, kun ulkolämpötila on alle -10 °C. Tämä on tehty kahdesta syystä. Ensimmäinen on se, että virheen suuruus pienenee, kun mennään kylmempiin lämpötiloihin, lähelle mitoitusulkolämpötilaa. Toinen syy on se, että menoveden lämpötilan riippuvuus ulkolämpötilasta ei ole lineaarinen, vaan noudattaa kuvan 4 tapaista ajokäyrää, joka riippuu tuotantolaitoksesta. Kun tuotantolaitoksen ajokäyrä tunnetaan, menoveteen voidaan sovittaa sitä vastaava käyrä, josta nähdään, mihin menolämpötilan arvo todellisuudessa asettuu.

4.1.4 Tilausvesivirta

Tilausvesivirralle pystytään määrittämään arvo monella tapaa, minkä takia se on tämän tutkimuksen keskeinen suure. Tässä työssä tilausvesivirta määritellään neljällä eri tavalla, joiden tuloksia vertaillaan keskenään. Tilausvesivirta voidaan määrittää samoin tavoin tuntiluentatiedoista, kuten tilaustehon kohdalla on tehty. Tilausvesivirran arvo voidaan määrittää myös luvussa 2 johdetulla kaavalla (2.3), jolloin sen laskennassa käytetään edellisissä alaluvuissa määritettyjä tilaustehoa ja jäähtymää.

Tilausvesivirran määrittäminen tehdään tässä työssä neljällä eri tavalla, jotka ovat:

1. Tilausvesivirran määrittäminen vesivirran tuntiluentatiedoista lineaarisella regressiolla, jonka jälkeen tilausvesivirran arvo tarkastetaan mitoitusulkolämpötilassa.
2. Tilausvesivirran määrittäminen suurimman toteutuneen tuntisen virtaaman avulla ja muuntamalla se mitoitusulkolämpötilaa vastaavaksi arvoksi sääriippumattoman vesivirran avulla.
3. Tilausvesivirran määrittäminen regressiolaskennalla lasketun tilaustehon ja ajokäyrän mukaisen jäähtymän avulla.
4. Tilausvesivirran määrittäminen regressiolaskennalla lasketun tilaustehon ja toteutuneen jäähtymän avulla.

Laskennat suoritetaan luvussa 5. Samassa luvussa arvioidaan laskennoissa saatuja tuloksia ja arvioidaan laskentojen toimivuutta käytännössä.

4.1.5 Menolämpötilan vaikutus tilausvesivirran suuruuteen

Tilausvesivirran määrityksessä ongelmaksi nousee se, miten kaukolämmön menoveden lämpötila huomioidaan asiakkaan hinnassa. Menoveden lämpötila aleneminen johtaa paluueden lämpötilan nousuun (Wiltshire 2015, s. 227), mikä tarkoittaa huonompaa jäähtymää. Huono jäähtymä taas nostaa virtaaman suuruutta, joka puolestaan nostaa hintoja. Menoveden lämpötila tulee huomioida hinnoittelussa luvussa 3 esitettyjen perusteluiden takia. Esimerkiksi Otaniemi Consulting Group Oy:n (1998) tekemässä selvityksessä todettiin sekä viranomaisten ja lämmönmyyjien että asiakkaiden olevan yhtä mieltä siitä, että asiakkaan sijainti ei saa vaikuttaa kaukolämmön hintoihin (katso Mäkelä et al. 2015, s. 118–119). Asiakkaat saavat kylmempää kaukolämpövettä sijaintinsa takia ja he ovat tällöin tilausvesivirtapohjaisen hinnoittelun näkökulmasta eriarvoisessa asemassa verrattuna niihin asiakkaisiin, jotka sijaitsevat lähellä tuotantolaitosta.

Tässä työssä kaukolämpöveden menolämpötila on huomioitu alaluvun 4.1.3 mukaisella jäähtymän määrityksellä, joka on kaikille asiakkaille sama. Tämä arvo ei kuitenkaan anna

todellista kuvaa asiakkaan kaukolämpölaitteiden jäähtymästä, joten menoveden lämpötilan huomioimiselle tilausvesivirran määräyksessä tulisi kehittää uusi menetelmä, mikä on yksi kaukolämpöhinnonittelun tutkimuksen potentiaalisia kehityskohteita.

4.2 Tehomaksutariffien hintamallit

Tariffeilla määritetään kaukolämmön maksujen muodostuminen. Suomen laissa lämpöliiketoiminnassa toimitaan kilpailuperiaatteella, jonka mukaan kaukolämpö on määräävässä markkina-asemassa jo liitettyjen asiakkaiden kohdalla. Määräävää markkina-asemaa ei saa väärinkäyttää, mikä edellyttää hinnoittelulta muun muassa kustannusvastavuutta ja tasapuolista kohtelua. (Mäkelä 2015, s. 117–118)

Asiakkaan tasapuolinen kohtelu edellyttää mittauksiin perustuvaa hinnoittelua (Koskelainen et al. 2006, s. 373). Tässä luvussa käydään läpi ne tehomaksun hinnoittelumallit, joiden muuttujina toimivat aiemmin tässä luvussa määritetyt tilausteho ja tilausvesivirta. Hintamallien ominaisuuksia sovelletaan myöhemmin luvussa 5, kun maksuperusteiden tarkastamisen vaikutuksia arvioidaan kaukolämpöliiketoimintaan ja asiakkaisiin.

4.2.1 Tilaustehoon pohjautuva tehomaksu

Tilaustehoon pohjautuvassa tehomaksukomponentissa tilausteho on ainoa muuttuja. Näin laskentakaavat saadaan pidettyä yksinkertaisina, jolloin asiakkaan on helpompi ymmärtää, mistä tariffit koostuvat. Laskentakaavat noudattavat yleensä lineaarista muotoa (Mäkelä 2015, s. 123), jota voidaan mallintaa kaavalla

$$TM_p = aP + b, \quad (4.2)$$

jossa TM on tehomaksukomponentin suuruus [€/a], P on asiakkaan tilausteho [kW] ja a [€/kW] ja b [€] ovat vakioita kyseisessä hinnoitteluportaassa. Tilaustehopohjaisen tehomaksukomponentin muodostuminen on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2: Yleinen tehopohjaisen tehomaksukomponentin muodostuminen. (Muokattu lähteestä Mäkelä 2015, s. 123)

| Porras | Porrasväli | Kaava |
|--------|-------------|-----------------------------|
| 1 | $0 - P_1$ | $a_0 \cdot P + b_0$ |
| 2 | $P_1 - P_2$ | $a_1 \cdot P + b_1$ |
| ... | ... | ... |
| n | $P_{n-1} -$ | $a_{n-1} \cdot P + b_{n-1}$ |

Porrastamisella mahdollistetaan tehomaksun kustannusvastaavuus, sillä suuremmilla tilaustehoilla asiakkaan kiinteät kustannukset pienenevät suhteessa pienempään asiakkaaseen. (Koskelainen et al. 2006, s. 469) Tästä syystä taulukon 2 mukaisen tehomaksukomponentin kaavojen vakio a_0 on yleensä arvoltaan 0, mikä tarkoittaa sitä, että ensimmäinen porras on vakiomaksu suuruudeltaan b_0 . Tämä johtuu siitä, että tehomaksun on tarkoitus kattaa lämpöliiketoiminnan kiinteitä kustannuksia, joista osa on tehon tai vesivirran suuruudesta riippumattomia kustannuksia, joilla asiakas pidetään liitettynä verkkoon (Energiateollisuus ry 2014, s. 3).

4.2.2 Tilausvesivirtaan pohjautuva tehomaksu

Tilausvesivirtaan pohjautuva tehomaksukomponentti muodostuu samoilla periaatteilla kuin tehoon pohjautuva tehomaksu. Laskentakaavat noudattavat tehomaksun tavoin lineaarista muotoa (Mäkelä 2015, s. 123), jota voidaan mallintaa kaavalla

$$TM_V = aV + b, \quad (4.3)$$

jossa tilaustehon tilalla on tilausvesivirta V [m³/h]. Tilausvesivirtapohjaisessa hinnoittelussa portaat muodostuvat myös samoin kuin tilaustehopohjaisessa. Tilausvesivirtapohjaisen tehomaksukomponentin muodostuminen on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3: Yleinen virtaamapohjaisen tehomaksukomponentin muodostuminen.

(Muokattu lähteestä Mäkelä 2015, s. 123)

| Porras | Porrasväli | Kaava |
|--------|-------------|-----------------------------|
| 1 | $0 - V_1$ | $a_0 \cdot V + b_0$ |
| 2 | $V_1 - V_2$ | $a_1 \cdot V + b_1$ |
| ... | ... | ... |
| n | $V_{n-1} -$ | $a_{n-1} \cdot V + b_{n-1}$ |

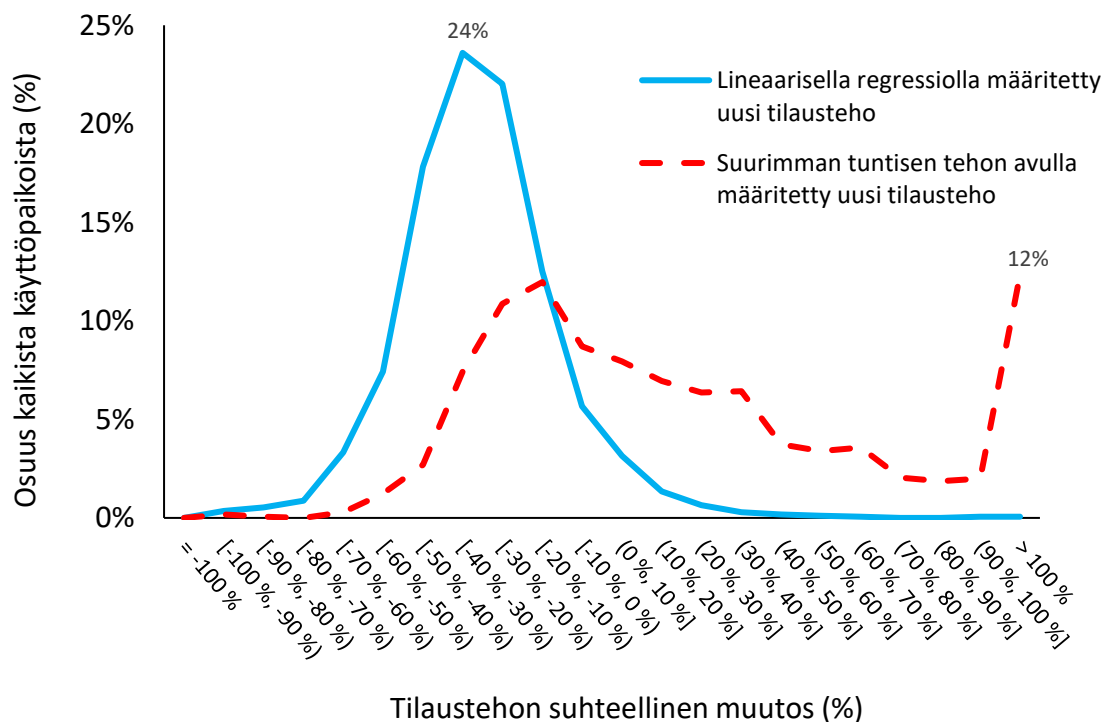
Taulukon 3 mukainen vesivirtapohjainen hinnoittelu noudattaa samoja periaatteita kuin tehopohjainen hinnoittelu, joka on esitetty taulukossa 2. Erona on tilaustehon korvaaminen tilausvesivirralla, joka näkyy vakioiden a ja b suuruuksissa.

5. TULOKSET: CASE LOISTE LÄMPÖ OY

Tässä luvussa käsitellään, miten esimerkkiyrityksessä voidaan soveltaa aiemmin tässä tutkimuksessa esiteltyjä laskentatapoja. Esimerkkiyrityksenä toimii Kajaanissa sijaitseva kaukolämpöyhtiö Loiste Lämpö Oy. Tulosten arvioinnin kannalta on oleellista tietää, että Loiste on tarkastanut asiakkaiden tehomaksun suuruuden määräävän tilaustehon aiemmin ainoastaan asiakkaan pyynnöstä. Täten tuloksissa odotetaan näkyvän jonkin verran suuriakin muutoksia (Sarvaranta 2012, s. 17).

5.1 Tilaustehon määrittämisen tulokset

Käsitellään tilaustehon määrittämistä luvun 4.1.2 periaatteiden mukaisesti. Kuvassa 6 on esitetty tilaustehon suhteellisten muutosten tiheysjakauma. Sinisellä viivalla on kuvattu lineaarisella regressiolla määritetty tilausteho ja punaisella katkoviivalla on kuvattu suurimman tuntisen tehon avulla määritetty tilausteho.

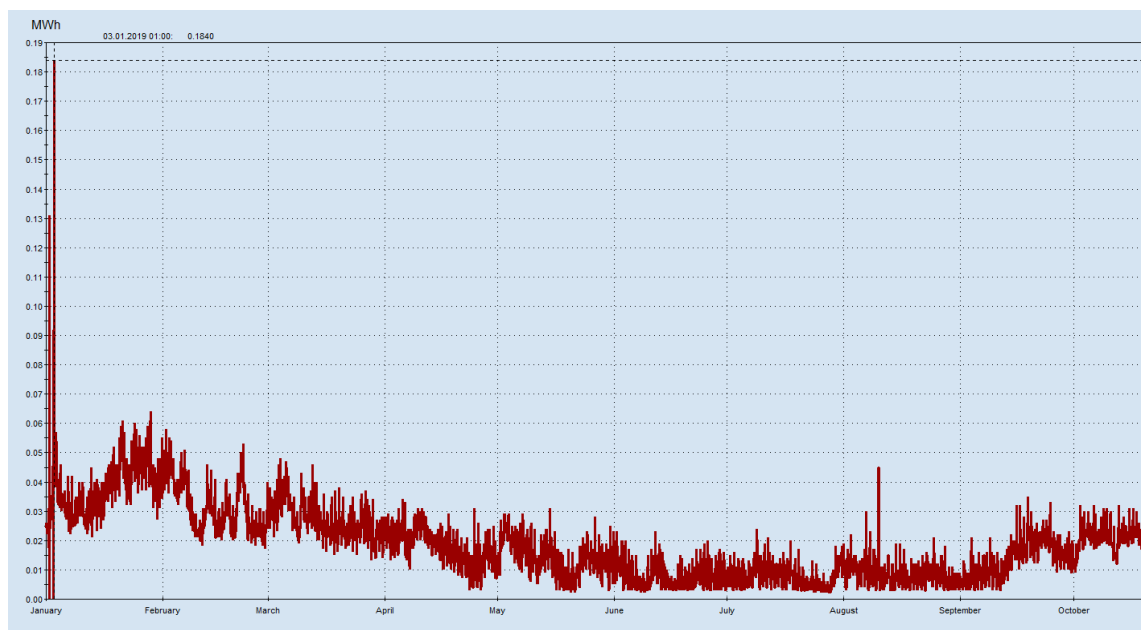


Kuva 6: Tilaustehon muutosjakauma, kun uuden tilaustehon määrittäminen tehdään regressiolaskennalla ja suurimman tuntisen tehon avulla luvun 4.1.2 mukaan.

Kuvasta 6 nähdään, että tilaustehojen arvot muuttuvat paljon ja eri tavoilla riippuen määrittämistavasta. Tuntisten keskiarvotehojen regressiolaskennassa määritettyjen tilauste-

hojen arvot pääasiassa laskevat. Suurin piikki on kohdassa, jossa 24 %:lla käyttöpaikoista tilausteho laskee -40–30 %. Arvojen laskeminen johtuu osittain siitä, että lineaarinen regressio ei ole yhtä herkkä yksittäisille tehopiikeille, kuin suurimpien tuntisten tehojen arvoon perustuva laskenta. Suurimpiin tuntisiin tehoihin perustuva laskenta puolestaan antaa tulokseksi huomattavasti suurempia tilaustehon arvoja. Luvun 4 kuvassa 2 nähdään, miten laskentatapojen tuloksien erot muodostuvat. Kyseisessä esimerkissä erot ovat kuitenkin pieniä johtuen tasaisesta ja hyvin ulkolämpötilariippuvaisesta energiankäytöstä. Esimerkin pieni ero johtuu myös siitä, että tehomaksimi esiintyy lähellä mitoitusulkolämpötilaa, mikä pienentää virheen suuruutta. Käyttöpaikoilla, joiden lämpöenergiantarpeessa on paljon vaihtelua ja useita tehopiikkejä, laskentatapojen tuloksien erot kasvavat.

Tilaustehon arvon tulisi vastata asiakkaalle varattua suurinta tehon tarvetta mitoitusulkolämpötilassa (Energiateollisuus ry 2014, s. 5), minkä vuoksi suurimpaan tuntiseen tehoon perustuva määrittystapa käsiteltiin tässä työssä. Johtopäätöksenä voidaan kuitenkin todeta sen olevan liian herkkä virheille. Tämä voidaan päätellä kuvasta 6, jossa huomataan suuri piikki kuvaajan oikeassa laidassa. Sen mukaan 12 %:lla käyttöpaikoista tilausteho kasvaisi kaksinkertaiseksi, tai sitä suuremmaksi. Jos tämä johtuisi todellisesta energiantarpeen kasvusta, se näkyisi kuvaajassa siten, että regressiolaskennan käyrä nojaisi enemmän oikealle. Sama huomio tehtiin myös virhearviointissa, joka toteutettiin käyttöpaikkojen lukumäärän takia pistotarkastuksena muutamalle kohteelle, joiden tilaustehon määrittymisen tulokset erosivat merkittävästi toisistaan.



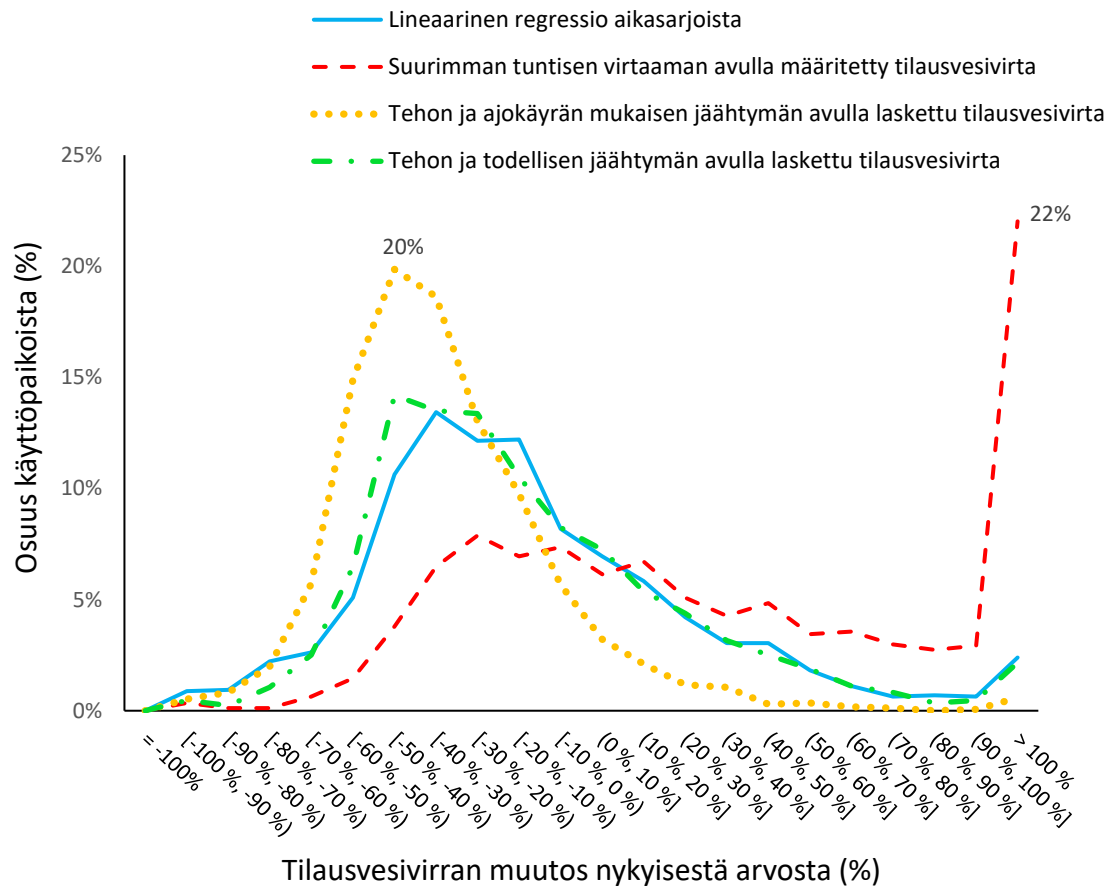
Kuva 7: Erään asiakkaan tuntiset tehon arvot ajan funktiona. Tehossa piikki, jonka suuruus on moninkertainen verrattuna muuhun kulutukseen. Kuva ladattu Generis-tiedonhallintajärjestelmästä.

Kuvassa 7 nähdään vasemmassa laidassa yksittäinen tehopiikki. Yksittäiset piikit olivat suurin syy tilaustehon suhteellisen suureen muutokseen, kun tilausteho määritettiin suurimpien tuntisten tehojen avulla. Regressiolaskennan perusteella määritetty tilausteho on vähemmän herkkä virheille, vaikka se antaakin tulokseksi tilaustehon, joka on arvoltaan yleensä todellista suurinta tehon tarvetta pienempi. Tämä huomattiin, kun verrattiin toteutuneita redusoimattomia tuntisia maksimitehoja regressiolaskennan tuloksiin. Noin 95 %:lla käyttöpaikoista regressiolaskennan tulos oli pienempi kuin todellinen toteutunut tehomaksimi. Tämä johtuu osittain siitä, että vuonna 2019 Kajaanissa mitattiin ulkolämpötiloja, jotka olivat pienempiä kuin mitoitussulkolämpötila. Leutona talvena tulos ei välttämättä olisi yhtä suuri.

Tuloksista voidaan todeta, että maksuperusteina toimivien suureiden tarkastuslaskenta on tärkeää. Suuret muutokset tilaustehossa ja -vesivirrassa johtuvat esimerkiksi mitoitusvirheistä ja energiatehokkuustoimenpiteistä. Näiden seurauksena tehon ja vesivirran tarve on muuttunut, mikä näkyy laskentojen tuloksissa. (Sarvaranta 2012, s. 17) Kaukolämpöyhtiöiden tulisi tarkastaa maksuperusteet tietyin väliajoin, jotta kustannusvastuu säilytetään. Tulevaisuuden hinnoittelumallien kehityksen painopisteinä voidaan olettaa olevan dynaamisuus ja järjestelmien kehittymisestä seuraava automatisoituminen, jotta maksuperusteiden tarkastuslaskenta voidaan suorittaa tarkasti kerralla isoillekin kaukolämpöverkoille. Tämän vuoksi laskenta tulisi optimoida ennen näiden hinnoittelumekanismien käyttöönottoa. (Korjus 2016, s. 47)

5.2 Tilausvesivirran määrityksen tulokset

Tilausvesivirran määrittäminen tehdään alaluvussa 4.1.4 luetelluilla laskennoilla. Kuvassa 8 on esitettyä laskentojen tulokset tilausvesivirran suhteellisten muutosten tiheysjakaumana. Kuvassa on sinisellä viivalla tilausvesivirtojen suhteellinen muutos, kun tilausvesivirrat on määritetty suoraan lineaarisella regressiolla virtaamien tuntiluentatiedoista. Suurimman toteutuneen tuntisen virtaaman avulla määritettyjen vesivirtojen suhteelliset muutokset ovat kuvassa punaisella katkoviivalla. Keltainen pyöreä piste -viivalla ja vihreä viiva-piste -viivalla kuvastavat niitä laskentatapoja, joissa käytetään aiemmin määritettyjä tilaustehon arvoja, jotka ovat laskettu lineaarisella regressiolla. Tämän vuoksi jakauksissa voidaan huomata yhtäläisyyksiä. Keltaisella merkitty jakauma kuvastaa niiden vesivirtojen suhteellista muutosta, joiden laskennassa jäähtymien arvona on käytetty luvun 4.1.3 mukaista ajokäyrän ja paluulämpötilan regressiolaskennalla määritettyä jäähtymää. Vihreällä merkitty jakauma kuvastaa niiden vesivirtojen suhteellista muutosta, joiden laskemiseen käytettyjen jäähtymien arvot ovat määritetty regressiolaskennalla meno- ja paluuvien lämpötiloista.



Kuva 8: Tilausvesivirran muutoksen tiheysjakaumat luvun 4.1.4 laskennoille.

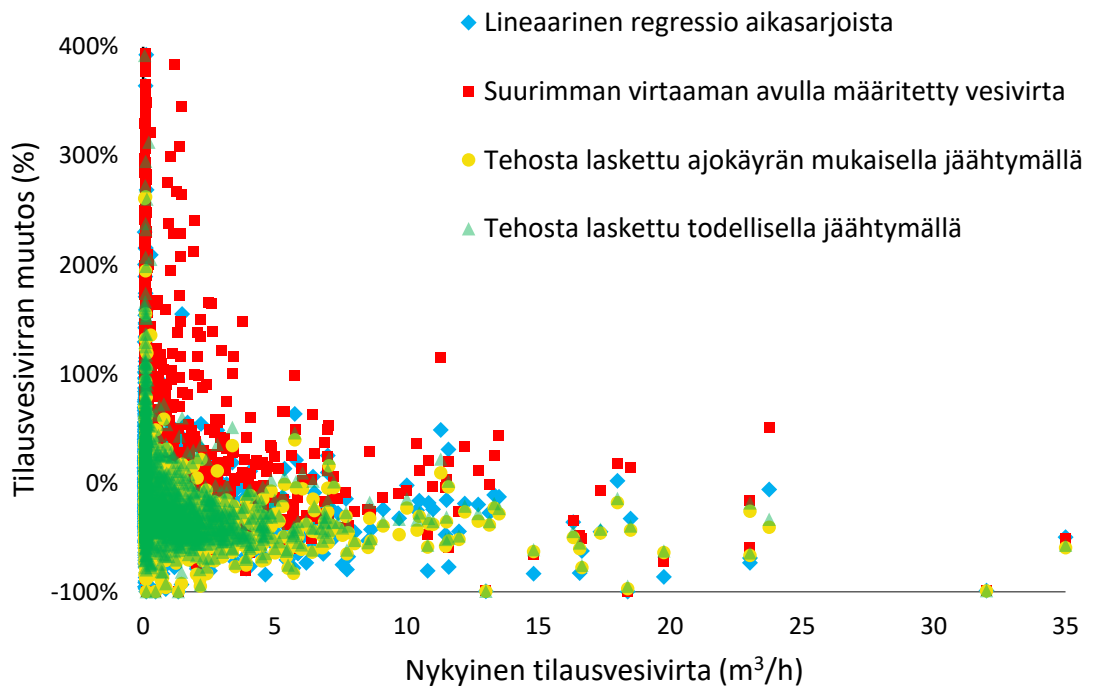
Kuvasta 8 voidaan päätellä, miksi suurinta toteutunutta vesivirran arvoa on vaikea muuntaa mitoitusulkolämpötilaan, sillä punaisen käyrän piikki kuvan oikeassa reunassa on vesivirran avulla määritettynä vielä suurempi kuin tehon avulla määritettynä. Tämä johtuu siitä, että vesivirrassa on enemmän ulkolämpötilasta riippumatonta vaihtelua. Huono jäähtymä vaikuttaa myös piikin suuruuteen, mutta ei selitä sitä, koska muiden käyrien mukaan tilausvesivirrat pääasiassa laskevat. Vihreässä ja keltaisessa käyrässä kuvastuvat hyvin jäähtymän vaikutus tilausvesivirran suuruuteen. Ajokäyrän avulla määritetty jäähtymä antaa jäähtymälle yleensä todellista suuremman arvon. Tämä johtaa siihen, että sen avulla määritetyt vesivirrat saattavat jäädä liian pieniksi. Tämä näkyy kuvassa siten, että keltainen jakauma nojaa enemmän vasemmalle ja on muita korkeampi siellä, missä vesivirtojen suhteellinen muutos on negatiivinen.

Tilausvesivirran kohdalla toteutettiin sama tarkastus kuin tilaustehon kohdalla, eli katsottiin, miten lineaarisella regressiolaskennalla saadut arvot erosivat toteutuneeseen suurimpaan virtaamaan. Noin yhtä suuri osa, eli 95 % regressiolaskennalla saaduista arvoista oli pienempiä kuin toteutunut tuntinen virtaama. Tämän vuoksi olisi tärkeää kehittää laskentaa siten, että se suoritettaisiin esimerkiksi tietyissä ulkolämpötiloissa esiintyneille suurimmille tehoille ja virtaamille. (Energiateollisuus ry 2014, s. 13)

5.3 Taloudellisten vaikutusten alustava arviointi

Alalukujen 5.1 ja 5.2 tulosten takia hinnoittelussa käytettävien suureiden tarkastuksella on taloudellisia vaikutuksia niin asiakkaisiin kuin lämpöyhtiöön. Kuvissa 6 ja 8 näkyy tilaustehojen ja tilausvesivirtojen suhteellinen muutos, mikä ei ole suoraan verrannollinen muodostuvien tehomaksujen muutoksiin, sillä kuvaajista ei voi päätellä, minkä kokoluokan asiakkaille muutokset tapahtuvat. Esimerkiksi pieni asiakas, jonka tilausvesivirta on ollut aiemmin $0,10 \text{ m}^3/\text{h}$, mutta tarkastuksen jälkeen on kasvanut arvoon $0,15 \text{ m}^3/\text{h}$ näkyy kuvaajassa 50 %:n kasvuna. Pienen virtaaman takia asiakas sijoittuu todennäköisesti alaluvun 4.2.2 hinnoittelumallin alimmalle portaalle. Tällä portaalla tehomaksun suuruus on kiinteä, eikä tällöin tämän kyseisen asiakkaan tehomaksujen suuruus muutu ollenkaan, ellei kyseisen portaan kertoimia muuteta.

Tässä työssä taloudellisten vaikutusten arviointi tehdään ainoastaan alustavasti, sillä käytössä ei ole hinnastoa, johon tuloksia voisi soveltaa. Tämän lisäksi tulokset ovat kaukolämpöverkkokohtaisia, joten näitä tuloksia ei voida soveltaa suoraan muihin verkkoihin. Taloudellisten vaikutusten arviointi onnistuu esimerkiksi tarkastelemalla asiakkaiden liittymien kokoa. Kuvassa 9 on esitetty eri laskentatapojen tilausvesivirtojen muutokset suhteessa nykyisen tilausvesivirran arvoon. Tarkastelu tehdään, jotta nähtäisiin, minkä kokoluokan asiakkaisiin muutokset vaikuttavat.



Kuva 9: Tilausvesivirran muutos suhteessa tilausvesivirran nykyiseen arvoon.

Kuvasta 9 nähdään, että suurimmat muutokset tilausvesivirrassa tapahtuvat pienillä liittymillä. Tämä ei ole riippuvainen määrittäytavasta, vaan se pätee kaikkiin laskentoihin.

Huomion arvoista on se, että se pätee myös pitkälti suurimman virtaaman avulla määritettyihin tilausvesivirtoihin, jotka on merkitty kuvaan punaisella.

Taloudellisia vaikutuksia asiakkaisiin voidaan arvioida, kun tarkastellaan, miten asiakkaat ovat liikkuneet luvun 4.2. mukaisten hinnoitteluportaiden välillä. Otetaan vertailukohteeksi Energiateollisuus ry:n (2011) tyyppitalojen mukaiset kaukolämpöliittymät ja katsotaan, miten asiakkaat liikkuisivat suhteessa kyseisiin tilausvesivirran arvoihin. Taulukossa 4 on tämän tarkastelun tulokset.

Taulukko 4: Asiakkaiden liikkuvuus eri tyyppitalojen mukaisten portaiden välillä. Numerot 1, 2, 3 ja 4 ovat luvussa 4.1.4 luetellut laskentatavat.

| Tyyppitalojen porraskäytöt (m ³ /h) | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--|-------|-------|-------|-------|
| -0,15 | -3 % | -53 % | 7 % | -2 % |
| 0,15–0,8 | 65 % | 203 % | 62 % | 81 % |
| 0,8–2,8 | 1 % | 1 % | -13 % | -8 % |
| 2,8– | -16 % | -2 % | -29 % | -24 % |

Taulukon 4 arvot kuvastavat sitä, mikä on kyseisen kokoluokan liittymien suhteellinen muutos. Esimerkiksi laskentamenetelmässä 1, eli regressiolaskennassa ensimmäisen hinnoitteluportaan asiakkaiden määrä pienenee 3 %.

Hieman alle puolet, noin 48 % Loisteen kaukolämmön käyttöpaikoista ovat pienempiä, kuin Energiateollisuuden pienimmän tyyppitalon (Energiateollisuus ry 2011) mukaisia, eli tilausvesivirraltaan korkeintaan 0,15 m³/h. Kun otetaan huomioon kaikki muut määrittäytävät, paitsi suurimman vesivirran mukaan määritetty tilausvesivirta, pienistä liittymistä maksimissaan 3 % kasvaa tilausvesivirraltaan suuremmaksi kuin 0,15 m³/h. Tämä tarkoittaa sitä, että portaitaisen hinnoittelun vuoksi tehomaksu ei muutu 97 %:lla pienistä käyttöpaikoista.

Tilausvesivirran määrittelystä riippumatta suuret liittymät pienenevät. Taulukon 4 isoimmat tilausvesivirrat, eli 2,8 m³/h tai suuremmat, ovat pääasiassa kerrostaloja tai sitä isompia rakennuksia. (Energiateollisuus ry 2011) Tällaisten rakennusten energiankulutusta on vaikea ennustaa, jolloin muutokset näissä kaukolämpöliittymien kokoluokissa oli odotettavissa.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoitteena oli tarkastella kaukolämmön hinnoittelua ja kaukolämmön tehomaksukomponentin muodostumista. Tavoitteena oli selvittää, miten dynaamiseen hinnoitteluun siirryttäessä tehomaksun hinnoittelun perusteena olevien suureiden tarkastaminen automaattisesti onnistuu mahdollisimman tasapuolisesti ja kustannusvastaavasti. Perinteisiä hinnoittelumalleja käyttävät kaukolämpöyhtiöt tarkastavat asiakkaiden maksu-perusteet vain asiakkaan pyynnöstä, jolloin tarkastamiseen voidaan käyttää erityistä harkintaa ja asiakkaan kaukolämmön tarvetta voidaan arvioida tapauskohtaisesti. Automaattiseen tilaustehon tai -vesivirran tarkastamiseen siirryttäessä tämä tapauskohtaisuus häviää ja kaikille tulee luoda sama tarkastusmenettely.

Tässä työssä Loiste Lämpö Oy:n kaukolämpöasiakkaiden liittymien tilaustehot ja -vesivirrat tarkastettiin eri laskennoilla. Tilaustehon kohdalla suoritettiin kaksi ja tilausvesivirran kohdalla neljä erilaista määrittystapa. Nämä määrittystavat valittiin siten, että niitä voitiin soveltaa kerralla koko asiakaskuntaan. Tämä tehtiin siksi, että kyseisiä laskentoja voidaan jatkossa automatisoida dynaamisen hinnoittelun mahdollistamiseksi.

Tulosten arvioinnin kannalta oli tärkeää tietää, että Loisteen kaukolämpöasiakkaiden tehomaksujen perusteena toimiva tilausteho on tarkastettu aiemmin ainoastaan asiakkaan toiveesta. Tämän pohjalta voitiin jo etukäteen arvioida, että uudet tilaustehot ja -vesivirrat poikkeavat mahdollisesti paljonkin nykyisin käytössä olevista suureista. Suurimmalla osalla asiakkaista on käytössään kaukolämpösuunnitelman mukainen laskennallinen tilaustehon tai -vesivirran arvo, eivätkä ne aina vastaa todellisuutta. Tämä johtuu muun muassa asiakkaiden erilaisista kulutustottumuksista, virheellisestä mitoituksista ja kaukolämpölaitteiden toiminnasta.

Luvussa 5 esitettiin tulokset tilaustehon ja -vesivirran muutosten tiheysjakaumana. Tuloksista nähtiin, että monella asiakkaalla tilausteho ja -vesivirta muuttuu huomattavasti, mikä oli odotettavissa pohjatietojen perusteella. Työn kannalta tärkeimmät tulokset esitettiin luvun 5 kuvissa 6 ja 8, joissa kuvattiin asiakkaiden tilaustehon ja -vesivirran muutosten tiheysjakaumat eri määrittystavoilla. Kuvat havainnollistavat hyvin, millä tavoilla määrittelyperusteet vaikuttavat tilaustehon ja -vesivirran suuruuteen. Tuloksien perusteella voitiin todeta, että suurimman tuntisen tehon tai vesivirran perusteella määritetty tilausteho tai -vesivirta ei ole suositeltava laskentatapa. Tämä johtuu siitä, että laskennan aiheuttama virheen suuruus ja todennäköisyys on liian suuri, mikä vaikeuttaa sen auto-

matisoointia. Automatisoinnin kannalta regressiolaskentaan perustuva määrittäminen on parempi, vaikka kyseisellä laskennalla saadut tilausvesivirrat jäävät todellista arvoa pienemmäksi. Laskentaa voidaan kuitenkin kehittää, esimerkiksi siten, että regressiosuoran määrittämiseen käytetään ainoastaan suurimpia tehon ja virtaaman arvoja tietyissä ulkolämpötiloissa. Näin saadaan parannettua tulosten oikeellisuutta ja siten myös kustannusvastaavuutta.

Luvun 5 tuloksista voitiin huomata maksuperusteena toimivien tilaustehon ja tilausvesivirran tarkastamisen tärkeys, sillä iso osa kaukolämpöyhtiöistä laskuttaa asiakkaitaan kaukolämpösuunnitelmien mukaisilla tilaustehoilla tai -vesivirroilla. Tällöin yhtiöiden kiinteät kustannukset, joita tehomaksuilla katetaan, eivät jakaudu kustannusperusteisesti asiakaskunnalle. Maksuperusteiden tarkastaminen olisi siis hyvä tehdä, vaikka kaukolämpöyhtiö ei siirtyisikään dynaamisen hinnoittelun pariin.

Tulosten pohjalta voitiin todeta, että kaukolämmön tehomaksujen tarkastamisen automatisointiin vaadittava laskenta vaatii vielä jatkokehitystä. Kehityksen kohteena on muun muassa se, miten regressiolaskentaa voitaisiin kehittää, jotta arvot vastaisivat paremmin todellisuutta. Tämä on erityisen tärkeää käyttöpaikoilla, joiden kulutuksen riippuvuus ulkolämpötilasta vaihtelee paljon. Tulevaisuuden kaukolämmön tutkimuksessa voidaan myös pohtia, kannattaako asiakkaiden kulutusta verrata ollenkaan ulkolämpötilaan, jos asiakkaiden kulutus riippuu vaihtelevasti siitä.

Toinen kehityskohde on asiakkaan teoreettisen jäähtymän määrittäminen siten, että sitä voidaan käyttää tilausvesivirran laskennassa. Tässä työssä tilausvesivirran laskentaan käytetyt jäähtymän arvot ovat todellinen jäähtymä ja ajokäyrän avulla laskettu jäähtymä. Todellista jäähtymän arvoa ei ole suositeltavaa käyttää sen takia, että se ei huomioi menolämpötilan arvoa, mikä ei ole oikeudenmukaista niitä asiakkaita kohtaan, jotka sijaitsevat kaukana lämmöntuotantolaitoksesta. Tämä johtuu siitä, että kauempana tuotantolaitoksesta kaukolämmön menoveden lämpötila on matalampi, mikä puolestaan pienentää näiden asiakkaiden jäähtymän suuruutta. Tämä puolestaan kasvattaa tilausvesivirran arvoa ja näin myös hintoja.

Menoveden lämpötilasta aiheutuva jäähtymän heikkenemistä on laskennallisesti kompensoitu käyttämällä ajokäyrän mukaista menoveden lämpötilaa, vaikka se ei vastaa täysin asiakkaan teoreettista jäähtymää. Tämän vuoksi hinnoittelumallien jatkotutkimuksen kannalta potentiaalinen kohde on kehittää laskentatapa, joka ottaa menolämpötilan paremmin huomioon hinnoittelussa.

LÄHTEET

- Aarnio, O.P. (2014) Uusien kaukolämmön hinnoittelumallien kehittäminen. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere.
- European Environment Agency (2019). Heating and cooling degree days. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.08.2020): <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/heating-degree-days-2>
- Energiatehokkuuslaki (2014). L 30.12.2014/1429. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 10.06.2020): <https://finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20141429>
- Energiateollisuus ry. (2011) Kaukolämmön hintatilasto – Tyyppitalot. Saatavissa (viitattu 30.09.2020): https://energia.fi/files/1196/Kaukolammon_hintatilasto_tyypitalomaarittelyt.pdf
- Energiateollisuus ry. (2014). Teho ja vesivirta kaukolämmön maksuperusteina, Suositus K15/2014. Saatavissa (viitattu 15.06.2020): https://energia.fi/files/586/Teho_ja_vesivirta_SuositusK15_2014.pdf
- Energiateollisuus ry. (2020). Energiavuosi 2019 kaukolämpö. Saatavissa (viitattu 15.06.2020): https://energia.fi/files/4402/Energiavuosi2019_Kaukolampo_MEDIAKU-VAT_20200120.pdf
- Fortum Oy (2020). Kaukolämmön hinnat taloyhtiöille ja yrityksille. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 03.10.2020): <https://www.fortum.fi/yrityksille-ja-yhteisoille/lammitys-ja-jaahdytys/kaukolampo/kaukolammon-hinnat-taloyhtioille-ja-yrityksille>
- Gåverud, H., Sernhed, K., & Sandgren, A. (2016). Kundernas uppfattning om förändrade prismodeller. Rapport 2016:301. Energiforsk AB.
- Ilmatieteenlaitos (2019). Lämmitystarveluku eli astepäiväluku. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 15.6.2020): <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/lammitystarveluvut>
- Kontu, K., Vimpari, J., Penttinen, P., & Junnila, S. (2020). Individual ground source heat pumps: Can district heating compete with real estate owners' return expectations? Sustainable Cities and Society. Vol. 53, Elsevier Ltd.
- Korjus, T. (2016). Kaukolämmön uudet hinnoittelumallit suomessa ja ruotsissa sekä niiden kehittyminen markkinoiden mukana., Espoo.
- Koskelainen, L., Nuorkivi, A., Saarela, R., & Sipilä, K. (2006). Kaukolämmön käsikirja. Energiateollisuus ry, Helsinki.
- Larsson A., Idefeldt J., Björkqvist O. (2010). Risk assessment of new pricing strategies in the district heating market: A case study at Sundsvall Energi AB. Energy Policy. Vol. 38, pp. 2171–2178.
- Larsson O. (2011). Pricing models in district heating. Department of Energy and Environment. Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden. Report No: T2011-351.

- Li, H., Sun, Q., Zhang, Q., & Wallin, F. (2015). A review of the pricing mechanisms for district heating systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 42, pp. 56–65.
- Lund, H., Werner, S., Wiltshire, R., Svendsen, S., Thorsen, J. E., Hvelplund, F., & Vad Mathiesen, B. (2014). 4th generation district heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *Energy*. Vol. 68, pp. 1–11.
- Mäkelä, V., Tuunanen, J. (2015). Suomalainen kaukolämmitys. Mikkelin ammattikorkeakoulu, Oppimateriaalia – Study material 16. ISBN: 978-951-588-506-4
- Paiho, S., & Saastamoinen, H. (2018). How to develop district heating in Finland? *Energy Policy*. Vol. 122, pp. 668–676.
- Pöyry Management Consulting Oy (2016). Kaksisuuntaisen kaukolämmön liiketoimintamallit. Helsinki. Energiateollisuus ry; Sitra. 54 s. Saatavissa (viitattu 02.10.2020): <https://www.sitra.fi/julkaisut/kaksisuuntaisen-kaukolammon-liiketoimintamallit/>
- Rydén, B., Sköldberg, H., Stridsman, D., Göransson, A., Sahlin, T., Sandoff, A., Williamsson, J., Hansson, N., Holmberg, U., & Gunnarsson, A. (2013). Fjärrvärmens affärsmodeller: Slutrapport för fjärrsynprojektet. Fjärrsyn rapport 2013:7.
- Sarma U., Bazbauers, G. (2016). District heating tariff component analysis for tariff benchmarking model. International Scientific Conference “Environmental and Climate Technologies”, CONECT 2016. Riga Technical University. Riga, Latvia. pp. 104–110.
- Sarvaranta, A., Jääskeläinen J., Puolakka J., Kouri, P. (2012). Kaukolämmön hinnoittelun nykytila ja tulevaisuuden mahdollisuudet. Loppuraportti 21.12.2012. ÅF-Consult Oy. Espoo.
- Song J., Wallin F., Li H. (2017). District heating cost fluctuation caused by price model shift. *Applied Energy*, Vol. 194, pp. 715–724.
- Tampereen Sähkölaitos Oy (2017). Lähilämpö – hinnoittelu ja sopimusehdot 1.4.2017 alkaen. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 03.10.2020): <https://www.sahkolaitos.fi/yrityksille-ja-taloyhtiaille/lamporatkaisut/hinnat-ja-sopimusehdot/>
- Tilastokeskus. (2019). Energian hankinta ja kulutus, kaukolämmön tuotanto ja kulutus. Tilastokeskuksen PxWeb-tietokannat. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 10.06.2020): http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ene__ehk/
- Työ- ja elinkeinoministeriö. (2014). Energia- ja ilmastotiekartta 2050: Parlamentaarisen energia- ja ilmastokomitean mietintö 16. päivänä lokakuuta 2014. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja, Energia ja ilmasto, 31/2014.
- Wiltshire, R. (2015). *Advanced district heating and cooling (DHC) systems*. Elsevier Science and Technology. 365 p.