

Opinnäytetyö (AMK )

Energia- ja ympäristötekniikka

2020

Markus Lönnqvist

# KAUKOLÄMMÖN- JA SÄHKÖNTUOTANNON TUOTANNONSUUNNITTELUN KEHITTÄMINEN

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Energia- ja ympäristötekniikka

2020 | 35 sivua, 2 liitesivua

Markus Lönngqvist

# KAUKOLÄMMÖN- JA SÄHKÖNTUOTANNON TUOTANNONSUUNNITTELUN KEHITTÄMINEN

Opinnäytetyön tarkoitus oli luoda tilaajalle, Turku Energialle, työkalu kaukolämmön ja sähkön yhteistuotannon historiadataan ja optimoidun tuotantodatan vertailulle. Työkalun on määrä edistää tuotannonsuunnittelua ja tuoda sitä kautta lisäarvoa yritykselle. Työkalu on rakennettu Microsoft Excel taulukkolaskentaohjelmaan. Työkalu vertailee prosessiohjausjärjestelmästä saatua historiadataa ja optimointiohjelmasta kerättyä optimoitua tuotantodataa sekä luo näistä Pivot-taulukoita. Työkalu laskee toteutuneen tuotannon ja optimoidun tuotannon välille onnistumisindeksin. Pivot-taulukoista on koostettu kuvaajia jotka helpottavat tuotannonsuunnittelua tekevää henkilökuntaa historiadataan vertailussa

Työssä esitellään yhteistuotannon hyötyjä sekä paneudutaan kaukolämpöverkkojen rakenteeseen ja sähkön- ja lämmöntuotannon periaatteisiin. Lisäksi työssä paneudutaan siihen miten ja miksi optimointia suoritetaan tilaajayrityksessä ja mitä kehitettävää optimoinnissa vielä on.

Lopputuloksena on työkalu jonka Turku Energia voi ottaa käyttöön ja jota yritys voi jatkokehittää haluamaansa suuntaan.

## ASIASANAT:

Yhteistuotanto  
Optimointi  
Kaukolämmitys

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Energy and Environmental Engineering

2020 | 35 pages

Markus Lönnqvist

## THE DEVELOPMENT OF DISTRICT HEAT AND ELECTRICITY PRODUCTION PLANNING

The purpose of this thesis was to create a tool that can compare historical data of district heating and electricity cogeneration with the optimized production data for the customer company Turku Energia Oy. The tool is intended to promote production planning and thereby bring added value to the company. The tool is built into a Microsoft Excel spreadsheet. The tool compares the historical data obtained from the process control system with the optimized production data collected from the optimization program, and creates Pivot tables from these. The tool calculates a success index between actual production and optimized production. Pivot tables are compiled with graphs to make it easier for production planning staff to compare historical data.

The work presents the benefits of cogeneration and focuses on the structure of district heating networks and the principles of electricity and heat production. In addition, the work focuses on how and why optimization is performed in the client company and what needs to be done in order to further develop optimization.

The result is a tool that Turku Energia Oy can use and further develop in the direction needed.

### KEYWORDS:

Cogeneration  
Optimization  
District heating

# SISÄLTÖ

<b>KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO</b>	<b>6</b>
<b>1 JOHDANTO</b>	<b>7</b>
<b>2 KAUKOLÄMMITYS</b>	<b>8</b>
2.1 Kaukolämpö Suomessa	8
2.2 Kaukolämpöverkkojen rakenne Suomessa	11
2.3 Kaukolämmön tuotanto	13
<b>3 LÄMMÖN- JA SÄHKÖNTUOTANTOLAITOKSET TURUN SEUDULLA</b>	<b>16</b>
3.1 Naantalin voimalaitos	16
3.2 Kakolan lämpöpumppulaitos	17
3.3 Orikedon lämpökeskus	17
3.4 Huippukuorma- ja varavoimalaitokset	17
<b>4 TUOTANNON OPTIMOINTI</b>	<b>19</b>
4.1 Optimoinnin merkitys	19
4.2 Energy Optima 3 Turku Energian käytössä	19
4.3 Haasteet optimoinnin kannalta	20
4.4 Case Tampereen sähkölaitos	23
4.5 Case Oulun Energia	23
<b>5 TULOKSET</b>	<b>25</b>
5.1 Työvaiheet	25
5.2 Tuotannon onnistuminen	27
5.3 Optimoinnin kehittämisideat	31
<b>6 YHTEENVETO</b>	<b>33</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>34</b>

## LIITTEET

Liite 1. Pivot-taulukoiden rakenne.  
Liite 2. Taulukoinnin rakenne.

## KUVAT

Kuva 1. Kaukolämpöjohto, Mpuk, jossa saman vaipan ja eristeen sisällä kulkee sekä meno että paluuputki, ja vasemmalla 2Mpuk kaukolämpöjohto, jossa meno- ja paluuputki ovat eri vaipan sekä eristeen sisällä (Energiateollisuus ry 2020c).	13
--	----

## TAULUKOT

Taulukko 1. TE:n vara- ja huippukuormalaitokset (Turku Energia 2020b).	18
--	----

## KUVIOT

Kuvio 1. Kaukolämmön hankinta vuodesta 1970 vuoteen 2018 (Energiateollisuus ry 2020b).	9
Kuvio 2. TE:n kaukolämmön hankinta polttoaineittain vuonna 2019 (Turku Energia 2020c).	10
Kuvio 3. KL-verkon menoveden lämpötilan suhde ulkolämpötilaan (myötäillen Mäkelä ym. 2015, 23).	12
Kuvio 4. Prosessi- ja optimoitidatan keräämistä kuvaava lohkokaavio.	26
Kuvio 5. NA4 yksikön sähköntuotannon historiadataa ja tuotantotasesähkön myyntihinta 15.4-18.4.2020.	28
Kuvio 6. NA4 yksikön tuotannon onnistuminen suhteessa optimointiin.	30
Kuvio 7. NA4 yksikön sähkötehon historiadataa.	31

## KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO

BFB	Kupliva leijupeti
CFB	Kiertävä leijupeti
CHP	Combined Heat and Power
ELBAS	Electricity Balance Adjustment System
KL	Kaukolämpö
LP	Lämpöpumppu
SKL	Savukaasulauhdutin
TE	Turku Energia Oy

# 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on toimia pioneeritutkimuksena toimeksiantajayrityksen eli Turku Energia Oy:n lämmön- ja sähköntuotannon optimoinnin historiadatan keruun työkalun luomiseen. Turku Energia Oy (jäljempänä TE) on Varsinais-Suomen alueella vaikuttava energiayhtiö, jonka toimialaan kuuluu sähkön ja kaukolämmön tuotanto, sekä myyntiin ja jakeluun liittyvät palvelut. Lisäksi TE:n tuotteisiin kuuluu prosessihöyry ja kaukojäähdytys. TE:n omistaa Turun kaupunki.

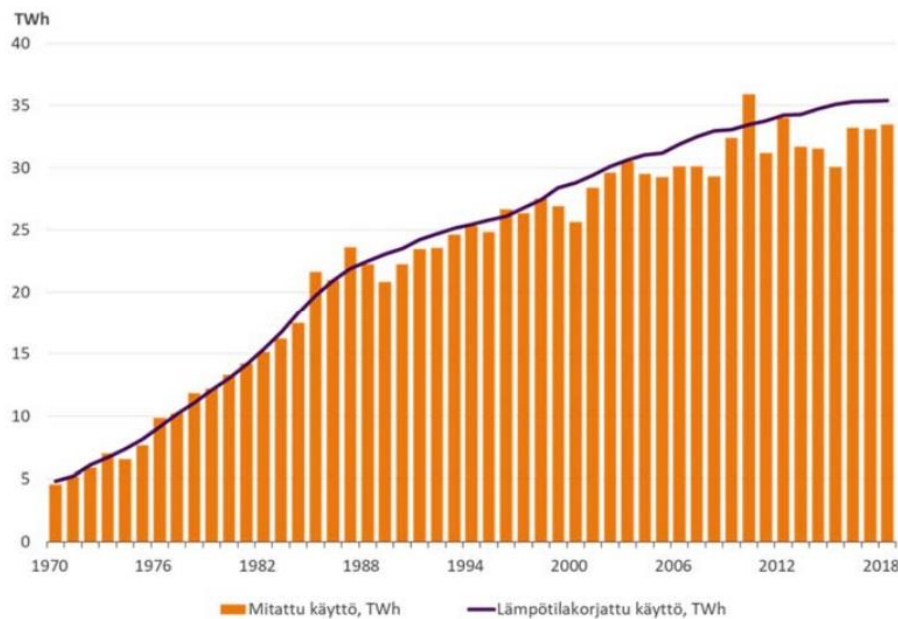
TE operoi Turun Seudun Energiantuotanto Oy:n (jäljempänä TSE) voimalaitoksia Naantalissa, jossa se tuottaa yhteistuotannossa sähköä ja kaukolämpöä. TE on TSE:n toinen pääomistaja Fortumin ohella, osakkuuksien ollessa 39,5 % ja 49,5 %. Muita TSE:n omistajia ovat Raisio, Kaarinan ja Naantalin kunnat. TE operoi Naantalin laitoksen lisäksi muita Turun alueen huippu- ja peruskuormalaitoksia. Peruskuormalaitoksiin lukeutuvat Naantalin yksiköiden ohella Orikedon lämpökeskus ja jäteveden hukkalämpöä hyödyntävät Kakolan lämpöpumput. Huippukuormalaitoksiin kuuluvat TSE:n omistama Luolavuoren pellettilaitos ja TE:n omistamat öljykattilat Linnankadulla, Härkämäessä, Koroisilla, Luolavuorella, Turun yliopistollisella keskussairaalalla ja Artukaisissa.

## 2 KAUKOLÄMMITYS

Kaukolämmityksellä tarkoitetaan lämmitysenergian siirtämistä jonkin väliaineen avulla lämmitysasiakkaalle putkistoa pitkin. Ensimmäisissä varsinaisissa kaukolämpöjärjestelmissä lämmönsiirtoaineena käytettiin höyryä, mutta höyryn käytöstä luovuttiin suurten siirtohäviöiden ja paineenalaisen höyryn vaarallisen luonteen vuoksi. Tosin New Yorkin Manhattanilla ja Pariisissa on edelleen käytössä vanhoja höyryputkijärjestelmiä. (Lund et al. 2014). Kaukolämmitykselle on ominaista se, että kaukolämpöverkkoon on liittyneenä laajoja alueita, kuten asuin- ja teollisuusalueita tai kokonaisia kaupunkeja. Suomen ensimmäinen kaukolämpöjärjestelmä rakennettiin Olympiakylään Helsinkiin vuonna 1940 ja 1952 Helsingin kaupunkialuetta alettiin lämmittämään kaukolämmöllä. Kaukolämmön jakelu Naantalin voimalaitokselta ympäryskuntiin ja Turkuun aloitettiin 1982.

### 2.1 Kaukolämpö Suomessa

Kaukolämmöllä on Suomessa vankka asema lämmitysmuotojen markkinajohtajana. Puhtuuttaessa uudisrakennuskannasta, kaukolämpöä lämmitysmuotonaan käyttää 65 % asuinrakennuksista, hoitoalan rakennuksista 84 %, liikerakennuksista 66 % ja toimistorakennuksista 87 %. Kaukolämpöverkkoa oli vuoden 2018 lopulla yhteensä 15 140 km. Uutta kaukolämpöverkkoa rakennetaan noin 250 km vuosittain. (Energiateollisuus ry 2018.) Vuonna 2019 kaukolämpöä toimitettiin 32,4 TWh lämpötilakorjatun määrän ollessa 35,4 TWh, jolloin nousua edellisvuoteen oli 0,1 %. Kasvun hidastusta saattaa osaltaan selittää keskimäärin yhden celsiusasteen lämpimämpi vuosi 2019 sekä rakennuskannan energiatehokkuuden paraneminen. (Energiateollisuus ry 2019.) Kaukolämpöverkkoon kytketyissä kotitalouksissa asui 2018 yhteensä 2,92 miljoonaa suomalaista. (Energiateollisuus ry 2020b.) Kuviossa 1 esitetään kaukolämmön hankinnan kasvua vuodesta 1970 vuoteen 2018 asti.



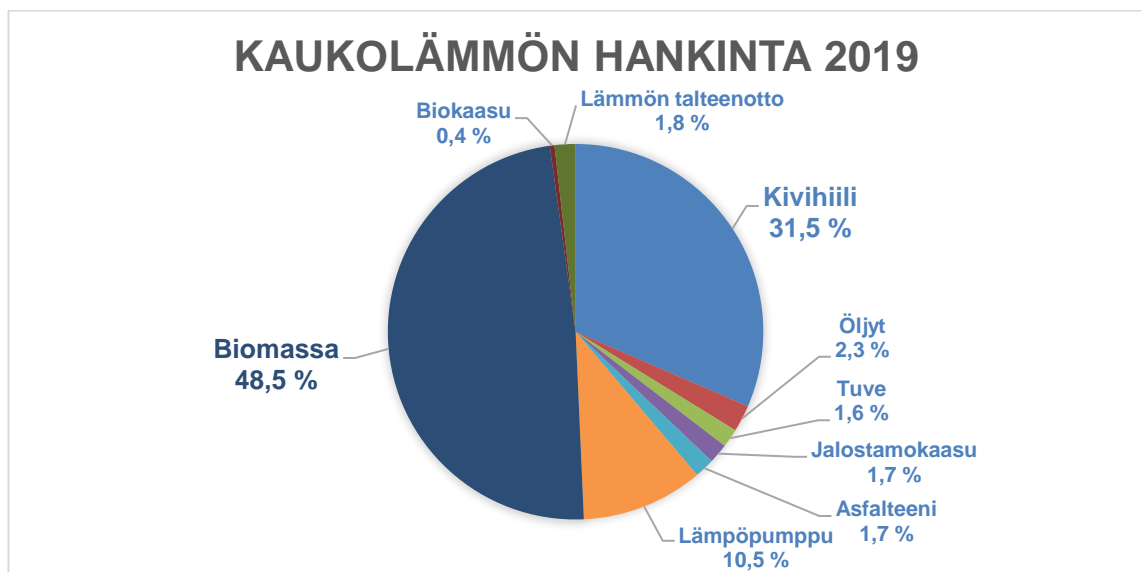
Kuvio 1. Kaukolämmön hankinta vuodesta 1970 vuoteen 2018 (Energiateollisuus ry 2020b).

Kaukolämmityksen suosiota on siivittänyt sen toimintavarmuus, kokonaistaloudellisuus, ympäristöystävällisyys ja energiatehokkuus. Kaukolämmityksen toimitusvarmuus on jo tänä päivänä erittäin korkealla tasolla. Lämmöntoimitusten keskeytyksiä on vuosittain keskimäärin ainoastaan 1,5–2 tuntia, nostaen toimitusvarmuuden 99,98 %:iin. Kaukolämmön energiatehokkuus taas saavutetaan tuottamalla kaukolämmitys yhteistuotannossa sähköenergian kanssa. Energiatehokkuutta parantaa se, että suuret yhteistuotantovoimalaitokset ovat hyötysuhteeltaan merkittävästi parempia kuin talouskohtaiset lämmitysjärjestelmät. Nykyaikaiset voimalaitokset on varustettu monipuolisilla säätö- ja ohjausjärjestelmillä ja savukaasujen lämmöntalteenotto- ja puhdistusjärjestelmillä. Nämä yhdessä parantavat kaukolämmityksen ympäristöystävällisyyttä. Suurimmat ympäristövaikutukset kaukolämmityksestä ovat polttoaineen poltosta johtuvat CO<sub>2</sub>-päästöt. Näitä päästöjä voidaan edelleen vähentää käyttämällä biopohjaisia polttoaineita. (Mäkelä ym. 2015, 12–16.)

Yhteistuotannossa saadaan samasta polttoainemäärästä enemmän energiaa käyttöön kuin erillistuotannossa tai kotitalouskohtaisissa lämmittimissä. Voimalaitoksissa voidaan

lisäksi käyttää ympäristöystävällisempiä ja edullisempia biopolttoaineita kuin kotitalouksissa. Tällä on merkitystä myös kaupunkien ilmanlaatuun. Kun lämmitysenergia on tuotettu keskitetysti tehokkaassa palamisprosessissa käyttäen biopolttoainetta ja savukaasut puhdistetaan voidaan yhdyskuntien hiilidioksidi- ja pienhiukkaspäästöjä vähentää. Suomi on ollut pitkään edelläkävijä yhteistuotannon kehittäjänä. Helsingin kaupunki on saanut jo vuonna 1990 YK:n ympäristöpalkinnon yhteistuotannon edistämisestä. (Mäkelä ym. 2015, 15).

TE:n ympäristöohjelmaan sisältyy tavoite tuottaa vuoden 2020 loppuun mennessä 70 % yrityksen myymästä energiasta uusiutuvilla energialähteillä. Tähän pyrkimykseen päästään esimerkiksi käyttämällä entistä enemmän biopolttoaineita lämmön hankinnassa. Yrityksen myymän lämmön ominaispäästöt samana vuonna olivat 144kg CO<sub>2</sub>/MWh. (Turku Energia 2020c.) Vuoden 2019 kaukolämmön hankinta polttoaineittain esitetään kuviossa 2.

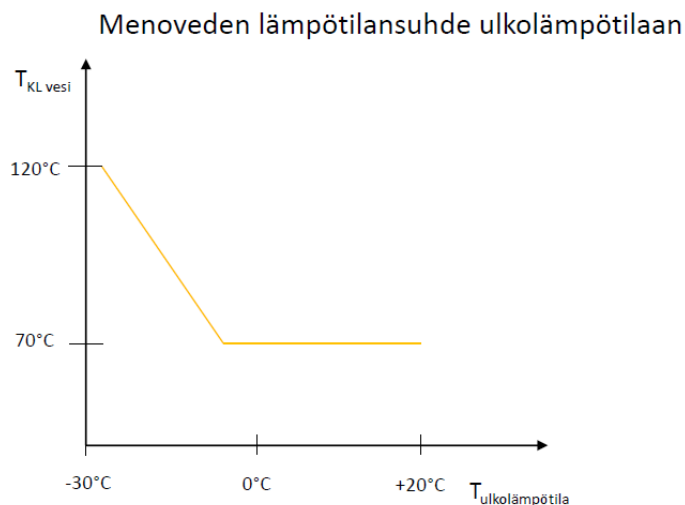


Kuvio 2. TE:n kaukolämmön hankinta polttoaineittain vuonna 2019 (Turku Energia 2020c).

## 2.2 Kaukolämpöverkkojen rakenne Suomessa

Kaukolämpöverkko käsittää voimalaitoksen ja asiakkaan välisen putkiverkoston. Kaukolämpöverkko muodostuu meno- ja paluupuolen runkoputkistosta, jakelujohdoista ja lämmitysasiakkaiden liittymisjohdoista. Runkoputkisto siirtää lämpimän kaukolämpöveden lämmöntuotantolaitokselta lähelle asiakasta ja palauttaa jäähtyneen veden takaisin lämmöntuotantolaitokselle. Jakelujohto taas ulottuu rajatulle alueelle, kuten kaupunginosaan ja johon asiakas liittyy liittymisjohdolla. Suomessa kaukolämmön siirtämiseksi käytetään suljettua kaksiputkijärjestelmää. Järjestelmä koostuu meno- ja paluuverkosta. Lämmöntuotantolaitoksella lämmitetty lämmitysväliaine pumpataan kiertopumpuilla menoverkoston, jota pitkin väliaine kulkee lämmitysasiakkaan kaukolämmönvaihtimeen, jossa lämmitysenergian luovutus asiakkaalle lopulta tapahtuu. Tämän jälkeen jäähtynyt kaukolämpövesi pumpataan paluuverkkoon ja edelleen takaisin lämmöntuotantolaitokselle. (Hellgren ym. 1999, 118–119.)

Kaukolämpöjärjestelmän tärkeimmät säädettävät muuttujat ovat KL-veden menolämpötila ja paine-ero meno- ja paluuputken välillä. KL-verkkoa säädetään niin, että myös kaikkein kauimpana olevan kaukolämpöasiakkaan käytettävissä on 60kPa paine-ero asiakaslaitteiden yli. Menoveden lämpötilaa taas säädetään voimalaitoskattilan polttoainetehoa säätämällä vallitsevan ulkolämpötilan edellyttämällä tavalla. Lämmityskauden kylmimpinä aikoina menoveden lämpötila on noin 120 °C. Kun kesäkaudella kaukolämpöä käytetään lähinnä lämpimän käyttöveden lämmittämiseen, menoveden lämpötila on 70 °C. (Mäkelä et al. 2015, 22–23.) Kuviossa 3 on esitelty kaukolämmön menoveden lämpötilan suhdetta ulkolämpötilaan.



Kuvio 3. KL-verkon menoveden lämpötilan suhde ulkolämpötilaan (myötäillen Mäkelä ym. 2015, 23).

Suomessa yleisimmin käytössä oleva kaukolämpöjohto muodostuu teräksisestä virtausputkesta, polyuretaanieristeestä ja muovikuoresta. Rakenteista käytetään nimitystä Mpuk ja 2Mpuk. Nimi tulee polyeteenisestä muovisuojakuoressa (M) ja polyuretaanieristeestä (puk). Numero 2 taas kertoo sen, että meno- ja paluuputki ovat erillisen eristeen ja kuoren sisällä. Näiden kaukolämpöjohtojen etu on, että ne ovat tehdasvalmisteisia elementtirakenteita ja näin ollen helppo asentaa. Aikaisemmin yleisin asennettava kaukolämpöjohto oli betonielementtikanava, mutta uusissa kaukolämpöasennuksissa niitä ei käytetä kustannussyistä. Teräksisten virtausputkien lisäksi käytössä on myös kuparista ja muovista valmistettuja virtausputkia. Kupariputkia on käytössä pientaloalueiden asennuksissa ja muoviputkia järjestelmissä, joissa käytettävän KL-veden lämpötila on enintään 80 °C. (Mäkelä et al. 2015, 56-58.) Kuva 1 havainnollistaa Mpuk ja 2Mpuk kaukolämpöjohtojen rakennetta.



Kuva 1. Kaukolämpöjohto, Mpuk, jossa saman vaipan ja eristeen sisällä kulkee sekä meno että paluuputki, ja vasemmalla 2Mpuk kaukolämpöjohto, jossa meno- ja paluuputki ovat eri vaipan sekä eristeen sisällä (Energiateollisuus ry 2020c).

### 2.3 Kaukolämmön tuotanto

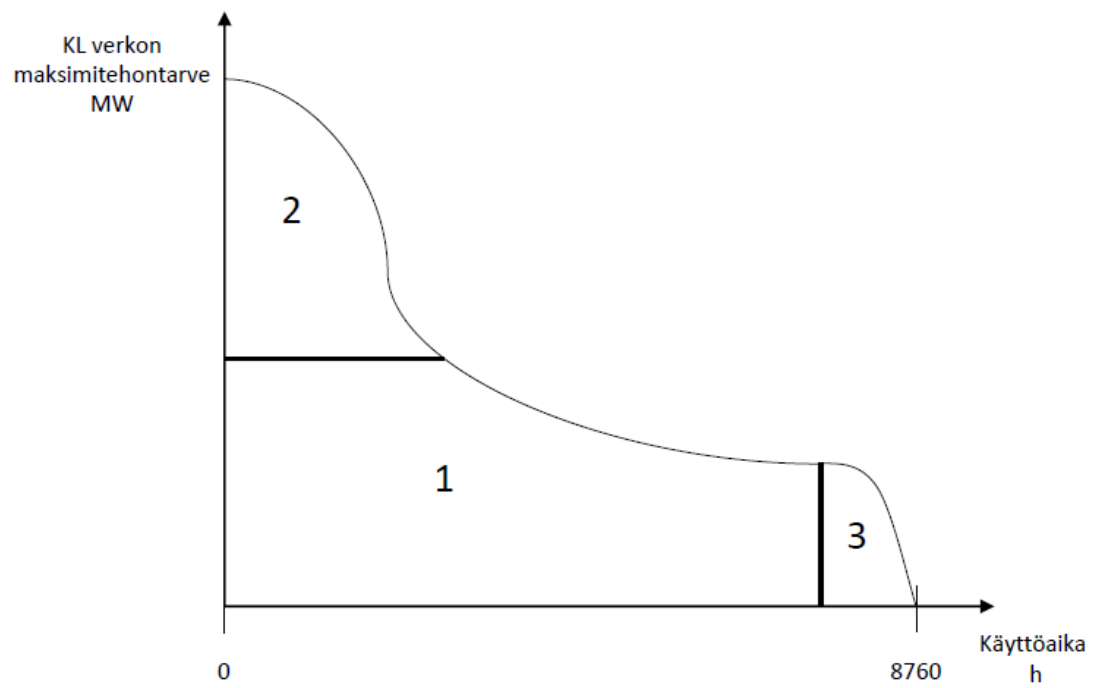
Kaukolämmön peruskuorma tuotetaan nykyisellään useimmiten yhteistuotannossa sähkön kanssa. Tällöin lämpöenergia tuotetaan CHP (*eng. Combined Heat and Power*) -laitoksesta. Sähköä, kaukolämpöä tai teollisuuden vastapainehöyryä tuottavia höyryvoimalaitoksia kutsutaan myös vastapainevoimalaitoksiksi. Termi tulee siitä, että höyryturbiinista ulostulevan höyryn paine, vastapaine, on riittävän suuri, jotta höyryä voidaan käyttää lämmitystarkoituksiin. Pääerona teollisuuden vastapainehöyryä ja kaukolämpöenergiaa tuottavilla laitoksilla on se, että kaukolämpölaitoksella höyryn paisunnan annetaan jatkua selvästi alempaan paineeseen, sillä kaukolämmöntuotannossa höyryn lämpötilan ei tarvitse olla yhtä korkea kuin teollisuuden prosesseissa. (Hellgren et. al 1999, 73.) Turbiinilta tuleva höyry johdetaan turbiinin välitosta kaukolämmönvaihtimeen, jossa höyry luovuttaa energiansa kaukolämpövedeen lauhtuen samalla vedeksi.

Voimalaitoksesta, joka tuottaa ainoastaan sähköä, käytetään nimitystä lauhdevoimalaitos. Nimitys tulee siitä, että höyryn paine turbiinin jälkeen on ainoastaan 0,02–0,03 bar verraten vastapainehöyryn noin 1 bar paineeseen. Matalapaineista höyryä ei voida enää tehokkaasti käyttää lämmitystarkoitukseen höyryn matalan entalpian takia (Huhtinen et al. 2008, 12). Höyry lauhdutetaan yleensä järvi-, joki- tai merivettä hyödyntäen takaisin vedeksi. Prosessissa syntynyt lauhde puhdistetaan ja pumpataan takaisin voimalaitoskattilan vesi-höyrykiertoon.

Yhteistuotannossa saadaan samalla polttoainemäärällä enemmän energiaa käyttöön, sillä lauhtumislämpö saadaan talteen kaukolämpöveteen. Voimalaitosprosessin kannalta on tärkeää saada höyry lauhtumaan vedeksi, sillä höyryä ei voida pumpata voimalaitoksen kattilaputkiin.

Peruskuormalaitokset suunnitellaan kattamaan 50 % kaukolämpöverkon huippukuormasta. Tällä suunnittelutavalla taataan peruskuormalaitoksen korkea käyttöaste ja käyttöikä. Peruskuormalaitokset ovat investointina suuria huippukuormalaitoksiin nähden, mutta niissä käytettävä polttoaine on edullisempaa huippukuormalaitosten käyttämään polttoaineeseen verrattuna. Peruskuormalaitosten käyttökustannukset ovat lisäksi pienemmät. Peruskuormalaitoksilla pystytään kattamaan jopa 80 % vuotuisesta lämmitysenergian tarpeesta, jolloin loput 20 % energiasta tuotetaan huippukuormalaitoksissa esimerkiksi öljyllä, maakaasulla tai biopolttoaineella kuten pelleteillä. (Huhtinen et al. 2008, 13–14). Huippukuormalaitokset ovat usein miehittämättömiä, ja tästä syystä niissä käytettävä polttoaine tulee olla toimintavarmaa ja mahdollistaa yksinkertainen kaukokäynnistys. (Mäkelä et al. 2015, 32).

Kaukolämmitysverkon lämmöntuotantolaitosten mitoittamisessa käytetään apuna kaukolämmön pysyvyyskäyrää. Pysyvyyskäyrälle on järjestetty arvioitu kaukolämmön tehontarve tunneittain suuruusjärjestykseen vuoden jokaiselle tunnille. Käyrältä voidaan tarkastella, kuinka suuren osan vuodesta kaukolämmön tarve ylittää mitoitettavan laitoksen tehokapasiteetin. Laitoksen kapasiteetin ylittävälle ajanjaksolle tarvitaan perustuotannon lisäksi vara- tai huippukuormalaitoksia. Yleensä huippu- ja varavoimalaitosten käyttöaika on 3 000 tuntia, jolloin vuoden loput 5 760 tuntia katetaan peruskuormalaitoksilla. Kuviossa 4 on kuvattu periaate laitosten mitoittamisesta pysyvyyskäyrän avulla. Alue 1 katetaan peruskuormalaitoksilla ja alue 2 huippukuormalaitoksilla. Alue 3 käsittää varavoimalaitoksilla tuotettavan kaukolämmityksen silloin, kun peruskuormalaitokset ovat suunnitelluissa huoltoseisokeissa. (Mäkelä et al. 2015, 28–31).



Kuvio 1. Kaukolämmityksen pysyvyyskäyrän ja lämmityslaitosten mitoittamisen periaatekuva.

### 3 LÄMMÖN- JA SÄHKÖNTUOTANTOLAITOKSET TURUN SEUDULLA

#### 3.1 Naantalin voimalaitos

Naantalin voimalaitoksella tuotetaan Turun, Naantalin, Kaarinan ja Raision kaukolämmön peruskuorma kiinteään polttoaineen kattiloilla. Naantalin voimalaitosalueella on toiminnassa kaksi tuotantoyksikköä, NA3 ja NA4. Vanhimmat kolme yksikköä (NA1-3) ovat hiilipölypolttoon perustuvia Shultzer-läpivirtauskattiloita. 1.7.2020 alkaen TSE sulkee vuonna 1960 valmistuneen NA1-yksikön sekä 1964 valmistuneen NA2-yksikön. Päätös sulkemisesta on osa Turun kaupungin, TE:n ja TSE:n pyrkimyksiä kohti kivihiiletöntä energiantuotantoa. Tavoitteena on luopua kivihiilen käytöstä kokonaan vuoteen 2022 mennessä. (Turku Energia 2020a.)

NA3-yksikkö on varustettu 125 MW lauhdeturbiinilla. Turbiinin välitoista kyetään ottamaan kaukolämpötehoa 155 MW ja prosessihöyryä 60 MW. Laitos on varustettu sähkösuodattimella, jonka lisäksi savukaasut puhdistetaan yksiköiden 1-3 yhteisessä rikinpoistolaitoksessa. (Heikkilä 2017, 94.)

NA4-voimalaitosyksikkö on vuonna 2017 käyttöönotettu CFB-monipolttoainelaitos. Kattilan höyryteho on 395 MW ja hyötysuhde 92,4 %. TSE investoi 2019 yksikön uuteen savukaasulauhduttimeen, joka nostaa kaukolämpötehoa edelleen 60 MW:iin (Turku Energia 2019). Laitoksen sähköteho tuotetaan Siemensin höyryturbiinilla ja on niin ikään 146 MW. Kaukolämpöä pystytään tuottamaan turbiinin välitottojen avulla 200 MW. Prosessihöyryä voidaan ottaa turbiinin välitosta 50 MW. (Heikkilä 2017, 94.)

### 3.2 Kakolan lämpöpumppulaitos

Kakolan jätevedenpuhdistamon yhteyteen rakennettiin 2009 jäteveden hukkalämpöä hyödyntävä lämpöpumppulaitos. Lämpöpumppujen 2 ja 4 yhteenlaskettu KL-teho on 42 MW, jonka lisäksi kaukojäähdytystä voidaan tuottaa 29 MW. Lämpöpumput keräävät puhdistetusta jätevedestä sen sisältämän lämpöenergian KL-veteen. Puhdistettu jätevesi jäähtyy noin 10–17 celsiusasteesta noin neljään celsiusasteeseen, jonka jälkeen jätevesi johdetaan 15 000 m<sup>3</sup> kylmävesialtaaseen (haastattelu Kalle Karjala 30.3.2020). Jäähtynyttä jätevettä pumpataan kaukojäähdytyksen tarpeisiin.

### 3.3 Orikedon lämpökeskus

Orikedon lämpökeskus tuottaa noin kuudesosan Turussa käytettävästä kaukolämmöstä (Turku Energia 2020b). Polttoaineena lämpökeskuksessa käytetään biopolttoaineita, metsä- ja sahateollisuuden tähteitä, purua, puukuorta ja haketta. Polttotekniikaltaan laitos on BFB-kattila, ja laitos on lisäksi varustettu savukaasulauhduttimella. Kaukolämpötehoa kattilalla pystytään tuottamaan 45 MW ja savukaasulauhduttimella vielä 12 MW lisää (Haastattelu Kalle Karjala 30.3.2020).

### 3.4 Huippukuorma- ja varavoimailaitokset

TE käyttää omia vara- ja huippukuormalaitoksia talven kylmimpinä ajanjaksoina ja peruskuormalaitosten vikatilanteissa noin 100 GWh verran vuodessa (Turku Energia 2020b).

Luolavuoren lämpökeskus on puupellettien pölypolttoon rakennettu lämpölaitos. Kyseessä on Suomen suurin tällaista tekniikkaa käyttävä lämpökeskus. Laitos toimii alueen

KL-verkon vara- ja huippukuormalaitoksena tarjoten 40 MW KL tehon. (Turku Energia 2020b).

Turun Artukaisissa sijaitsee Artukaisten höyrylämpölaitos. Laitos on varustettu 12 MW kiinteään polttoaineen kattilalla ja 10 MW varakattilalla, joka käyttää polttoaineenaan nestekaasua. Laitos tuottaa kaukolämpöä ja prosessihöyryä alueen yritysten käyttöön (Turku Energia 2020b).

TE:llä on omia kevyttä polttoöljyä käyttäviä lämpökeskuksia taulukon 1 mukaisesti. Kevyellä polttoöljyllä tuotettu kaukolämpö on TE:lle tappiollista liiketoimintaa mutta välttämätöntä kaukolämmön toimitusvarmuuden turvaamiseksi. Kaukolämmöntuotannon optimoinnilla pyritään pitämään kevyen polttoöljyn käyttö minimissä.

Tuotantoyksikkö	Teho
Linnankatu	4 x 40 MW
Härkämäki	2 x 40 MW
Koroinen	2 x 40 MW
Luolavuori	2 x 40 MW
TYKS	2 x 40 MW
Artukainen	1 x 37 MW

Taulukko 1. TE:n vara- ja huippukuormalaitokset (Turku Energia 2020b).

## 4 TUOTANNON OPTIMOINTI

### 4.1 Optimoinnin merkitys

Optimointi on lämmön- ja sähköntuotannon yksiköiden jatkuvaa tehon säätöä ja mittaamista. Optimoinnin tarkoitus sähkön- ja kaukolämmöntuotannossa on tehostaa tuotantoa ja parantaa liiketoiminnan kannattavuutta. Kaukolämpö tulisi tuottaa niin, ettei yhtään polttoainetta polteta turhaan. Turhasta polttoaineen kuluttamisesta joudutaan maksamaan päästökaupan mukaiset maksut ja polttoaineen verot. Lisäksi kaukolämpöveden tarpeettoman kuumana pumppaaminen lisää lämpöhäviöitä ja lisää pumppauskustannuksia. Jos taas sähköä tuotetaan liikaa, joutuu tuottaja pahimmassa tapauksessa maksamaan myydystä sähköstä.

Nykyisin tehokkaaseen tuotannonsuunnitteluun kuuluu oleellisena osana jokin tietokonepohjainen optimointiohjelma. Automatisoitu optimointi tarjoaa parhaassa tapauksessa säästöjä työajassa ja lyhentää investointien takaisinmaksuaikaa sekä parantaa tuotannon kokonaistaloudellisuutta. Lisäksi automaatio voi pienentää inhimillisistä syistä johtuvien virheiden riskiä. Ruotsalainen tuotannonoptimointityökalun kehittäjä Energy Opticon esimerkiksi ilmoittaa verkkosivuillaan, että käyttämällä heidän Energy Optima 3 -tuotetaan on mahdollista säästää tuotannon kuluissa 2–10 % (Energy Opticon 2020).

### 4.2 Energy Optima 3 Turku Energian käytössä

TE käyttää tuotannon optimoinnissa TSE:n Valmetin kautta tilaamaa Energy Optima 3 -optimointiohjelmaa. Optimointiohjelmaa käytetään apuna kaukolämmön ja -kylmän, sähkön ja teollisuushöyryn tuotannon optimoinnissa. Aiemmin TSE:n tuotantolaitosten optimointi tilattiin palveluna Fortumilta Espoon konttorista ja tuotantosuunnitelma tehtiin

viikoksi kerrallaan. Tässä toimintatavassa oli ilmeisiä puutteita. Tiedon kulun puutteista johtuen Espoon konttorilla ei aina ollut tiedossa Naantalin laitosten käytettävyyteen liittyvät tekijät. Lisäksi lyhyen aikajänteen optimointi mahdollistaa reagoinnin kaukolämmön ja -kylmän kysynnän muutoksiin, sekä reagoinnin suunnittelemattomiin tuotannon seisokeihin. Keskitetysti tehty pitkän optimointihorisontin tuotantosuosunnitelma ei pysty huomioimaan nopeita muutoksia joihin nykypäivänä on tärkeää puuttua oikea-aikaisesti.

Optimointijärjestelmälle asetettuja tavoitteita ovat sähköntuotannon ja KL-tuotannon kustannusten vähentäminen ja eri tuotantoyksiköiden ajotapojen yhtenäistäminen. Lisäksi optimointijärjestelmä auttaa ratkaisemaan tuotantoyksiköiden optimaaliset käynnistys- ja pysäytysajankohdat. (Haastattelu Kalle Karjala 30.3.2020.)

Energy Optimaan on syötetty kaikkien TSE:n ja TE:n omistamien tuotantolaitosten optimointiin vaikuttavat parametrit. Tällaisia parametreja ovat esimerkiksi käytettävän polttoaineen hankintahinta ja polttoaineen käyttämisestä johtuvat verot ja hiilidioksidin päästökaupan mukaiset maksut sekä tuotantolaitoksen ylös- ja alasajosta johtuvat kustannukset. Ohjelma arvioi kaukolämmönkulutusta, johon vaikuttaa ulkolämpötila ja vallitseva säätila, kuten sade ja tuuli, sekä ihmisten käyttäytymisestä johtuva vuorokausivaihtelu. Lisäksi Energy Optima seuraa pohjoismaisten sekä Baltian maiden kantaverkkoyhtiöiden omistaman Nord Pool -sähköpörssin pörssisähkön spot-hintaa.

Näitä parametreja hyödyntäen EO3 tekee tuotantosuosunnitelman, jonka täyttämiseksi ohjelma ehdottaa, millä laitoksella tulisi kulloinkin ajaa. Mikäli ennuste osuu oikeaan ja tarvittava määrä sähköä ja kaukolämpöä pystytään tuottamaan suunnitellusti, on tuotanto tehty kokonaisedullisimmalla tavalla.

#### 4.3 Haasteet optimoinnin kannalta

Tällä hetkellä tuotannon suunnittelu toimii siten, että Naantalin voimalaitoksen höyryturbiininen tuottama sähkö myydään spot-hintaisena Nord Pool -sähköpörssiin. TE:n tulee tietää, millaista sähkötehoa he ovat valmiita tarjoamaan myyntiin seuraavan vuorokauden vaihtuessa. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että tuotantosuosunnitelma sähkötehon

osalta tulee olla lähetettynä kantaverkkoyhtiölle aamulla kello 12 mennessä. Näin sähköteho on "lukittu" seuraavalle vuorokaudelle välillä 01-24. Sähkösuunnitelmaa pyritään noudattamaan mahdollisimman pitkään ilman muutoksia.

Sähkösuunnitelman edellyttämä sähköteho tuotetaan Naantalin yksiköillä NA3 ja NA4. Sähkötehoon vaikuttaa olennaisesti laitosten rakennussuhde. Rakennussuhde kuvaa CHP-laitoksen kaukolämpötehon ja sähkötehon suhdetta. Rakennussuhdetta voidaan jonkin verran säätää kaukolämmön eduksi ohjaamalla osa höyrystä turbiinin ohi osareduktioon. Laitoksilla on omat höyryturbiinit, joita ei ole varustettu lauhdeperällä. Turbiinin lauhdeperä mahdollistaisi suuremman sähkötehon ajamisen kuin rakennussuhde kaukolämmöntuotannon osalta edellyttäisi. NA4-yksikkö on kuitenkin varustettu apulauhduttimella, joka meriveden avulla lauhduttaa höyryä, jotta höyry voidaan pumpata vetenä takaisin kattilaan. Apulauhduttimen, kuten myös turbiinin lauhdeperän, käyttäminen sähkön tuotantoon heikentää laitoksen kokonaishyötysuhdetta. Naantalissa ei käytetä apulauhdutinta sähköntuotannon optimointiin, vaan sen käyttö on varattu muihin häiriötilanteisiin. Näin ollen sähköntuotannon optimoinnin määräävänä tekijänä toimii NA3- ja -4-yksiköiden rakennussuhde ja kaukolämmön tarve.

Kaukolämmön tuotannon optimointiin on käytettävissä laajempi skaala erilaisia laitostekoonpanoja. Optimoinnin lähtökohtana on tuottaa kaukolämpö kokonaisuuteen nähden edullisimmalla tavalla vaarantamatta kaukolämmön toimitusvarmuus. Kaukolämmön tuotantokustannuksia määriteltäessä tulee ottaa huomioon myös muut myytävät tuotteet: kaukojäähdytys ja prosessihöyry. Naantalin voimalaitosyksiköillä tuotetaan sähkö, kaukolämmön peruskuorma ja lähialueiden yritysten prosessihöyry, joten niiden yksiköiden käyttö on useimmiten edullisinta.

Mikäli Naantalin kiinteän polttoaineen kattilat eivät ole käytössä, tyydytetään prosessihöyryn tarve Naantalin kahdella sähkökattilalla. Sähkökattilat tuottavat tarvittavan prosessihöyryn sähkön avulla. Sähkökattiloiden käyttökustannus riippuu pitkälti sähkön pörssihinnasta. Sähkökattiloita joudutaan käyttämään silloin kun Naantalin yksiköt ovat kesäaikaan huoltoseisokissa tai on muu tuotannon häiriötilanne.

Kesälle ajoittuu kaukojäähdytyksen suurin kysyntäpiikki ja pienin kaukolämmön tarve. Kakolan lämpöpumput tuottavat kaukojäähdytyksen ohella aina myös hieman kaukolämpöä. Lämpöpumppujen optimointiin vaikuttaa myös se, että pumput on tarjottu Fingridin ylläpitämille säätösähkömarkkinoille osana sähkön kysyntäjoustoa. Tämä tarkoittaa sitä,

että mikäli sähköpörssin ensisijaisilla markkinapaikoilla, Nord Poolin Spot:n Elspot pörssissä ja Elbas jälkimarkkinoilla ei saada sähkön tarjontaa ja kysyntää tasapainotettua, voidaan lämpöpumput irrottaa verkosta säätösähkömarkkinoiden alassäätötarjouksen mukaisesti. Tällä menettelyllä saadaan säästöä toisen lämpöpumpun käytöstä, sillä toisen pumpun kuluttama sähkö on kiinteähintaista ja toisen pumpun kuluttama sähkö ostetaan suoraan sähköpörssistä spot-hintaisena.

Kesäisin saattaa seurata tilanne, että lämpöpumppujen KL teho ei aivan riitä ja rinnalle tarvitaan muuta tuotantoa polttolaitosten minikuorma-ajolla. Minimikuorma-ajo on haastavaa etenkin kiinteitä polttoaineita käyttäen. Polttoaineen syötössä ja palamisprosesseissa tapahtuu silloin eniten häiriöitä ja minikuormalla ajo vaatii tuotannon henkilökunnalta eniten prosessiin puuttumista. Orikedon käytön optimointiin vaikuttaa käytettävän polttoaineen hinta ja prosessihöyryn tarve Naantalissa. Vaikka Orikedolla olisikin määrättyssä tilanteessa halvempi tuottaa kaukolämpöä kuin Naantalin yksiköillä, prosessihöyryn tarve ja sähkön myynti kääntää kannattavuuden Naantalin eduksi.

Kaukolämmön myynnin kannalta tappiollisinta on tuottaa kaukolämpö öljyä polttavilla huippukuormalaitoksilla. Kovilla talvipakkasilla tai häiriötilanteissa niin joudutaan kuitenkin tekemään. Tarpeen loputtua öljyn poltto tulee viipymättä lopettaa. Kulutushuippujen tasaamiseksi Turun alueen kaukolämpöverkkoon on liitetty kaksi kaukolämpöakkuja. Kaukolämpöakku on suuri eristetty vesisäiliö, johon varastoidaan KL-vettä. Yksi akku sijaitsee Naantalın voimalaitoksella ja on kapasiteetiltaan 800 MW. Toinen on Turussa Wärtsilän vanhassa kaasukellossa ja on kapasiteetiltaan 260 MW. Akkuun on pumpattu maksimissaan 95-celsiusasteista kaukolämpövettä, jota puretaan kaukolämmön paluuverkkoon kulutushuipun leikkaamiseksi. Kulutuksen pienentyessä akkua ladataan. Näin vältetään huippukuormalaitosten jatkuvalta käynnistyksiltä ja sammutuksilta ja peruskuormalaitoksella voidaan ajaa keskimäärin korkeammalla kuromalla. Optimointiohjelman tehtävänä on auttaa tuotannon henkilökuntaa kaukolämpöakkujen käytön ajoittamisessa.

Jotta voidaan seurata, onnistuiko tuotanto saavuttamaan optimoinnin asettamat tavoitteet, tulee kerätä tieto tuotannon toteumasta sekä tietää, millä laitteilla ja millaista tehoa optimointi on ehdottanut kulloinkin ajettavan. Tätä kirjoittaessa TE ei ole kerännyt tietoa siitä, miten hyvin tuotanto on tässä tavoitteessa suoriutunut. Tämä johtuu siitä, että tällaisenaan EO3 ei tallenna historiadataa. Käytännössä ei siis pääse käsiksi siihen, millainen ”ajatus” optimointiohjelmalla on ollut KL-ennusteen määrittämisen tehon saavuttamiseksi.

Tuotannon suunnittelun ja tuotannonohjauksen kehittämiseksi olisi kriittistä pystyä seuraamaan, kuinka hyvin tuotanto on onnistunut. Kun tiedetään, miten hyvin tuotanto on onnistunut, voidaan puuttua tuotannossa ilmenneisiin ongelmiin.

#### 4.4 Case Tampereen sähkölaitos

Tampereen sähkölaitoksella on käytössä sama optimointiohjelmisto, EO3. Optimoinnin onnistumista tarkastellaan kerran kuukaudessa edelliselle kuukaudelle. Tarkastelu toteutetaan siten, että optimointiohjelmaan syötetään toteutunut KL-tuotanto tarkasteltavalta kuukaudelta. Lisäksi ohjelmaan syötetään toteutunut sähkön ja polttoaineiden hinnat. Ohjelma suorittaa niin sanotun vapaan optimoinnin, jossa ohjelma laskee millä laitoilla se olisi ajanut tarvittavan KL-tehon. EO3:sta saatu data, sekä Valmet DNA -prosessiohjausjärjestelmästä saatu data, KL-teho, sähköteho ja käynnistys- ja pysäytyskustannukset ja polttoainemäärät syötetään Generis-laskentajärjestelmään, joka laskee optimaalisen energiakatteen. Tämän jälkeen optimoitua ja toteutunutta tuotantoa voidaan vertailla ja poikkeamia sekä niiden kustannuksia laskea.

EO3 toimii Tampereen sähkölaitoksella neuvoa antavana ohjelmistona. Yritykseen on palkattu energia-asiantuntijoita, jotka energiavalvomosta käsin vastaavat koko tuotantokapasiteetin optimoinnista. Asiantuntija tarkastelee ohjelman tuottamaa, tunnin välein muuttuvaa optimointia kahden vuorokauden optimointihorisontilla. Vuorossa olevasta asiantuntijasta riippuu, käytetäänkö EO3:sen tuottamaa dataa tukena varsinaisen tuotantosuunnitelman luomisessa.

#### 4.5 Case Oulun Energia

Oulun Energialla ei ole tuotannon suunnittelussa käytössä erillistä optimointiohjelmää, jonka dataa käytettäisiin tuotannon toteutumisen määrittämiseen. Yritys on suunnitellut ottavansa Energy Optima 3 -järjestelmän käyttöönsä alkukesästä 2020. Tämä luo hie-

man erilaiset lähtökohdat tuotannon onnistumisen määrittämiselle. Oulun Energia käyttää tuotannon suunnitteluun FORE-nimistä järjestelmää. Järjestelmään on annettu tieto käytössä olevien tuotantolaitosten käynnistymisjärjestyksestä. Järjestelmässä laskenta tapahtuu lukuisia Excelin IF -päättelyitä käyttäen, jotka käyttöhenkilökunta on itse määrittänyt. Käytännössä kokonaisuuden kannalta edullisin tuotantolaitos ajetaan ylös ensimmäisenä. (Haastattelu Tommi Kantola 23.4.2020.)

FORE-järjestelmään on asetettu kolme sähköntuotannon tarjoustasoa. Ensimmäinen taso tarkoittaa sitä, että käytössä olevat yhteistuotantolaitokset toimivat minimiteholla. Tällöin tuotetaan vain tarvittava kaukolämpöteho ja minimi sähköteho koska höyryturbiineja ei voida täysin ohittaa. Toisella tasolla höyryä ajetaan turbiinin läpi rakennussuhteen mahdollistama maksimimäärä. Näin ollen kaukolämmön tarve määrittää myös maksimi sähkötehon. Kolmannella tarjoustasolla tuotantoyksiköt toimivat täydellä kattilateholla ja osa höyrystä täytyy lauhduttaa apulauhduksia käyttäen. Tämä johtuu siitä syystä, että kaikkea höyryä ei voida lauhduttaa KL-vaihtimissa. Kahdelle ylemmälle tasolle yritys on itse määritellyt rajahinnan, ja ensimmäinen sähköntarjoustaso myydään aina riippumatta pörssisähkön hinnasta. (Haastattelu Tommi Kantola 23.4.2020.)

Tuotantoa ohjataan siten, että kun pörssisähkön hinta ylittää sähköntuotannon tarjoustason rajahinnan, tuotantoa säädetään ylöspäin. Kun pörssisähkön hinta laskee tarjoustason rajahinnan alapuolelle, tuotantoa säädetään alas. Näin saadaan maksimi tuotto sähköntuotannosta. Voimalaitoksen valvomossa vuoron esimies, vuoromestari, tarkastaa FOREsta tuotantosuunnitelman ja muokkaa sitä tarvittaessa ennen suunnitelman välittämistä sähköpörssiin. (Haastattelu Tommi Kantola 23.4.2020)

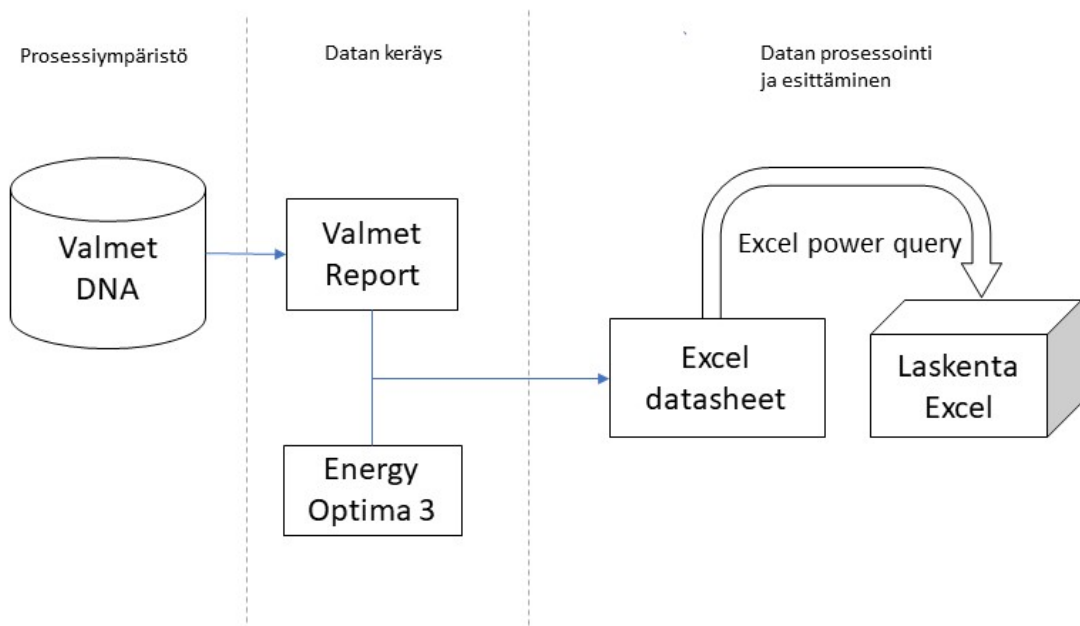
Tuotannon onnistumista tarkastellaan vertaamalla toteutuiko ihanteellinen laitosten käynnistysjärjestys ja kuinka hyvin sähkökauppa toteutui. Varsinaista onnistumisen mittaria ei Oulun Energialla ole määritelty, mutta tuotantosuunnitelmasta poikkeamisen aiheuttamat kustannukset selvitetään ja optimaalinen kate pyritään saavuttamaan. (Haastattelu Tommi Kantola 23.4.2020)

## 5 TULOKSET

### 5.1 Työvaiheet

Lähtökohtina sähkön- ja lämmöntuotannon, sekä näiden optimoitujen arvojen historiadan keräämiseen oli se, että data tulisi kerätä Microsoft Exceliin ja tuottaa datasta useita erilaisia Pivot-taulukkoita. Lisäksi tavoitteena oli määrittää niin sanottu onnistumisindeksi, kuinka hyvin tuotanto toteutuu suhteessa optimoituun tuotantoon. Toimeksiantaja halusi, että Excel-työkirja auttaisi vertailemaan Naantalin tuotantoyksiköiden onnistumista suhteessa muihin TE:n tuotantoyksiköihin. Lisäksi Excel-taulukossa tuli vertailla kaukolämpöakkujen purkua ja latausta suhteessa optimointiin. (Haastattelu Kalle Karjala 30.3.2020.)

Toteutuneen tuotannon historiadan kerääminen on suoraviivainen prosessi. Valmet DNA -prosessiohjausjärjestelmä kerää jatkuvasti voimalaitoksen prosessidataa, joka on mahdollista ladata valmiina Excel-raporttipohjana Valmetin DNA Report -raportointijärjestelmästä. EO3-optimointiohjelma ei sen sijaan kerää historiadataa, vaan saatavilla on ainoastaan juuri sen hetken optimointitieto. Kuviossa 4 havainnollistetaan lohkokaaaviolla datan keräämistä.



Kuvio 4. Prosessi- ja optimoitidatan keräämistä kuvaava lohkokaavio.

Sähköntuotannon tuotantosuunnitelma tarkastetaan joka aamu Naantalin voimalaitoksen valvomossa kello 8 ja 11 välillä. Tuotantosuunnitelma luodaan optimointiohjelman tuottaman neljän vuorokauden optimointihorisontin pohjalta ja suunnitelma tehdään seuraavalle vuorokaudelle välillä 01-24. Tuotantosuunnitelma välitetään Nord Pool -sähköpörssiin, ja tuotannon prioriteetti on noudattaa tätä suunnitelmaa. Koska optimointiohjelma päivittää optimointihorisonttiaan tunnin välein eikä ohjelma kerää historiadataa, tulee neljän vuorokauden optimoitu tuotantosuunnitelma ladata samalla kuluvalle tunnilla kuin Naantalin voimalaitoksessa suunnitelma on lähetetty sähköpörssiin välittäjälle. Koska tuotantosuunnitelman lähettämistä välittäjälle ei ole suoritteena vakioitu tiettyyn kellonaikaan, luo tämä tiukan aikaikkunan, jolloin optimointia tarkkailevan henkilön tulee ladata suunnitelma optimointiohjelmasta. Tämä on suurin haaste määriteltäessä tuotannon onnistumista suhteessa optimointiin.

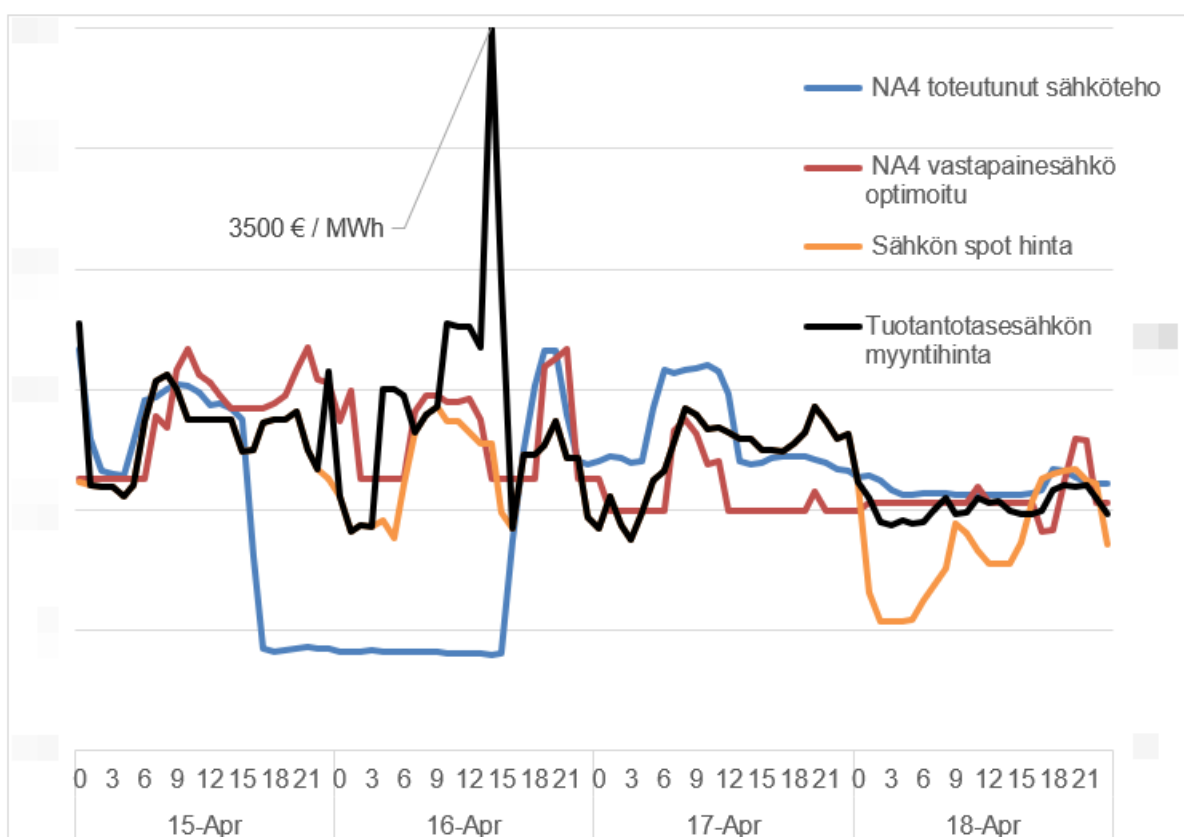
Kun toteutuneen tuotannon historiadata ja optimoitu tuotantosuunnitelma on ladattu, tuodaan tiedot samaan Excel-tiedostoon. Tätä tehdessä ongelmaksi muodostui Valmetin DNA Reportin raporttipojan aikasarakkeen kirjoitusasu. Aikasarakkeen päivämäärä ja aika on muodossa *pp.kk.vvvv tt:mm:ss* eli ensin tulee päivä, sitten kuukausi, vuosi, tunnit, minuutit ja lopuksi sekunnit. Excel ei suoraan tunnista tätä muotoa, eikä ajan luokittelu Pivot-taulukossa toimi. Tässä tapauksessa ongelma kierretään Excelin Power Query Editor -toimintoa käyttäen. Power Query Editorin avulla on mahdollista kerätä dataa erilaisista tietolähteistä, kuten toisesta Excel-tiedostosta, SQL-tietokannasta, tekstitiedostosta tai verkkosivustolta. Power Query Editor luo kyselyn lähdetiedostoon ja tuo datan uuteen Excel-tiedostoon. Toiminto mahdollistaa sarakkeiden datatyyppien pakottamisen haluttuun formaattiin. Kun datan kysely on luotu datan sisältävään Excel-työkirjaan, voidaan laskenta siirtää uudelle työkirjalle ja luoda Pivot-taulukoita vertailua varten. Historiadataa on kaikista TSE:n ja TE:n tuotantolaitoksista; Naantalin NA3- ja -4-yksiköstä, Kakolan lämpöpumpuista, Orikedon ja Luolavuoren lämpökeskuksista, sekä muista vara- ja huppulaitoksista ja Turun ja Naantalin KL-akuista. Kaikkien näiden yksiköiden historiadataa ja optimoitua tehoa voidaan vertailla Pivot-taulukoiden avulla. Liitteessä 2 on kuvattu Pivot taulukon rakennetta. Pivot taulukon kenttäluettelossa on mahdollista valita näkyville minkä tahansa edellä mainitun laitoksen data ja koostaa siitä havainnollistavia diagrammeja. Lisäksi laskentaan on tuotu mukaan laskettuja kenttiä, joilla havainnollistetaan esimerkiksi onnistumisindeksiä.

## 5.2 Tuotannon onnistuminen

Luvuissa 4.4 ja 4.5 esiteltiin Tampereen sähkölaitoksen ja Oulun Energian lähestymistavat onnistumisen mittaamiseen. Tampereen sähkölaitoksella onnistumista tarkasteltiin maksimaalisen energiakatteen kautta. Vertailu tapahtuu todellisten tuotantokustannusten, sähkökaupan ja EO3:sen ehdottaman optimaalisen tuotannon kautta. EO3 ottaa huomioon polttoaineen kustannukset sekä ylös- ja alasajokustannukset. EO3:sella tehdään vapaa optimointi, joka ehdottaa, miten paras kate olisi saavutettu. Mitä lähemmäs todelliset kustannukset osuvat optimoituja kustannuksia ja sähkönmyyntipotentiaalia, sitä paremmin tuotanto onnistui. Oulun Energia tarkastelee tuotannon onnistumista optimaalisen laitosten ajojärjestyksen kautta sekä vertailemalla sähkökaupan onnistumista.

Sähkön tuotannon ja kulutuksen tasapaino on tarkkaan säänneltyä. Mikäli tuotannon tase jää alijäämäiseksi, joutuu tasevastaava ostamaan tasesähköä kantaverkkoyhtiöltä eli Fingridiltä. Tuotantotasesähkön hinta muodostuu kaksihintajärjestelmällä, jossa tuotantosähkön myynnille ja ostolle on omat hintansa (Fingrid 2020a). Tuotantotasesähkön hinta on ylössäätötunnilta ylössäätöhinta ja alassäätötunnilta Suomen alueen spot-hinta. Mikäli tasevastaavan tuotanto on ylijäämäinen, ostaa Fingrid ylijäämän alassäätötunneilta alassäätöhintaan ja ylössäätötunneilta alueen spot-hintaan. Mikäli yli- tai alijäämäiselle tuotantotunnille ei ole säätöhintaa, korvataan taseet spot hintaisena. Tuotantotasesähkölle maksetaan lisäksi tuotantomaksu. Näin ollen tuotantotasesähkön poikkeamisesta ei voi hyötyä taloudellisesti. (Partanen 2011, 6–14).

Kuvio 5 havainnollistaa sähköntuotannon poikkeamisen kustannuksia. 16.4.2020 Olkiluoto 2 laitos joutui säätämään tehoa alas häiriön vuoksi. Tästä seurasi tilanne, jossa kantaverkkoyhtiö joutui käynnistämään nopeaa tehoreserviä ja aktivoimaan säätösähkömarkkinoilta lisää sähkötehoa (Fingrid 2020b).



Kuvio 5. NA4 yksikön sähköntuotannon historiadataa ja tuotantotasesähkön myyntihinta 15.4-18.4.2020.

Säätösähkön hinta nousi kello 14 arvoon 3500 €/MWh. Tuona aikana TE:n tuotantotase oli alijäämäinen. Alijäämä joudutaan ostamaan Fingridiltä tuotantotasesähkön myyntihintaan joka oli tuolloin ylössäätöhinta, eli 3500 €/MWh. Jos tuotanto olisi ollut esimerkiksi 50 MWh alijäämäinen kyseisellä tunnilla, maksettavaksi olisi kertynyt peräti 175 000 € .

Kaukolämmön tuotannon ylijäämästä aiheutuu lisääntyneitä polttoainekustannuksia. Lisäksi maksettavaksi jää päästökaupan mukaiset maksut, mikäli käytettävän polttoaineen käytöstä syntyy CO<sub>2</sub>-päästöjä. Jos tuotanto taas on alijäämäistä suunniteltuun nähden, joudutaan tuotantokapasiteettia nostamaan pahimmassa tapauksessa käyttämällä öljykäyttöisiä vara- ja huippukuormalaitoksia. Ylimääräisistä ja suunnittelemattomista ylös ja alasajoista syntyy myös kustannuksia.

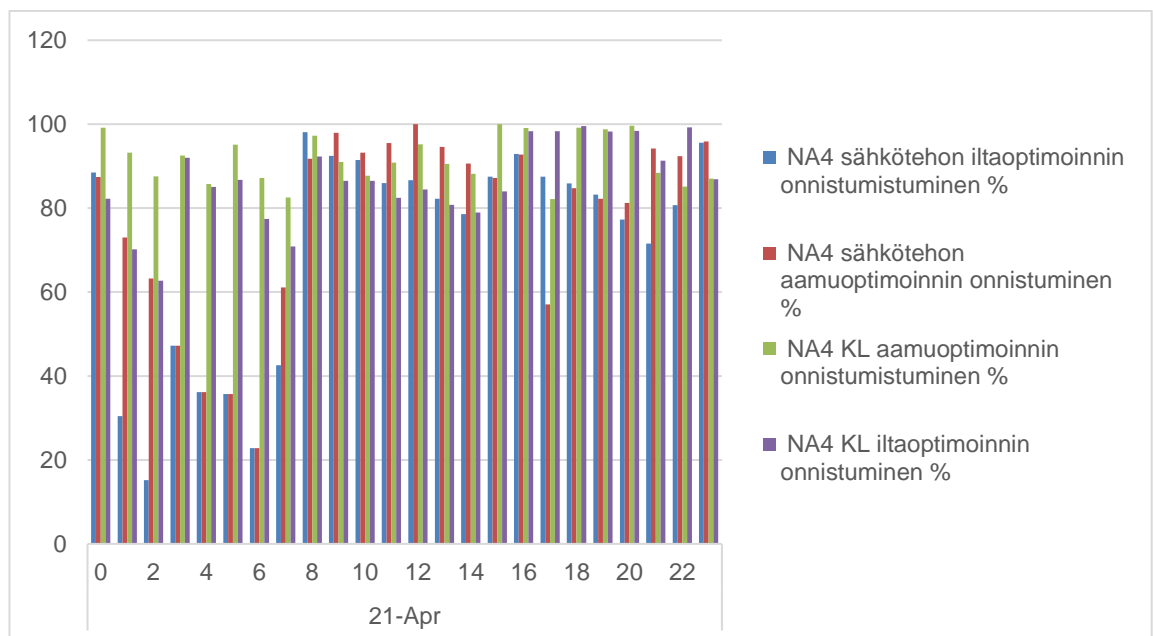
Opinnäytetyössä tuotannon onnistumista lähdetään tarkastelemaan optimoidun ja toteutuneen tuotannon kautta, kuten Tampereen sähkölaitoksen tapauksessa. Tarkastelun ulkopuolelle jätetään tuotantokustannukset. Onnistumista määritetään tässä tapauksessa laskemalla indeksi eli suhdeluku, kaavan 1 mukaisesti. Kaavalla lasketaan toteutuneen tuotannon ja optimoidun tuotannon suhteellista muutosta. Indeksillä kuvaa, kuinka paljon toteutunut tuotanto on optimoidusta tuotannosta. Kun suhdeluvusta vähennetään 100, saadaan suhteellinen muutos prosentteina. Ottamalla itseisarvon laskutoimituksesta ja vähentämällä sen sadasta, saadaan prosenttiluku, joka kuvaa, kuinka hyvin tuotanto on onnistunut suhteessa optimoituun.

$$100 - \left| \frac{\text{Toteutunut tuotanto}}{\text{Optimoitu tuotanto}} * 100 - 100 \right| \quad (1)$$

Indeksiä käyttämällä on mahdollista vertailla tuotantoyksiköiden onnistumista optimointiin nähden. Naantalissa peruskuormalaitoksista vertailudatan keräysaikana ainoastaan NA4 yksiköllä oli suunniteltua tuotantoa. Siksi vertailu kohdistuu enimmäkseen kyseiseen yksikköön, KL akkujen lisäksi. NA4 yksikön onnistumista verrattiin kahdella eri tavalla, aamuoptymointiin ja iltaoptimoointiin nähden. Aamun optimoinnilla tarkoitetaan toteutuneen tuotannon vertaamista aamun tuotantosuunnitelmaan ja iltaoptimoinnilla toteutuneen tuotannon vertaamista illan tuotantosuunnitelmaan. Illan tuotantosuunnitelma toimii tällä hetkellä vain ohjaavana suunnitelmana, jonka avulla pyritään varautumaan

mahdollisiin optimoinnin muutoksiin. Vertailua tehdään siitä syystä, että voimme vertailla kumpi tapa tuotannonsuunnittelulle olisi kannattavampaa.

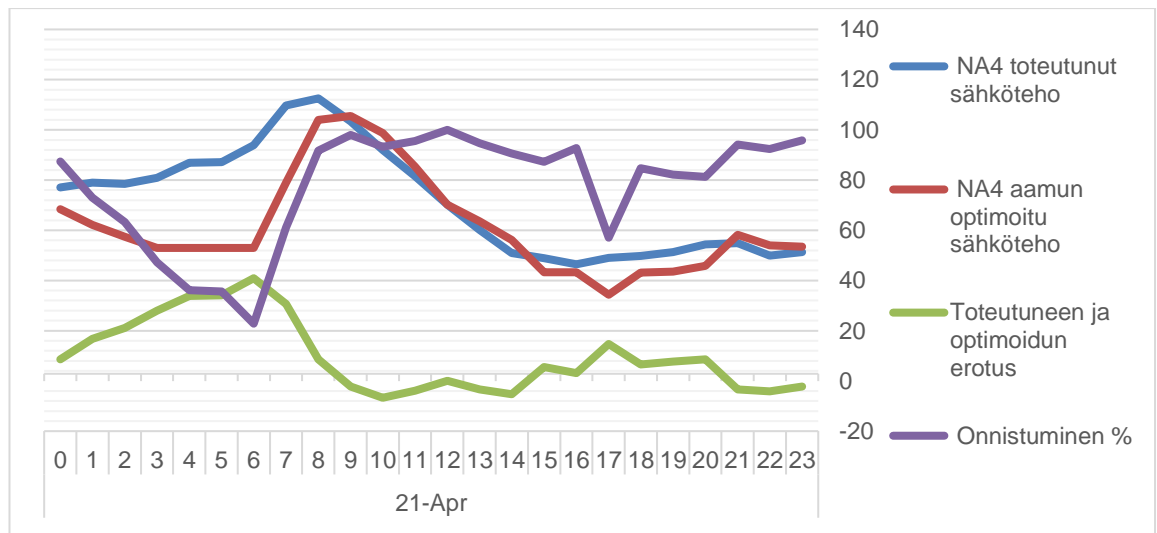
Taulukosta 2 nähdään huhtikuun 21. päivän optimoinnin ja toteutuneen tuotannon onnistumisvertailu. Taulukosta nähdään, että aamuyöllä onnistuminen on ollut keskimääräistä heikompaa. Mittausjaksolla 1.4-25.4.2020 onnistuminen on ollut keskimäärin sähkötehon aamuoptymoinnin osalta 97,1% ja iltaoptymoinnin osalta 98,8%. Syy iltaoptymoinnin parempaan onnistumiseen johtuu siitä, että illalla tehty tuotantosuunnitelma on kaukolämmön kuorman osalta tarkempi. Parantunut tarkkuus taas on seurausta siitä, että ennustettava ajankohta, eli tunnit 01-24 ovat lähempänä ja näin ollen sääolojen muutokset ovat ennustettavampia. Sähköteho on riippuvainen rakennussuhteesta, eli tuotetun kaukolämmön ja sähkön suhteesta, jolloin myös sähköntuotanto tarkentuu vastaamaan optimointia.



Kuvio 6. NA4 yksikön tuotannon onnistuminen suhteessa optimointiin.

Historiatieto Excel sisältää lukuisia Pivot taulukoita, joiden tarkoituksena on selittää tuotannon välisiä syy-seuraussuhteita. Taulukosta 3 pystymme lukemaan, että hutikuun 21.

päivän aamuyön tuotannon heikko onnistuminen johtuu siitä, että sähköä on tuotettu enemmän kuin optimointi olisi suositellut.



Kuvio 7. NA4 yksikön sähkötehon historiadataa.

### 5.3 Optimoinnin kehittämisideat

Tässä opinnäytetyössä esitelty malli tuotannon toteuman ja tuotannon optimoinnin väliin vertailuun ei ole suinkaan täydellinen. Suurin ongelma Naantalin tuotantoyksiköiden optimoidun- ja toteutuneen tuotannon välisessä vertailussa on se, että nämä yksiköt ovat EO3 ohjelman optimoinnissa jatkuvasti. Tämä tarkoittaa sitä, että laitosten ajama KL-teho muuttuu joka tunti, kun optimointi päivittyy. Koska sähköteho on riippuvainen rakennussuhteesta, muuttuu sähköteho samassa suhteessa KL-tehon kanssa. Tällä hetkellä ei ole mitään järkevää keinoa kerätä tunnin välein muuttuvan optimoinnin dataa.

Ongelma olisi mahdollista kiertää ainakin kahdella eri tavalla. Yksi keino on luoda automatisoitu datankeräysohjelma, joka kerää tunneittain muuttuvan optimoidun datan talteen myöhempää vertailua varten. Tämä mahdollistaisi sekä tehokkaan optimoinnin, että

datan vertailun mutta toisi kustannuksia uuden laskenta- tai datankeräysohjelman myötä. Toinen keino olisi muokata tuotantoyksiköiden ajotapaa niin, että tuotantosunnitelma kaukolämmön osalta lyötäisiin lukkoon vuorokausi etukäteen, aivan kuten sähkökaupan osalta pyritään. Silloin datan keruu voitaisiin vakioda esimerkiksi vuoromestarin työtehtäviin, eli datan kerääminen yhdistettäisiin samaan tilanteeseen, jolloin vuoromestari lähettää sähköntuotantosunnitelman sähköpörssiin. Tällä hetkellä koronavirusepidemia on johtanut siihen, että toimihenkilöiden määrä työpaikalla pyritään pitää minimissä. Näin ylläpidetään toimitusvarmuus mahdollisessa kriisitilanteessa. Samasta syystä vuoromestareille ei tulisi määrätä lisätehtäviä tällaisessa poikkeustilanteessa (Haastattelu Kalle Karjala 1.4.2020). Datan vertailu voitaisiin pitää Excelissä ja näin välttää uusien ohjelmien hankinta ja säästää kustannuksia.

## 6 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tilaajalle tehtiin tavoitteiden mukainen historiadataa analysoiva työkalu. Työkalu on luotu Excel-taulukkolaskentaohjelmaan, ja se hyödyntää Excelin Power Query -editoria datan kyselyketjujen tekemiseen. Power Query -editorin käyttö mahdollistaa laskennan ja raakadatan erillään pitämisen ja poistaa muuten työläitä välivaiheita aikasarakkeen luokittelun korjaamiseksi. Työkalu on käyttökelpoinen ja jättää kehittämisen varaa työn tilaajalle. Tilaajan organisaatiossa löytyy Excel-osaajia, jotka pystyvät kehittämään työkalua esimerkiksi laskentaan käytettävän datan keräämisen osalta. Työkalu ei ole täydellinen, ja mikäli siitä halutaan saada täysi hyöty käyttöön, vaatii se muutoksia TE:n tapaan tehdä optimointia ja tuotannon suunnittelua.

Mikäli työkalu halutaan käyttöön sellaisenaan, tulisi tuotannonsuunnittelu tehdä niin, että tuotanto lyödään ”lukkoon” aina vuorokaudeksi kerrallaan. Tampereen sähkölaitoksen ja Ouluenergian case tapauksissa tuotannonsuunnittelua tehdään juuri tätä periaatetta noudattaen. Silloin työkalun antama data olisi vertailukelpoista. Tällä hetkellä tuotanto on koko ajan optimoinnissa, joka muuttuu tunnin välein. Optimointidataa ei kuitenkaan ole tällä hetkellä järkevää miesvoimin ladata Excel-taulukolle tunnin välein. Näin ollen aamun tuotantosuunnitelma mukainen optimointidata on aina hieman vanhentunut, vaikkei optimointi yleensä muutu radikaalisti puoleen tai toiseen. Vuoromestarin työtehtäviin voisi sisällyttää optimointidatan lähettämisen verkkolevylle, josta työkalua käyttävän henkilön olisi helppoa käydä keräämässä data ja liittää se työkalun dataa sisältävään Excel-työkirjaan. Lataaminen verkkolevylle voisi olla rutiinitehtävä siinä missä tuotantosuunnitelman lähettäminen sähkömarkkinoille.

Jos taas tuotannonsuunnittelua ei tahdota muuttaa, täytyy silloin investoida toisenlaiseen ohjelmaan, joka kerää optimoinnin historiadataan talteen tunnin välein.

## LÄHTEET

Hellgren, M; Heikkinen, L; Suomalainen, L; Kala, J. 1999. Energia ja ympäristö. Helsinki: Haka-paino Oy.

Huhtinen, M; Korhonen, R; Pimiä, T; Urpalainen, S. 2008. Voimalaitostekniikka. Keuruu: Otava Kirjapaino Oy.

Raiko, R; Kurki-Suonio, I; Saastamoinen, J; Hupa, M. 1995. Poltto ja palaminen. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.

Heikkilä, M. 2017. Naantalin voimalla, kertomuksia Naantalin voimalaitokselta 60 vuoden ajan. Newprint Oy

Lund, H; Werner, S; Wiltshire, R; Svendsen, S; Thorsen, J; Hvelplund, F; Mathiesen, B. 2014. 4<sup>th</sup> Generation District Heating: Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. Energy

Mäkelä, V-M; Tuunanen, J. 2015. Suomalainen Kaukolämmitys. Tammerprint Oy

Energiateollisuus ry 2020. Viitattu 24.1.2020 <https://energia.fi/energiasta/energiaverkot/kaukolampoverkot>

Partanen, J. 2011. Valtakunnallinen sähkötaseiden hallinta ja selvitys – Sähkömarkkinat. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. <https://docplayer.fi/4997280-BI20a0400-sahkomarkkinat-valtakunnallinen-sahkotaseiden-hallinta-ja-selvitys-jarmo-partanen.html>

Turku Energia 2020a. Vuosikatsaus 2019, Keskeiset hankkeet. Viitattu 14.2.2020 <https://vsk2019.turkuenergia.fi/vuosikatsaus/keskeiset-hankkeet/>

Turku Energia 2020b. Kaukolämmön tuotantolaitokset. Viitattu 27.1.2020 <https://www.turkuenergia.fi/kaukolampo-ja-jaahdytys/kaukolampo-kestavin-valinta/kaukolammon-alkupera-ja-ymparistovaikutukset/kaukolammon-tuotantolaitokset/>

Turku Energia 2020c. Kaukolämmön alkuperä ja ympäristövaikutukset. Viitattu 25.1.2020 <https://www.turkuenergia.fi/kaukolampo-ja-jaahdytys/kaukolampo-kestavin-valinta/kaukolammon-alkupera-ja-ymparistovaikutukset/>

Energiateollisuus ry 2020a. Energiavuosi 2019. Viitattu 19.3.2020 [https://energia.fi/files/4402/Energiavuosi2019\\_Kaukolampo\\_MEDIKUVAT\\_20200120.pdf](https://energia.fi/files/4402/Energiavuosi2019_Kaukolampo_MEDIKUVAT_20200120.pdf)

Energiateollisuus ry 2020b. Kaukolämpötilasto 2018. Viitattu 19.3.2020 <https://energia.fi/files/3935/Kaukolampotilasto2018.pdf>

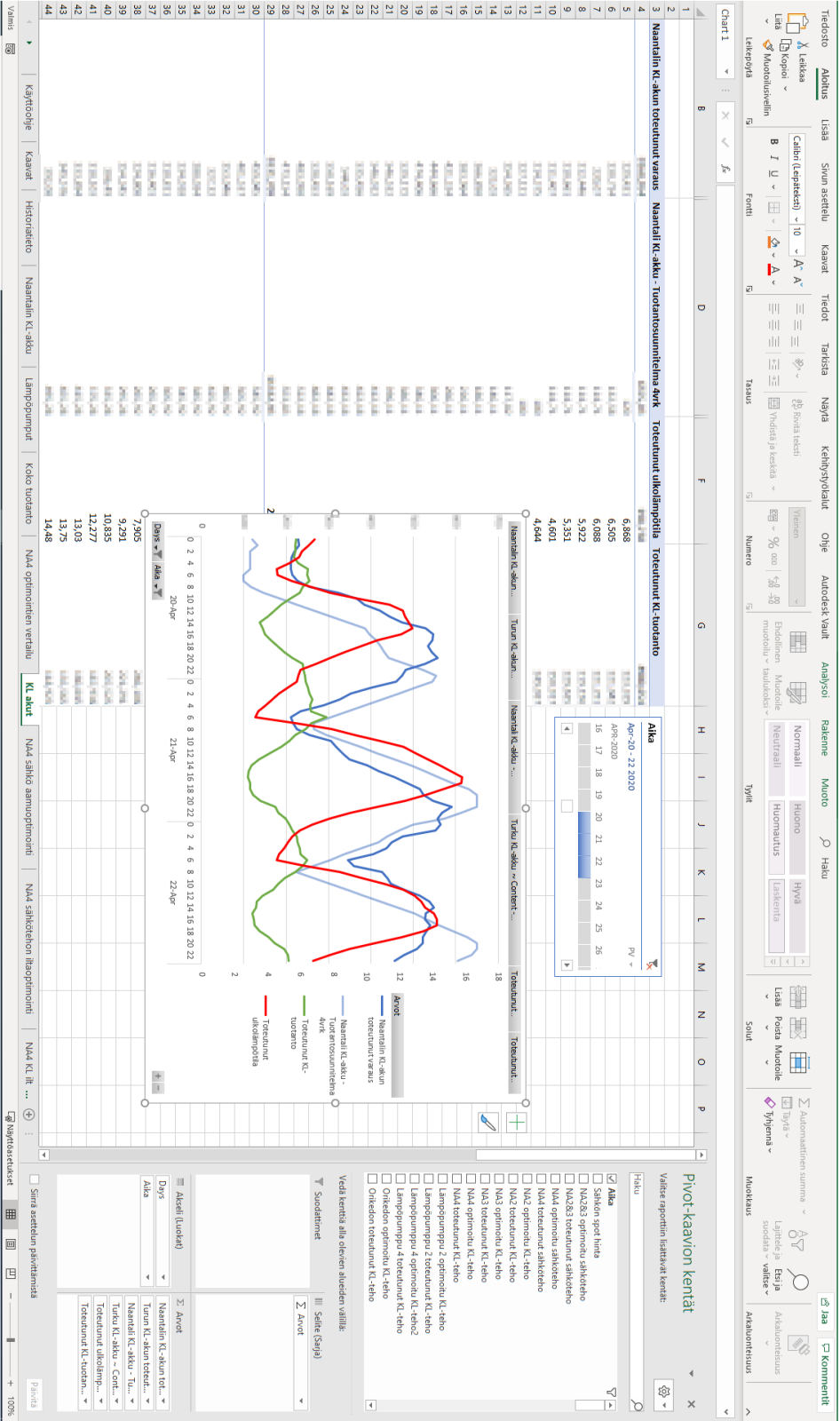
Energiateollisuus ry 2020c. Kaukolämpöverkot. Viitattu 9.6.2020 <https://energia.fi/energiasta/energiaverkot/kaukolampoverkot>

Energy Opticon 2020. Energy Optima 3. Viitattu 3.5.2020 <https://en.energyopticon.com/energy-optima-3/>

Fingrid 2020a. Tasemallin kuvaus. Viitattu 25.5.2020 <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/tasepalvelut/tasemallin-kuvaus/>

Fingrid 2020b. Tiedotteet. Viitattu 10.6.2020 <https://www.fingrid.fi/sivut/ajankohtaista/tiedotteet/2020/fingrid-aktivoi-saatosahkomarkkinoilta-tarjouksia-ja-kaynnisti-nopeaa-hairioreservia-olkiluoto-2n-akillisen-tehonpudotuksen-vuoksi-16.4/>

Kuva 2 Laskentaohjelman rakenne. Pivot taulukko Naantalin KL- akun varauksen, optimoidun varauksen ja kaukolämpötehon suhteesta.



Kuva 3 Laskentaohjelman rakenne. Taulukon sivu josta Pivot taulukoiden data kerätään.

[illegible]