

Lasse Toivonen

Kaukolämmön operointiliittymän modernisointi

Espoon, Kirkkonummen ja Kauniaisten kaukolämpöverkko

Metropolia Ammattikorkeakoulu

YAMK Insinööri

Automaatioteknologia

Opinnäytetyö 12.5.2015

Tekijä Otsikko	Lasse Toivonen Kaukolämmön operointiliittymän modernisointi
Sivumäärä	80 sivua + 2 liitettä
Tutkinto	YAMK-insinööri
Koulutusohjelma	Automaatioteknologia
Suuntautumisvaihtoehto	
Ohjaaja(t)	tekninen päällikkö Markku Muilu yliopettaja Markku Inkinen
<p>Tämän insinöörityön tarkoitus on dokumentoida Suomenojan voimalaitoksen kaukolämmön operointiliittymän modernisointi. Tavoitteena on löytää nykyvaatimusten tuomien haasteiden edellyttämiä teknisiä apukeinoja, joilla operaattorin tehtäviä voitaisiin helpottaa ja operaattorin olisi itse helpompi mitata päivittäisen suorituskykynsä tasoa. Työssä sivutaan kaukolämpövalvojan tehtävien vaativuutta ja toimintaympäristön muutosten tuomia haasteita ja esitellään kaksi ratkaisua haasteiden helpottamiseksi.</p> <p>Työn alkuosa käsittelee Suomenojan voimalaitoksen ja lämpökeskusten tuotantokapasiteetin ja tuotannon varmistamiseksi käytetyn teknologian esittelyä. Suomenojalla käytetyn prosessinohjauksen ja erityisesti kaukolämmön verkon operointiin käytetyn teknologian elinkaari on saavuttanut päätöksensä ja työn alkuvaihe keskittyy operointiliittymän modernisointiin graafisten parannusten ja uusien ominaisuuksien rakentamisessa. Uusien tarvittavien ominaisuuksien määrittelyyn on käytetty apuna käyttöliittymää päivittäin käyttäviä operaattoreita ja heitä ohjaavia esimiehiä.</p> <p>Määrittelyvaiheen jälkeen työssä kuvataan uuden operointiin tarkoitetun käyttöliittymän rakennustyö, integrointi olemassa olevaan vanhaan automaatiojärjestelmään sekä käyttöönotto ja koulutus. Tehtävä sisältää yhteistyötä ulkopuolisen kumppanin kanssa.</p> <p>Toinen merkittävä parannus käsittelee monimuuttujasäätöperiaatteen hyödyntämistä kaukolämpöverkon paine-erojen ja menolämpötilan säädössä. Työ esittelee Espoon kaukolämpöverkon säätötekniset perusteet, erittelee sen haasteet ja luo ratkaisun vaikeiden säätöparametrien hallitsemiseksi ja operaattorin työn helpottamiseksi.</p> <p>Työ keskittyy kahden parantavan ratkaisukonseptin ympärille luoden kaukolämpöoperaattorille huomattavasti paremmat edellytykset havaita visuaalisesti kaukolämpöverkossa tapahtuvat muutokset ja antaa automatiikan reagoida tarvittavalla tavalla muutostilanteiden hallitsemiseksi. Tehdyillä muutoksilla saavutettiin merkittävä taloudellinen hyöty sekä parannettiin oleellisesti kaukolämpöverkon operoinnin käyttäjäystävällisyyttä.</p>	
Avainsanat	Kaukolämpö, käyttöliittymä, monimuuttujasäädin

Author Title	Lasse Toivonen Modernization of Suomenoja Power plant control system user interface
Number of Pages	80 pages + 2 appendices
Degree	Master's Degree Programme in Civil Engineering
Degree Programme	Automation technology
Specialisation option	
Instructor(s)	Markku Muilu, Technical Manager Markku Inkinen, Principal Lecturer
<p>The purpose of this engineering thesis is to redesign and document a full modernization of Suomenoja power plant district heat operative control system user interface. The aim is to find technical solutions to help the operator to overcome challenges in today's process operation. This engineering theses focuses on two remarkable enhancements that will not only help the operator to guide through activities during unstable circumstances in district heat network but also give a clear graphical overlook to network status.</p> <p>This engineering study presents the capacity of Suomenoja power plant and heat only boilers and the technology by which they are controlled today. Current control technology that is in use has reached the final stages of its lifecycle and this engineering study focuses on creating a new platform for a modern graphical illustration and new applications that organizes and illustrates information more clearly and in a prioritized way. Operators themselves have had a key role in developing new features to the new user interface.</p> <p>Furthermore, the operator will have a provision to operate production components automatically via model predictive controller that will optimize the amount of produced energy in order to obtain stable, economical and constant delivery of district heat to customers.</p> <p>This engineering thesis demonstrates a construction of new modern operating interface, integration to old system and commissioning of new interactive control applications. Establishment of these two concepts will give operator a prominent opportunity to master a fluent operation of district heat network with very little physical workings. Implemented improvements gained a significant economical impact on production optimization and has made control system much more user friendly.</p>	
Keywords	District heat, user interface, model predictive controller

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Yritysesittely	2
2.1	Fortum Heat, Electricity Sales and Solutions	2
2.2	Suomenojan voimalaitos	2
2.2.1	So1 hiilivoimalaitos	3
2.2.2	So2 Maakaasukombivoimalaitos	4
2.2.3	So3 kiertopetikattilalaitos	5
2.2.4	So4 Lämpöpumppulaitos	6
2.2.5	So6 kaasuturbiinilaitos	7
3	Tavoitteena hyvä valvomo	8
3.1	Valvomosuunnittelun perusteet	9
3.2	Tarvittavat ominaisuudet	10
3.3	Kehitysprosessi varmistaa onnistuneen lopputuloksen	11
3.4	Käyttöliittymä operaattorin työvälineenä	12
3.5	Tulevaisuuden valvomo	17
4	CYBERVILLE 1.0 –Uusi operointiliittymä	19
4.1	Skenaario 1, "Ollaan kartalla"	21
4.2	Skenaario 2, "Mikä mättää"	22
4.3	Skenaario 3, "Asiakas tykkää"	23
4.4	Skenaario 4, "Huippusuoritus"	24
4.5	Skenaario 5, "Ajotietokone"	26
4.6	Yhteenveto	26
4.7	Cyberville 1.0 asennus	27
4.8	Käyttöliittymän uusien ominaisuuksien esittely	30
5	Kaukolämmön säädön periaatteet	33
5.1	Espoon Kaukolämpöverkon rakenne	33
5.2	Kaukolämpöverkon säätöjen tavoitteet	35
5.3	Menoveden lämpötilan säädön tavoitteet	36
5.4	Paine-erosäädön tavoitteet	37
5.5	Säätöjen toiminnan arviointi	38
5.5.1	Suomenojan voimalaitos	38

5.5.2	Suomenojan menoveden lämpötilan säädöt	38
5.5.3	Suomenojan paine-eron säädöt	41
5.5.4	Lämpökeskukset	42
5.5.5	Lämpökeskusten menolämpötilan ja paine-eron säädöt	42
5.5.6	Pumppuasemat	45
6	MPC säätö (Model Predictive Control)	45
6.1	Menoveden lämpötilan säädöt	45
6.2	Paine-eron säädöt	46
6.3	Pumppaamoiden vaikutukset verkon paine-erojen säätöihin	48
6.3.1	Pumppaamoiden tehtävä	48
6.3.2	Pumppujen vaikutukset verkon paine-eroihin	49
6.4	Operointi	52
6.5	Automaatiojärjestelmät	55
6.6	Häiriötilanteiden hallinta	56
6.7	MPC säädön siirtofunktio	57
6.8	Askelvastekokeet, MPC säätimen vahvistukset	58
6.8.1	Suvelan pumppaamon askelvastekokeet	59
6.8.2	Juvanmalmin lämpökeskuksen askelvastekokeet	64
6.9	Hyötytarkastelu	66
6.9.1	Suomenoja So1 hiilipölykattila ja vastapaineturbiini	68
6.9.2	Suomenoja So3 kiertopetikattilalaitos, kuumavesikattila	69
6.9.3	Suomenoja So6 kaasuturbiini ja lämmöntalteenottokattila	71
6.9.4	Lämpökeskukset	73
7	Käyttöönotto ja koulutus	76
7.1	Cyberville 1.0 ja Metson koordinoitu säätö	76
7.2	Käyttöönotto ja koulutus	76
7.2.1	Cyberville 1.0	76
7.2.2	Metso DNA remote säädin	77
7.3	Käyttökokemukset ja kehitys	79
	Lähteet	80

Liitteet

Liite 1. Mittapisteiden minimi- ja maksimiasetusarvojen tarkastelu. Kirkkonummen, Neidonkallion, Masalan, Hommaksenkaaren, Kauklahten ja Saunalahden mittapisteet.

Liite 2. Mittapisteiden minimi- ja maksimiasetusarvojen tarkastelu. Kalajärven, Juvamalmi, Suvelan, Tapiolan, Laajalahden ja Kaupunginkallion mittapisteet.

1 Johdanto

Suomenojan voimalaitoksen tehtävänä on tuottaa yhdistettyä sähköä ja kaukolämpöä asiakkaille. Sähkön ja kaukolämmön tuotantoa valvotaan Suomenojan voimalaitoksen keskusvalvomosta käsin kahdesta erillisestä valvontapisteestä. Kaukolämmön jakelua valvotaan omasta valvontapisteestä, johon kuuluu yhdeksän lämpökeskuksen ja kymmenen pumppaamon ohjaus etäkäyttöisesti Netcontrol ohjausjärjestelmän avulla.

Kaukolämmön valvontaan käytetään 1990-luvulla hankittua lämpölaitosten ja pumppaamoiden ohjaukseen suunniteltua Netcontrol etäoperointiliittymää. Netcontrol operointiliittymä toimii lämpölaitosten paikallisautomaation ylimpänä säätäjänä ja antaa valvojalle mahdollisuuden puuttua kunkin lämpökeskuksen ja pumppaamon säätöarvoihin. Vuosien saatossa järjestelmään on tehty lukuisia päivityksiä kaukolämpöverkon laajetessa ja tuotantoyksiköiden lisääntyessä. Kaukolämpövalvojan näkökulmasta moisiin käyttäjäystävällisyyttä lisääviin muutoksiin ei pystytä enää vastaamaan järjestelmätoimittajan kautta ilman huomattavia investointeja eli käytännössä koko järjestelmän perusrakenteen uusimista.

Käyttöorganisaatiossa kaukolämmön verkon operointiin pätevöityneitä henkilöitä on kuusi, joista jää eläkkeelle puolet vuoteen 2018 mennessä. Tämä asettaa suuren haasteen työnantajan kyvyille tuottaa uusille valvojille helposti ymmärrettävää opintomateriaalia ja toimintamalleja eri vuodenaikoina kaukolämpöverkon optimaalisen ja turvallisen operoinnin saavuttamiseksi. Valvojilta kerätyn tiedon perusteella oppimista ja optimaalista operointia helpottaisi huomattavasti tiettyjen perusilmiöiden mallintaminen ja automatisointi sekä jo olemassa olevien mittasignaalien toiminnan varmistus ja parempi visualisointi.

Tämän työn tavoitteena on löytää kaukolämpöverkon käytön kannalta oleelliset vaikuttavat parametrit ja toteuttaa operointikäyttöliittymän modernisointi siten, että sen käyttö olisi operaattorin kannalta helppoa ja järjestelmän käyttöliittymästä tulisi käyttäjäystävällisempi ja toimintoja ohjaava. Käyttöliittymän julkisivu ja grafiikka suunnitellaan valvojen toiveiden mukaisesti ja siinä huomioidaan erityisesti inhimillisiin tekijöihin liittyvät parannusehdotukset joita on kerätty paitsi kootusti erillisissä työryhmissä, myös käyttökokemusten perusteella löydetyistä epäkohdista.

Kaukolämpöverkon operointia pyritään helpottamaan etsimällä automaatioteknologisia ratkaisuja muutosten hallitsemiseksi ja integroimaan uudet toiminnallisuudet vanhan automaation päälle siten, että operaattorin antamat käskyt kulkevat etäohjausjärjestelmässä uuden käyttöliittymän läpi ohjaten vanhaa automatiikkaa. Tällä ratkaisulla vältetään mittava investointi koko järjestelmän perinpohjaisesta uusinnasta.

2 Yritysesittely

2.1 Fortum Heat, Electricity Sales and Solutions

Suomenojan voimalaitos kuuluu Fortum Heat, Electricity and Solutions divisioonan alaisuuteen. HESS divisioona sisältää sähkön ja lämmön yhteistuotannon (CHP), kaukolämpöliiketoiminnan, yritysten lämpöratkaisut, aurinkovoiman tuotannon, sähkön myynnin ja siihen liittyvät ratkaisut sekä konsernitason kestävä kehityksen toiminnot.(1)

2.2 Suomenojan voimalaitos

Suomenojan voimalaitos on yhdistetty sähkön ja lämmöntuotantolaitos, eli niin kutsuttu CHP laitos. Termi CHP tulee englanninkielisestä termistä ”Combined heat and power”. Toiminnan tuloksena tuotetaan sähköä valtakunnan verkkoon ja kaukolämpöä erilliseen kaukolämpöverkkoon. Suomenojan voimalaitoksella on kuusi tuotantoyksikköä, höyryvoimalaitos (So1), maakaasukombivoimalaitos (So2), leijupetilaitos (So3), lämpöpumppulaitos (So4), kaasuturbiinilaitos (So6) ja apukattilalaitos (So7)(Taulukko 1).

Taulukko 1. Suomenojan voimalaitoksen tuotantoyksiköt nimellistehoineen

Yksikkö	Sähköteho MW	Kaukolämpöteho MW
So1	90	160
So2	239	214
So3	-	80
So4	-	40
So6	45	110
So7	-	18
Suomenoja yhteensä	374	622

Suomenojan voimalaitoksen kahdesta valvontapisteestä ohjataan asiakkaan lämmönsaantia. Taloudellisista syistä on kannattavinta tuottaa lämpö ensisijaisesti Suomenojan voimalaitoksella ja lämpökeskuksilla tasata kuormitushuiput, jotka ylittävät Suomenojan tuotantokapasiteetin (Taulukko 2). Suomenojan voimalaitoksen operaattori säätelee voimalaitoksen kaukolämpöpumpuilla verkon kokonaispaine-eron jota kaukolämpöoperaattori tasapainottaa kulutuksen mukaisesti lämpölaitosten ja pumppaamoiden käytöllä.

Taulukko 2. *Espoon, Kirkkonummen ja Kauniaisten kaukolämpöverkon lämpölaitokset nimelistehoineen.*

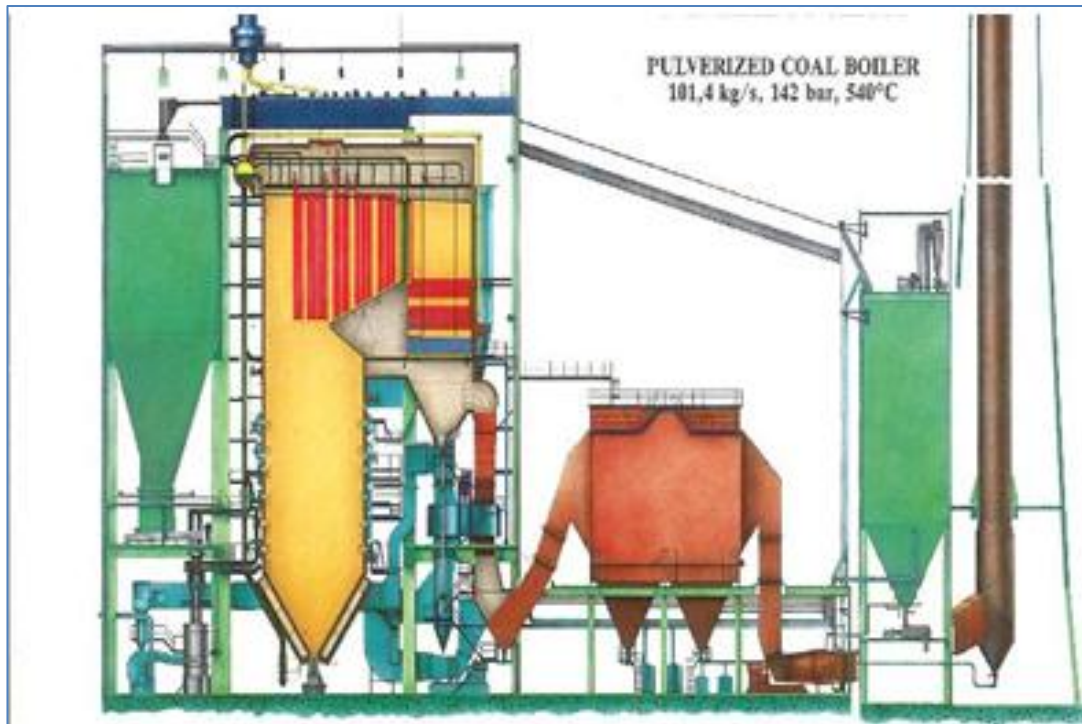
Lämpölaitos	Kaukolämpöteho MW
Tapiola	160
Otaniemi	120
Kivenlahti	130
Vermo	172
Kaupunginkallio	80
Juvanmalmi	16
Kirkkonummi	31
Masala	18
Kalajärvi	5
Lämpökeskukset yhteensä	732

Lämpölaitosten yhteenlaskettu kapasiteetti riittää kattamaan koko Espoon, Kirkkonummen ja Kauniaisten lämmöntarpeen kylmimmissäkin keliolosuhteissa, mutta se tietysti edellyttää kaikkien lämpölaitosten käynnistyvyyttä tarpeen tullessa.

2.2.1 So1 hiilivoimalaitos

So1 hiilivoimalaitos koostuu hiilipölykattilasta ja höyryturbiinista (Kuva 1). Hiilipölykattila rakennettiin vuonna 1977 ja kykenee tuottamaan 110 Kg/h tuorehöyryä, 142 Bar:n paineessa ja 540 asteen lämmössä. Kattila on nurkkapolttoinen ja polttoaineina voidaan käyttää hiilen lisäksi maakaasua. Kattilalla poltetaan pääsääntöisesti hiiltä, vaikka maakaasun rooli So1:n polttoaineena on korostunut viime vuosina. Tämä johtuu käyn-

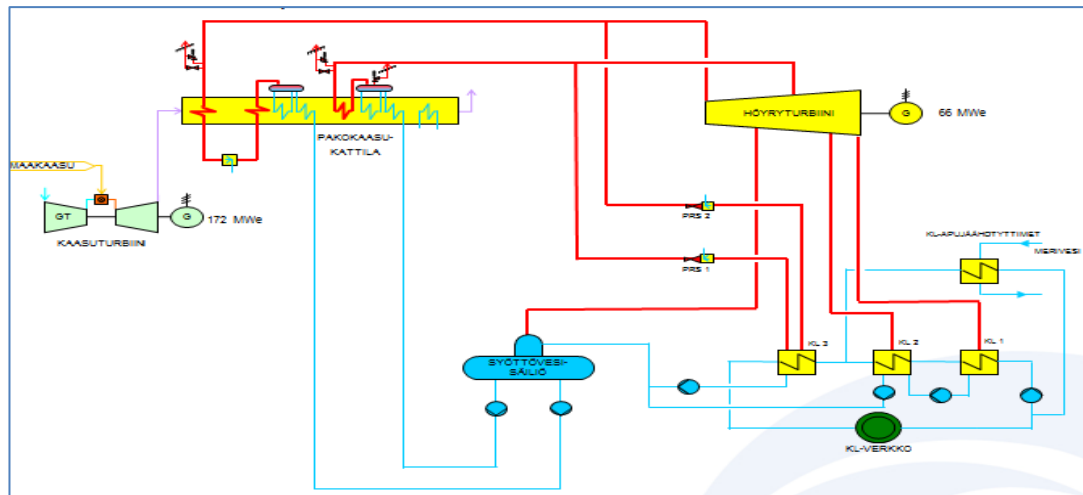
nistysten lukumäärän kasvusta tuotannon ohjautuessa lähipäivien sähköennusteen ja kaukolämmön kulutuksen mukaisesti.



Kuva 1. Suomenojan So1 hiilikattila

2.2.2 So2 Maakaasukombivoimalaitos

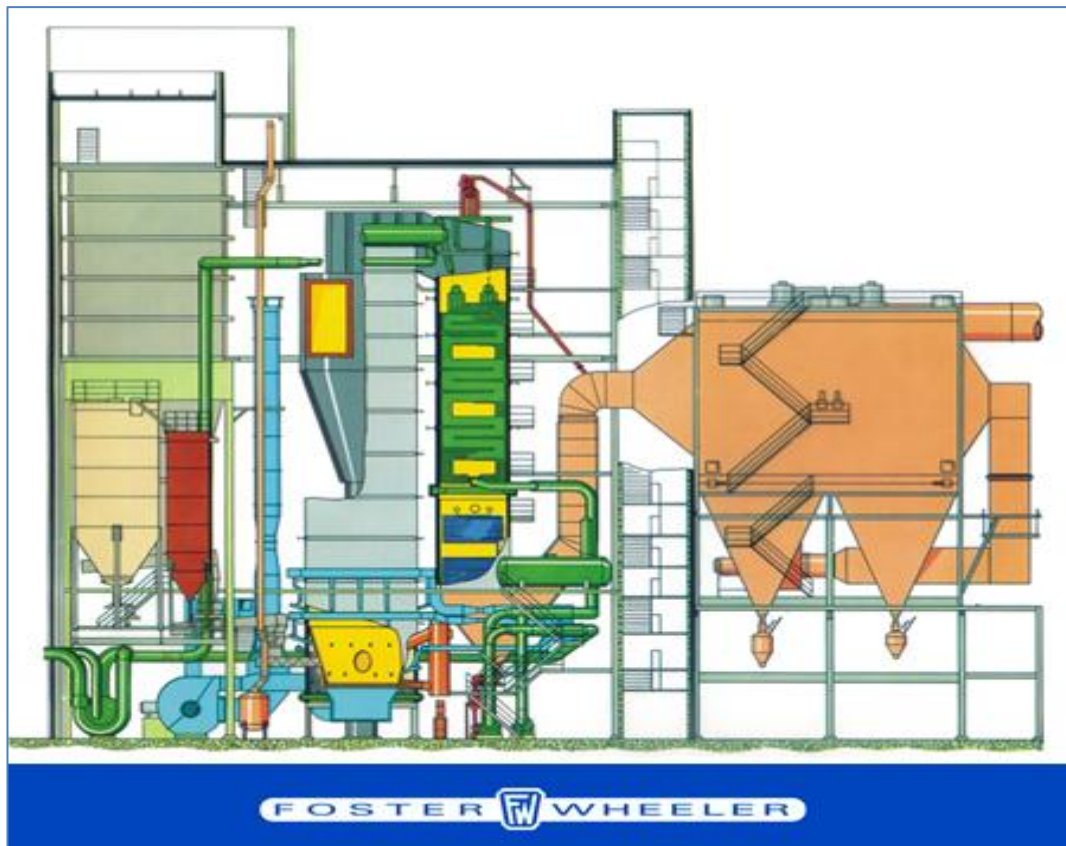
So2 Maakaasukombivoimalaitos on maakaasua peruspolttoaineena käyttävä voimalaitos, johon kuuluu kaasuturbiinin ja höyryturbiinin yhdistetty tuotantoprosessi. Voimalaitos rakennettiin vuonna 2009 ja se toimii tällä hetkellä vara ja huippuvoimalaitoksena Espoon verkkoalueella (Kuva 2). Kombiprosessi muodostuu kaasuturbiinin, kattilan ja höyryturbiini yhdistetystä tuotantokokonaisuudesta.



Kuva 2. So2 yksinkertaistettu prosessikaavio

2.2.3 So3 kiertopetikattilalaitos

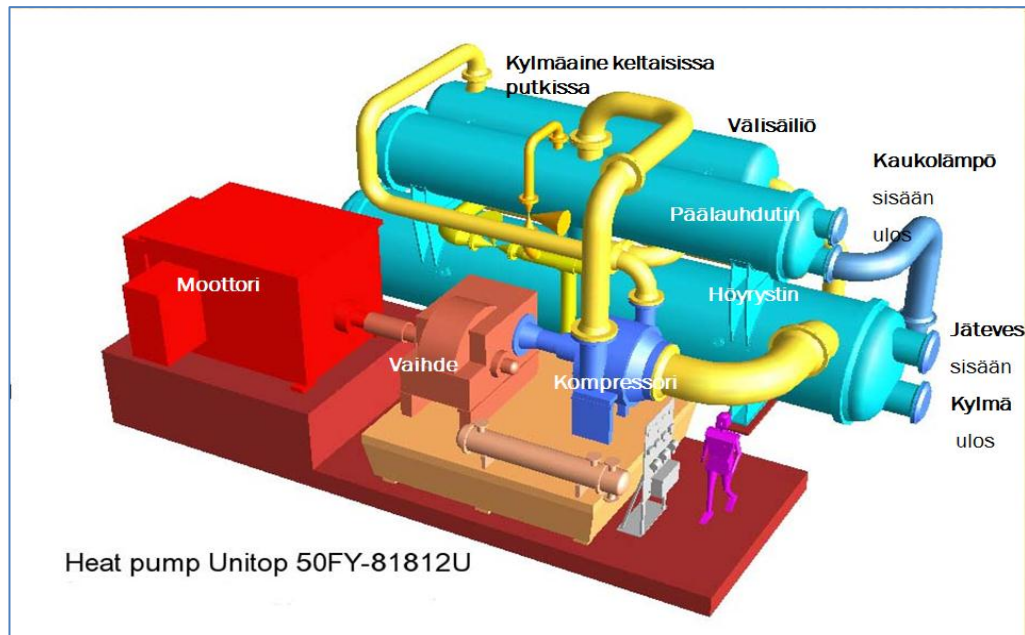
So3 kiertopetikattila on vuonna 1986 valmistunut hiilellä, raskaalla ja kevyellä polttoöljyllä sekä maakaasulla käyvä peruskuromakattila (Kuva 3). Kuormapolttoaineena käytetään hiiltä ja käynnistykseen maakaasua tai öljyä. So3 kattila tuottaa ainoastaan kaukolämpöä ja sen nimellisteho on 80 MW.



Kuva 3. SO_3 kiertopetikattilalaitos

2.2.4 SO_4 Lämpöpumppulaitos

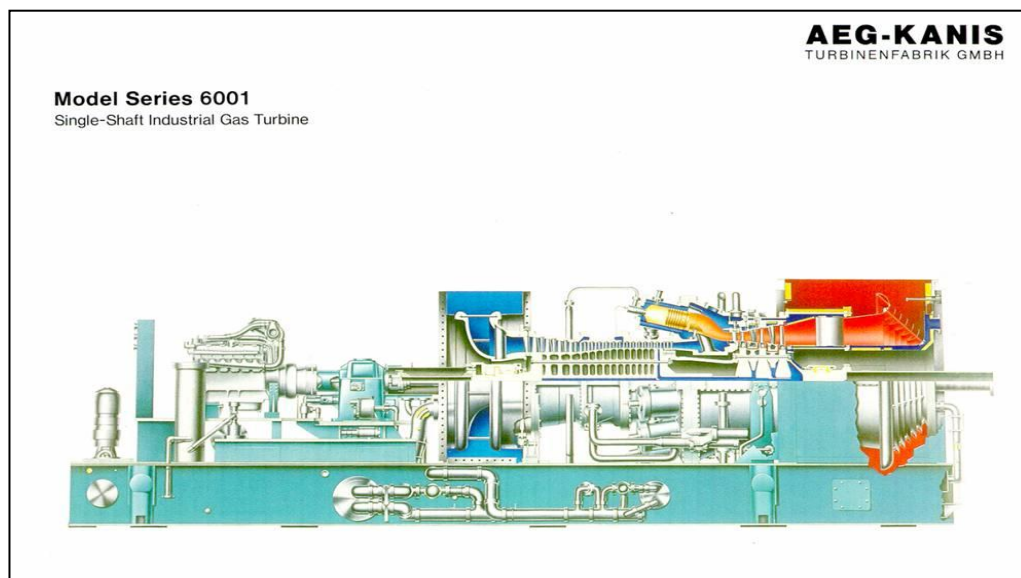
Vuoden 2014 lopulla Suomenojan tuotantokokonaisuuteen rakennettiin kaksi HSY Oy:n puhdistettua jätevettä hyödyntävää lämpökompessoripumppulaitosta. Yhden lämpöpumpun nimellinen kaukolämmön tuottoteho on 20 MW, joten kahden pumpun yhteenlaskettu tuotto on 40 MW (Kuva 4).



Kuva 4. Friotherm lämpöpumppu.

2.2.5 So6 kaasuturbiinilaitos

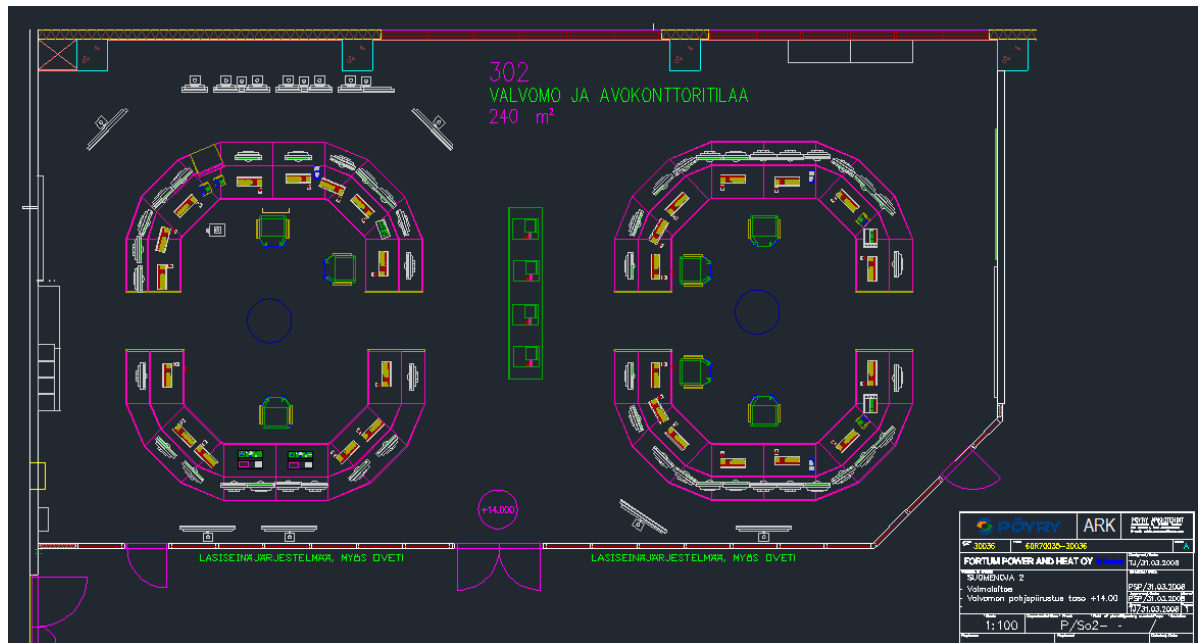
So6 kaasuturbiinilaitos on vuonna 1989 valmistunut kaasuturbiinin ja lämmön talteenottokattilan yhdistelmälaitos, johon on lisätty maakaasun lisäpolton mahdollisuus (Kuva 5). Kaasuturbiinin teho on 45 MW ja lämmön talteenottokattilan kaukolämpöteho on 110 MW.



Kuva 5. So6 kaasuturbiini

3 Tavoitteena hyvä valvomo

Vuonna 2009 Suomenojan voimalaitokselle rakennettiin uusi keskusvalvomo osana uuden So2 kaasukombivoimalaitoksen rakennusurakkaa. Uusi valvomo suunniteltiin uusiin standardeihin perustuen ja henkilöstön toiveisiin nojaten. Valvomon perusrakenne jaettiin kahteen valvontayksikköön, Suomenojan tuotantoyksiköiden valvontayksikköön (vasen puoli) ja kaukolämpölaitosten valvontayksikköön (oikea puoli) (Kuva 6).



Kuva 6. Suomenojan voimalaitoksen keskusvalvomon pohjapiirros

Kaukolämmön valvontaan liittyy oleellisesti molempien tuotantokokonaisuuksien operaattoreiden tekemät muutokset pumppauksiin ja eri yksiköiden tehojen säätöön. Valvontapisteeltä voidaan tehdä havaintoja niin pöytänäytöiltä kuin suuremmilta ns. "roikunäytöiltä" jotka ovat sijoitettu katon rajaan korkeammalle pulpettitasolta.

Valvomosta on suora näkymä merelle ja seinät läpinäkyvää ikkunalasia josta luonnon valvo pääsee helposti sisään. Ilmanvaihto on toteutettu koneellisesti jossa automaattinen lämpötilansäätö varmistaa tilan riittävän jäähdytyksen kovallakin helteellä. Valvomo toimii operointihenkilöstön tiedonkeruupaikkana mutta myös hengähdyspaikkana.

Operaattorit valvovat laajoja tuotantoprosesseja ja hoitavat myös tehtäviä, jotka eivät liity varsinaisesti prosessin hallintaan. Heidän tärkein työvälineensä ja näkymänsä työn kohteeseen on valvomo, joka laajasti tulkittuna sisältää sekä valvomotilat että auto-

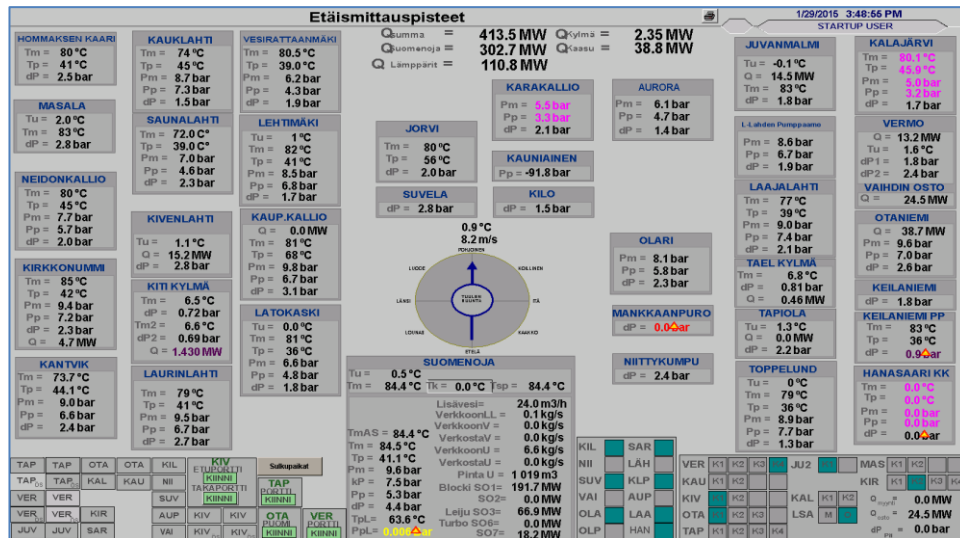
maatio- ja tietojärjestelmien käyttöliittymät. Valvomo on siis sekä operaattoreiden työkalu että heidän työympäristönsä. Tilat ja käyttöliittymät eivät ole toisistaan riippumattomia, ja tulevaisuudessa voimme odottaa tietotekniikan sulautuvan toimintaympäristön rakenteisiin (2, s.79-80).

3.1 Valvomosuunnittelun perusteet

Onnistuneen valvomosuunnittelun kannalta on tärkeää, että operaattorit on tuotu kiinteäksi osaksi suunnitteluprosessia ja toteutettavia ratkaisuja voidaan peilata käyttäjien toimintaan ja ominaisuuksiin suunnittelun edetessä. Kun operaattorit pääsevät toteutettaviin ratkaisuihin, he ovat myös sitoutuneempia muutoksiin ja tyytyväisempiä lopputulokseen. Tärkein rooli käyttäjäkeskeisellä suunnittelunäkökulmalla on kuitenkin, että sen avulla voidaan jo suunnitteluvaiheessa varmistua, että toteutettavat valvomoratkaisut tulevat toimimaan myös käytännössä. (3)

Suomenojan voimalaitoksessa kaukolämpövalvoja joutuu työssään valvomaan useita näyttöruutuja johon on saatettu satoja mittasignaaleja sekä viiden lämpölaitoksen aluevalvonta. Uutta käyttöliittymää suunniteltaessa tarpeet uudistuksille olivat perusteelliset, eli käytännössä eniten seurantaan vaativa etämittapistenäyttö haluttiin uusia kokonaan useasta syystä, joista tärkeimmät ovat:

- Etämittapisteet eivät ole karttapohjalla
- Mittapisteistä tulevaa dataa on liikaa
- Kuvan dataa on vaikea priorisoida
- Kuvan graafinen asettelu on sekava



Kuva 7. Espoon kaukolämpöverkon nykyinen päävalvontanäyttö



Kuva 8. Espoon kaukolämpövalvomo

3.2 Tarvittavat ominaisuudet

Käyttäjakeskeiselle valvomolle on helppo luetella ominaisuuksia: tilannetietoutta ja päätöksentekoa tukeva, toimintavaatimukset täyttävä, eri käyttäjät ja työtehtävät huomioiva, ergonominen sekä tulevaisuuteen mukautuva. Näiden ominaisuuksien huomiointi toteutuksessa varmistaa tehokkaan ja virheettömän toiminnan.

Valvontatyö on lisääntynyt tasaisesti automaatioasteen kasvun myötä ja valvottavien prosessien kasvanut seuranta ja hallinta luovat suuria haasteita niin valvontajärjestelmien käyttöliittymille kuin valvomotilan toimivuudelle. Järjestelmien ja käyttöliittymien ongelmat kulminoituvat usein suuren tietomäärän hallintaan sekä prosessin tilan kokonaiskuvan ja oleellisen tiedon esittämiseen. Toimimattomissa käyttöliittymissä oleellinen tieto hukkuu informaatiotulvaan, oikean tiedon löytäminen on haastavaa ja prosessiohjauksen vaikutuksen seuraaminen vaikeaa. Usein kokonaisuuteen liittyy myös liikaa muistin varassa olevia asioita. Käyttöliittymistä johtuvat ongelmat kuormittavat operaattoria ja aiheuttavat pahimmillaan turvallisuusriskejä.

Käyttöliittymien ja informaatiohallinnan ratkaisujen tulisi tehostaa operaattorien päätöksentekoketjua. Havaitsemisen helppous, tilannetietoisuus, muistin kuormittamattomuus ja toiminnan virheettömyys ovat kaikki ominaisuuksia jotka tulisi käydä toteen hyvää käyttöliittymää hyödyntämällä. Näyttöjen määrä ja sijoittelu on optimoitu vastaamaan tilassa tehtävää operointityötä. Operointialue on rauhoitettu ja ympäristötekijät on suunniteltu edistämään valppautta ja tarkkaavaisuutta. Viimeistely, toimintavarma ja viihtyisä valvomo saadaan varmistamalla näiden ominaisuuksien toteutuminen uusissa tila- ja käyttöliittymäsuunnitelmissa. (2, s.99-102)

3.3 Kehitysprosessi varmistaa onnistuneen lopputuloksen

Miten uudet suunnitelmat ja onnistunut muutos sitten toteutetaan? Valvomo saadaan vastaamaan vaadittua toimintaa toteuttamalla hallittu valvomon kehitysprojekti, jossa tila ja informaation hallinta sovitetaan käyttäjien ja tehtävien tarpeisiin ja ominaisuuksiin operaattoreiden osallistamisen, uuden teknologian ja monipuolisen asiantuntijuuden avulla. Kehitysprojektin alussa kootaan kattavat lähtötiedot vanhasta valvomosta tai käyttöliittymästä, tavoitteena on selvittää perusteellisesti muutosta vaativat ongelmat, toimivat ja sen vuoksi muutoksessa säilytettävät asiat sekä tulevaisuuden vaatimukset muunneltavuuden ja kasvuvaran varmistamiseksi. Tarkastelukohteena on erityisesti valvojan käyttämä käyttöliittymä. Tämän tiedon keräämisessä avainasemassa ovat operaattorit sekä asiantuntijat. (2, s.169-170)

Useiden operaattoreiden käyttäessä samaa käyttöliittymää, haasteeksi muodostuukin se että yhtenäistä näkemystä toimintojen kehityksestä ei välttämättä löydetä. Eri ihmiset kokevat eri ominaisuudet tärkeimmiksi ja väittelyä aiheesta seuraa helposti. Kuuden operaattorin operoidessa kaukolämpöverkkoa eri vuoroissa johtaa kuuteen erilaiseen

tapaan hallita verkkoa ja siinä tapahtuvia muutoksia. Siksi on erittäin tärkeää sitouttaa kaikki kuusi operaattoria keskustelamaan aiheesta yhteisen pöydän ääressä ja asettaa toivotut muutostarpeet tärkeysjärjestykseen josta kaikki ovat samaa mieltä.



Kuva 9. Nykyaikainen valvomo jossa tila ja informaation hallinta sovelletaan käyttäjien tarpeisiin (3)

Kerätyn tiedon pohjalta tehdään tarvittavat muutostarkeet: selvittääkö pienillä muutoksilla vai tarvitaanko merkittäviä muutoksia ja lisäominaisuuksia joiden kehittäminen vaatii tarkempaa ja kattavampaa selvitystä. Kartoituksen pohjalta järjestelmien käyttöliittymiä kehitetään yksittäisten näkymien tasolla tai järjestellään koko esitettävän informaation rakenne uusiksi, paremmin työskentelyä ja prosessinhallintaa tukevaksi. (3)

Luvussa 4 käsitellään kuinka juuri Suomenojan voimalaitoksen kaukolämpövalvonnan käyttöliittymän tarvittavat uudet ominaisuudet löydettiin ja kuinka niiden toteutuksesta sovittiin.

3.4 Käyttöliittymä operaattorin työvälineenä

Käyttöliittymän toimintaa voidaan ajatella joukkona kaksisuuntaisia vuorovaikutuskanavia, joiden ilmentymiä ovat esimerkiksi tiedot ja ohjausmahdollisuudet näyttöpaneelleilla, prosessitilaan ja ulkoalueelle avautuva näköyhteys ja sieltä kuuluvat äänet,

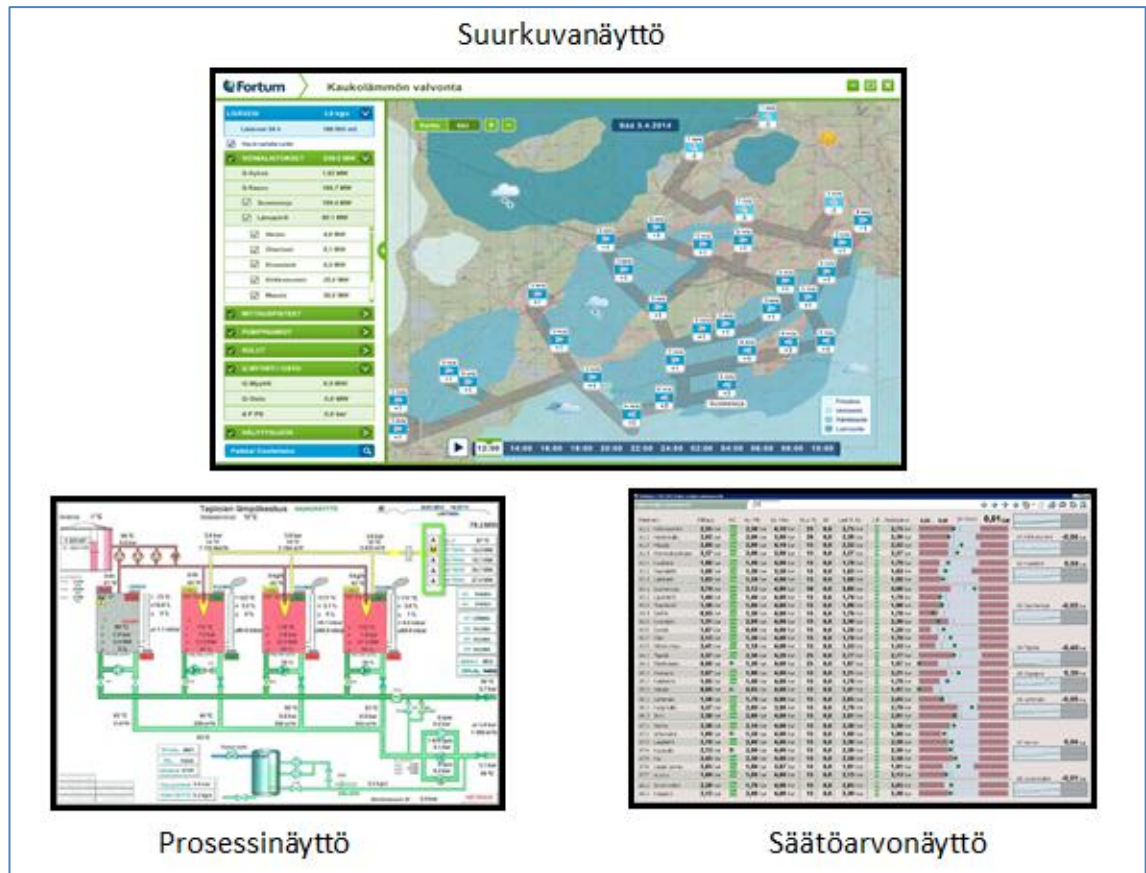
merkkilamput ja ohjauskytkimet sekä puhelimet. Tietotekniikkaa sovellettaessa automaatiojärjestelmissä tyypillinen vuorovaikutuskanava on prosessitietoa esittävä näyttösiivu. Nämä valvomoympäristön ja automaatiojärjestelmän käyttäjälle näkyvät elementit ovat myös suunnittelijan keinoja luoda hyvä käyttöliittymä prosessiin ja tuotantoon. Siksi suunnittelijan on tunnettava niiden mahdollisuudet ja rajoitukset.

Eri järjestelmätuotteiden käyttöliittymät eroavat jossakin määrin toisistaan, mutta niissä on myös paljon yhteisiä piirteitä ja käsitteitä. Myös standardit pyrkivät yhtenäistämään käyttöliittymiä. Tyypillisiä käyttöliittymään liittyviä käsitteitä ovat:

- Työpöytä
- Näyttösivut
- Näyttöjärjestelmä
- Hälytykset ja tapahtumat
- Historia ja raportointityökalut
- Yhteistyövälineet
- Ohjeet

Operaattorin työpiste sisältää tyypillisesti hiiren ja näppäimistön sekä useita näyttöpaneeleita, jotka muodostavat yhtenäisen työpöydän. Se on yhteinen termi kaikille näyttöpaneeleilla esittäville tiedoille ja ohjausmahdollisuuksille. Ikkunoiva käyttöliittymä näkyy näyttöpaneeleilla ikkunoina, joita voidaan avata, sulkea siirtää suurentaa ja pienentää. Tyypillinen ikkunan sisältö on yksi näyttösiivu joka sisältää tietoa prosessin tilanteesta. Jos käyttöliittymä ei ole ikkunoiva, näyttösiivu täyttää koko paneelin. Työpöytä voi olla usean näyttöikkunan kokoinen, jolloin ikkuna voidaan siirtää näyttöpaneelilta toiselle (Kuva 10). Suurkuvanäytöt voivat olla osa samaa työpöytää näyttöpaneeleiden kanssa, mutta ne voivat myös muodostaa oman työpöytänsä.

Ikkunointi tai useampi käytössä oleva näyttöpaneeli antavat käyttäjälle mahdollisuuden mukauttaa käyttöliittymän tarjoama näkymä kulloiseenkin tilanteeseen. Työpöydälle voidaan ottaa esimerkiksi näyttösiivu alku- ja loppupäästä prosessia, jolloin voidaan seurata alkupäähän tehtyjen toimenpiteiden vaikutuksia loppupäässä. Normaalitylanteessa työpöydällä voidaan pitää keskeiset trendikäyrät, pääprosessit sekä hälytyslista. Kun syntyy ennakoimaton poikkeustilanne tai kun päädytään prosessin alasajoon, työpöydän ikkuna-asetelma voidaan vaihtaa tähän tilanteeseen soveltuvaksi.



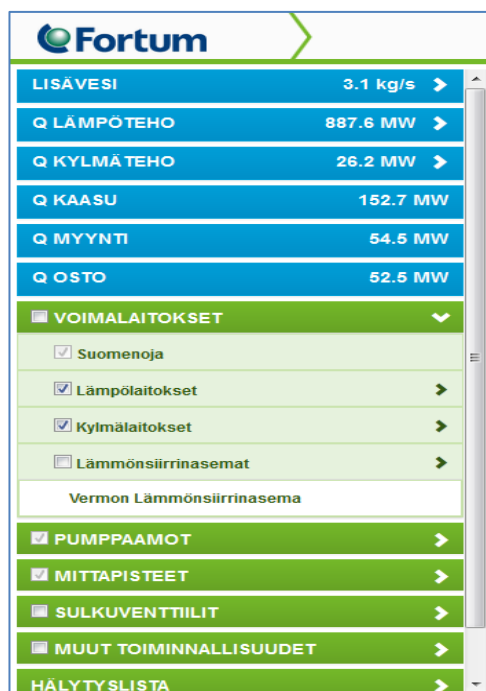
Kuva 10. Esimerkki työpisteen ikkunoivasta työpöydästä

Työpöytä sisältää myös koko käyttöliittymälle yhteisiä toimintoja, kuten erilaisten työkalujen käynnistämisiä (päiväkirja, historytyökalu jne.). Yhteisiä toimintoja ovat tyypillisesti myös uusimmat hälytykset näyttävä lista ja nopea yhden napsautuksen pääsy sellaiseen näyttösiivuun, joka esittää hälyttävän prosessin osan tiedot. Yhteiset toiminnot voidaan sijoittaa jatkuvasti esillä pidettävään työkaluikkunaan.

Näyttösiivulla esitetään tietoa tyypillisesti graafisilla symboleilla, numeroilla, teksteillä, käyrillä ja väreillä. Näyttösiivut sisältävät sekä staattista tietoa, kuten putkilinjoja, säiliöitä ja nimitekstejä, että muuttuvaa tietoa, esimerkiksi prosessimittauksia. Näyttösiivujen muuttuvat tiedot päivittyvät jatkuvasti kullekin automaatiojärjestelmälle ominaisen aikakierron sisällä, jolloin niiden ajantasaisuuteen voidaan luottaa. Muuttuvat tiedot voivat olla joko hetkellistietoa tai historiatietoa, kuten lämpötilan kehitys 24h aikana. Historiatiedon esitystä varten voidaan suunnitella erillisiä trendinäyttösiivuja, joissa esitetään valikoitu joukko mittauksia. Trendikäyrät ilmaisevat havainnollisesti, mihin suuntaan mittaukset ovat muuttumassa ja millä tavalla, joten ne kertovat paljon prosessin tilanteesta ja luonteesta.

Näyttösivujen kautta ohjataan myös prosessia. Nykyaikaisissa järjestelmissä ohjausvälineitä ovat hiiri ja tietokonenäppäimistö. Prosessia ohjataan osoita ja napsauta periaatteella. Jos käyttäjä haluaa esimerkiksi käynnistää pumpun, hän osoittaa ja napsauttaa näyttösivulla olevaa pumpun symbolia. Tällöin symbolin läheisyyteen avautuu yksityiskohtaisempi keskusteluikkuna, esimerkiksi piirinäyttö, jossa on käyntiin ja seis painikkeet. Näppäimistöä käytetään numeroarvojen tekstitiedon syöttämiseen annettaessa uusia asetusarvoja tai kirjoittaessa tekstiä päiväkirjaan.

Näyttösivut ja niiden navigointimahdollisuudet muodostavat näyttösivujen valintaa ohjaavan hierarkisen verkon (Kuva 11).



Kuva 11. Käyttöliittymän navigointivalikko

Sen tarkoitus on antaa näyttösivulle looginen ja käyttäjän odotusten mukainen jäsenyys, jolloin näyttösivun oleellisten tietojen löytäminen on helppoa. Näyttöjärjestelmä perustuu yleensä pääasiassa prosessin hierarkiseen jäsenyykseen (prosessi, osaprosessit, laitteet), mutta myös käyttäjien tehtävät vaikuttavat näyttöjärjestelmän sisältöön.

Suomenojan voimalaitoksen keskusvalvomossa on useita kymmeniä näyttöjä joista muutama on valittu ns. suurkuvanäytöiksi. Kaukolämpövalvoja seuraa aktiivisesti noin kymmentä ruutua joiden sisältö on priorisoitu kokemukseen perustuvalla tiedolla. Suurkuvanäytöltä valvoja seuraa kaukolämpöverkon yleistä tilaa etämittapisteiden välittä-

mistä mittatiedoista ja yksittäisistä pienruuduista valvoja antaa etäkäskeyjä kattilalaitosten kattiloille ja pumpuille käynnistysten, sammutusten ja tehonsäädön muodossa. Nykyinen automaatiotaso ja mittapisteiden runsaus on aiheuttanut suuren informaatiotulvan joka asettaa painetta paremman informaation esitystavan suunnittelulle. Järjestelmiä ohjaa useimmissa tapauksissa ihminen ja käyttöliittymän täytyy kyetä jäsentämään valvojan tehtävän kannalta tärkein tieto dynaamisesti tärkeysjärjestykseen siten, ettei muu tieto hukuta sitä alleen, ja että valvoja saa selkeän kuvan tapahtumien kulusta. Älykäs järjestelmä ja käyttöliittymä osaa myös muuttaa prioriteettia tapahtumien muuttuessa ja varoittaa sekä ohjata tai suositella toimenpiteitä tilanteen tasapainottamiseksi, varsinkin poikkeustilanteissa.

Näyttösivut ovat vuorovaikutuskanavia, joita operaattori käyttää oman tarpeensa mukaan. Monesti aloitteen informaatiolle tekee automaatiojärjestelmä joka voi olla päälekkäinen esimerkiksi lämpölaitoksen oman paikallisautomaation kanssa. Informaatio voi olla esimerkiksi hälytys tai tapahtuma. Informaatio voi myös olla tieto siitä että järjestelmä on vaipumassa tilaan jossa automaattinen korjaus astuu voimaan eikä valvojan tarvitse erikseen tehdä operointitoimenpiteitä.

Kun prosessista tulee uusia hälytyksiä, automaatiojärjestelmä ilmaisee ne äänimerkillä, väreillä tai jopa fyysisillä ilmiöillä kuten värinällä. Samalla näyttöpaneelille ilmestyy kuvaus hälytyksen nimestä ja mille prosessialueelle se kohdentuu. Hälytyksen vakavuus esitetään värillä, symbolilla tai numeroilla. Tärkeitä hälytysten käsittelyn työkaluja ovat hälytyslistat, joissa hälytykset esitetään aika tai vakavuusjärjestyksessä. Hälytysten ja tapahtumien aikajärjestys on tärkeää tietoa, kun selvitetään häiriön kulkua ja erityisesti sen alkusyytä. Historiaa analysoiva käyttöliittymä pystyy esittämään myös historiatrendejä valittavien signaalien arvoista, niiden analysointi voi usein ratkaista vian syyn ja johdattaa parantavien muutosten tekoon.

Tähän asti kuvatut automaatiojärjestelmän työkalut ovat liittyneet enimmäkseen käyttäjän ja prosessin väliseen vuorovaikutukseen. Prosessista saadaan tietoa, käyttöorganisaatio tekee tulkintoja ja vaikuttaa prosessin tilaan. Tulkintoja tehdessään henkilökunta välittää toisilleen tilannetietoa sekä keskustelelee tulkinnoista ja tarvittavista toimenpiteistä. Pitkät etäisyydet sekä se, että kaikki osapuolet eivät esimerkiksi vuorotyön takia ole yhtä aikaa paikalla, vaatii, että tietoja pitää välittää myös muuten kuin kasvotusten. Tähän tarkoitukseen automaatiojärjestelmä tarjoaa erilaisia yhteistoimintatyökaluja, kuten päiväkirjan, ilmoitustaulun ja muita viestintätekniikoita. (2, s.25-35)

3.5 Tulevaisuuden valvomo

Jotta voi hyvin ymmärtää edes nykyisiä valvomossa käytettäviä teknologisia ratkaisuja, täytyy mennä ajassa hieman taaksepäin ja tarkastella miten halutut prosessit on toteutettu menneisyydessä ja miksi niihin on tehty muutoksia. Merkittävä kulminaatiopiste valvomotekniikassa on ollut 1970-luvulla alkanut järjestelmien digitalisoituminen sekä uudet korkean resoluution näyttöikkunat oheislaitteineen. Automaation nopea kehitys on osaltaan pakottanut hakemaan uusia ratkaisuja jossa käyttäjän ja automaation välinen synergia on saatu parhaiten toimimaan. Tavoitteena ei kuitenkaan ole aina ollut käyttäjän toiveiden toteutus vaan saada tekninen prosessi toimimaan halutulla tavalla. Tämä ilmiö, ironista kyllä, on osaltaan jarruttanut tehokkaampien valvontaratkaisujen löytämistä.



Kuva 12. Havainnekuva valvomossa käytetyn teknologian kehityskaaresta

1970-luvun valvomossa keskityttiin lähinnä seuraamaan tuotantokomponenttien toimintaa kentällä ja keräämällä analogisten mittareiden lukemia ruutupaperille sekä tallentamaan niitä piirturipapereille. Ruutupaperi ja kynämerkinnät olivat lähes ainoa tapa kerätä analysoitavaa dataa prosessin kulusta ja tehdä päätöksiä tehtävistä ohjausmuutoksista. 1970-luvulla alkanut tietokoneiden vallankumous ja erityisesti 1990-luvun moderni prosessoritekniikka toi kipeästi kaivattuja apuvälineitä valvomoon ja operointihenkilöstön saataville. Monet automaatiojärjestelmät, kuten Metso Classic, sai alkunsa tuon aikakauden kuluessa, samoin korkearesoluutioiset valvontanäytöt jotka toimivat lähinnä kirkkailla kontrasteilla mustalla pohjalla. Prosessinohjaukseen käytetyt tie-

tokoneet eivät enää välttämättä sijainneet valvomossa, vaan laitousyksikön sisäinen toimistoverkko yhdisti valvontanäytöt reletiloissa sijaitseviin prosessiasemiin. Nykyisin ei ole tavatonta hyödyntää prosessin valvontaan langattomia toimilaitteita jotka lähettävät langattomasti sisäisen wi-fi verkon välityksellä toimilaitteiden signaaleja valvontanäytölle josta niiden asentoa voidaan esimerkiksi muuttaa asetetulla aikaviiveellä ja asettaa muutoksille haluttu muutosnopeus.

Tulevaisuudessa voimme nähdä perinteisissä valvomoissa älykkäitä, ihmisten kanssa kommunikoivia järjestelmiä ja uudenlaisia käyttöliittymätekniikoita, yhteisöllistä prosessin hallintaa sekä uudenlaisia automaatio- ja valvomototeutuksia, joissa tuotannon tavoitteet, ihmisten tehtävät ja tekniset ratkaisut nähdään kokonaisuutena. (2, s. 202-207)

Tulevaisuuden valvomo ja valvojan tärkein työkalu, eli käyttöliittymä on enemmän kuin numeerisia totuuksia esittelevä suurkuvanäyttö. Se sisältää paljon sähköistä keskustelua eri toimilaitteiden välillä, sijainnista välittämättä. Ohjattava komponentti voi olla vaikkapa 1000 kilometrin päässä eri mantereella ohjausta suorittavasta prosessorista. Valvontaan käytettävä käyttöliittymä osaa seuloa tuhansien, tai jopa miljoonien signaalien seasta valvojaa kiinnostavat viestit ja osallistuu suurilta osin prosessin ohjaukseen automaattisesti. Komponenttien keskinäinen keskustelu internetin välityksellä antaa paremmat mahdollisuudet automaattiselle prosessin ohjaukselle ja muutosten ennakkoinnille. Operaattorin tehtäväksi jää lähinnä antaa suuripiirteiset tai valitessaan hyvin tarkat tavoitteet mielivaltaiselle ajalle jossa prosessi saavuttaa halutut tavoitteet. Kaikki näytöillä näkyvä tieto muuttaa väriä tavoitteiden mukaisesti ja sähkömarkkinoita, keliä, eli kaukolämmön kulutusta ennakoiden. Äänet ovat integroitu osa viestintää ja valvoja pystyy antamaan ohjaukskäskyjä myös vokaalisesti. Valvontanäytön grafiikka ei ole enää kiinteästi kiinnitetty näytölle, vaan sen asettelua voidaan ohjata hologrammimuodossa vaikkapa keskelle huonetta.

Langattomuus antaa myös mahdollisuuden vapaaseen liikkuvuuteen, valvontaa ei välttämättä tarvitse suorittaa vain yhdestä pisteestä käsin vaan mobiililaitteet ovat käyttövarmuudessaan jo langallisia ratkaisuja luotettavampia. Mikään tieto ei enää katoa, vaan se varastoituu langattomasti valtaviin pilvipalvelimiin jotka säilövät haluttua tietoa lähes rajattomasti.

Tulevaisuus prosessin valvonnassa tai sen käyttöteknologiassa ei ole konsepti joka tapahtuu jonain tietynä hetkenä tai lineaarisesti. Se tapahtuu vaiheittain uusien innovaatioiden tullessa teollisuuden ja siviilien käyttöön. Täytyy muistaa että vaikka tuotannon optimointi ja taloudellisen hyödyn maksimointi ovat tekniikan kehityksen ajureina, sitä edistävät kuitenkin ihmiset ja usein ihmisten käyttömukavuuteen tai tehokkuuteen vaikuttavat rajoitukset. Siksi ihmisten, erityisesti tämän insinööriyön puitteissa olevat ihmiset, kaukolämpövalvojat täytyy ottaa osaksi uuden käyttöliittymän suunnittelua. Vain siten sen käytön ja kehityksen kaaresta tulee tavoitteisiin ohjaava.

4 CYBERVILLE 1.0 –Uusi operointiliittymä

Tässä luvussa käsitellään Espoon kaukolämpöverkon operointiin tarkoitetun käyttöliittymän ominaisuuksia ja keskitytään erityisesti sen ajasta jälkeen jääneisiin ominaisuuksiin jotka suurelta osin pakottivat aloittamaan kehitysprojektin sen uusinnasta. Nykyinen operoinnin suurkuvanäyttö on asetettu valvojan pään yläpuolelle noin 2 metrin etäisyyteen valvontapulpetista. Suurkuvanäyttö sisältää pääosin etämittapisteiden antaman absoluuttisen lukuarvon (Kuva 7). Mittapisteitä on runsaasti ja samaan ikkunaan on liitetty myös tietoa pumppaamoista ja eri lämpökeskusten alueporttien asennosta. Suurkuvanäytön tietoa analysoidessa käy ilmi muutama erittäin suuri heikkous:

- Tietoa on liikaa liian pienellä ruudulla ja se sekoittaa näkymää
- Tietoa ei pysty priorisoimaan
- Tietoa ei anneta karttapohjalla

Kaukolämpöoperaattorin tehtävänkuvaan kuuluu operoinnin lisäksi mm. lämpökeskusten aluevalvonta ja asiakaspuheluihin vastaaminen. Asiakaspuheluissa kyse on useimmiten reklamaatiosta lämmönsaannin suhteen tai ilmoituksesta epäilystä kaukolämpövuodosta. Molempien aiheiden käsittely edellyttää karttapohjaisen tiedon analysointia. Nykyinen käyttöliittymä ei anna siihen mahdollisuutta, vaikka mittapisteiden fyysistä sijaintia on ryhmiteltykin maantieteellisen sijainnin suhteen.

Investointi uuden käyttöliittymän hankkimiseksi hyväksyttiin syksyllä 2014. Sitä ennen pidettiin kaukolämpövalvojen kanssa työpaja jossa kukin valvoja pääsi kertomaan oman mielipiteensä käyttöliittymän uusien ominaisuuksien tarpeesta. Tämä luku esittelee työpajan tulokset ja sen kuinka niistä päästiin yksimielisyyteen.

Työpaja järjestettiin 17.4.2014 ja siihen osallistui kaikkien kaukolämpövalvojen lisäksi käyttöinsinööri ja ulkopuolinen konsultti (Linja Design Oy) yrityksestä. Työpajapäivää varten konsulttiyrityksen edustaja oli kerännyt haastatteluiden pohjalta ajatuksia erilaisista toimintaa parantavista skenaarioista joista valvoja pääsi valitsemaan tärkeysjärjestyksessä. Skenaariot oli kirjoitettu keltaisille post-it-lapuille johon kukin valvoja piirsi viivan ilmaistakseen sen tärkeyttä. Eniten viivoja keränneet skenaariot saivat tärkeysjärjestyksessä suuremman arvon.

Työpajassa nousi selvästi esiin muutama yleistrendi. Yhtäältä kaivattiin enemmän yksityiskohtaista tietoa esimerkiksi häiriötilanteista selviämisen tueksi, toisaalta taas kaivattiin parempaa yleiskuvaa tilanteen seuraamiseen. Myös ongelmatilanteisiin liittyvä asiakaspalvelun tärkeys nousi selvästi esiin ja tekninen asiakaspalvelu koettiin laajasti asiaksi, johon halutaan panostaa jatkossa vielä nykyistäkin enemmän. Näiden lisäksi nousi esiin toivomus verkon optimaaliseen käyttöön ohjaavista ja auttavista työkaluista. Myös useiden järjestelmien rinnakkaiskäyttö koettiin nykytilanteessa työtä hankaloitavaksi. Havaittiin, että päätöksenteko pohjautuu lähes yksinomaan valvojan osaamiseen. Joitakin uusia liiketoimintamahdollisuuksiakin nousi esiin. (4)

Yhdistävät elementit:

- Yleistilanteen seuraamista tulisi helpottaa nykyisestä
- Verkosta tulisi saada enemmän tarkempaa tietoa
- Karttapohjainen ratkaisu koettiin mielekkääksi
- Sään seuraaminen tulisi olla helpompaa
- Asiakaspalvelutyöhön lisää välineitä
- Työkaluja optimaalisempaan suoritukseen

Skenaarioita esiteltiin 5 kappaletta (Kuva 13).



Kuva 13. Kaukolämpöverkon operoinnin käyttöliittymän parannuselementit

4.1 Skenaario 1, "Ollaan kartalla"

Ajatuksena on nähdä verkoston tilanne konkreettisemmin. Valvoja pystyy aktivoimaan eri tietoja tarpeen mukaan. Tasot voivat olla esim. Sääkartta ja ennuste, varoituskartta, verkon kylläisyyttä tai puutetilaa indikoiva taso, tilanteen kehityksen ennustus jne. Tavoite on, että valvoja näkee kaiken oleellisen yhdellä silmäyksellä, mutta voi tarvittaessa kaivaa yksityiskohtaisempaa lisätietoa syvemmältä helposti. Tärkein ominaisuus kuitenkin koettiin olevan mittapisteiden sijainnin karttapohjalla (Kuva 14).

- Keskeiset hyödyt valvojalle
 - Antaa hyvän kokonaiskäsityksen
 - Portti yksityiskohtaisempaan tietoon
- Keskeiset hyödyt Fortumille
 - Muutkin kuin koulutetut valvojat voivat tarvittaessa helpommin seurata tilannekuvaa
 - Uusien operaattoreiden koulutus helpottuu huomattavasti
- Keskeiset elementit:
 - Karttapohjainen esitystapa, tietotasojen aktivointi



Kuva 14. "Ollaan kartalla" Skenaariomallit

4.2 Skenaario 2, "Mikä mättää"

Tämä vaihtoehto pyrkii tuottamaan yksityiskohtaista tietoa valvojalle. Tässä vaihtoehdossa juuri ongelmatilanteet ja niissä tarvittava tieto nousevat tärkeimmäksi toiminnoksi. Valvojalle tuotetaan oikeata täsmätietoa (Kuva 15).

- Keskeiset hyödyt valvojalle
 - Yksityiskohtaista tietoa päätösten tekemisen tuoksi
- Keskeiset hyödyt Fortumille
 - Häiriötilanteiden nopea selättäminen
- Keskeiset elementit:
 - Tarkempaan tietoon porautuva käyttöliittymä, muutosten korostaminen, häiriön paikallistaminen (4)



Kuva 15. "Mikä mättää" Skenaarion mallit

4.3 Skenaario 3, "Asiakas tykkää"

Tämän vaihtoehdon ohjenuorana on asiakastyytyväisyys. Tässä vaihtoehdossa panostetaan siihen, että asiakkaan ollessa yhteydessä valvomoon asiakasta pystytään autamaan mahdollisimman hyvin ja nopeasti. Tämä toteutetaan rakentamalla toimintoja, jotka mahdollistavat asiakkaan nopean paikantamisen ja asiakkaan mittarin etälukemisen sekä lisäämällä asiakastiedot järjestelmään (Kuva 16).

- Keskeiset hyödyt valvojalle
 - Helpottaa asiakaspalvelutilanteita, antaa tarkkaa tietoa asiakkaan todellisesta tilanteesta
- Keskeiset hyödyt Fortumille
 - Asiakastyytyväisyyden kasvu.

- Keskeiset elementit:
 - Mittareiden etäluenta, asiakkaan tunnistaminen ja paikallistaminen, "VIP"-asiakkaiden huomiointi ja listaus. (4)



Kuva 16. "Asiakas tykkää" Skenaariomallit

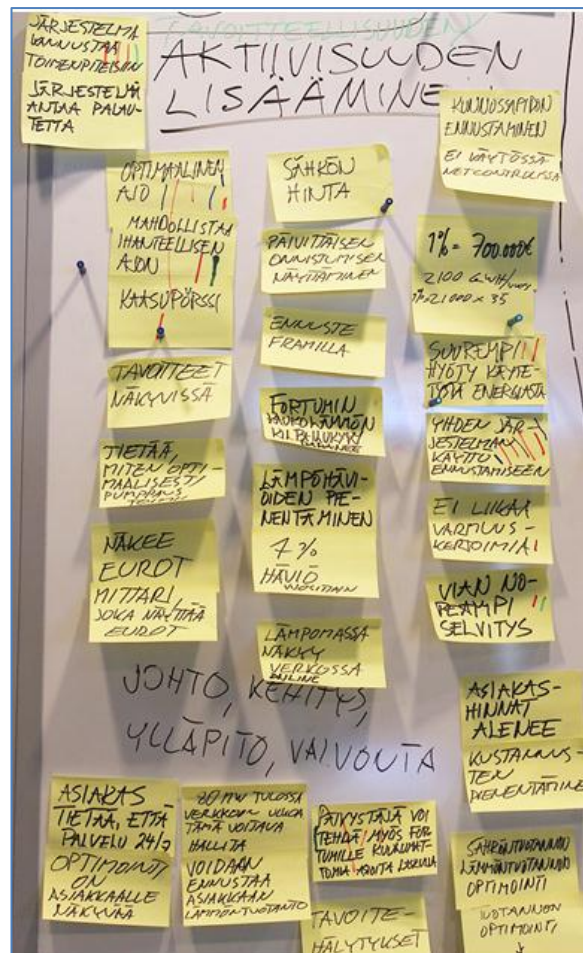
4.4 Skenaario 4, "Huippusuoritus"

Tässä vaihtoehdossa pyritään luomaan valvojille keinoja päästä omiin ja yrityksen asettamiin tavoitteisiin. Toiminnan taustalla on tavoite ajaa verkkoa mahdollisimman tarkasti ja optimoidusti. Valvojalle pyritään luomaan työkaluja aktiiviseen ajamiseen, jotta tavoitteet voidaan saavuttaa. Keskeistä tässä vaihtoehdossa ovat eri mittarit ja trendien-

nusteet, joilla omaa suoritusta pystyy tarkastelemaan esim. eurojen, optimilämpötilan, paine-eron ja asiakastyytyväisyyden valossa (Kuva 17).

- Keskeiset hyödyt valvojalle
 - Oman suorituksen seuraaminen ja vertaaminen tavoitteisiin
- Keskeiset hyödyt Fortumille
 - Rahalliset säästöt optimoidusta ajotavasta
- Keskeiset elementit:
 - Trendien esittäminen, mittarit, onnistumisen näkyväksi tekeminen.

(4)



Kuva 17. "Huippusuoritus" Skenaarion mallit

4.5 Skenaario 5, "Ajotietokone"

Tässä vaihtoehdossa järjestelmä pyrkii tekemään valvojan työn mahdollisimman helppoksi antamalla suosituksia ajotyylisiin. Järjestelmä käyttää pohjana kulutustietoa kaukolämpöverkosta ja huomioi muutostilanteet, kuten aamu ja iltapäivän kulutushuiput. Järjestelmä aktivoi valvojaa huomaamaan muutoksia, esimerkiksi säätilassa.

- Keskeiset hyödyt valvojalle
 - Ei tarvitse itse muistaa kaikkea, järjestelmä adaptoituu tilanteeseen ilman lisätoimenpiteitä
- Keskeiset hyödyt Fortumille
 - Varmistaa tasalaatuisen ajotyylin.
- Keskeiset elementit:
 - Suositukset perustuen historiatietoihin ja ennusteisiin, aktivoi valvojaa huomaamaan muutoksia. (4)

4.6 Yhteenveto

Työpaja oli erittäin tärkeä kehitysprojektin kannalta, sillä sen aikana kaikki pääsivät antamaan oman mielipiteensä kehitystyön suunnalle. Tämä sitouttaa valvojia itseään toimimaan sovitulla tavoilla ja yhtenäistämään operointityylejä. Työpajassa löydettyjen parannusmallien konseptien painotukset liikkuvat akselilla Toimintavarmuus - Tavoitteellisuus (Kuva 18). Toimintavarmuuden ääripäässä pyritään siihen, että mikään ei häiritse toimintaa. Tavoitteellisuuden ääripäässä pyritään mahdollisimman suureen optimointiin.

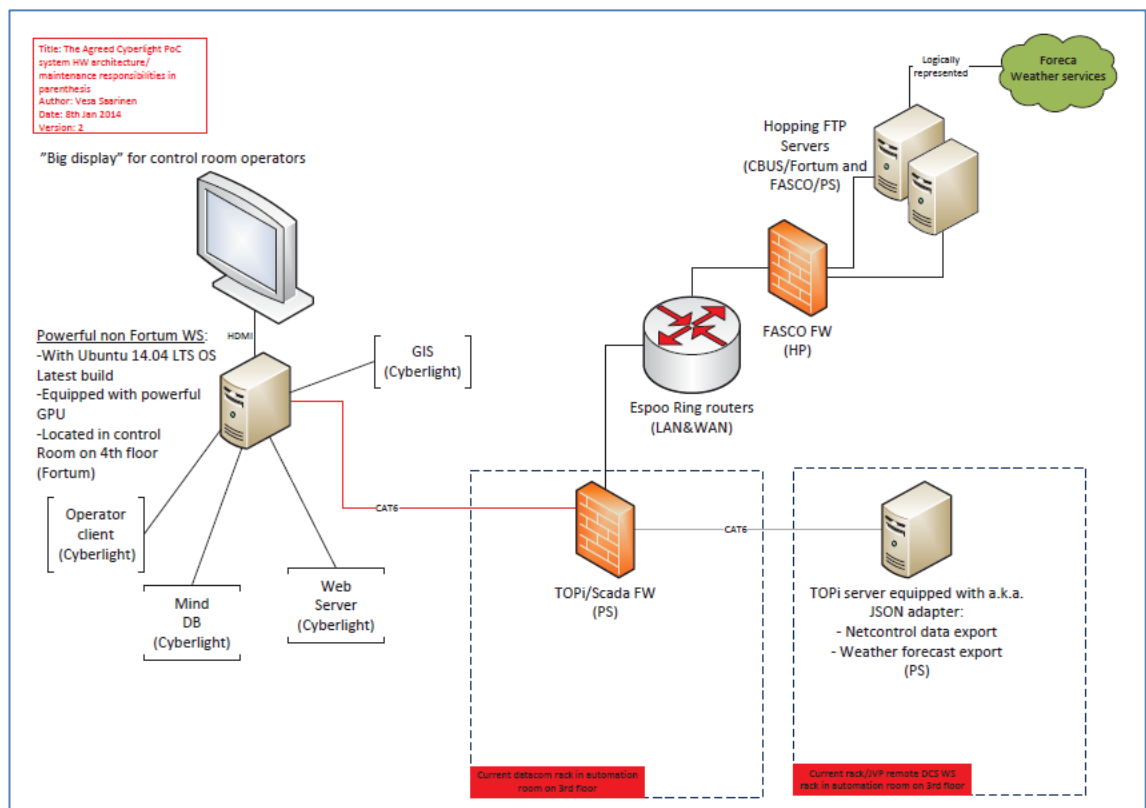
Skenaarioiden 1 - 4 toteutus kuvataan luvussa 4.3 jossa esitellään parannuskonseptien pohjalta rakennetun uuden käyttöliittymän ominaisuuksia. Skenaario 5 "Ajotietokone" käsitellään luvussa 6, jossa käsitellään Metso Automation Oy:n kanssa kehitettyä ratkaisua ns. "ajotietokoneen" toteuttamiseksi.



Kuva 18. Parannuskonseptien painotuspäät

4.7 Cyberville 1.0 asennus

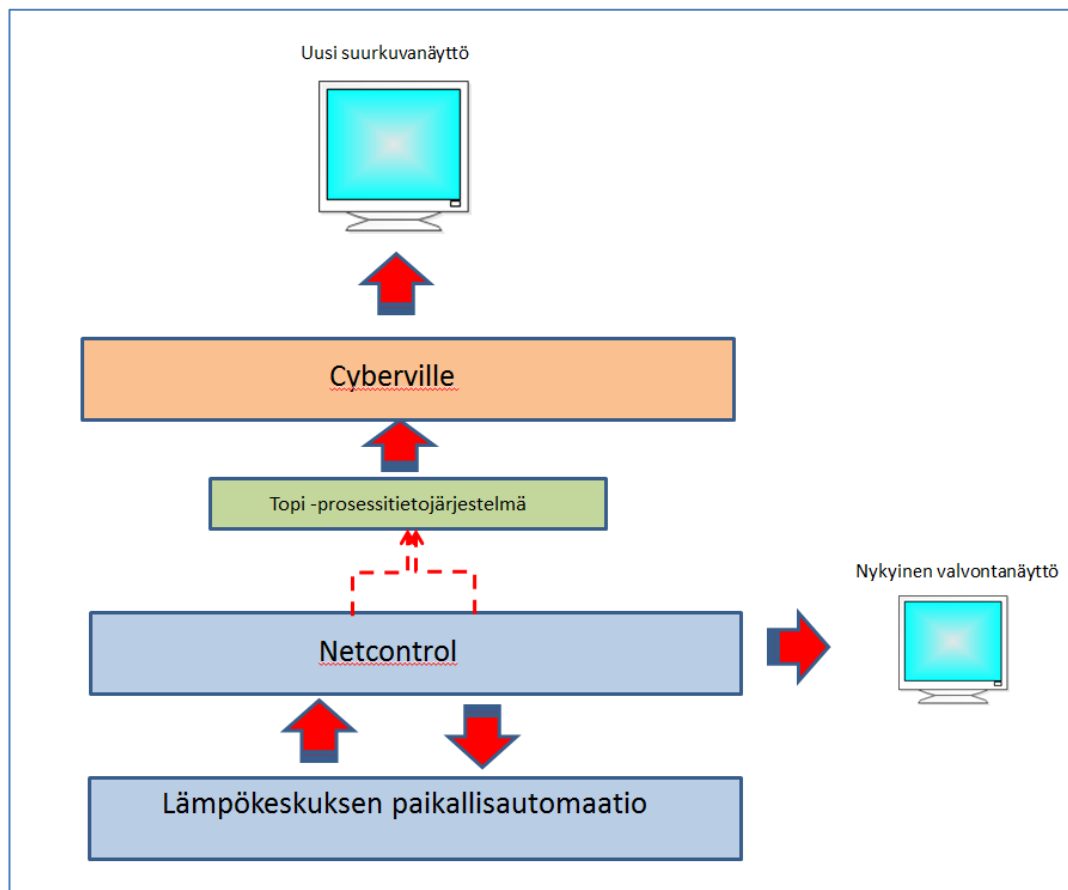
Signaalien kulku käy periaatteellisella tasolla ilmi havainnekuvasta (Kuva 19).



Kuva 19. Cyberville 1.0 liitäntäkaavio Netcontrol järjestelmään.(5)

Signaalien lähtöpohjana toimii lämpökeskusten tai pumppaamoiden paikallisautomaatio josta signaali kulkee Modbus väylää pitkin Netcontrol etäohjausjärjestelmään. Varsinainen integraatio toteutetaan Topi ja Cyberville -ohjelmistojen välillä, johon rakennetaan yhdensuuntainen signaalinkulku. Cyberville 1.0 ei tue signaalinvälitystä molempiin suuntiin, eli Cybervillestä Netcontroliin, vaan suunta on täysin yhdensuuntaista Netcontrolista Topiin, ja Topista Cybervillen palvelimelle (Kuva 20). Tähän ratkaisuun päädyttiin siitä syystä että IT turvatekniset ongelmat ovat huomattavasti helpompi ratkaista toteutuksessa jossa Cyberville ei kuljeta signaalia ohjausjärjestelmään.

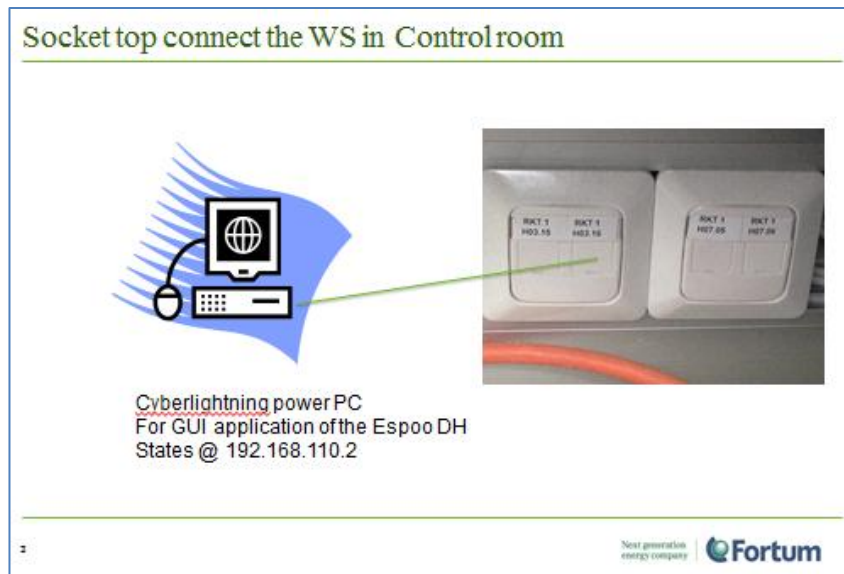
Kytöksen heikkona puolena on, kuten luvussa 6 käsitellyssä monimuuttujasäätimen toiminnassa, Netcontrolin tiedoista riippuvainen järjestelmä, tässä tapauksessa Cyberville, joutuu odottamaan päivitettyä signaalia melko kauan. Yhteydestä ja mittalaitteen toteutuksesta riippuen aikaviive voi olla jopa 30 sekuntia.



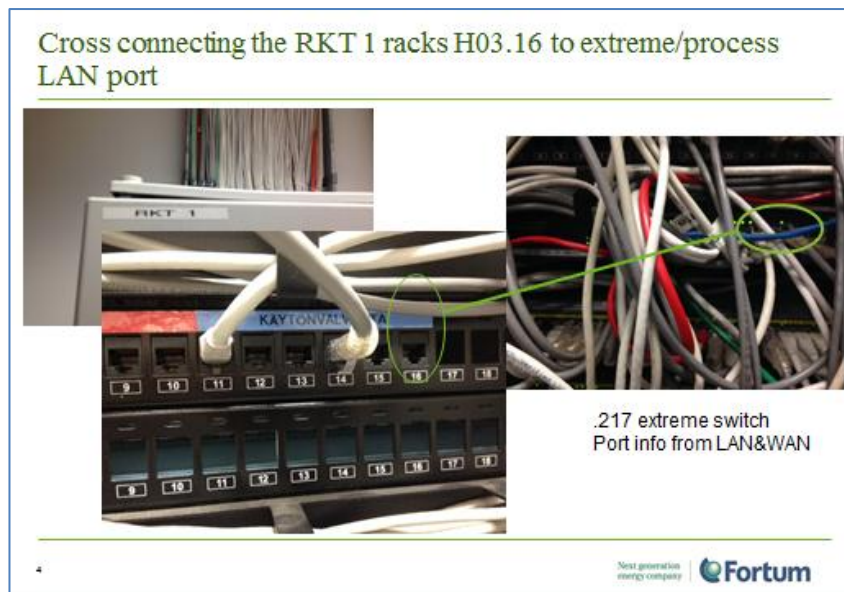
Kuva 20. Järjestelmien periaatekaavio

Asennus vaati muutamia toimenpiteitä valvomohuoneen alla sijaitsevassa automaatio ja reletilassa. Toimistoverkon ristikytkentä on suoritettava reletilassa ja varmistettava

että kaapeloinnit ja pistokkeet ovat valvomohuoneessa Cyberville tietokoneen lähettyvillä ja helposti kytkettävissä (Kuva 21) ja (Kuva 22).



Kuva 21. Valvomon kytkentä



Kuva 22. Reletilan ristikytkentä

Cyberville 1.0 käyttää toiminta-alustanaan tietokonetta joka on erityisesti suunniteltu keskeytymättömään ammattikäyttöön. Tietokoneen tekniset vaatimukset esitettiin VerkkoKauppa.com yritysmyyntille ja ehdotettu ratkaisu valittiin käyttöön (Kuva 23).

Käyttöjärjestelmää ei tilattu toimittajalta suoraan vaan koneeseen asennettiin ammattikäyttöön soveltuva Linux -järjestelmä hankinnan jälkeen.

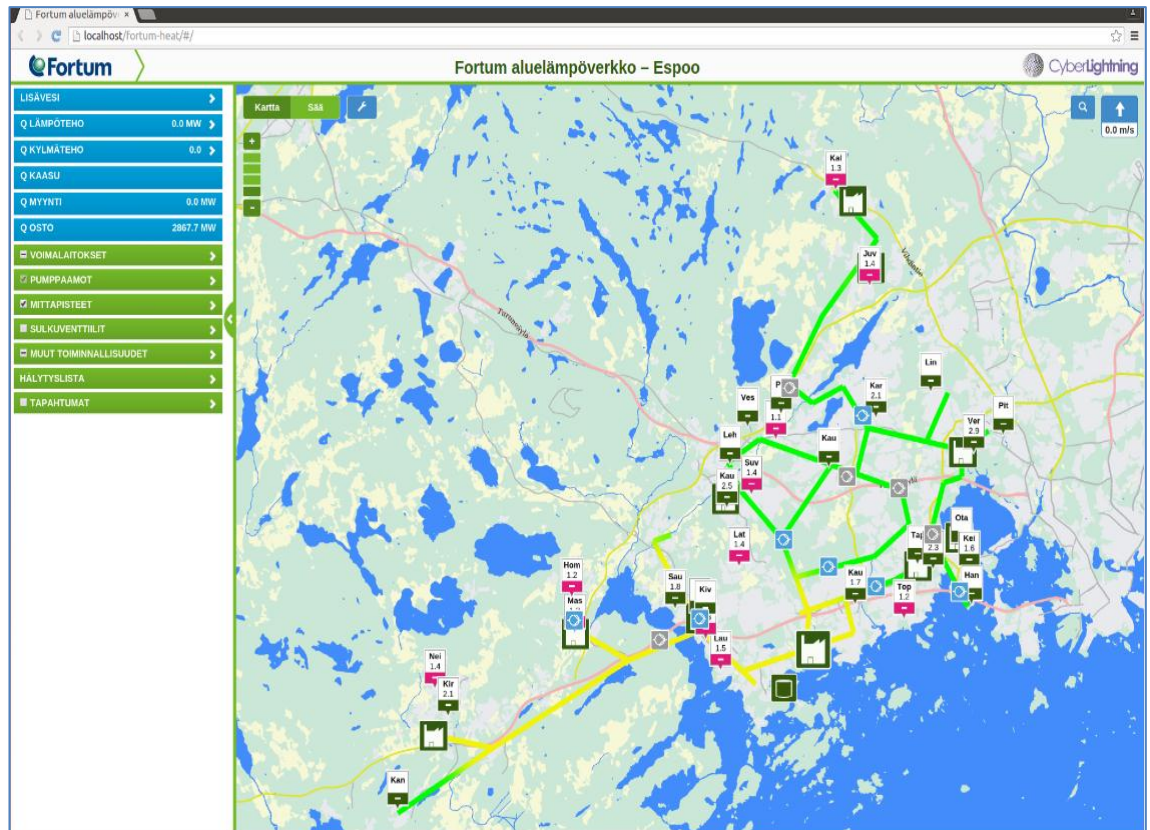


Kuva 23. Cyberville 1.0 tietokoneen tekniset ominaisuudet

4.8 Käyttöliittymän uusien ominaisuuksien esittely

Cyberville 1.0 käyttöliittymässä on huomioitu kaikki luvussa 4 käsitellyt tarpeet uusista ominaisuuksista. Tärkeimpänä uutena ominaisuutena voidaan mainita karttapohjainen etämittapisteiden luenta (Kuva 24). Ominaisuus vasta hyvin tarpeeseen ja skenaarioon "Ollaan kartalla". Grafiikan asettelussa on noudatettu hyvin tarkasti työryhmässä todetun hyvien mallien pohjaa jossa karttapohjalla on visualisoitu kaukolämpöverkko ja sen etämittapistet. Kuvan vasemmassa laidassa on ns. "Navityökalu", josta operaattori voi valita mitä ruudulla haluaa nähdä. Navin saa myös pois näkyvistä siten että koko ruutu on pelkkää karttamaisemaa.

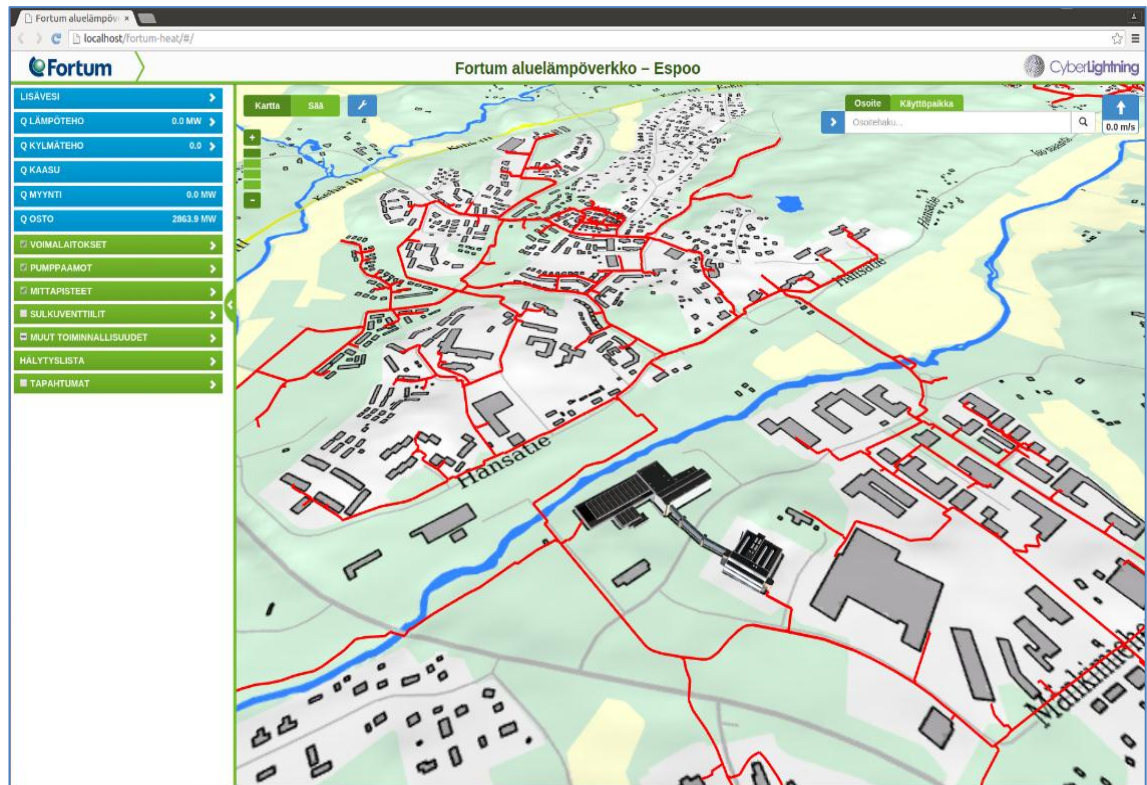
Operaattorilla on mahdollisuus katsoa sääennustetta kahdeksan tuntia eteenpäin ja saada käsitys muuttuvista sääolosuhteista. Karttapohjaan voi jättää muistutusviestejä esimerkiksi meneillään olevista kaukolämpöverkon korjaustoista tai muista asioista jotka operaattori haluaa välittää muiden vuorojen operaattoreille. Huoltoautojen sijaintitieto välittyy myös Cyberville palvelimelle ja näkyy auton symbolina karttapohjalla.



Kuva 24. Cyberville 1.0 käyttöliittymän etuikkuna

Kuva tarkentuu jos operaattori haluaa tarkentaa kuvaa lähemmäksi. Tarkennetussa kuvassa voi nähdä kaukolämpöverkon. Muutamiin VIP kohteisiin on myös lisätty 3d kuva rakennuksesta Lumenen tehdasrakennus Espoon Kauklahdessa (Kuva 25). Kuvasta näkee myös selvästi mihin kohtaan rakennusta kaukolämpölinja on fyysisesti rakennettu.

Käyttöliittymä antaa mahdollisuuden etsiä tiettyä osoitetta joko perinteisen osoitteen perusteella tai kaukolämpöliittymän numerolla. Tiedon voi syöttää ruudun oikeassa yläalaidassa näkyvään osoitekenttään (Kuva 25). Syöttöikkunan arvon perusteella liittymä osoittaa tarkan kohdan verkostossa nuolella.



Kuva 25. Cyberville käyttöliittymän tarkennettu kuva kaukolämpöverkosta

Cyberville 1.0 käyttöliittymä asennetaan 55 tuuman laajakuvanäyttöön joka kiinnitetään valvomon etuseinään noin 1 metrin korkeuteen istuma-asennosta. Suurkuvanäytöksi valittiin Nec LCD 55 tuuman laajakuvanäyttö (Kuva 26). Kaukolämpövalvomon nykyinen näyttösijoittelu asetteli uudelle asennukselle hieman haasteita siitä syystä että olemassa olevat paikat suurkuvanäytöille oli jo varattu pääosin kameravalvontaan kuuluville suurkuvanäytöille. Pienin uusintajärjestelyin suurkuvanäyttö saatiin asennettua paikalleen.



Kuva 26. Cyberville suurkuvanäytön tekniset ominaisuudet

5 Kaukolämmön säädön periaatteet

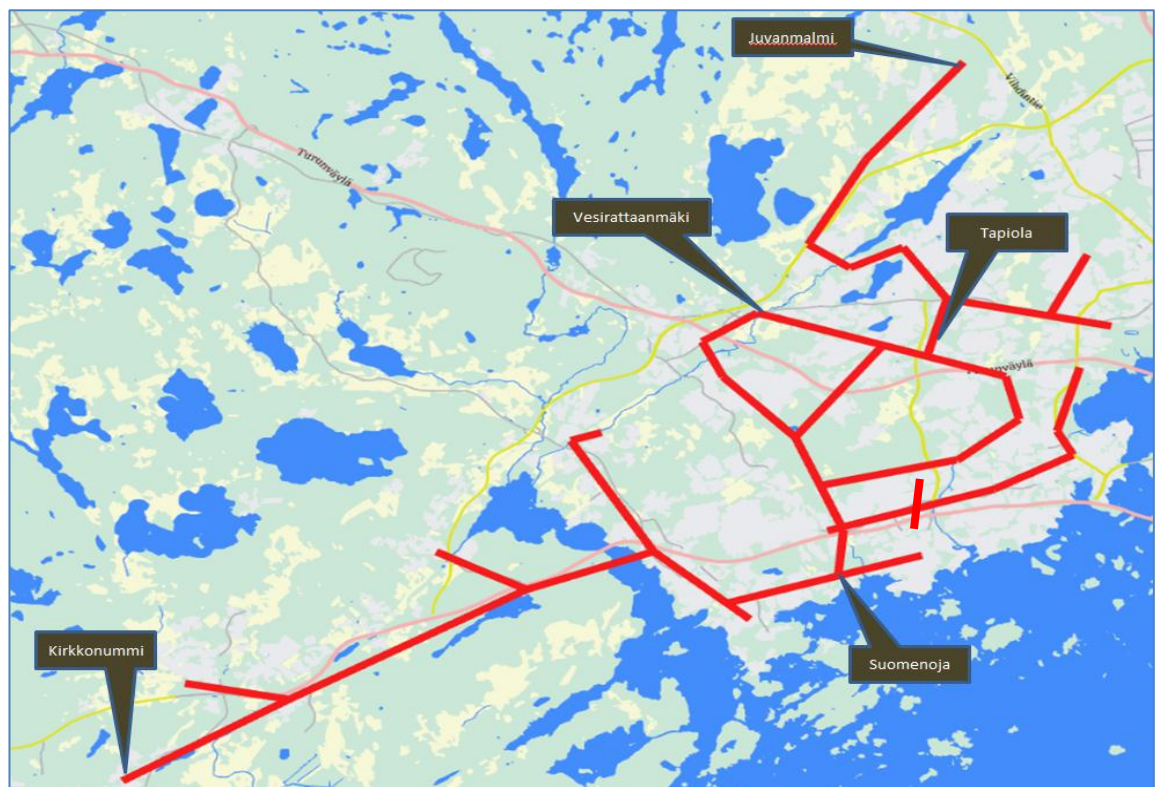
Keväällä 2013 aloitettiin Espoon kaukolämmön verkkoalueen säätötutkimus toimeksiantona Metso Automation Oy:n suorittamana. Säätötutkimus tilattiin sillä kokemusten perusteella Espoon kaukolämpöverkko käyttäytyy kaukolämmön menoveden lämpötiloissa ja paine-eroissa mitattuna ajoittain hyvin epäedullisesti aiheuttaen turhaa tehohävikkiä. Paine-eroja on hyvin vaikea hallita erityisesti kulutuksen, eli tehon muuttuessa suuresti.

Tutkimukseen osallistui Metso Automation Oy:n säätöasiantuntijoiden lisäksi Fortum Power & Heat Oy:n omaa henkilöstöä, kuten voimalaitoksen automaatioasiantuntijoita, käyttöinsinööri ja operaattoreita. Tutkimukset tehtiin aikavälillä 15.1.2013 – 12.2.2013. Kaukolämpöverkon rakenne ja säätöjen toiminnan nykytila ja parannuspotentiaali selvitettiin teknisiä dokumentteja tutkimalla, tallennettua mittausdataa analysoimalla sekä käyttöhenkilökuntaa haastatteleamalla. Varsinaiset askelvastekokeet ja säätimien parametroidit suoritettiin syksyllä 2014 ja kevät-talvella 2015.

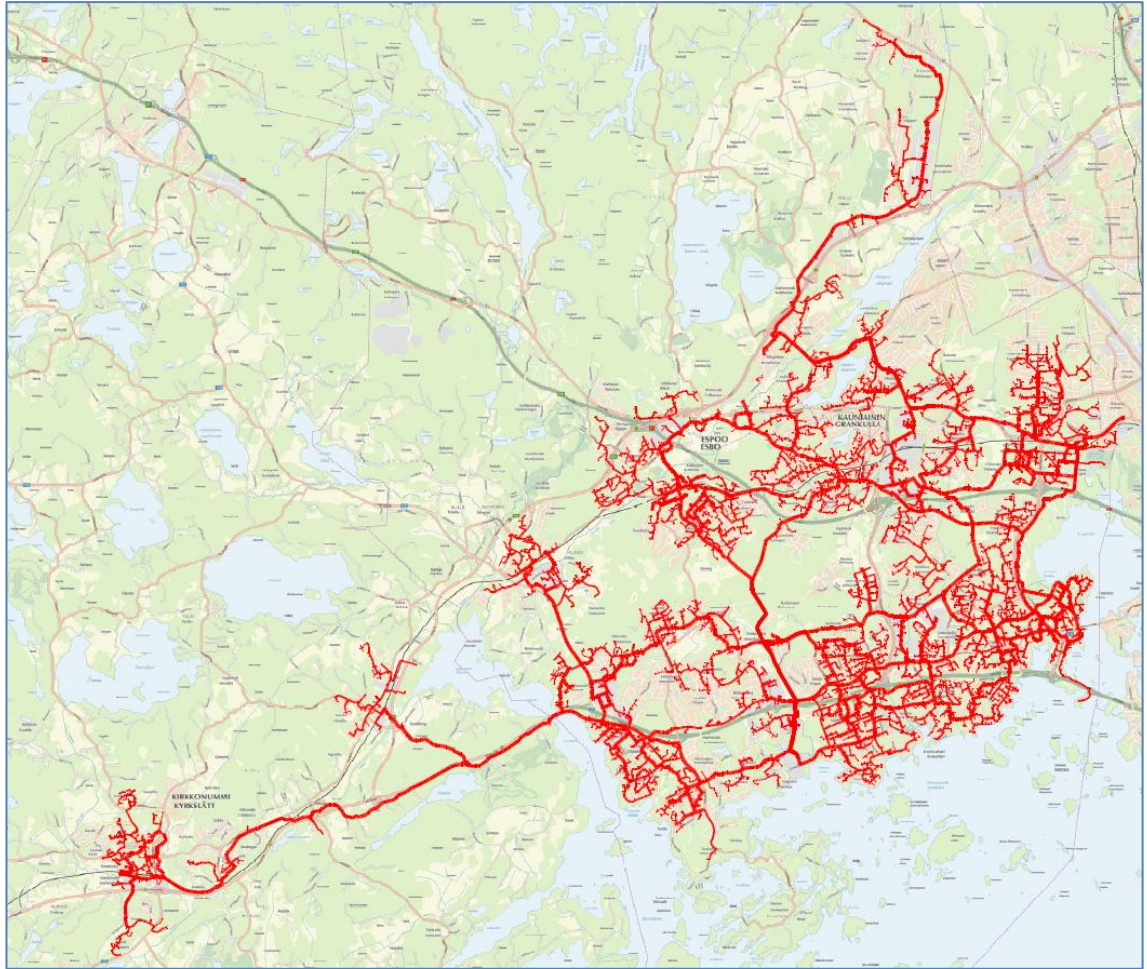
5.1 Espoon Kaukolämpöverkon rakenne

Tutkittava kaukolämpöverkko on Suomen toiseksi suurin ja se laajenee jatkuvasti. Vuonna 2014 verkon kokonaispituus oli 812 km ja tilavuus 61000 m³. Verkossa on sekä rengasmaisia alueita että pitkiä haaroja (Kuva 27). Enemmän yksityiskohtia sisältävä kartta on vaikealukuisempi (Kuva 28).

Kuten kaaviosta käy ilmi, Espoon kaukolämpöverkko on pirstaloitunut jakautuen muutamiaan suurta kulutusta ylläpitävään keskusrenkaaseen kuten Tapiolan ja Otaniemen alueisiin sekä pitkien siirtolinjojen päässä oleviin pienen kulutuksen alueisiin, kuten Juvanmalmin, Kirkkonummen ja Kauklahten alueisiin. Verkoston muoto ja dynamiikka asettaa energian optimaaliselle siirrolle hyvin suuret vaatimukset. Kaukolämmön kulutus vaihtelee talven kylmimmästä noin 800 MW kulutuksesta kesän kuumimpaan noin 80 MW kulutukseen. Alueittaiset vaihtelut voivat olla hyvinkin suuria eteenkin kevät ja syysaikaan kun päivän ja yön välinen ulkolämpötilaero voi kasvaa jopa 30 asteeseen.



Kuva 27. Espoon kaukolämpöverkon päälinjat



Kuva 28. Espoon kaukolämpöverkko

Lämpöä kaukolämpöverkkoon tuottavat Suomenojan voimalaitoksen lisäksi 10 lämpökeskusta. Suomenojan voimalaitoksen ja lämpökeskusten yhteenlaskettu kaukolämmön tuotantoteho on 1354 MW. Pumppuasemia on kaukolämpöverkossa yhteensä kymmenen kappaletta, seitsemän isoa ja kolme pientä. Pumppuasemien tehtävänä on siirtää kaukolämpöä tuottajilta kuluttajille, eli tasata tuotannon ja kulutuksen epätasaista jakautumista verkon eri osissa. Noin 90 % kaukolämpöenergiasta tuotetaan Suomenojan voimalaitoksella. (6)

5.2 Kaukolämpöverkon säätöjen tavoitteet

Kaukolämpöverkon tärkeimmät säädöt ovat:

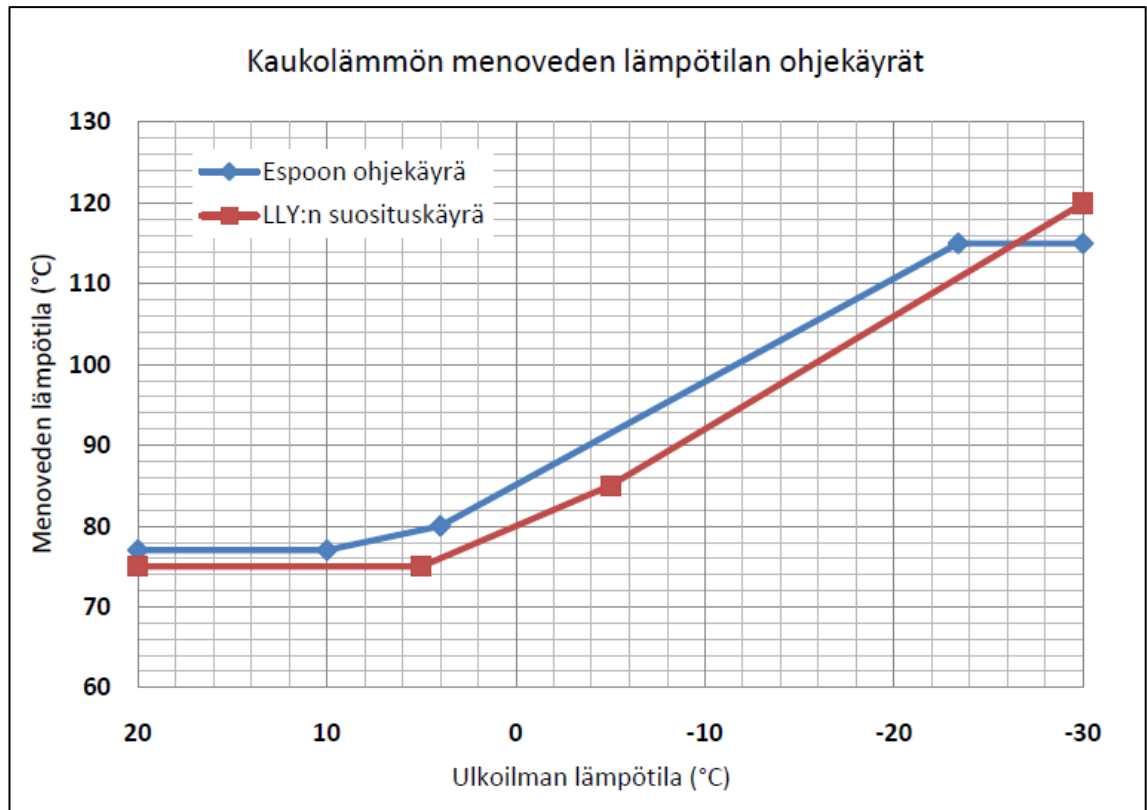
- Verkon menolämpötilan säätö
- Verkon paine-eron säätö

Seuraavissa kappaleissa kuvataan näille säädöille asetetut tavoitteet ja vaatimukset.
(6)

5.3 Menoveden lämpötilan säädön tavoitteet

Alarajan menoveden lämpötilalle asettavat kuluttajien lämmityslaitteiden ja käyttövesilämmittimien sekä teollisuuden prosessilaitteiden mitoitus. Energiateollisuus ry:n antamien ohjeiden mukaan rakennusten käyttöveden lämmönsiirtimet on mitoitettava siten, että ensiöpiirin tulolämpötila voi olla alimmillaan 70 °C. Ylärajana puolestaan on paineastialain mukainen 120 °C. Näiden rajojen puitteissa menolämpötilan tavoitearvo määräytyy monen tekijän optimina. Menolämpötilan nostaminen lisää lämpöhäviöitä putkistossa. Lämpötilan lasku puolestaan kasvattaa lämmön siirtämisen tarvittavaa virtausta, mikä lisää tarvittavaa pumppaustehoa. Toisaalta alempi menolämpötila kasvattaa vastapaineturbiinin sähköntuotannon hyötysuhdetta yhdistetyssä sähkön ja lämmöntuotannossa.

Näiden tekijöihin perustuen Energiateollisuus ry on antanut suosituskäyrän (Kuva 29), jossa menoveden lämpötilan tavoitearvo saadaan käyrältä ulkoilman lämpötilan funktiona. Kuvassa näkyy myös Espoon kaukolämpöverkolle laadittu oma tavoitekäyrä. Tämä ohjekäyrä antaa kaukolämmön menovedelle alarajan, jolla kuluttajat vielä tulevat toimeen.



Kuva 29. Kaukolämmön menoveden suosituskäyrä.(6)

Kaukolämpöverkon lämpörasitusten välttämiseksi menolämpötilan muutosnopeuden tulee olla normaalitilanteessa noin $1\text{ °C} / 6\text{ min}$, enintään $2\text{ °C} / 6\text{ min}$. Lisäksi kaikkien samaa verkkoa syöttävien lämpölaitosten menolämpötilojen ero tulee olla mahdollisimman pieni, enintään 15 °C , sillä syöttöalueiden rajakohdissa jatkuva lämpötilan nopea muuttuminen rasittaa verkon rakenteita. (6)

5.4 Paine-erosäädön tavoitteet

Lämpökeskusten, voimalaitosten ja pumppaamoiden tuottamalla paine-erolla saadaan aikaan kaukolämpöveden kierto verkossa. Kaukolämmön kuluttajat puolestaan määräävät omilla säätölaitteillaan virtausmäärän. Jotta asiakas saa tarvitsemansa virtauksen, tulee kuluttajille taata riittävän suuri käytettävissä oleva paine-ero. Sopimusteknisesti asiakkaan omaan kaukolämpökoneistoon tulisi saada $0,6\text{ bar}$ paine-ero. Tämä tarkoittaa että asiakkaalle tulevan kaukolämmön ja lähtevän kaukolämmön paine tulee poiketa toisistaan vähintään $0,6\text{ bar}$.

Energiateollisuus ry:n antamien ohjeiden mukaan rakennusten lämmönsiirtimet on mitoitettava siten, että paine-ero voi olla alimmillaan 0,6 bar. Taulukossa 3 on esitetty Espoon kaukolämpöverkon etämittapisteille määritetyt ohjeelliset paine-erot, joilla paine-ero riittää kaikille kuluttajille. Näistä arvoja suurempi paine-ero on turhaa pumppausta. Suositellut paine-erot on laskettu tietokoneohjelmaa hyödyntämällä sekä raja-arvohaennalla käytännössä operoimalla. (Taulukko 3) (6)

Taulukko 3. *Espoon kl-verkon ohjeelliset paine-erojen raja-arvot etämittapisteissä (7)*

Hommaksenkaari dp > 0.8 bar	Kivenlahti dp > (1.5 - 2.0) bar	Lehtimäki dp > (1.4 - 2.2) bar	Karakallio dp > (1.8 - 2.5) bar	Lintuvaara dp > 1.0 bar	Keilaniemi dp > 1.2 bar
Masalan lk dp > (1.5 - 2.5) bar	Saunalahti dp > 1.0 bar	Jorvi dp > 1.4 bar	Länderanta dp > (1.6 - 2.0) bar	Vermo dp > (1.5 - 3.5) bar	Itäranta dp > 1.3 bar
Neidonkallio dp > 2.2 bar	Kauklahti dp > 1.3 bar	Kaupunginkallio dp > 2.8 bar	Auroranportti dp > (1.5 - 1.8) bar	Laajalahti dp > 1.3 bar	Otaniemi dp > 1.8 bar
Kirkkonummen lk dp > (1.5 - 2.5) bar	Latokaski dp > 1.3 bar	Olarinluoma dp > 1.0 bar	Juvanmalmi dp > 0.8 bar		Vesitorni dp > (2.0 - 3.5) bar
					Westend dp > 1.4 bar
					Tapiola dp > (2.5 - 3.7) bar

5.5 Säättöjen toiminnan arviointi

5.5.1 Suomenojan voimalaitos

Suomenojan kaukolämpösäättöjen perusongelmana on tammikuuhun 2013 asti ollut, että Suomenojalta lähtevän kaukolämmön menoveden lämpötila ei ole ollut hallinnassa. Syynä tähän ovat olleet seuraavat kaksi tekijää: Suomenojan yksiköitä on ajettu pääsääntöisesti vakioteholla (täydellä teholla, koska Suomenojalla on edullisimmat polttoaineet) ja kaukolämpöverkon paine-ero on säädetty Suomenojan voimalaitoksen omilla pumpuilla. Seurauksena tästä ajotavasta on, että kun kaukolämmön kulutus muuttuu tai lämpökeskuksen ohjauksia muutetaan, se näkyy paine-eron voimakkaana heilahteluna. Paine-erosäätö Suomenojalla muuttaa kaukolämpöpumppausta, jolloin Suomenojan läpi kulkeva kaukolämpövirtaus muuttuu. Näin myös lähtevän kaukolämpöveden lämpötila muuttuu.

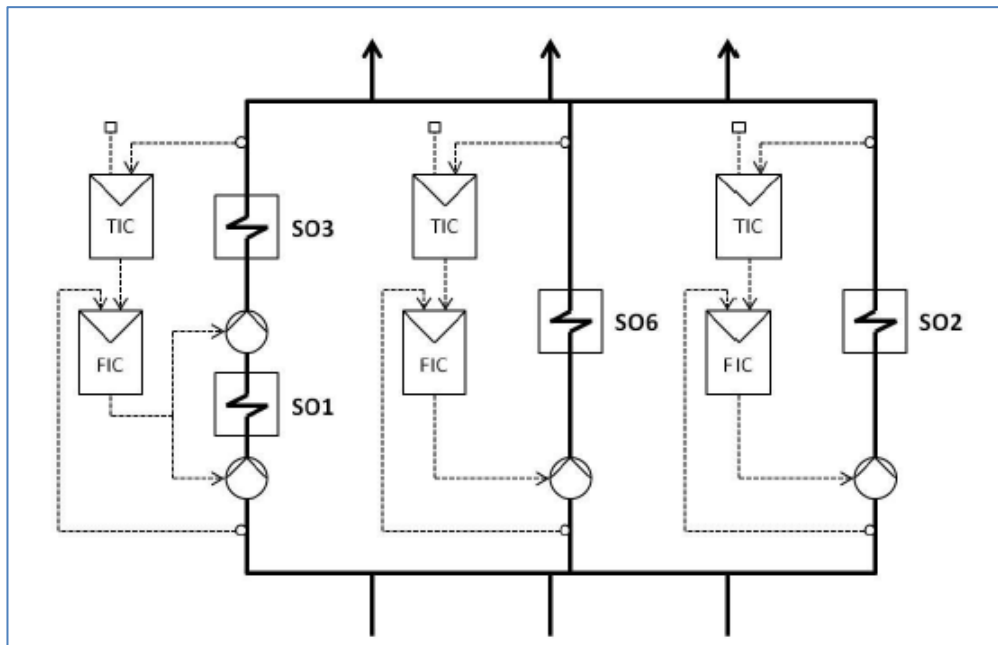
5.5.2 Suomenojan menoveden lämpötilan säädöt

Ennen kaukolämmön menoveden lämpötilan säätömuutosta, joka toteutettiin tammikuussa 2013, Suomenojan voimalaitoksentuotantoyksiköitä ohjattiin paine-erosäädöllä (Kuva 30).



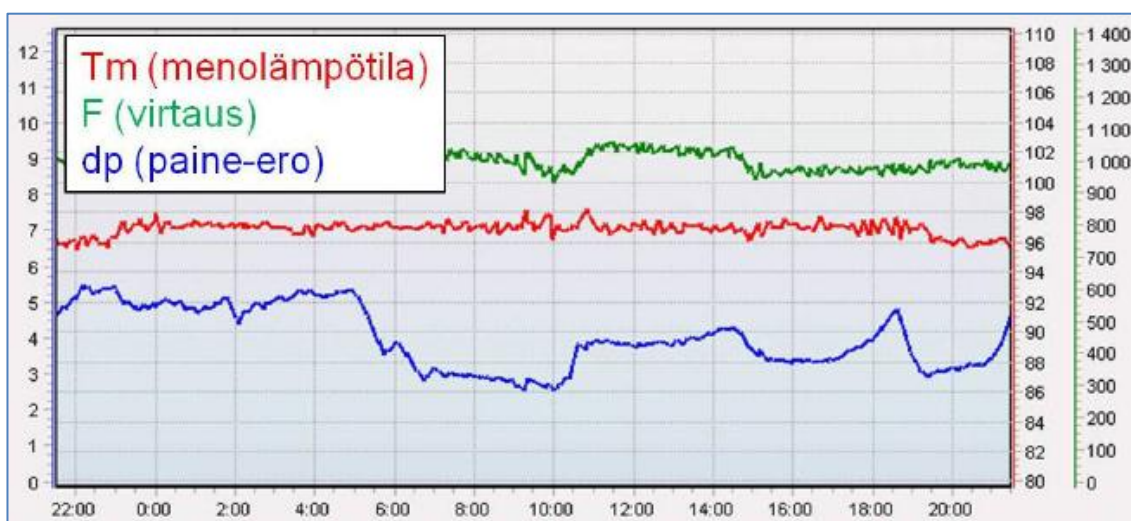
Kuva 30. Suomenojalta lähtevän kaukolämmön menolämpötila, virtaus ja paine-ero enne sää-
tömuutosta

Tammikuussa 2013 Suomenojan kaikilla yksiköillä otettiin käyttöön voimalaitosyksikkö-
kohtainen menolämpötilansäätö kaukolämpöpumpuilla (Kuva 31). Kaskadisäätöperiaat-
teen mukaisesti menolämpötilan mittausrvo ohjaa kaukolämpöpumppujen taajuus-
muuntajan antamaa pumpun pyörimisnopeutta. Kaukolämmön menoveden lämpötilan
noustessa yli asetusarvon, säädin ohjaa kaukolämpöpumpun nostamaan kierrosnope-
utta, jolloin menolämpötila laskee ja toisinpäin menoveden lämpötilan laskiessa.



Kuva 31. Kaukolämmön menoveden lämpötilan säätöperiaate yksikkökohtaisesti (6)

Kaukolämmön menolämpötilan säädön periaatteen mukaisesti menovesi pysyy vakiona (Kuva 32). Tällä säätöperiaatteella kaukolämmön menolämpötila pysyy tarkasti asetusarvossaan, mutta paine-ero puolestaan vaihtelee voimakkaasti. Kaukolämpövalvoja säätää verkon paine-eroa manuaalisesti ohjaamalla lämpökeskusten ja pumppaamoiden tehoja.



Kuva 32. Kaukolämmön menolämpötila, virtaus ja paine-ero säätömuutoksen jälkeen. Kaukolämpövalvoja testaa kaukolämpöverkon paine-eron säätöä manuaalisesti ohjaamalla lämpökeskusten ja välipumppaamoiden tehoja.

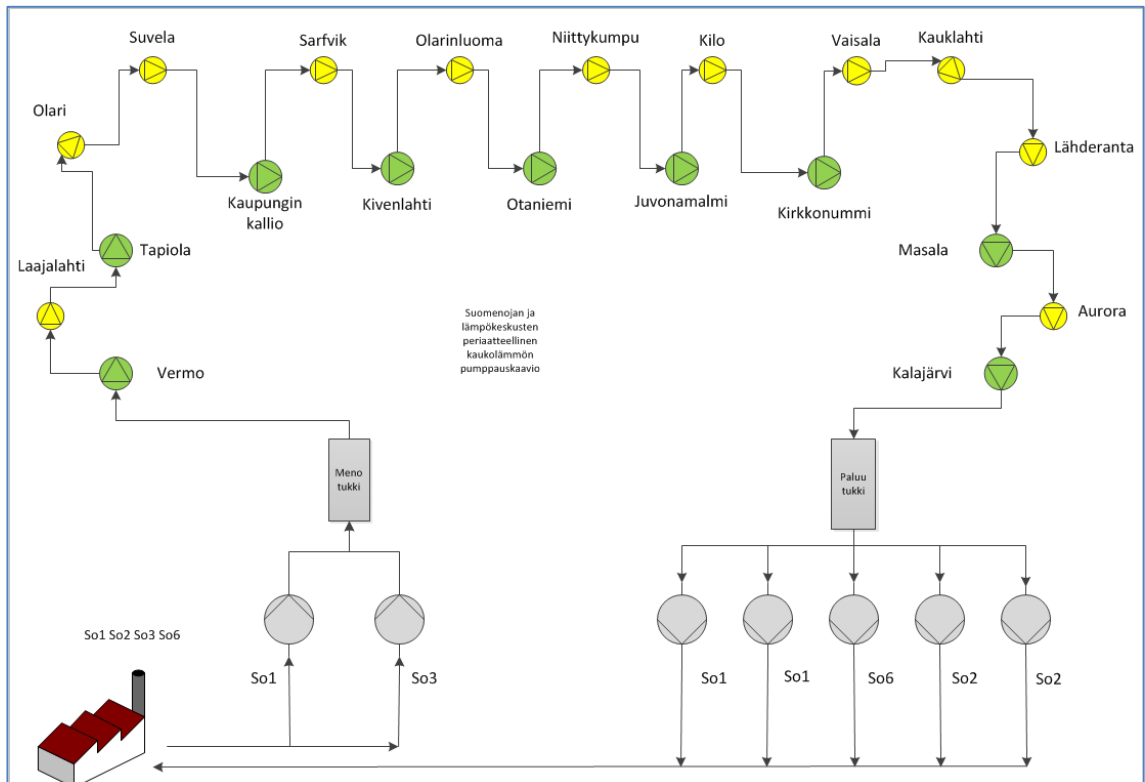
Kaukolämpöverkon kestävyiden kannalta menolämpötilasäätöön perustuvaa tilannetta (Kuva 32) voidaan pitää parempana, sillä menoveden lämpötilan vaihtelu rasittaa putkistoa huomattavasti enemmän kuin paine-eron vaihtelu. Kuluttajan näkökulmasta paine-eron vaihtelu on yhtä haitallista kuin menolämpötilan vaihtelu. Paine-eron vaihtelu heikentää kuluttajien säätölaitteiden suorituskykyä, sillä paine-eron muuttuessa kuluttajan säätöventtiilin asennon ja venttiilin läpi kulkevan virtauksen suhde muuttuu.

Kuvasta (Kuva 32) ilmenee myös kaukolämpöverkon paine-eron dynaaminen käyttäytyminen. Kun verkon paine-ero kasvaa, kaukolämmön tuotanto on kulutusta suurempi. Vastaavasti kun paine-ero laskee, kulutus on suurempi kuin tuotanto. Paine-eron absoluuttisesta arvosta sen sijaan ei voi päätellä tuotannon ja kulutuksen määrää. Tämän johdosta paine-eron säätäminen manuaalisesti on hyvin työlästä. Kaukolämmön ope-

raattorit ovat yksimielisiä siitä että lämpökeskuksilla ja pumppaamoilla on erittäin vaikea löytää sopivia tehotasoja, joilla paine-erot pysyisivät vakaina. (6)

5.5.3 Suomenojan paine-eron säädöt

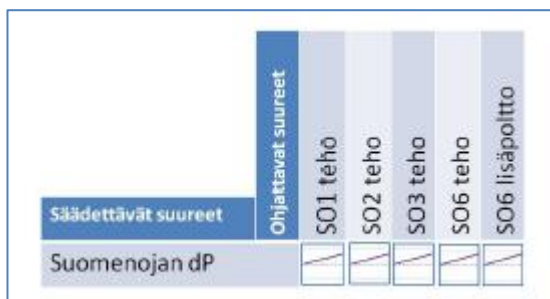
Suomenojan voimalaitokselle on syksyllä 2012 toteutettu kaukolämmön tuotannonhallintasovellus. Sen tehtävänä on säätää Suomenojan voimalaitoksen kaukolämmön meno- ja paluutukkien paine-eroa ohjaamalla voimalaitosyksiköiden poltto- ja sähkötehoja.



Kuva 33. Suomenojan ja kaukolämpölaitosten kaukolämmön pumppausperiaate

Suomenojan voimalaitoksen, lämpökeskusten ja pumppaamoiden kaukolämmön pumppausperiaate (Kuva 33). Kuva on periaatteellinen, eikä pumppaamoiden ja lämpökeskusten maantieteellinen sijainti vastaa kuvassa esitettyä. Vihreät pumput edustavat lämpökeskuksia, keltaiset pumput pumppausasemia ja harmaat pumput Suomenojan voimalaitoksen pumppuja. Väärinymmärrysten välttämiseksi mainittakoon että lämpökeskukset toimivat itse sekä pumppausasemana että lämpöenergiantuottajana. Sääteknisesti Suomenojalla ohjattavia suureita on viisi, So1 höydyturbiinin sähkötehon asetusarvo, So2 kaasuturbiinin kuorman asetusarvo, So3 hiilitehon asetusarvo,

So6 kaasuturbiinin kuorman asetusarvo ja So6 kaasuturbiinin lisäpolton asetusarvo. Säätömatrixissä (Kuva 34) kuvataan ohjattavien suureiden vaikutus säädettäviin suureisiin, eli käytännössä Suomenojan yksiköiden tehojen vaikutukset Suomenojan paine-eroon. (6)



Kuva 34. Suomenojan voimalaitoksen paine-erosäädön matriisi

5.5.4 Lämpökeskukset

Kaikkia Espoon kaukolämpöverkon lämpölaitoksia ja pumppaamoita ohjataan Suomenojan voimalaitoksen kaukolämpövalvomosta Netcontrol kaukokäyttöjärjestelmän avulla. Kaukokäyttöjärjestelmä välittää mittaustiedot ja hälytykset lämpökeskuksilta operaattorille, ja vastaavasti operaattorin antamat ohjaukset ja asetusarvot lämpökeskuksille. Netcontrol järjestelmässä ei ole toteutettu minkäänlaista säätölaskentaa, vaan kaikki säädöt ovat lämpökeskusten paikallisautomaatioissa. Paikallisautomaatioina lämpökeskuksilla ovat ABB Sattline -järjestelmät. (6)

5.5.5 Lämpökeskusten menolämpötilan ja paine-eron säädöt

Taulukossa (Taulukko 4) on esitetty lämpökeskusten paikallisautomaatioissa käytettävissä olevat säädöt. Kaukolämmön menoveden lämpötilan säätö on toteutettu kaikilla lämpökeskuksilla, mutta sen toteutustapa riippuu siitä mitä muita säätöjä lämpökeskuksella on. Kaikille lämpökeskuksille on yhteistä että operaattori voi antaa asetusarvon menoveden lämpötilalle. Viidellä suurimmalla lämpökeskuksella (Vermo, Tapiola, Kaupunginkallio, Kivenlahti ja Otaniemi) on kattilakohtainen tehonsäätö. Operaattori antaa asetusarvot kunkin kattilan teholle. Tehonsäätö ohjaa kattilan polttoaineensyöttöä. Menoveden lämpötilaa säädetään kaukolämpöpumpkauksella.

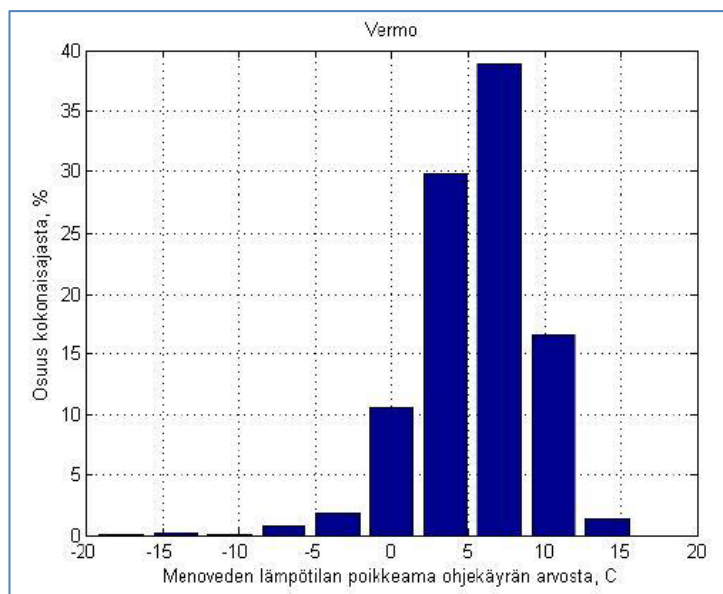
Juvanmalmin ja Kirkkonummen lämpökeskuksilla on lämpökeskusten kaikille kattiloille yhteinen kl-virtaussäätö. operaattori antaa asetusarvon lämpökeskuksen kokonaisvirtaukselle. Virtaussäätö ohjaa lämpökeskuksen kaukolämpöpumppuja. Menoveden lämpötila säädetään kattilakohtaisesti ohjaamalla kattilan polttoaineensyöttöä.

Masalan ja Kalajärven lämpökeskuksilla lämpökeskuksilla on paikalliset meno- ja paluulinjojen paine-erosäädöt. Paine-erosäätö ohjaa lämpökeskuksen kaukolämpöpumppuja. Menoveden lämpötila säädetään kattilakohtaisesti ohjaamalla kattilan polttoaineensyöttöä.

Taulukko 4. Lämpökeskusten paikalliset kaukolämpösäädöt

Lämpökeskukset	Teho MW	Polttoaine	Menolämpötilan säätö	Kattilakohtainen tehonsäätö	Yhteinen kl-virtaussäätö	Paine-eron säätö	Käytetään vain pumppaamona
Vermo	2*40 + 2*46	raskasöljy, kaasu	X	X			
Tapiola	4*40	raskasöljy, kaasu	X	X			
Kaupunginkallio	2*40	kevytöljy	X	X			
Kivenlahti	2*45	raskasöljy	X	X			
Otaniemi	3*40	raskasöljy, kaasu	X	X			
Auroranportti	16	kevytöljy					X
Juvanmalmi	16	kevytöljy, kaasu	X		X		
Kirkkonummi	31	raskasöljy, kaasu	X		X		
Masala	3.5	kevytöljy, kaasu	X			X	
Kalajärvi	5	kevytöljy, kaasu	X			X	
Vermon lämmönsiirrin	70	-					

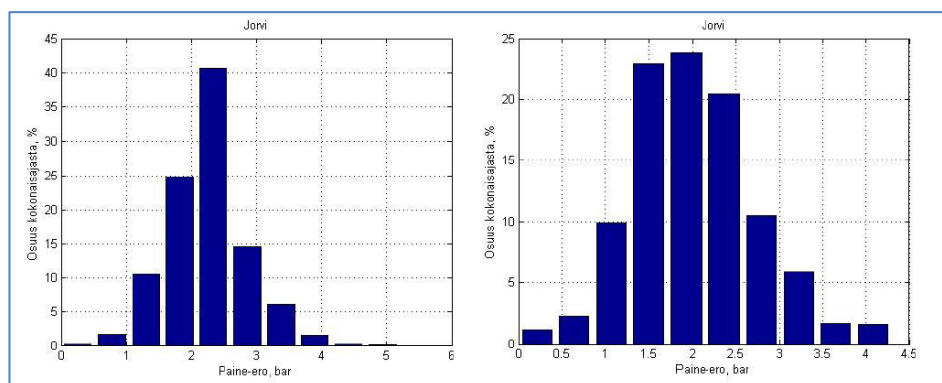
Seuraavassa kuvassa (Kuva 35) on esitetty histogrammina lämpökeskusten kaukolämmön menoveden lämpötilan poikkeamat ohjekäyrän tavoitearvosta aikaväliltä 1.1.2012 - 31.1.2013. Histogrammi on piirretty siltä ajalta kun lämpökeskus, tässä tapauksessa Vermon lämpökeskus, on ollut käynnissä. Menoveden lämpötilan oikeellisuutta on verrattu Espoon ohjekäyrältä (Kuva 29).



Kuva 35. Vermon lämpökeskuksen kaukolämmön menoveden lämpötilan poikkeama (6)

Histogrammista nähdään (Kuva 36), että suurimman osan ajasta sen menoveden lämpötila on ollut käyrän arvoa korkeammalla. Alentamalla menolämpötilaa voidaan saavuttaa merkittäviä taloudellisia säästöjä koko Espoon mittakaavassa.

Kuvassa nähdään vertailuna kaukolämpöverkon etämittapisteen Jorvin paine-ero. Vasemmanpuoleisessa kuvassa tarkastelujaksona on koko vuosi 2012 ja oikeanpuoleisessa on tammikuu 2013.



Kuva 36. Jorvin paine-ero suhteessa tavoitearvoon.(6)

Paine-eron histogrammista havaitaan, että suurimman osan ajasta paine-erot ovat esitettyjen suositusarvojen yläpuolella (Taulukko 3.). Histogrammista (Kuva 36) havaitaan että tammikuussa 2013 paine-eron ylitystä on tapahtunut edelleen. Tämä selittyy sillä,

että tammikuussa 2013 Suomenojan kaukolämpöpumput vaihdettiin paine-erosäädöltä lämpötilasäädölle. Tästä syystä kaukolämpöoperaattorit ovat manuaalisesti säätäneet paine-eroja lämpökeskusten tehoja ohjaamalla. (6)

5.5.6 Pumppuasemat

Kaikkia kaukolämpöverkon pumppuasemia ohjataan Suomenojan voimalaitoksen kaukolämpövalvomosta Netcontrol -kaukokäyttöjärjestelmän avulla. Kuten lämpökeskuksilakin, kaukokäyttöjärjestelmä välittää pumppuasemilta mittaustiedot ja hälytykset operaattorille, ja vastaavasti operaattorin antamat asetusarvot pumppuasemille. Pumppuasemilla on vain pumppujen pyörimisnopeussäädöt. Operaattori antaa asetusarvot pumppujen pyörimisnopeuksille manuaalisesti kaukokäyttöjärjestelmään syöttämällä.

Pumppuasemat ovat tärkeässä roolissa kaukolämpöverkon tasapainon säätelyssä. Pumppuasemilla voidaan siirtää tuotettua tehoa verkon osasta toiseen, mutta kokonaisuuteen ne eivät vaikuta. Tämä näkyy myös verkon paine-eroissa siten, että esimerkiksi menopumpun pyörimisnopeuden kasvattaminen lisää verkon paine-eroa pumpun painepuolella ja vastaavasti pienentää paine-eroa pumpun imupuolella. (6)

6 MPC säätö (Model Predictive Control)

Tässä luvussa käsitellään ratkaisumallia kaukolämpökeskusten ja Suomenojan voimalaitoksen yksiköiden ohjaamiseksi koordinoitusti siten, että kaukolämpöverkon paine-erot ja menoveden lämpötilat voidaan hallita nykyistä paremmin kaikissa tilanteissa. Luvussa 4.5 käsitellyssä käyttöliittymän parannus skenaariossa 5 "Ajotietokone" vastaa ajatukseltaan juuri tämän luvun käsittelemää parannuskonseptia.

6.1 Menoveden lämpötilan säädöt

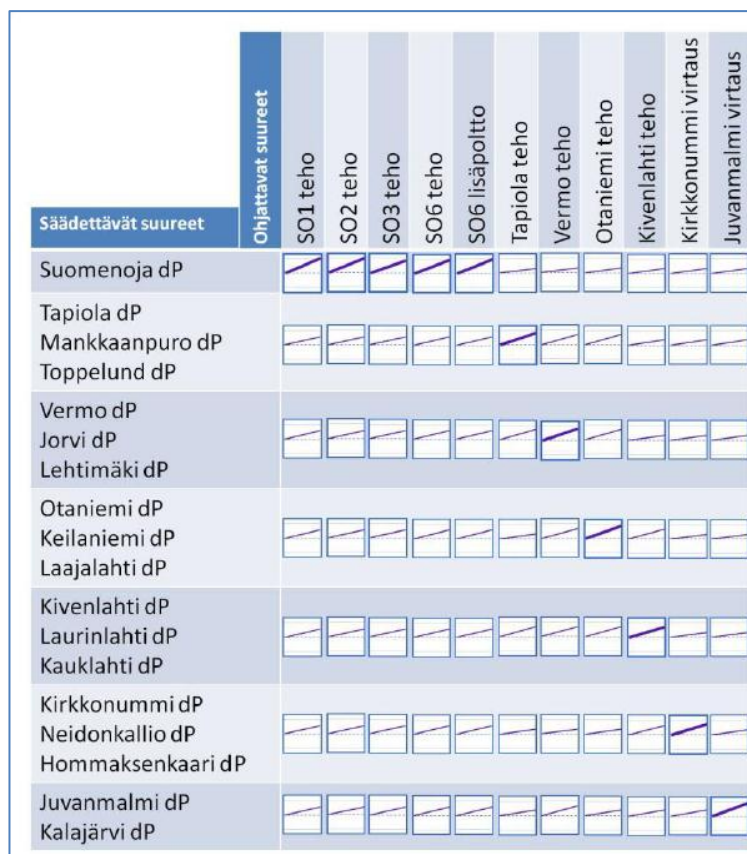
Nykyiset, luvussa 6 kuvatut menoveden lämpötilan säädöt soveltuvat kaukolämmön koordinoituun säätöön. Lämpökeskusten menolämpötilan asetusarvoille tulisi kuitenkin toteuttaa automaattinen ulkolämpötilan seuranta. Se tarkoittaa, että ulkolämpötilan muuttuessa menoveden lämpötila muuttuu automaattisesti kuvassa (Kuva 29) esitetyn Espoon ohjekäyrän mukaisesti. Tämä toiminto toteutettiin Suomenojan voimalaitoksen menoveden lämpötilasäätöihin vuonna 2013 ja lämpökeskusten menovesisäätöihin

keväällä 2014. Lisäksi operaattori voi lisätä käyrältä tulevaan arvoon haluamansa korjauksen ja näin "akuttaa" verkkoa.

6.2 Paine-eron säädöt

Koska kaukolämmön kokonaiskulutus vaihtelee vuorokauden aikana enemmän kuin minkään yksittäisen lämpökeskuksen säätöalue antaa mahdollisuuden, ei kaukolämmön paine-erosäätöä voida toteuttaa millään yksittäisellä lämpökeskuksella, riippumatta siitä miten paine-erosäätö olisi toteutettu. Näin ollen useamman kuin yhden lämpökeskuksen on samanaikaisesti osallistuttava paine-eron säätöön. Lämpökeskukset ovat kuitenkin verkon välityksellä vuorovaikutuksessa toistensa kanssa. Käytännössä se tarkoittaa, että kun yhden lämpökeskuksen tehoa nostetaan, verkon paine-erot nousevat tämän lämpökeskuksen läheisyydessä, mutta myös muualla verkossa muiden lämpökeskusten läheisyydessä. Jos lämpökeskuksia ohjattaisiin paikallisten paine-eromittausten perusteella, säädöt alkaisivat kilpailla keskenään, jolloin osa lämpökeskuksista ajautuisi maksimiteholle ja osa minimiteholle. Lämpökeskuksia ei näin voida ohjata pelkästään yhden paine-eromittauksen perusteella, vaan lämpökeskusten ohjauksessa on huomioitava myös muiden lämpökeskusten ja pumppaamoiden ohjaukset.

Kaukolämpöverkon paine-erot tullaan muuttamaan niin sanottuun koordinoitun säädön piiriin jossa paine-erot säätyvät lämpökeskusten tehoilla ja pumppaamoiden kierrosnopeuksilla. Kuvassa (Kuva 37) on esitetty koko kaukolämpöverkon paine-eron säätömatrissi. Säätömatrississa kuvataan kunkin yksikön ohjauksen vaikutus kaikkiin paine-eromittauspisteisiin. Esimerkiksi Suomenojan yksiköiden tehoilla on suurin vaikutus Suomenojan alueen omaan paine-eroon ja lisäksi pieni vaikutus kaikkiin muihin kaukolämpöverkon paine-eroihin. Vastaavasti esimerkiksi Tapiolan lämpökeskuksella on suurin vaikutus Tapiolan, Mankkaanpuron ja Toppelundin paine-eroihin ja lisäksi pieni vaikutus myös muihin paine-eroihin.



Kuva 37. Kaukolämpöverkon paine-erosäädön säätömatriisi (6)

Talviaikana kaukolämmön kokonaiskulutuksen ollessa suurempi kuin Suomenojan kaukolämmön tuotantokapasiteetti, osa kaukolämpötehosta on tuotettava lämpökeskuksilla. Nykyisillä polttoaineiden ja sähkön hinnoilla Suomenojan So1-, So3-, So4 ja So6 -yksiköitä kannattaa ajaa täydellä teholla ja kaukolämpökeskuksia vain tarpeen mukaan. Tällöin Suomenojan yksiköt eivät osallistu kaukolämpöverkon paine-erojen säätöön vaan paine-erot säädetään kaukolämpökeskusten tehoja ohjaamalla.

Keväällä, kun kaukolämmön kokonaiskulutus laskee, lämpökeskuksia ajetaan alas operaattorin parhaaksi katsomassaan järjestyksessä. Käyntiin jäävät lämpökeskukset, kuhan niitä on vähintään kolme tuotantoyksikköä, säätävät verkon paine-erot. Kun kulutus laskee pienemmäksi kuin Suomenojan kaukolämmöntuotanto on, Suomenojan yksiköiden tehoa alettava pienentää kaukolämmön kulutusta vastaavaksi. Tämä tilanne ilmenee verkossa siten, että paine-eroja säätävien kaukolämpökeskusten tehot laskevat minimirajalle, ja siitä huolimatta paine-erot verkossa nousevat. Tässä tilanteessa kaukolämpölaitoksia on ajettava alas operaattorin parhaaksi katsomassa järjestyksessä ja vähintään yksi Suomenojan yksiköistä on otettava valittava mukaan paine-eron

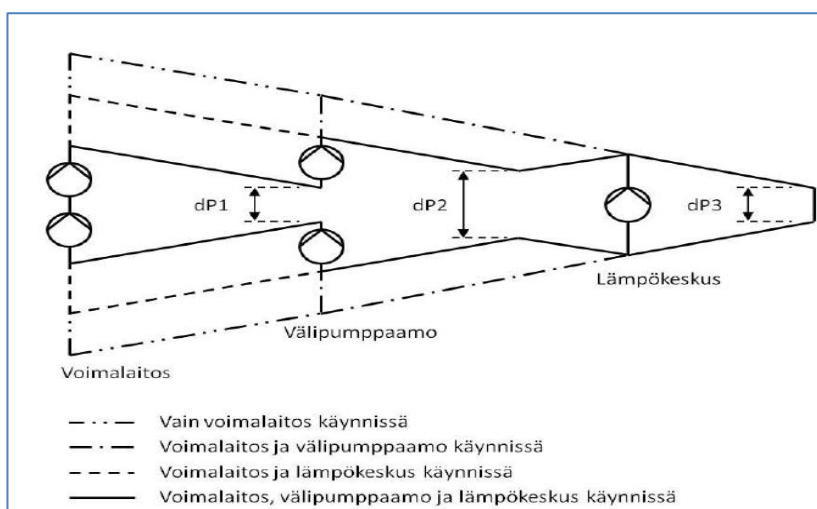
säätöön. Tällöin Suomenojan säätöön valitun Suomenojan yksikön teho laskee, kunnes tasapaino kaukolämmön tuotannon ja kulutuksen välillä saavutetaan ja paine-erot ta-
saantuvat haluttuihin asetusarvoihin.

Kesällä, kun kulutus on pientä ja lämpökeskuksia ei ole käytössä, Suomenojan teho riittää kattamaan koko verkon kulutuksen. Tällöin vähintään yhden Suomenojan yksi-
kön tehon on oltava paine-erosäädöllä. Syksyllä, kun kaukolämmön kulutus kasvaa, on
lämpökeskuksia käynnistettävä Suomenojan paine-eroa säättävät yksikön tullessa täy-
delle teholle. Suomenojan yksikkö voidaan ottaa pois paine-erosäädöltä ja ajaa sitä
vakioteholla.

6.3 Pumppaamoiden vaikutukset verkon paine-erojen säätöihin

6.3.1 Pumppaamoiden tehtävä

Välipumppaamoiden tehtävä on tasata kaukolämmön tuotannon ja kulutuksen epäta-
saista jakautumista verkoston eri osissa. Suuressa verkossa, jossa valtaosa lämmöstä
tuotetaan yhdellä suurella lämmityslaitoksella tai voimalaitoksella, osa tarvittavasta
pumppauksesta on hoidettava verkkoon sijoitettujen välipumppuasemien avulla. Suu-
ren lämmöntuottajan pumppujen tarvittava nostokorkeus voisi muuten ylittää verkon
rakenteellisen maksimipaineen tai kuluttajalaitteiden maksimipaine-eron. Kuvassa
(Kuva 38) on esitetty kaukolämpöverkon yhden haaran painepiirroksiset erilaisissa ajoti-
lanteissa.



Kuva 38. Kaukolämpöverkon yhden haaran painepiirroksiset

Pumppaamalla voidaan siirtää toteutettua tehoa verkon osasta toiseen, mutta kokonaistehoon ne eivät vaikuta. Tämä näkyy verkon paine-eroissa siten, että esimerkiksi menopumpun pyörimisnopeuden kasvattaminen lisää verkon paine-eroa pumpun paine-puolella ja vastaavasti pienentää paine-eroa pumpun imupuolella, mutta keskimääräiseen koko verkon yli mitattuun paine-eroon pumput eivät vaikuta.

Espoon kaukolämpöverkossa pumppausasemia on yhteensä 12. Kaikilla pumppaamoilla on menopumput ja osalla myös paluupumput. Kaikkia pumppaamoita ohjataan lämpökeskusten tavoin Suomenojan keskusvalvomosta käsin. Pumppaamoilla on vain pyörimisnopeussäädöt, jotka operaattori asettelee (Taulukko 5). Taulukossa on esitetty pumppujen pyörimisnopeuksien ohjausalueet.

Taulukko 5. Pumppaamoiden meno- ja paluupumppujen ohjausalueet.

Pumppaamo	Menopumpun ohjausalue (rpm)		Paluupumpun ohjausalue (rpm)		Meno- ja paluupumput ohjattavissa erikseen	Pumppausuunta vaihdettavissa
	Min	Max	Min	Max		
Laajalahti	109	1090	109	1090	kyllä	ei
Olari	115	1160	115	1160	kyllä	ei
Suvela1	300	1200	-	-	-	ei
Suvela2 (Tane)	0	3000	-	-	-	ei
Sarfvik	300	1480	300	1480	ei	ei
Olarinluoma	0	3000	-	-	-	ei
Niittykumpu	0	1500	0	1500	kyllä	ei
Kilo	0	1800	0	1800	ei	kyllä
Vaisala	0	1500	0	1500	ei	ei
Kauklahti	150	2980	-	-	-	ei
Lähteranta	off	on	-	-	-	ei
Aurora	0	1500	-	-	-	kyllä

6.3.2 Pumppujen vaikutukset verkon paine-eroihin

Pumppaamot ovat verkon välityksellä vuorovaikutuksessa toistensa kanssa. Käytännössä se tarkoittaa, että kun yhden pumppaamon pyörimisnopeutta nostetaan, verkon paine-erot muuttuvat tämän pumppaamon vaikutusalueella, mutta myös muualla verkossa muiden pumppaamoiden vaikutusalueella. Näiden vuorovaikutusten selvittämiseksi verkon kaukolämpöpumpuille tehtiin askelvastekokeet.

Askelvastekokeiden aikana kaukolämmön kokonaiskulutus ja tuotanto pysyi lähes muuttumattomana. Lämpökeskuksia ei ollut käytössä, askelvastekoe suoritettiin kaikille käynnissä oleville pumppuille keväällä 2014 (Taulukko 6).

Askelvastekokeissa muutettiin askelmaisesti pumppujen pyörimisnopeuksia ja muutosten vaikutukset verkon paine-eroihin otettiin talteen kopiona operointinäytöltä. Testissä muutettiin yhden pumppaamon meno- ja paluupumppujen pyörimisnopeuksia samanaikaisesti. Askeleen koot olivat pumppaamosta riippuen noin 10 - 50 % niiden ohjausalueesta. Muiden pumppaamoiden pumppujen pyörimisnopeudet pidettiin vakiona. Askeleen jälkeen pumppujen pyörimisnopeudet palautettiin takaisin alkuperäisiin arvoihin ennen kuin siirryttiin testaamaan seuraavaa pumppaamaa. Taulukossa 6. on esitetty askelvastekokeiden tulokset. On syytä muistaa, että tässä lasketut arvot pätevät tarkasti vain tässä toimintapisteessä, koska pumppujen pyörimisnopeuden vaikutus paine-eroihin ei ole lineaarinen. Taulukossa näkyvät numeroarvot kuvaavat sitä kuinka paljon ja kumpaan suuntaan paine-eron arvo muuttuisi (mbar), jos pumppaamon ohjausta nostettaisiin yhden prosentin sen ohjausalueesta (%). Positiiviset arvot on korostettu vihreällä värillä ja negatiiviset punaisella.

Taulukko 6. Pumppaamoiden pyörimisnopeuksien vahvistukset verkon paine-eroihin

mbar/%	Sarfvik	Suvela	Suvela (Tane)	Olari	Olarinluoma	Niittykumpu	Kilo, SO suuntaan	Laajalahti
Hommaksenkaari	60.84	-4.95	-9.00	-10.45	-3.10	-3.25	-1.92	-0.16
Masala	56.90	-0.45	-4.00	-15.68	-3.10	-0.75	5.28	-5.07
Neidonkallio	45.10	8.55	-14.00	-10.45	-3.10	-0.75	1.68	-5.07
Kirkkonummi	45.10	-0.45	-14.00	-10.45	-3.10	1.75	1.68	-5.07
Kauklahti	-9.96	-4.95	-9.00	-10.45	2.90	-0.75	1.68	-0.16
Saunalahti	-13.90	-9.45	-4.00	-10.45	-0.10	-5.75	8.88	-5.07
Kivenlahti	-9.96	-9.45	-4.00	-10.45	-0.10	-3.25	5.28	-5.07
Laurinlahti	-9.96	-9.45	-4.00	-10.45	-0.10	-5.75	5.28	-5.07
Lehtimäki	-6.03	8.55	21.00	5.23	-0.10	1.75	26.88	9.65
Kaup.kallio	-9.96	-0.45	36.00	-5.23	-0.10	-0.75	26.88	9.65
Latokaski	-6.03	-9.45	-4.00	-10.45	-0.10	-0.75	-5.52	-5.07
Aurora	-9.96	13.05	1.00	5.23	-0.10	6.75	-9.12	4.74
Jorvi	-6.03	22.05	21.00	5.22	-0.10	-0.75	34.08	4.74
Suvela	-6.03	-31.95	-14.00	-20.90	-0.10	-8.25	30.48	-0.16
Karakallio	-6.03	13.05	6.00	0.00	-0.10	4.25	-16.32	19.46
Kilo	-6.03	22.05	6.00	5.22	-0.10	1.75	-34.32	9.65
Olari	-13.90	-13.95	-4.00	-31.35	-0.10	-8.25	8.88	-5.07
Mankkaanpuro	-9.96	-0.45	1.00	5.23	5.90	4.25	-5.52	-9.97
Niittykumpu	-9.96	-9.45	-4.00	5.22	-0.10	-18.25	-1.92	-5.07
Juvanmalmi	-6.03	13.05	6.00	5.23	-0.10	6.75	-9.12	4.74
L-Lahden ppaamo	-6.03	4.05	-4.00	31.35	2.90	1.75	-9.12	-29.59
Laajalahti	-9.96	4.05	-4.00	15.68	-0.10	4.25	-12.72	9.65
Tapiola	-6.03	-0.45	-4.00	20.90	2.90	4.25	-9.12	-9.97
Toppelund	-6.03	-9.45	-4.00	0.00	-0.10	-0.75	1.68	-0.16
Kalajärvi	-6.03	8.55	6.00	5.23	-0.10	6.75	-1.92	4.74
Lintuvaara	-6.03	8.55	6.00	5.22	-0.10	4.25	-16.32	19.46
Vermo2	-6.03	13.05	1.00	15.68	-0.10	6.75	-19.92	9.65
Otaniemi	-9.96	-0.45	-4.00	15.68	-0.10	4.25	-12.72	-5.07
Keilaniemi	-6.03	-0.45	1.00	20.90	-0.10	6.75	-1.92	-5.07
Suomenoja	-6.03	-22.95	-4.00	-10.45	-0.10	-8.25	8.88	-0.16

Koordinoituun säätöön otetaan mukaan verkon 10 tärkeintä pumppaamo: Suvela1, Suvela2, Olari, Niittykumpu, Kilo, Laajalahti, Sarfvik, Olarinluoma, Kauklahti ja Lähderanta. Säädön ulkopuolelle jäävät kaksi pumppaamo, Aurora ja Vaisala, koska niillä on normaalin vuoden aikana vain vähän käyttöä, eikä niiden pumppaustehoa voi säätää.

Pumppaamoiden säädön tavoitteena on, että paine-erot ovat tasapainossa pumppaamon molemmilla puolilla, eli Suomenojan puolella (menopumpun imupuoli) sekä haaran perällä (menopumpun painepuoli). Pumppuja ei siis ohjata pelkästään haaran perällä olevan etämittauspisteen perusteella vaan säädössä huomioidaan myös pumpun Suomenojan puolella olevat paine-erot. Tavoitteena on, että menopumpun imupuolella ja haaran perällä etämittapisteessä paine-erot ovat molemmat yhtä lähellä asetusarvoaan. Näin pumppaustyö saadaan minimoitua ja paine-erot ovat riittävät kaikkialla verkossa.

Kaukolämpöverkon haaran perällä olevia paine-erojen etämittauksia verrataan kunkin mittauksen omaan minimiasetusarvoon. Operaattori asettelee nämä arvot. Vastaavasti myös pumppaamon Suomenojan puolen paine-eroa verrataan sen omaan asetusarvoonsa. Myös tämän arvon operaattori voi asettaa. Sitten haaran perällä olevien paine-eromittausten vertailuarvoista valitaan pienin arvo, ja tätä verrataan Suomenojan puolelta laskettuun vertailuarvoon. Näin saatu arvo kuvaa paine-erojen tasapainoa välipumppaamon molemmilla puolilla.

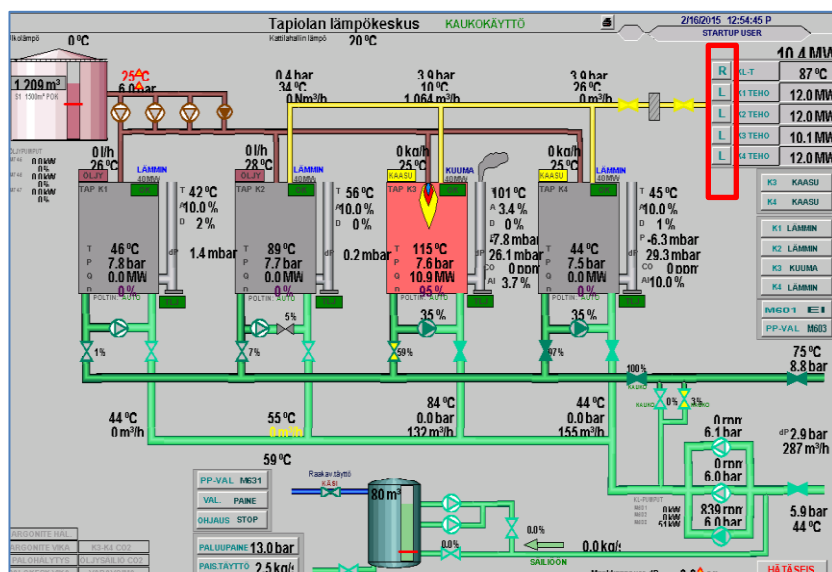
Tasapainon tavoitearvona on aina 0 bar. Kun tasapainon arvo on positiivinen, se tarkoittaa, että haaran perällä paine-erot ovat verrattain suuremmat kuin pumppaamon Suomenojan puolella. Tällöin tasapainosäädin pienentää pumppujen pyörimisnopeutta, mikä nostaa paine-eroja Suomenojan puolella ja pienentää paine-eroja haaran perällä. Vastaavasti, jos arvo on negatiivinen, haaran perällä paine-erot ovat verrattain pienemmät kuin Suomenojan puolella. Tällöin tasapainosäädin nostaa pumppujen pyörimisnopeutta, mikä laskee paine-eroa Suomenojan puolella ja nostaa paine-eroa haaran perällä. Pumppujen ohjauksessa on kuitenkin huomioitava myös muut pumppaamot sillä ne ovat verkon välityksellä vuorovaikutuksessa toisiinsa taulukon 6. mukaisesti, jotta säädöt eivät ala kilpailemaan keskenään. Tasapainosäätö toteutetaan siksi monimuuttujasäätimellä joka on adaptiivinen ja kykenee huomiomaan usean muuttujan vaikutukset kuhunkin säätöalueeseen.

Kun verkon eri osat on säädetty keskenään tasapainoon välipumppaamoiden avulla, jää lämpökeskusten ja Suomenojan voimalaitoksen koordinoitun säädön tehtäväksi säätää paine-erojen absoluuttinen taso halutulle tasolle. Toisin sanoen, lämpökeskukset ja Suomenojan voimalaitos huolehtivat siitä, että kokonaistuotanto vastaa kokonaiskulutusta, eli verkoston paine-erot ovat keskimäärin sopivalla tasolla, ja välipumppaamot huolehtivat siitä, että paine-erot ovat alueellisesti tasapainossa.

Pumpuilla on myös rajoitussäätö, jonka tehtävänä on varmistaa, että paineet pysyvät pumppujen molemmilla puolilla sallituissa rajoissa. Imupaine-eron rajoitussäätö pienentää pumpun pyörimisnopeutta, jos menopumpun imupuolelta mitattu paine-ero laskee alle 0,8 bar. Painepuolen rajoitussäätö vastaavasti pienentää pyörimisnopeutta jos painepuolelta mitattu paine-ero ylittää maksimiarvon 5 bar.

6.4 Operointi

Tapiolan, Vermon, Otaniemen ja Kivenlahden lämpökeskuksille operaattori voi valita kattilakohtaisesti mitkä kattilat ovat mukana paine-eron säädössä ja mitkä eivät. Kuva 39) on esitetty Tapiolan lämpökeskuksen kaukolämmön menoveden lämpötilan ja kattiloiden tehojen asetusravon auto/manual valinnat. Kaukolämmön koordinoitu säätö ohjaa automaattilla olevien kattiloiden tehojen asetusravoja. Manuaalilla olevien kattiloiden säädöt operaattori voi asettaa käsin.



Kuva 39. Tapiolan lämpökeskuksen operointikuva, asetusravojen säätöikkuna korostettuna

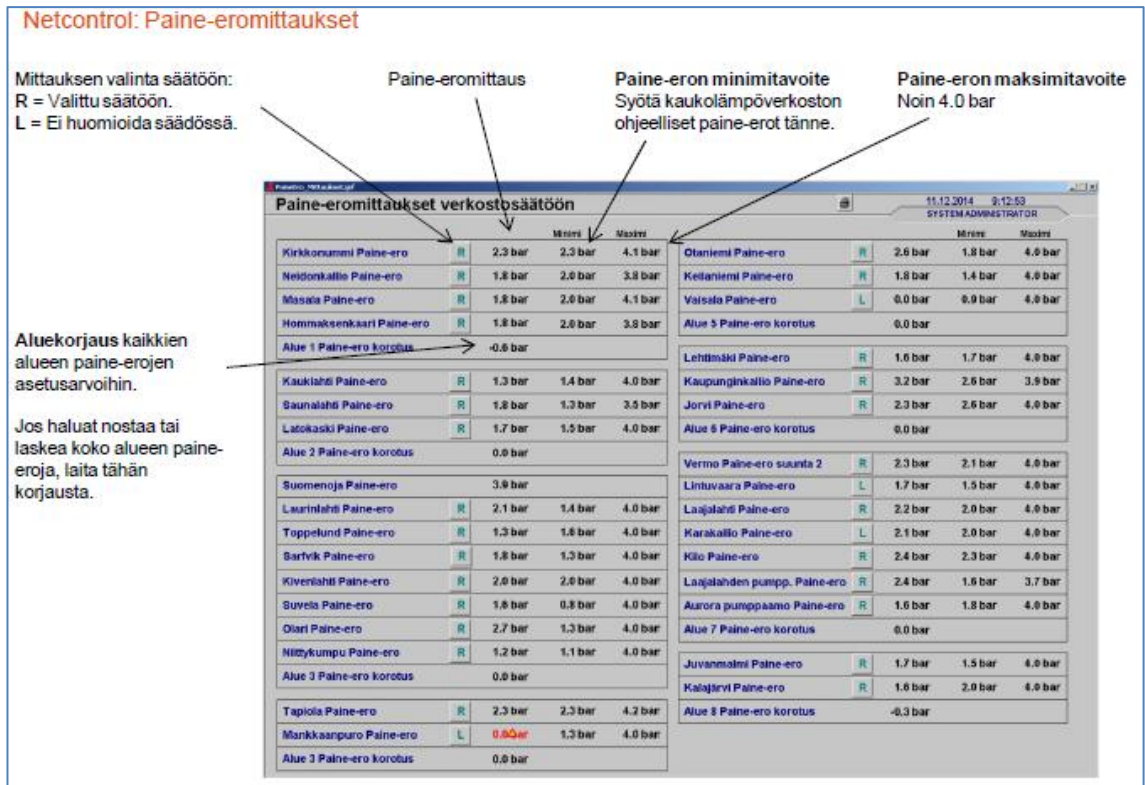
Kirkkonummen ja Juvanmalmin lämpökeskuksilla operaattori voi valita lämpökeskuskohtaisesti onko keskus mukana paine-erosäädössä. Kaukolämpöverkon koordinoitu säätö ohjaa tällöin säätöön valittujen lämpökeskusten kaukolämpövirtauksen asetusarvoa.

Kaukolämpövalvomon operaattori asettelee kullekin säädettävälle paine-eromittaukselle minimi- ja maksimiasetusarvot, kuten kuvassa (Kuva 40) on esitetty. Alkuarvoina voidaan käyttää taulukossa (Taulukko 3) esitettyjä kaukolämpöverkon ohjeellisia paine-eroja. Operaattori voi myös valita mitkä paine-eromittaukset huomioidaan säädössä ja mitkä ei. Toisin sanoen operaattori voi halutessaan jättää tiettyjä paine-eromittauksia pois säädöstä, jolloin ne eivät vaikuta lämpökeskuksen ohjauksiin.

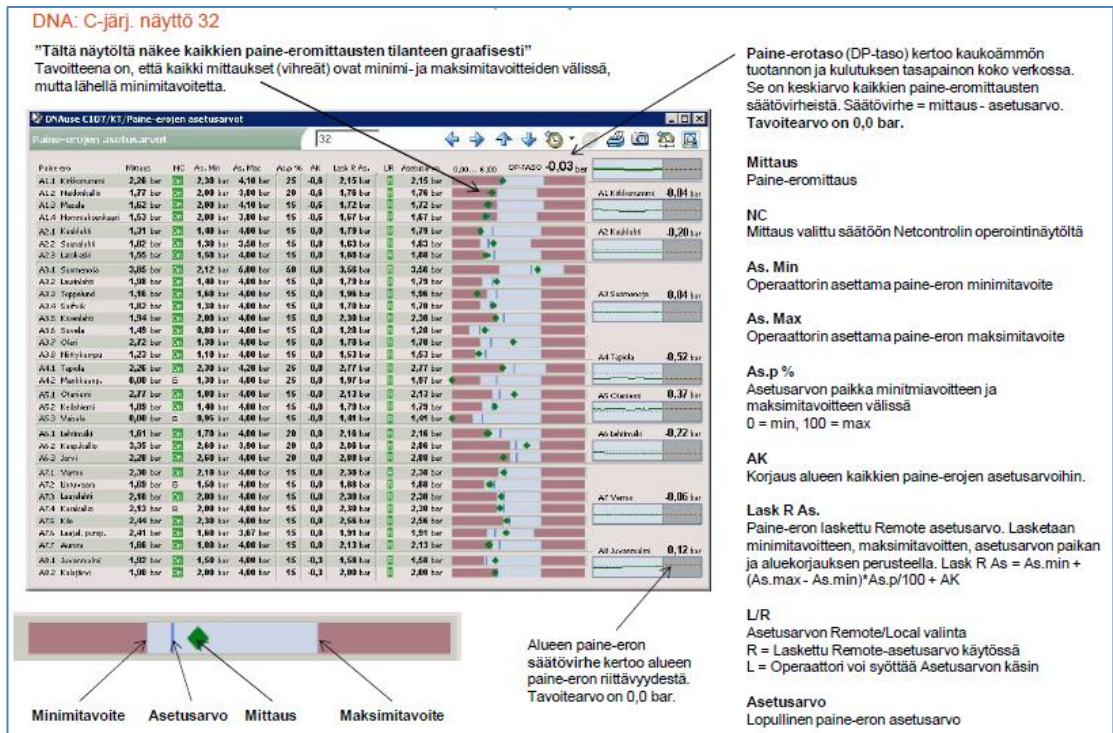
Paine-eron asetusarvot ja säätömittausten valinta				
Etäismittaus	Mittaus	Min	Max	Säädössä
Suomenoja dP	3.9	2.0	6.0	Ei
Tapiola dP	2.9	2.5	4.0	On
Mankkaanpuro dP	1.4	1.3	2.0	On
Toppelund dP	1.8	1.4	2.0	On
Vermo dP	2.7	1.5	4.0	On
Jorvi dP	2.4	1.4	2.0	On
Lehtimäki dP	1.8	1.4	2.0	On
Otaniemi dP	2.9	1.8	4.0	On
Keilaniemi dP	2.2	1.2	2.0	On
Laajalahti dP	2.8	1.3	2.0	On
Kivenlahti dP	2.0	1.5	4.0	On
Laurinlahti dP	1.9	1.5	2.0	On
Kauklahti dP	1.9	1.5	2.0	On
Kirkkonummi dP	4.3	1.5	4.5	On
Neidonkallio dP	3.8	2.2	2.8	On
Hommaksenkaari dP	2.4	0.8	2.0	On
Juvanmalmi dP	2.0	0.8	4.0	On
Kalajärvi dP	2.0	1.5	2.5	On

Kuva 40. Paine-asetusarvojen minimi ja maksimi syöttökentät

Käytännössä operaattori voi valita paine-ero asetuksen mukaan säätöön Metson operointinäytöltä (Kuva 41), mutta hän joutuu antamaan paine-eron tavoitteellisen asetusarvon Netcontrol järjestelmään (Kuva 42). Operaattori voi myös halutessaan asettaa halutulle vaikutusalueelle lisää paine-eroasetusta esimerkiksi poikkeustilanteen vuoksi.

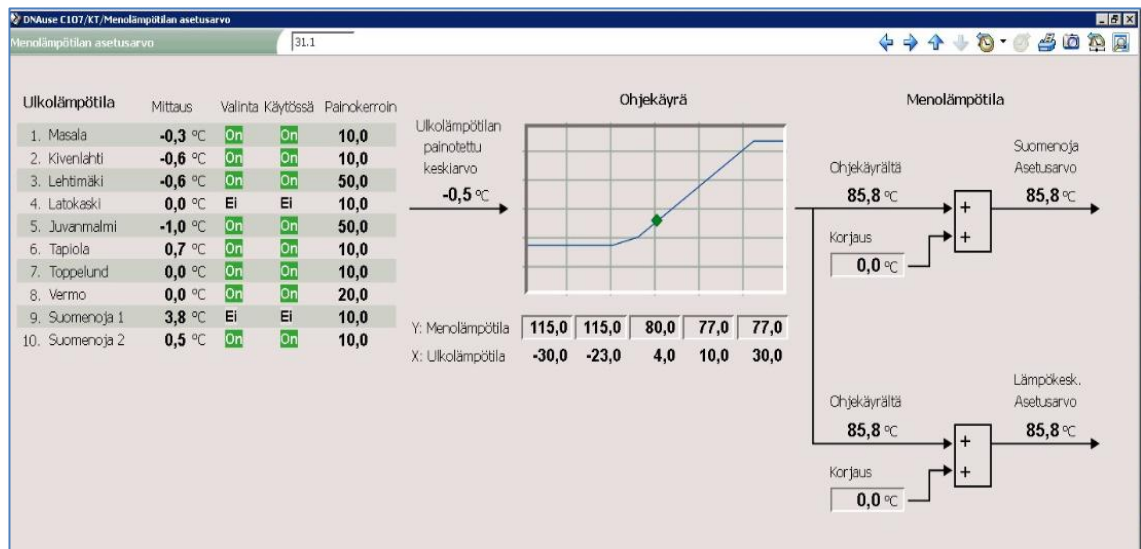


Kuva 41. Netcontrolin säätöarvojen syöttötaulukko, johon operaattori asettelee haluamansa paine-erotavoitteen



Kuva 42. Metson MPC säädön infonäyttö josta operaattori voi mm. valita säätöön mukaan luettavat alueet

Samoin operaattori voi halutessaan asettaa kaikille säätöalueille, niin Suomenojan voimalaitokselle tai lämpökeskuksille yhteisesti säätöön mukaan otettavan menolämpötilojen korjauksen. Korjauksen voi antaa lämpötilaa suositusta lisääväksi tai suositusta vähentäväksi (Kuva 43). Tällöin kaukolämpöverkon säätöä täytyy operoida lämpötilasäädön ehtojen mukaisesti.

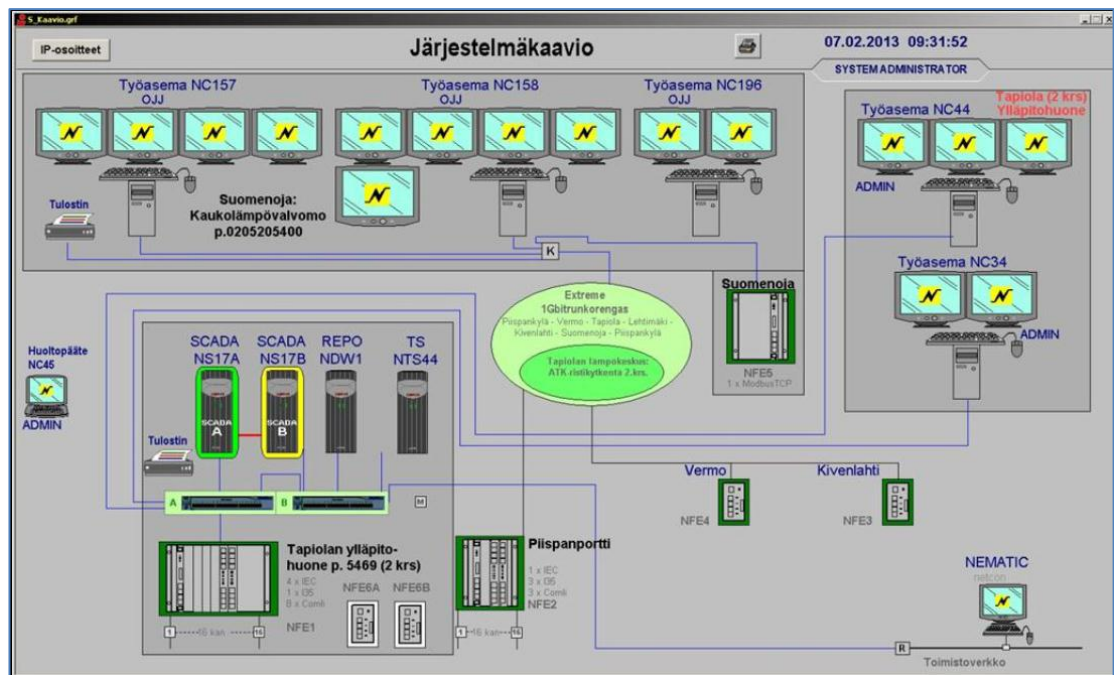


Kuva 43. Lämpötilasäädön korjausikkuna Metson prosessiohjausjärjestelmässä

6.5 Automaatiojärjestelmät

Kaukolämpöverkon koordinoitun säädön varsinainen säätölaskenta suoritetaan Suomenojan voimalaitoksen Metso DNA -järjestelmässä. Tästä syystä kaukolämpövalvomon lisättiin kevättalvella 2015 uusi Metso DNA operointiasema ja 2 kpl näyttöjä näitä toimintoja varten.

Varsinaisen lämpökeskusten ja pumppaamoiden paikallisautomaatioiden keruualustana toimii kuitenkin Netcontrol etäkäyttöjärjestelmä (Kuva 44) josta välitetään ohjaavaa tietoa Metson MPC säätimelle. Netcontrolin ja Metso DNA välistä tiedonsiirron viivettä on tarkasteltu luvussa 6.7.



Kuva 44. Netcontrol järjestelmäkaavio

6.6 Häiriötilanteiden hallinta

Voimalaitosyksikön tai lämpökeskuksen yllättävässä häiriötilanteessa kaukolämpöpumppu jää käyntiin yrittäen pitää menolämpötilan vakioarvossaan. Kun kattilan lämpöteho hiljalleen pienenee, pumppu hidastaa pyörimisnopeuttaan, eikä kylmää kaukolämpöä pumppaudu verkkoon. Alasajotilanteessa kaukolämpöverkon paine-ero pienenee kyseisellä alueella ja operaattorin täytyy ryhtyä toimenpiteisiin paine-eron nostamiseksi, kuten käynnistää häiriötä koskevalle säätöalueelle lisää tuotantokapasiteettia. Muut tuotantoyksiköt pyrkivät palauttamaan verkon tasapainon nostamalla tehojaan ja välipumppaamot joko hiljentämällä tai kasvattamalla pyörimisnopeuttaan riippuen siitä kuuluuko paine-eron romahdus pumpun paine- vai imupuolelle.

Kaukolämpöverkon vuototapauksessa paine-erot laskevat rajusti vuodon suuruudesta riippuen. Säädessä olevat kaukolämpölaitokset pysyvät käynnissä ja pyrkivät tasapainottamaan verkon paine-erot niin kauan kun kattilakohtainen virtaus ja tulopaine pysyy TLJ (Turva Lukitus Järjestelmän) asettaman rajan yläpuolella. Sääto voi nostaa vain käynnissä olevien lämpökeskusten kattiloiden tehoja, mikäli tehoja tarvitaan lisää, eli säädin nostaa tehon maksimiin paine-eron kuitenkin saavuttamatta asetusarvoa,

operaattorin on käynnistettävä lisää tuotantokapasiteettia kompensoimaan tehontarvetta.

Tietokatkos tilassa säädin pitää asetetut arvot kunnes niihin asetetaan muutos. Jos tiedonsiirtoyhteys katkeaa Metson ja Netcontrol:n välillä, käynnissä olevat lämpökeskukset ajetaan hallitusti alas tunnin kuluttua katkoksen alusta, ellei kattiloita oteta paikalliskäytölle. Pumppaamot säilyttävät pyörimisnopeutensa joka niille oli asetettu ennen tiedonsiirtokatkoa, ellei operaattori siirrä pumppaamoja paikalliskäytölle ja anna eroavia säätöarvoja.

6.7 MPC säädön siirtofunktio

Monimuuttujasäädön siirtofunktio on lausekkeen 1 mukainen.

$$G(s) = \left[K_0 + \frac{K_1}{T_1 s + 1} + \frac{K_2}{T_2 s + 1} \right] * e^{-D*s} \quad (1)$$

K_0 = Vahvistus 0, kaikissa askelvastekokeissa

K_1 = Vahvistus 1

K_2 = Vahvistus 2

T_1 = Aikavakio 1

T_2 = Aikavakio 2

D = Viive

Askelvastekokeet on jaettu pumppaamoiden ja lämpökeskusten omiin askelvastekokeisiin. Siirtofunktion parametrejä on vaihdeltu siten, että pumppaamoiden askelvastekokeissa viive on pidetty vakiona 15 sekuntia. Tämä siitä syystä että kestää noin 15 sekuntia että pumppu ehtii nostaa tai laskea kierrosnopeuden operaattorin haluamaan asetusrvoon. Lämpökeskusten askelvastekokeissa viivettä on pidetty vakiona 240 sekuntia. Tämä siitä syystä että kestää noin 4 minuuttia kun lämpökeskukselle annetaan tehonmuutuskäsky ja muutoksen aiheuttama vaikutus näkyy tuotannossa. Vahvistus 2 ja aikavakio 2 on jätetty kaikissa kokeissa arvoon nolla. Käytännössä vain Vahvistusta 1 on muutettu säätöalueittain. Joissain tapauksissa myös aikavakiota 1 on muutettu säädön laadun parantamiseksi. (8)

Tiedonsiirto Netcontrolin ja lämpökeskusten paikallisautomaatioiden sekä etämittapisteiden välillä on varsin rajallista. Etämittapisteiden mittaukset päivittyvät Netcontroliin yhteydestä riippuen noin 5 - 60 s välein. Nopeisiin, noin 5 s. päivitysväleihin päästään kuitu- ja kuparikaapeliyhteyksillä. Radioyhteyksillä päivitysvälit kasvavat noin 60 sekuntiin. Säädön toiminnan kannalta on positiivinen asia, että radioyhteyksillä toimivia mittapisteitä on verraten vähän, siitä syystä niillä on vain pieni vaikutus säädön toiminnan tarkkuuteen.

6.8 Askelvastekokeet, MPC säätimen vahvistukset

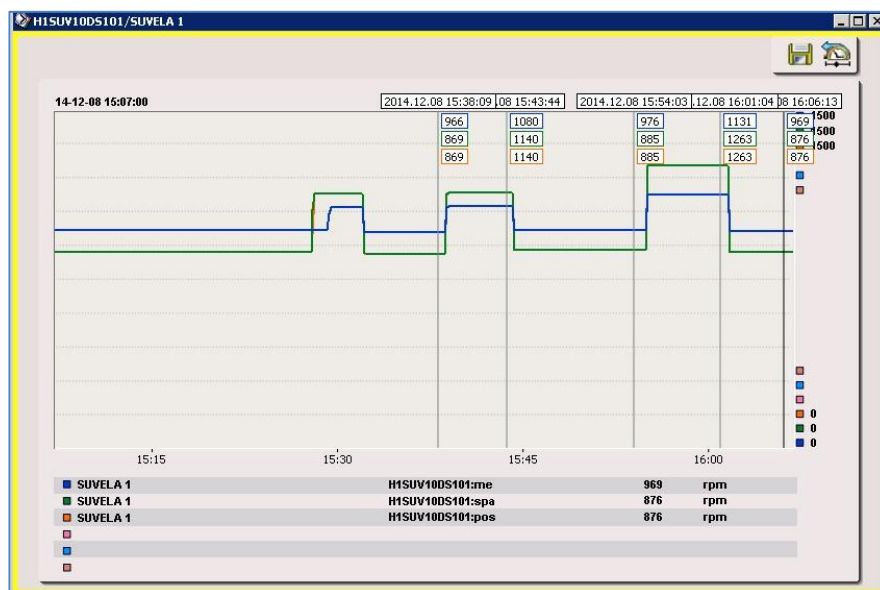
Askelvastekokeita tehtiin aikavälillä 1.1.2014 - 1.3.2015 olosuhteiden ollessa testeille edulliset. Kaikki askelvastekokeet on pyritty tekemään aikana jolloin testattavan lämpökeskuksen tai pumppaamon käyttö on ollut taloudellisesti kannattavaa. Tästä syystä ja askelvastekokeiden suuren lukumäärän takia niitä on jouduttu tekemään pitkän ajan kuluessa. Kesäaikana vastekokeita ei suoritettu siitä syystä että lämpökeskuksia ei varsinaisesti lämpimien kelien aikana tarvita, muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta. Niissäkin tapauksissa kyse on lyhytaikaisesta ajosta kaukolämpöverkon latvoilla, kuten Juvanmalmilla ja Kirkkonummella. Vastaavanlaiset olosuhteet vallitsevat Espoon kaukolämpöverkossa tyypillisesti ulkolämpötilan säilyessä viikon keskiarvolla yli 10 asteen yläpuolella. Askelvasteiden koetulokset on eritelty omiin taulukoihinsa riippuen siitä ajetaanko testiä pumppaamolle vai lämpökeskukselle. Pumppaamoiden askelvastekokeet suoritettiin kierrosnopeuksia muuttelamalla ja paine-eroja tarkastelemalla. Lämpökeskusten askelvastekokeet suoritettiin lämpökeskuksen eri kattiloiden tehoja muuttelamalla ja pääosin maakaasua polttoaineena hyödyntämällä.

Monilla Espoon kaukolämpöverkon lämpökeskuksilla on mahdollisuus polttaa myös kevyttä ja raskasta polttoöljyä, mutta askelvastekokeita ei tehty öljykäytöllä kuin Kaupunginkallion lämpökeskukselle. Kaupunginkallion lämpökeskuksella on suuri vaikutus verkon pohjoiseen siipeen jossa sijaitsee asiakaskuluttajista tärkeä kohde, Jorvin sairaala. Öljynpoltto loppuu suurilla lämpökeskuksilla, kuten Tapiolan, Otaniemen, Vermon ja Kivenlahden lämpökeskuksilla vuoden 2016 aikana kiristyvien päästövaatimusten takia, tästä syystä öljynpolton optimaalisten säätöarvojen haku jätettiin tämän työn ulkopuolelle. Askelvastekokeiden perusteella selvitetty vahvistuskertoimet ja aikavakiot selvitettiin yksi kerrallaan ja niiden vaikutusta säätöön arvioitiin muutaman päivän koeajolla.

6.8.1 Suvelan pumppaamon askelvastekokeet

Tässä luvussa käsitellään esimerkin omaisesti Suvelan pumppaamon askelvastekokeet jotka suoritettiin 10.12.2014. Pumppaamon vaikutus kaukolämpöverkon paine-eroihin on helpompi selvittää kuin lämpökeskuksen. Syy tähän on se, että pumppaamo ei itsessään tuota lämpöä, se vain jakaa sitä verkon eri osiin ja vaikutusten yhteenlaskettu arvo absoluuttisina lukuina on lähellä nollaa. Pumppaamoiden kokoero näkyy askelvastekokeiden perusteella selvitetystä tuloksista siten, että suurempi pumppaamo tuottaa kaukolämpöverkkoon suuremman paine-eromuutoksen samalla tehonostolla kuin pienempi pumppaamo. Suvelan pumppaamon askelvastekokeet suoritettiin keväällä 2014 ensimmäisen kerran, mutta kesällä 2014 tehtyjen mekaanisten muutosten vuoksi kokeet suoritettiin uudestaan talvella 2015.

Koe suoritettiin nostamalla Suvelan kahden menopumpun kierrosnopeutta yksi kerrallaan ja vaikutukset paine-eroihin kirjattiin ylös taulukkoon (Taulukko 7). Molemmilla koekerroilla kierroksia nostettiin yli 1000 rpm:n arvoon noin 800 rpm:n tasosta (Kuva 45). Paine-eroissa näkyy tietyillä alueilla nousua ja toisilla puolestaan laskua riippuen siitä tarkastellaanko Suvelan pumppaamon imu vai painepuolia. Askelvastekokeen tuloksena saadaan vahvistus, joka syötetään kunkin säätöalueen monimuuttujasäätimen parametreihin.



Kuva 45. Suvelan pumppaamon kierrosnopeuksien muutoskäyrät

Suvelan pumppaamalla on mahdollisuus pumpata kahteen eri suuntaan. Kaukolämpöverkon pohjoiseen suuntaan, Kaupunginkallion suuntaan sekä kaukolämpöverkon itäiseen suuntaan, Kilon suuntaan. Ensimmäinen koesarja tehtiin Suvelan menopumppu 1:llä Kaupunginkallion suuntaan.

Taulukon numeeriset arvot saatiin kun pumpun kierrosnopeuden muutosta verrattiin paine-eron muutosta suhteessa pumpun kierrosnopeuden lukuun. Kullakin vaikutusalueella mitattiin muutos joista laskettiin keskiarvo. Keskiarvoinen luku sijoitettiin kunakin säätöalueen vahvisteseen.

Taulukko 7. Askelvastekoetaulukko Suvelan menopumppu 1:n vaikutuksista koko verkon säätöalueisiin. Pumppaussuunta Espoon Keskus.

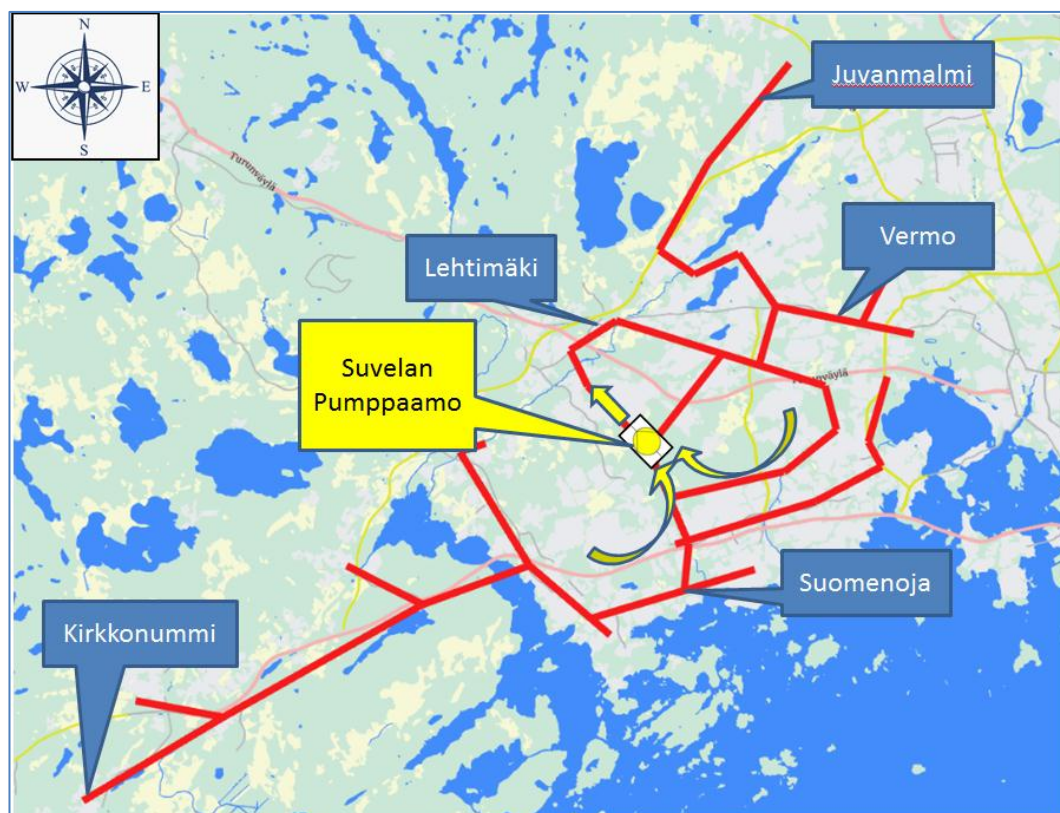
Alueet		15,38	15,43	15,54	16,01	16,06										average	Alueet	
GAIN		t1	t2	t3	t4	t5	t1->t2	gain	t2->t3	gain	t3->t4	gain	t4->t5	gain	gain	GAIN	Alueet	
mbar/RP	Ohjaus RPM	869,00	1140,00	885,00	1263,00	876,00	271,000		-255,000		378,000		-387,000			mbar/RP	Alueet	
-0,043	Kirkkonummi	3,82	3,82	3,82	3,82	3,82	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,043	
	Neidonkallio	2,89	2,89	2,89	2,89	2,89	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
	Masala	2,37	2,37	2,37	2,37	2,37	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
	Hommaksenka	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	0,000	0,000	0,100	-0,382	-0,110	-0,291	0,000	0,000	0,000	0,000		
-0,043	Kauklahti	1,95	1,67	1,67	1,67	1,79	0,120	0,443	0,000	0,000	0,000	0,000	0,120	-0,310	0,033	0,000	-0,043	
	Saunalahti	1,96	1,96	2,06	2,06	2,06	0,000	0,000	0,100	-0,382	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
	Latokaski	1,65	1,65	1,65	1,65	1,75	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,100	-0,258	-0,065	0,000		
-0,085	Suomenoja	3,63	3,66	3,69	3,69	3,72	0,030	0,111	0,030	-0,118	0,000	0,000	0,030	-0,078	-0,021	0,000	-0,085	
	Launilahti	1,77	1,77	1,79	1,81	1,81	0,000	0,000	0,020	-0,078	0,020	0,053	0,000	0,000	-0,006	0,000		
	Toppelund	1,62	1,72	1,82	1,82	1,82	0,100	0,369	0,100	-0,382	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,006	0,000		
	Sarfuk	1,76	1,87	1,87	1,87	1,87	0,110	0,406	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,101	0,000		
	Kivenlahti	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
	Suvela	1,96	1,79	2,03	1,90	2,03	-0,170	-0,627	0,240	-0,941	-0,130	-0,344	0,130	-0,338	-0,562	0,000		
	Olari	2,28	2,28	2,39	2,39	2,39	0,000	0,000	0,110	-0,431	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,108	0,000		
	Niittykumpu	2,44	2,44	2,44	2,44	2,56	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,120	-0,310	-0,078	0,000		
-0,298	Tapiola	3,38	3,28	3,49	3,49	3,49	-0,100	-0,369	0,210	-0,824	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,298	0,000	-0,298	
	Mankkaanpuro	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
-0,096	Otaniemi	3,82	3,82	3,82	3,82	3,95	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,130	-0,338	-0,084	0,000	-0,096	
	Keilaniemi	2,80	2,80	2,91	2,91	2,91	0,000	0,000	0,110	-0,431	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,108	0,000		
	Vaisala	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
0,784	Lehtimäki	1,61	1,61	1,66	2,02	1,81	0,200	0,738	-0,150	0,588	0,360	0,952	-0,210	0,543	0,705	0,000	0,784	
	Kaup.kallio	3,25	3,73	3,35	4,02	3,42	0,480	1,771	-0,380	1,490	0,670	1,772	-0,600	1,550	1,646	0,000		
	Jorvi	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
0,056	Yermo2	3,48	3,48	3,48	3,58	3,58	0,000	0,000	0,000	0,000	0,100	0,285	0,000	0,000	0,066	0,000	0,056	
	Lintuvaara	1,69	1,69	1,69	1,69	1,69	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
	Laajalahti	3,23	3,32	3,34	3,34	3,34	0,090	0,332	0,020	-0,078	0,000	0,000	0,000	0,000	0,063	0,000		
	Karakallio	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
	Kilo	3,12	3,12	3,23	3,23	3,24	0,000	0,000	0,110	-0,431	0,000	0,000	0,010	-0,026	-0,114	0,000		
	L-Lahden ppaam	3,18	3,18	3,18	3,18	2,29	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,890	2,300	0,575	0,000		
	Aurora	2,35	2,35	2,47	2,47	2,59	0,000	0,000	0,120	-0,471	0,000	0,000	0,120	-0,310	-0,195	0,000		
0,051	Juuanmalmi	2,69	2,82	2,82	2,97	2,97	0,130	0,480	0,000	0,000	0,150	0,397	0,000	0,000	0,215	0,000	0,051	
	Kalajärvi	2,71	2,71	2,83	2,83	2,83	0,000	0,000	0,120	-0,471	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,118	0,000		

Tulostaulukosta (Taulukko 7) nähdään että Suvelan kaukolämpöpumpun Kaupunginkallion suunnanvaikutukset (vahvistukset) voidaan jaotella säätöalueittain seuraavasti:

- Kirkkonummen säätöalue -0,043 mbar / rpm
- Kauklahten säätöalue -0,043 mbar / rpm
- Suomenojan säätöalue -0,085 mbar / rpm
- Tapiolan säätöalue -0,298 mbar / rpm

- Otaniemen säätöalue -0,096 mbar / rpm
- Lehtimäen säätöalue +0,784 mbar / rpm
- Vermon säätöalue +0,056 mbar / rpm
- Juvanmalmin säätöalue +0,051 mbar / rpm

Koesarjan tuloksista voidaan todeta että Suvelan pumppaamon kierrosluvun nostolla on negatiivinen vaikutus Espoon kaukolämpöverkon eteläiseen, läntiseen ja itäiseen osioon, mutta positiivinen vaikutus pohjoisiin osiin. Koesarjan tulokset ovat myös järjestyksessä kun tarkastelee Espoon kaukolämmön verkostoa, Suvelan pumppaamon sijaintia ja vaikutusalueita (Kuva 46).



Kuva 46. Suvelan pumppaamon vaikutuskuva pohjoisessa siivessä pumpattaessa Espoon Keskustan suuntaan.

Toinen koesarja suoritettiin Suvelan menopumpulla 2 Kilon suuntaan. Kokeen tulokset on esitetty taulukossa (Taulukko 8).

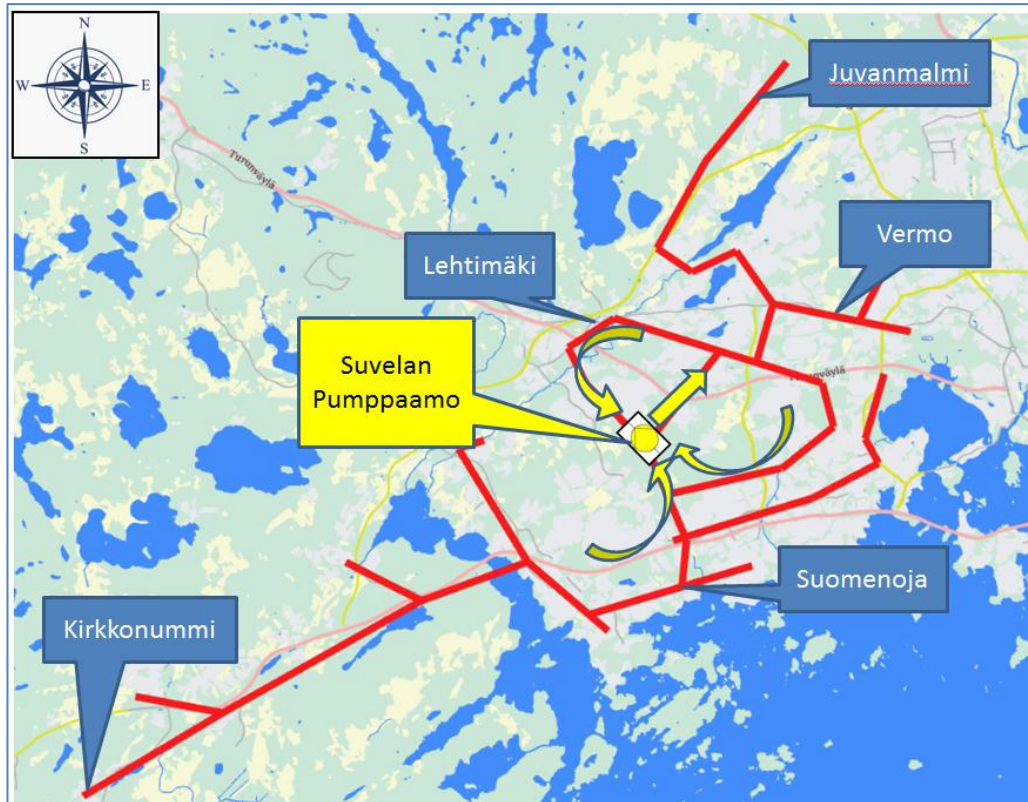
Taulukko 8. Askelevastekoetaulukko Suvelan menopumppu 2:n vaikutuksista koko verkon säätöalueisiin. Pumppaussuunta Kilo.

Alueet		16:15	16:20	16:26	16:33	16:40										average	Alueet	
GAIN		t1	t2	t3	t4	t5	t1->t2	gain	t2->t3	gain	t3->t4	gain	t4->t5	gain	gain	GAIN	M	
M	Ohjaus	1923,00	2403,00	1922,00	2411,00	1930,00	480,000		-481,000		489,000		-481,000					
-0,073	Kirkkonummi	3,82	3,82	3,82	3,82	3,82	0,000	-0,114	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,029	-0,073
	Neidonkallio	2,89	2,87	2,98	2,98	2,98	-0,020	-0,074	0,110	-0,431	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,128	
	Masala	2,37	2,37	2,37	2,37	2,37	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
	Hommakseenkaa	1,55	1,55	1,69	1,69	1,69	0,000	0,000	0,140	-0,549	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,137	
-0,078	Kauklahti	1,79	1,79	1,90	1,90	1,90	0,000	0,000	0,110	-0,431	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,108	-0,078
	Saunalahti	2,06	2,06	2,19	2,19	2,19	0,000	0,000	0,130	-0,510	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,127	
	Latokaski	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
-0,150	Suomenoja	3,73	3,72	3,76	3,76	3,78	-0,010	-0,037	0,040	-0,157	-0,010	-0,026	0,030	-0,078	0,000	0,000	-0,074	-0,150
	Launlahti	1,83	1,84	1,85	1,87	1,94	0,010	0,037	0,010	-0,039	0,020	0,053	0,070	-0,181	0,000	0,000	-0,033	
	Toppelund	1,92	1,92	2,04	2,02	2,02	0,000	0,000	0,120	-0,471	-0,020	-0,053	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,131	
	Sarvik	1,87	1,87	1,98	1,97	1,98	0,000	0,000	0,110	-0,431	-0,010	-0,026	0,010	-0,026	0,000	0,000	-0,121	
	Kivenlahti	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
	Suvela	2,03	1,90	2,19	1,93	2,19	-0,130	-0,480	0,290	-1,137	-0,260	-0,688	0,260	-0,672	0,000	0,000	-0,744	
	Olari	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
	Niittylumpu	2,56	2,56	2,66	2,66	2,66	0,000	0,000	0,100	-0,392	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,098	
-0,118	Tapiola	3,60	3,60	3,72	3,72	3,72	0,000	0,000	0,120	-0,471	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,118	-0,118
	Mankkaanpuro	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
-0,008	Otaniemi	3,95	3,95	4,07	4,07	4,07	0,000	0,000	0,120	-0,471	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,118	-0,008
	Keilaniemi	3,03	3,14	3,14	3,14	3,14	0,110	0,408	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,101	
	Vaisala	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
0,074	Lehtimäen	1,81	1,97	1,86	2,00	2,00	0,160	0,590	-0,110	0,431	0,140	0,370	0,000	0,000	0,000	0,000	0,348	0,074
	Kaup.kallio	3,42	3,42	3,55	3,55	3,55	0,000	0,000	0,130	-0,510	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,127	
	Jorvi	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
0,205	Vermon	3,58	3,80	3,69	3,84	3,84	0,220	0,812	-0,110	0,431	0,150	0,397	0,000	0,000	0,000	0,000	0,410	0,205
	Lintuvaara	1,69	1,69	1,69	1,69	1,69	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
	Laajalahti	3,44	3,44	3,54	3,54	3,55	0,000	0,000	0,100	-0,392	0,000	0,000	0,010	-0,026	0,000	0,000	-0,104	
	Karakallio	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
	Kilo	3,24	3,46	3,43	3,71	3,46	0,220	0,812	-0,030	0,118	0,280	0,741	-0,250	0,646	0,000	0,000	0,579	
	L.Lahden ppaam	3,30	3,42	3,42	3,53	3,53	0,120	0,443	0,000	0,000	0,110	0,291	0,000	0,000	0,000	0,000	0,183	
	Aurora	2,59	2,82	2,82	2,94	2,82	0,230	0,849	0,000	0,000	0,120	0,317	-0,120	0,310	0,000	0,000	0,369	
0,313	Juvanmäki	3,09	3,27	3,16	3,28	3,28	0,180	0,664	-0,110	0,431	0,120	0,317	0,000	0,000	0,000	0,000	0,353	0,313
	Kalajärvi	3,11	3,12	3,04	3,31	3,30	0,010	0,037	-0,080	0,314	0,270	0,714	-0,010	0,026	0,000	0,000	0,273	

Tulostaulukosta nähdään että Suvelan kaukolämpöpumpun Kilon suunnan vaikutukset (vahvistukset) voidaan jaotella säätöalueittain seuraavasti:

- Kirkkonummen säätöalue -0,073 mbar/ rpm
- Kauklahten säätöalue -0,078 mbar / rpm
- Suomenojan säätöalue -0,150 mbar / rpm
- Tapiolan säätöalue -0,059 mbar / rpm
- Otaniemen säätöalue -0,005 mbar / rpm
- Lehtimäen säätöalue 0,074 mbar / rpm
- Vermon säätöalue 0,205 mbar / rpm
- Juvanmalmin säätöalue 0,313 mbar / rpm

Koesarjan tuloksista voidaan todeta että Suvelan pumppaamon kilon suuntaan pumppaavan pumpun kierrosnopeuden nostolla on negatiivinen vaikutus verkon läntiseen ja eteläiseen suuntaan, mutta positiivinen vaikutus verkon pohjoiseen ja osittain itäiseenkin suuntaan. Tämä on loogista kun tutkii kuvaa (Kuva 47), joka kuvaa kaukolämmön kiertosuuntaa pumppattaessa Kilon päin.



Kuva 47. Suvelan pumppaamon vaikutuskuva pohjoisessa siivessä pumpattaessa Kilon suuntaan.

Kun molempien Suvelan pumppaamon pumppaussuuntien vahvistukset on selvitetty, ne syötetään Metson ohjelmalogiikkaan (kuva 47.) josta ne aktivoituvat säädön parametreiksi. Säädöt syötetään kunkin mallin vaikutettavaan alueeseen, tässä tapauksessa Suvelan pumppaamon Kilon ja Suvelan pumppaamon Kaupunginkallion muuttujiin.

District Heat Manager CV7 models

CV7 models Otaniemen malli $G(s) = \exp(-D.s) \cdot [K0 + K1 / (1 + T1.s) + K2 / (1 + T2.s)]$

	MV1	SO1	MV3	SO2	SO3	SO6	MV7	TAP	VER	OTA	KIV	KIR	JUV	SAR	KÄU	SUV KI
D	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	90,0	180,0	140,0	200,0	30,0	30,0	15,0	15,0	15,0
K0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	50,000	12,000	12,500	5,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,005
T1	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	20,0	20,0	20,0
K2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
T2	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
INT	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

	SUV KA	OLA	NII	KIL	LAA	AUR	VAI	MV24	MV25	MV26	MV27	MV28	MV29	MV30	MV31	MV32
D	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
K0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K1	-0,064	0,990	0,340	0,000	-0,920	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
T1	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
K2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
T2	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
INT	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Kuva 48. Otaniemen MPC malliparametrien syöttöikkuna

Kullekin mallille on oma malliparametrien syöttöikkuna, nimettynä termillä "CV = Controlled variable". Askelvastekokeiden perusteella määritellyt vahvistukset, aikavakiot ja viiveet syötetään omiin sarakkeisiinsa, nimettynä termillä "MV = Manipulated Variable". Kuvaan on myös hahmotettu diagonaalikäyränä kunkin vaikutusalueen luonne. Otaniemen paine-eroihin vaikuttaa eniten Tapiolan, Vermon, Otaniemen ja Kivenlahden tehomuutokset, koska käyrä on niiden alueiden kohdalla korkeimmalla tasolla, tämä näkyy myös K-parametreissa, erityisesti parametrissa K1 (Kuva 48). Säättöikkunan käyttö on helppoa ja sen saa nopeasti esiin Metson EAS (Engineering Activity Server) -asemalta.

Vastaavanlaiset askelvastekokeet suoritettiin lopuille 9 pumppaamoille niinä aikoina kun niiden operointi oli verkon kannalta kannattavaa.

6.8.2 Juvanmalmin lämpökeskuksen askelvastekokeet

Tässä luvussa keskitytään esimerkin omaisesti Juvanmalmin lämpökeskuksen askelvastekokeiden suorittamiseen. Lämpökeskusten kokeet poikkeavat pumppaamoille tehtyjen kokeiden mallista siten, että paine-eromuutosta ei tarkastella kaukolämpöpumpun kierroslukumuutoksen vaan lämpökeskuskattilan tehomuutoksen suhteen.

Juvanmalmin lämpökeskuksen askelvastekokeet suoritettiin maaliskuussa 2015 kello 10:00 - 13:00. Juvanmalmin lämpökeskuksen kyseessä ollessa on helppoa olettaa että suurin vaikutus on Juvanmalmin, Kalajärven ja Vermon vaikutusalueille, sillä ne kaikki sijaitsevat Espoon kaukolämpöverkon pohjoisessa osassa.

Askelvastekokeiden tulosten perusteella tehtiin pieniä muutoksia siihen mennessä oletusasetuksina asetettuihin arvoihin. Esimerkiksi Juvanmalmin vahvistuksena oli käytetty oletusarvoa 13, se korvattiin kokeiden tulosten perusteella arvolla 10,9 (Taulukko 9).

Taulukko 9. Juvanmalmin lämpökeskuksen askelvastekokeen tulokset.

		Aikutilanne	Juvanmalmin teho nostettu	Juvanmalmin teho palautettu	t1->t2	t1->t3	du	gain*1000	gain*1000	
JUVANMALMI KL-VIRT.	M3H	159,95	252,34	143,33	92,39	-16,61	100,70			
JUVANMALMI KL-TEHO	MW	6,07	9,58	5,44	3,51	-0,63	3,82			
Kello		10:36	11:07	11:34			dy			
K.Nummi KL-paine-ero	bar	1,65	1,75	2,10	0,11	0,45	-0,03	0,000	0,695	Kirkkonummi
Neidonkallio Paine-ero	bar	1,45	1,60	1,93	0,14	0,48	0,00	0,000		Neidonkallio
Masala Paine-ero	bar	2,06	2,28	2,55	0,23	0,49	0,06	0,796		Masala
Hommaksenk. Paine-ero	bar	2,19	2,63	3,01	0,45	0,83	0,20	1,986		Hommaksenkaari
Kauklahti Paine-ero	bar	1,93	2,20	2,34	0,27	0,41	0,14	1,436	1,203	Kauklahti
Saunalahti Paine-ero	bar	2,45	2,63	2,80	0,18	0,35	0,08	0,772		Saunalahti
Latokaski Paine-ero	bar	2,04	2,31	2,46	0,27	0,42	0,14	1,400		Latokaski
KL-VERKON PAINE-ERO	bar	4,37	4,48	4,53	0,11	0,16	0,07	0,647	1,148	Suomenoja
Laurinlahti Paine-ero	bar	2,61	2,82	2,93	0,21	0,32	0,11	1,111		Laurinlahti
Toppelund Paine-ero	bar	1,17	1,17	1,17	0,00	0,00	0,00	0,000		Toppelund
Sarfvik Paine-ero	bar	2,24	2,41	2,57	0,18	0,34	0,08	0,758		Sarfvik
Kivenlahti Paine-ero	bar	2,61	2,80	2,96	0,19	0,35	0,09	0,858		Kivenlahti
Suvela Paine-ero	bar	2,59	2,91	3,03	0,32	0,43	0,19	1,850		Suvela
Ollari Paine-ero	bar	2,82	3,08	3,14	0,27	0,32	0,17	1,690		Ollari
Niittykumpu Paine-ero	bar	1,39	1,75	1,82	0,36	0,43	0,23	2,270		Niittykumpu
Tapiola Paine-ero	bar	2,37	2,67	2,79	0,30	0,42	0,17	1,726	0,863	Tapiola
Mankkaanpuro Paine-ero	bar	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000		Mankkaanpuro
Otanieni Paine-ero	bar	2,58	2,77	2,87	0,19	0,28	0,11	1,045	0,902	Otanieni
Keilaniemi Paine-ero	bar	1,87	2,16	2,28	0,29	0,41	0,17	1,661		Keilaniemi
Vaisala P-ero P101 - P202	bar	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000		Vaisala
Lehtimäki Paine-ero	bar	1,83	1,83	1,83	0,00	0,00	0,00	0,000	1,125	Lehtimäki
Kaup.kallio Paine-ero	bar	4,59	4,69	4,79	0,10	0,20	0,04	0,416		Kaup.kallio
Jorvi Paine-ero	bar	1,95	2,31	2,37	0,36	0,42	0,23	2,317		Jorvi
Vesiratt Paine-ero	bar	2,51	2,80	2,87	0,29	0,37	0,18	1,764		Vesirattaanmäki
VERMO AVG PAINE-ERO	bar	2,26	2,71	2,76	0,45	0,50	0,30	2,981	3,344	Vermo2
Lintuvaara Paine-ero	bar	1,69	1,69	1,69	0,00	0,00	0,00	0,000		Lintuvaara
Laajalahti Paine-ero	bar	2,10	2,41	2,50	0,32	0,40	0,20	1,939		Laajalahti
Karakallio Paine-ero	bar	2,13	2,13	2,13	0,00	0,00	0,00	0,000		Karakallio
Kilo Paine-ero	bar	2,29	2,76	2,87	0,47	0,57	0,29	2,912		Kilo
L-Lahden ppaamo Paine-ero	bar	2,72	3,07	3,13	0,36	0,42	0,23	2,325		L-Lahden ppaamo
Aurora ppu Paine-ero	bar	1,70	2,54	2,31	0,85	0,62	0,66	6,563		Aurora
Juvanmalmi KL Paine-ero	bar	1,50	2,78	2,11	1,28	0,61	1,10	10,931	10,931	Juvanmalmi
Kalajoki Paine-ero	bar	1,39	1,39	1,39	0,00	0,00	0,00	0,000		Kalajoki

Kuten luvussa 6.8.1 Suvelan pumppaamon askelvastekokeiden tulosten käsittelyssä, myös Juvanmalmin lämpökeskuksen askelvasteen tulokset, eli siirtofunktion vahvisteet syötetään kunkin vaikutusalueen säätölogiikkaan (Kuva 49).

CV11 Juvanmalmin malli $G(s) = \exp(-D.s) \cdot [K0 + K1 / (1 + T1.s) + K2 / (1 + T2.s)]$

	SO1	MV2	SO2	SO3	SO6	MV6	MV7	TAP	VER	OTA	KIV	KIR	JUV	SAR	KAU	MV16
D	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	30,0	240,0	30,0	30,0	30,0	30,0	15,0	15,0	15,0
K0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	11,000	0,000	0,000	0,000	11,000	0,000	-0,030	0,313
T1	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	20,0	20,0	20,0
K2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
T2	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
INT	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

	MV17	MV18	MV19	MV20	MV21	MV22	MV23	MV24	MV25	MV26	MV27	MV28	MV29	MV30	MV31	MV32
D	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
K0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K1	0,050	0,000	0,000	0,000	0,000	1,130	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
T1	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
K2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
T2	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
INT	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Kuva 49. Juvanmalmin MPC malliparametrien syöttöikkuna

Kokeita haittaava tekijä oli voimakkaasti pienenevä kaukolämmön tarve. Se johtui jyrkästä lämpötilan noususta noin 09:00 - 12:00 välisellä ajalla kun aamuaurinko nousi pilvettömälle taivaalle. Tämä oleellisesti pienensi kaukolämmön kulutusta ja pienensi tarvittavan tehon määrää verkossa. Tämä näkyi verkossa siten että paine-erot jäivät verkossa kokeiden jälkeen suuremmalle tasolle kuin ennen kokeiden aloitusta. Tästä syystä koetuloksissa huomioitiin vähentävästi 0,5 kertaa kaukolämmön virtaus joka saatiin kun lämpökeskuksen teho palautettiin ennalleen kohotetusta arvosta. Tällä toimenpiteellä lievennettiin kaukolämpöverkon turpoamisen haittaavaa vaikutusta varsinaisen säätimen toimintaan, numeerinen huomiointi näkyy punaisena sarakkeena (Taulukko 9).

6.9 Hyötytarkastelu

Tässä luvussa käsitellään Kaukolämmön koordinoitua säädön hyötyjä. Mittadataa on analysoitu aikaväliltä 1.12.2014 - 15.2.2015. Mitatussa datassa on vertailtu menolämpötilan ja paine-eron säätöjen suorituskykyä kun säädöt ovat päällä tai pois päältä. Datasta on poistettu ne ajanjaksot, jolloin yksiköt eivät olleet käynnissä ja myös ne tilanteet, jolloin menolämpötilaa säättävä kaukolämpöpumppu on ollut täydellä teholla, eli pumppujen kapasiteetti ei ole ollut tuotettuun lämpötehoon nähden riittävä. Energiateknisesti taulukossa (Taulukko 10) on tarkasteltu energiansäästöpotentiaalia kun menolämpötilaa lasketaan 2 °C vuositason keskiarvona. Menolämpötilan lasku 2 °C keskiarvolla otettiin tavoitteeksi säädön toiminnan arvioinnin yhteydessä. Oletuksena vuoden ajalle keskittyvässä laskelmassa on käytetty putkiston keskihalkaisijana DN 80 putkistoa ja että koko verkostossa olisi käytetty hyvin eristävää uutta 2Mpuk kaukolämpöputkea. Lisäoletuksena on vuoden keskimääräinen lämpötila sekä maan lämpötila.

Todellisuudessa Espoossa on myös käytössä betonikanavoitua putkea jonka eristyskyky on huomattavasti huonompi. Laskelmassa ei ole huomioitu kaukolämmön paluulämpötilan laskua joka nostaa höyryturbiinista saadun nettotehon määrää.

Taulukko 10. Energiatekninen hyötylaskelma (8:9, 203-209)

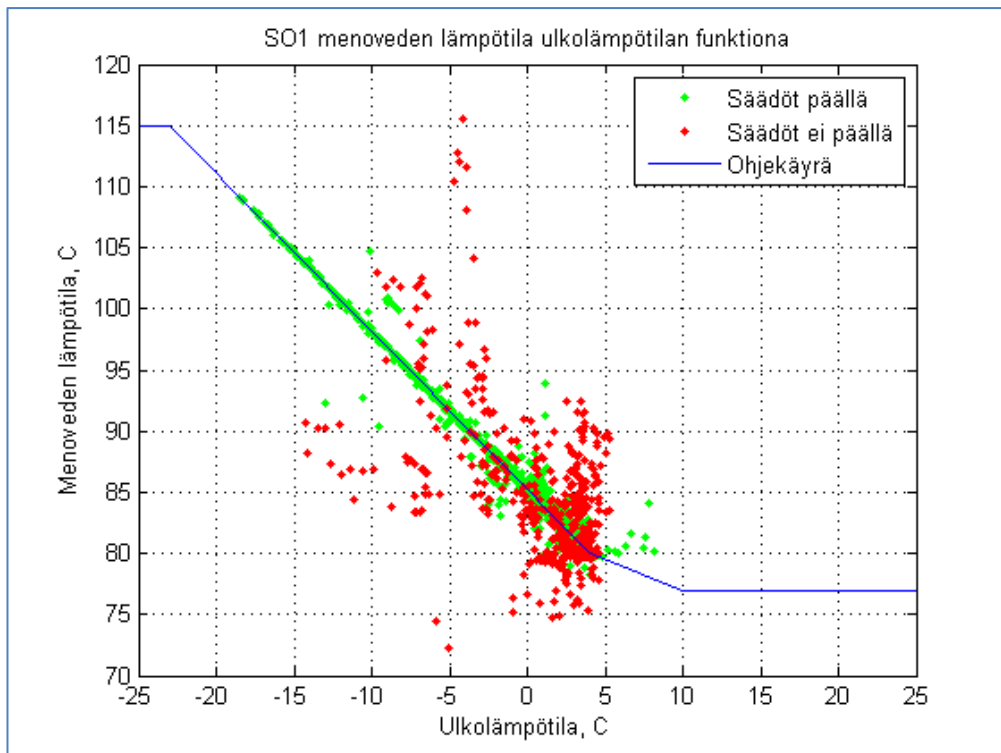
Hyötylaskelma			
Lämpöhäviöt ovat pienissä kaukolämpöverkoissa suuruusluokkaa 10...20 %, kun putkikoot ovat keskimäärin DN 50.			
Lämpöhäviöt ovat suurissa kaukolämpöverkoissa suuruusluokkaa 4...10 %, kun putkikoot ovat keskimäärin DN 150.			
Lämpövastukset (m°C/W)	Ri, eriste	Rm, keskin.	Rg, maaperä
DN 65	4,4150	0,1263	0,2173 m°C/W
Oletus --> DN 80	4,0542	0,1228	0,2080 m°C/W
DN 100	4,0542	0,1168	0,1940 m°C/W
Lämmönsiirtokerroin (W/m°C), $K = 1/(R1 + Rm + Rg)$			
DN 65	0,2101 W/m°C		
Oletus --> DN 80	0,2280 W/m°C		
DN 100	0,2291 W/m°C		
Menolämpötila			
Tm1	88 °C	Alkutilanne	
Tm2	86 °C	Tavoite	
Paluulämpötila			
Tp	45 °C		
Maaperän lämpötila			
Tg	3,4 °C	Ulkolämpötilan keskiarvo 3.4 °C	
Häviölämpövirta putkipituutta kohti (W/m), $\phi' = 2 * K [(Tm + Tp) / 2 - Tg]$			
$\phi'1$	28,780 W/m		
$\phi'2$	28,324 W/m		
Putkipituus			
L	850 km		
Häviölämpövirta (MW), $Q = \phi' * L$			
Q1	24,463 MW		
Q2	24,075 MW		
Vähennys lämpöhäviövirrassa			
Q	0,388 MW		
Tarkastelujakson pituus			
t	8760 h		
Lämpöhäviöenergia (MWh), $E = Q * t$			
E1	214 295 MWh		
E2	210 899 MWh		
Säästö lämpöhäviöenergiassa (MWh)			
E	3 396 MWh/vuosi		

Säästetyn energian määrä on melko suuri ja sen absoluuttinen hinta muodostuu käytetyn polttoaineen markkinahinnasta. Vertailun vuoksi mainittakoon että kivihiilen markkina-arvo maaliskuussa 2015 oli noin 60 €/Mwh. Tällä arvolla laskettaessa säästöpotentiaali on noin 200 000 € luokkaa vuositasolla.

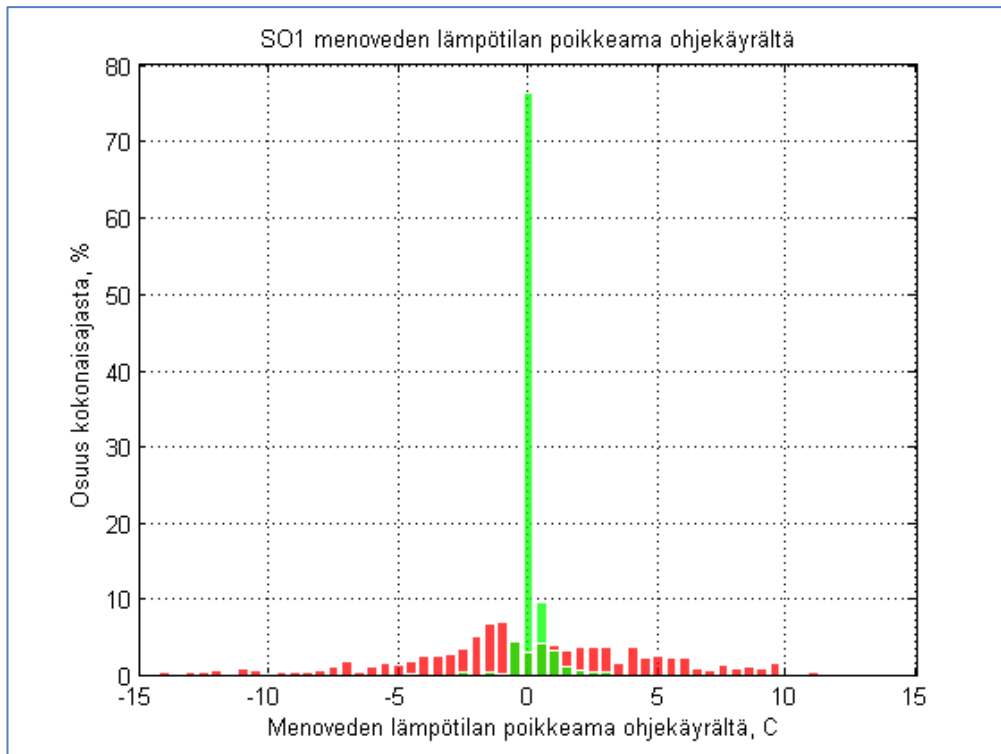
6.9.1 Suomenoja So1 hiilipölykattila ja vastapaineturbiini

Korrelaatiokäyrä (Kuva 50) ja pysyvyyskuva (Kuva 51) osoittavat että kaukolämmön menolämpötila pysyy $\pm 1,5$ °C sisällä asetusravosta vähintään 85 % ajasta kun säädöt ovat päällä. Mainittakoon vielä että jotta So1 hiilipölykattila ja höyryturbiini voivat toimia säädön aikomalla tavalla, on operaattorin kytkettävä menoveden säätö lämpötilaan ohjautuvaksi (Taulukko 11).

So1 laitoksen kyseessä ollessa säästöpotentiaali on suurimpia kaikkiin muihin tuotantoyksiköihin ja lämpökeskuksiin verrattuna sillä kyseistä tuotantoyksikköä operoidaan 99 % ajasta kivihiilellä joka on markkinahinnaltaan edullisin polttoaine Suomenojan voimalaitoksella. Menolämpötilan pysyvyyteen saavutettiin lähes 70 % parannus joka on hyvin merkittävä. Vihreät pisteet osoittavat pysyvyyden käyrällä, punaiset puolestaan edustavat tilannetta jossa on joko käytetty liikaa polttoainetta tai pumppausenergiaa riippuen siitä onko piste käyrän ylä- vai alapuolella (Kuva 50).



Kuva 50. So1 menoveden lämpötila ulkolämpötilan funktiona



Kuva 51. So1 menoveden lämpötilan poikkeama ohjekäyrältä

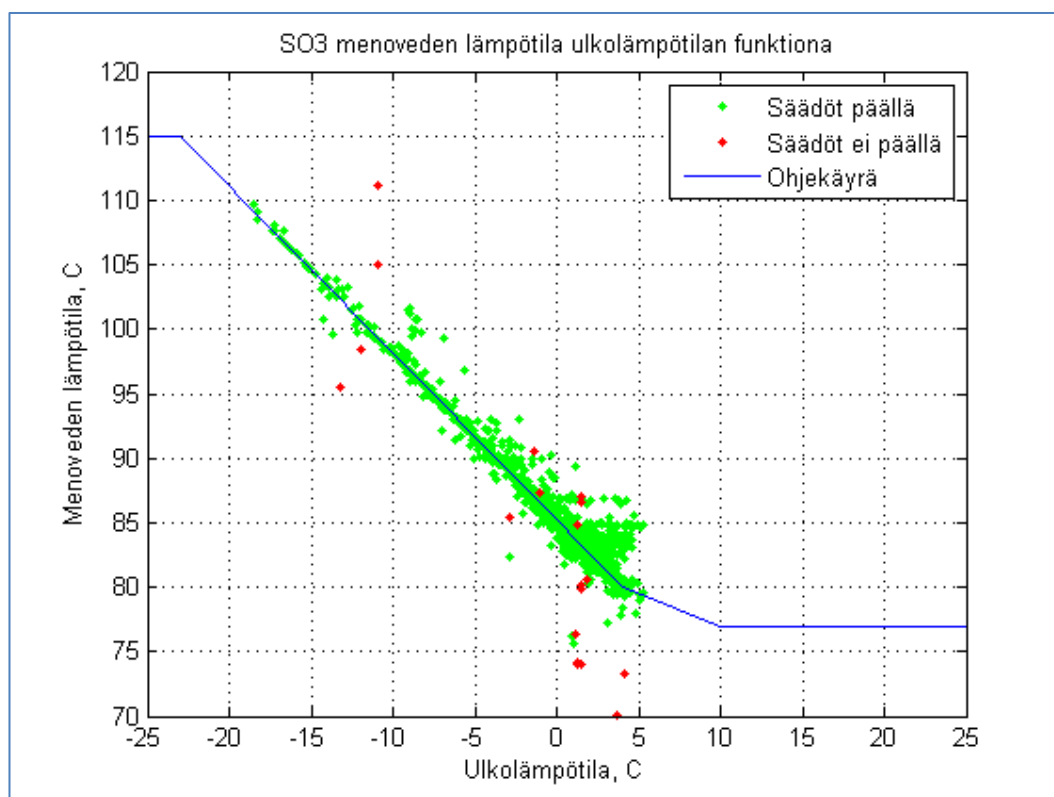
Taulukko 11. Hyötytarkastelu So1 säätöjen päälläolon suhteen

Toteutunut suorituskyky	$\pm 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ sisällä asetusravosta
Säädöt päällä	95,24 %
Ilman säätöjä	26,03 %
Parannus	69,21 %
Säätöjen käyttöaste	72,88 % tarkasteluajasta

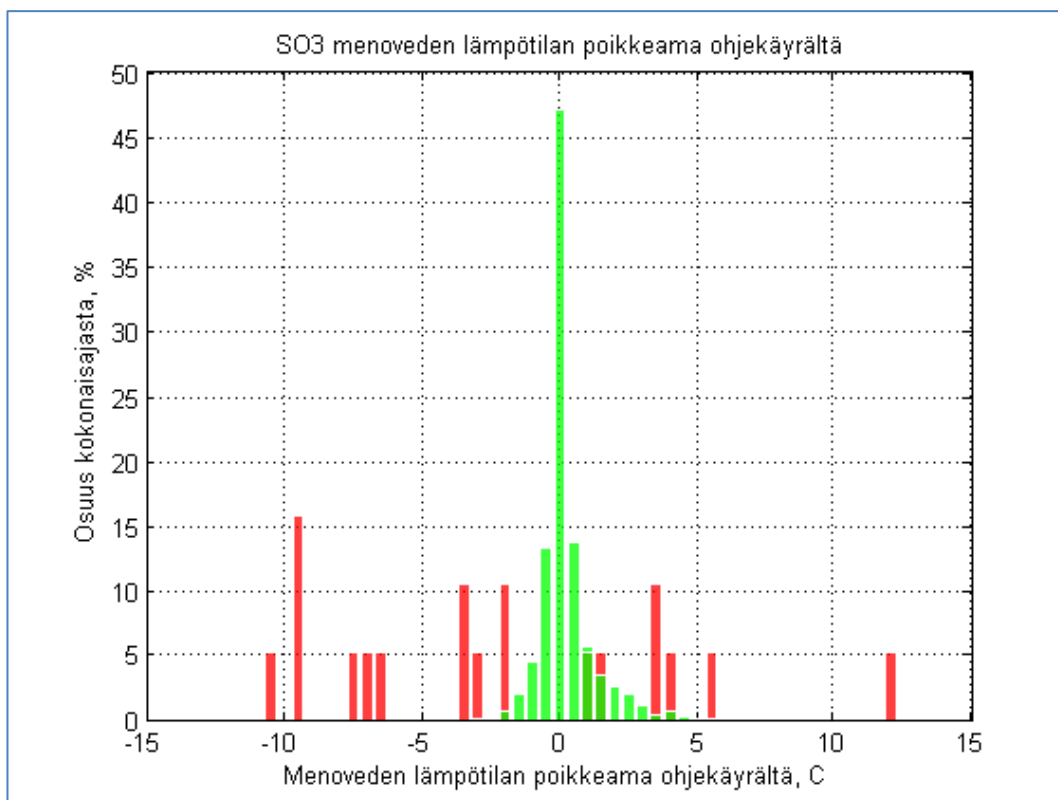
6.9.2 Suomenoja So3 kiertopetikkalaitos, kuumavesikattila

Korrelaatiokäyrä (Kuva 52) ja pysyvyyskuva (Kuva 53) osoittavat, että kaukolämmön menoveden lämpötila pysyy $\pm 2,0 \text{ }^\circ\text{C}$ sisällä asetusravosta vähintään 70 % ajasta kun säädöt ovat päällä. Suorituskykyä arvioitaessa on kuitenkin huomioitava So3 laitoksen

kohdalla se, että säädöt ovat olleet päällä lähes koko ajan, kuten taulukko (Taulukko 12) osoittaa.



Kuva 52. So3 menoveden lämpötila ulkolämpötilan funktiona



Kuva 53. So3 menoveden lämpötilan poikkeama ohjekäyrältä.

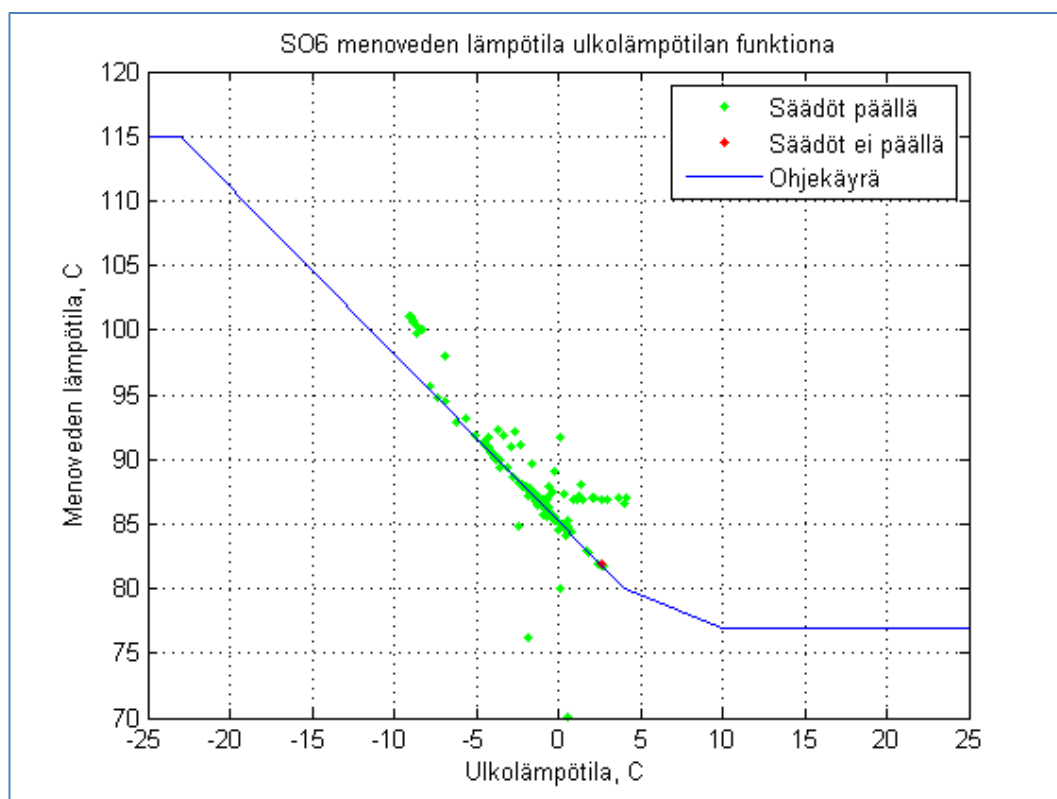
Taulukko 12. Hyötytarkastelu So3 säätöjen päälläolon suhteen

Toteutunut suorituskyky	$\pm 2,0$ °C sisällä asetusarvosta
Säädöt päällä	92,29 %
Ilman säätöjä	16,67 %
Parannus	75,62 %
Säätöjen käyttöaste	98,52 % tarkasteluajasta

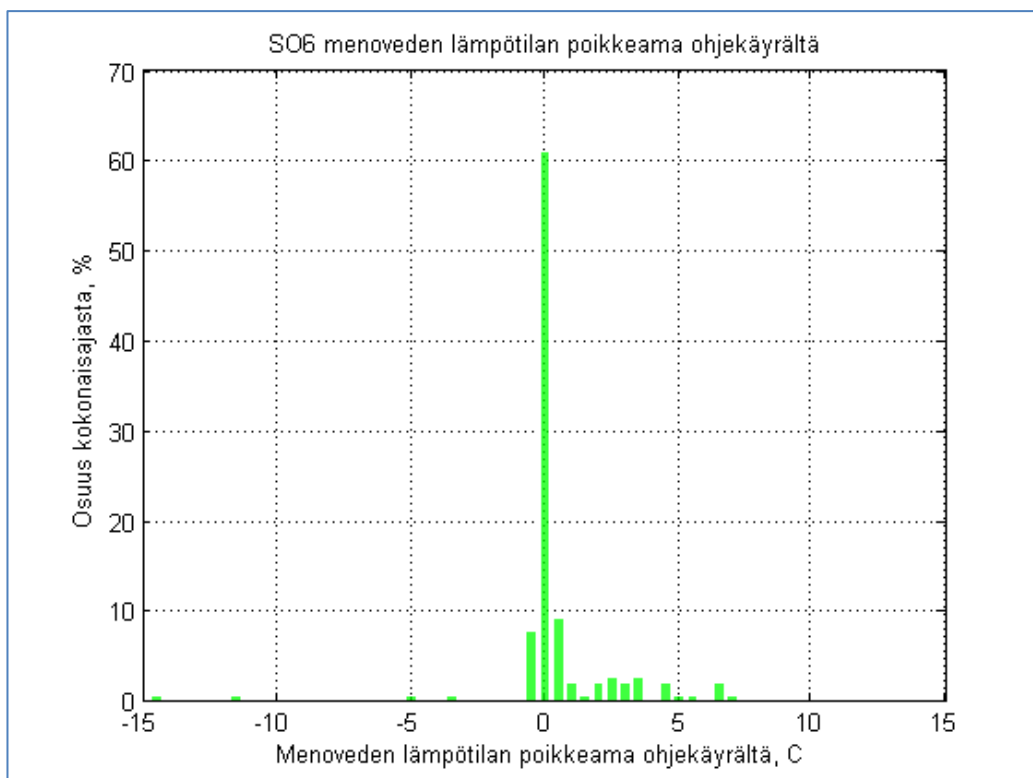
6.9.3 Suomenoja So6 kaasuturbiini ja lämmöntalteenottokattila

Korrelaatiokäyrä (Kuva 54) ja pysyvyyskuva (Kuva 55) osoittavat, että kaukolämmön menoveden lämpötila pysyy $\pm 1,5$ °C sisällä asetusarvosta vähintään 80 % ajasta. Suorituskykyä arvioitaessa on kuitenkin huomioitava So6 laitoksen kohdalla se että kuten So3 laitoskin, sen kaukolämmön menolämpötilaa pidetään säätöperusteena käytän-

nössä aina joten vertailudataa ajalta jolloin lämpötilasäätöä ei käytetä, ei ole riittävästi saatavilla (Taulukko 13).



Kuva 54. So6 menoveden lämpötila ulkolämpötilan funktiona



Kuva 55. So6 menoveden lämpötilan poikkeama ohjekäyrältä.

Taulukko 13. Hyötytarkastelu So6 säätöjen päälläolon suhteen

Toteutunut suorituskky	$\pm 1,5$ °C sisällä asetusarvosta
Säädöt päällä	82,61 %
Ilman säätöjä	0,00 %
Parannus	82,61 %
Säätöjen käyttöaste	99,30 % tarkasteluajasta

6.9.4 Lämpökeskukset

Lämpökeskusten pysyvyys paine-eroasetusten minimi- ja maksimiasetteluarvojen välissä on kuvattu liitteissä 1 - 2 pylväsdiagrammeina. Taulukko (Taulukko 14) kuvaa paine-erojen pysyvyyttä absoluuttisen arvona lämpökeskusten suhteessa. Paine-eron

pysyvyydellä tarkoitetaan sitä osuutta tarkasteluajasta, jolloin kyseinen paine-ero on voimassa olevien minimimitavoitearvon ja maksimitavoitearvon välissä. Keskiarvollisesti on saavutettu +2,8 % parannus.

Taulukko 14. Paine-erojen pysyvyys lämpökeskuskohtaisesti.

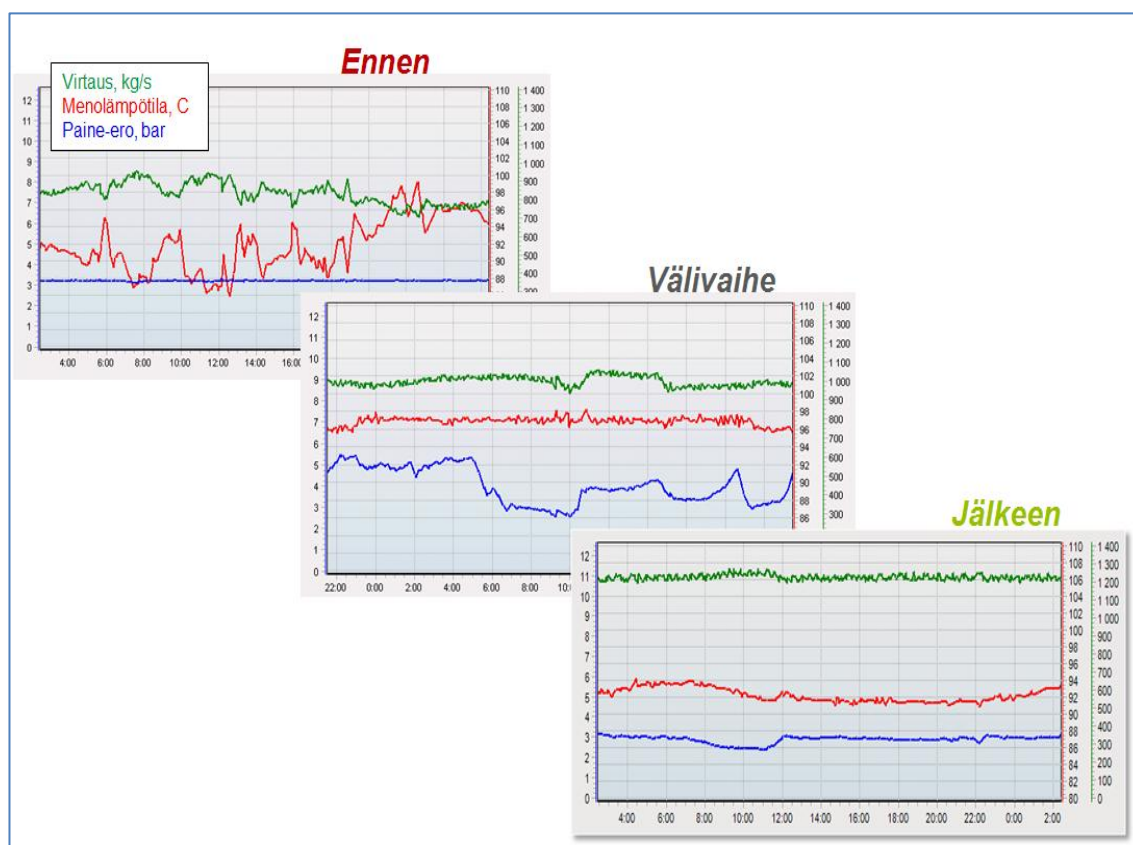
Paine-eron pysyvyys %	Säädöllä	Ilman säätöjä	Parannus
Kirkkonummi	75.4 %	54.2 %	21.2 %
Neidonkallio	70.6 %	50.9 %	19.6 %
Masala	84.1 %	73.5 %	10.5 %
Hommaksenkaari	65.8 %	63.4 %	2.4 %
Kauklahti	86.9 %	87.3 %	-0.4 %
Saunalahti	99.4 %	98.2 %	1.2 %
Latokaski	89.7 %	90.1 %	-0.4 %
Suomenoja	93.3 %	77.9 %	15.3 %
Laurinlahti	93.3 %	93.6 %	-0.3 %
Toppelund	48.6 %	56.6 %	-8.0 %
Sarfvik	85.2 %	81.8 %	3.4 %
Kivenlahti	64.8 %	69.4 %	-4.6 %
Suvela	99.4 %	98.1 %	1.2 %
Olari	98.9 %	98.9 %	0.0 %
Niittykumpu	97.6 %	98.2 %	-0.6 %
Tapiola	74.1 %	56.0 %	18.1 %
Otaniemi	95.7 %	88.7 %	7.1 %
Keilaniemi	77.2 %	65.7 %	11.4 %
Lehtimäki	53.7 %	73.9 %	-20.2 %
Kaupunginkallio	90.5 %	65.8 %	24.7 %
Jorvi	26.5 %	51.3 %	-24.8 %
Vesirattaamäki	34.6 %	74.1 %	-39.5 %
Vermo	92.3 %	92.6 %	-0.2 %
Laajalahti	95.8 %	89.4 %	6.4 %
Kilo	94.9 %	93.3 %	1.7 %
Laajalahden pumppaamo	98.4 %	96.4 %	2.0 %
Auroran pumppaamo	75.3 %	79.4 %	-4.1 %
Juvanalmi	91.3 %	75.2 %	16.1 %
Kalajärvi	80.2 %	58.9 %	21.3 %
Keskiarvo	80.5 %	77.7 %	2.8 %

Vaikka lämpökeskusten pysyvyysparannus ei prosentuaalisesti ole suuri, sillä on silti suuri käyttäjästävällisyyttä lisäävä vaikutus. Paine-erot tasapainottaa automatisoitu säätö, eikä operaattorin tarvitse puuttua arvoihin kuin poikkeustilanteissa.

Pumppausenergiana mitattuna lämpökeskusten yhteenlaskettu pumppausteho on noin 4000 kW. Oletetaan paine-erojen olevan koholla noin 10 % verran kaikilla säätöalueilla,

joka tarkoittaa noin 100 rpm kierrosnopeuden ylimääräistä nousua kussakin pumpussa. Kierrosnopeuden nosto 100 rpm tarkoittaa noin 50 kW:n tehonnousua kunkin pumpun omakäyttösähkön kulutuksessa. Kymmenen pumpun kyseessä ollessa säästetty pumppausenergia on noin 500 kW. Jos oletetaan omakäyttösähkötölkustannuksen hinnaksi noin 10 c/kWh, saadaan vuorokausitasolla säästöä jopa 1200 €. Toki tässä tarkastelussa pitää muistaa että pumppausenergiaa ei kuluteta yhtä paljon vuoden kaikkina aikoina, joten säästöpotentiaali keskittyy vuoden kylmimmille kuukausille, joulukuu, tammi ja helmikuulle.

Verkon paine-eroa tarkastellaan vuorokausitasolla säätöjen ollessa päällä (Kuva 56). Tarkasteltavalla hetkellä Suomenojan voimalaitos ajaa kolmella tuotantoyksiköllä menolämpötilasäädöllä kun samanaikaisesti lämpökeskusten tehoilla säädetään verkoston paine-ero. Trendeistä on nähtävissä että säätötulos on parantunut. Menolämpötila ja verkon yli mitattu paine-ero pysyy lähes vakiona koko vuorokauden ajan.



Kuva 56. Kaukolämmön virtaus, menolämpötila ja paine-ero ajan funktiona ennen ja jälkeen koordinoidun säätöratkaisun.

7 Käyttöönotto ja koulutus

7.1 Cyberville 1.0 ja Metson koordinoitu säätö

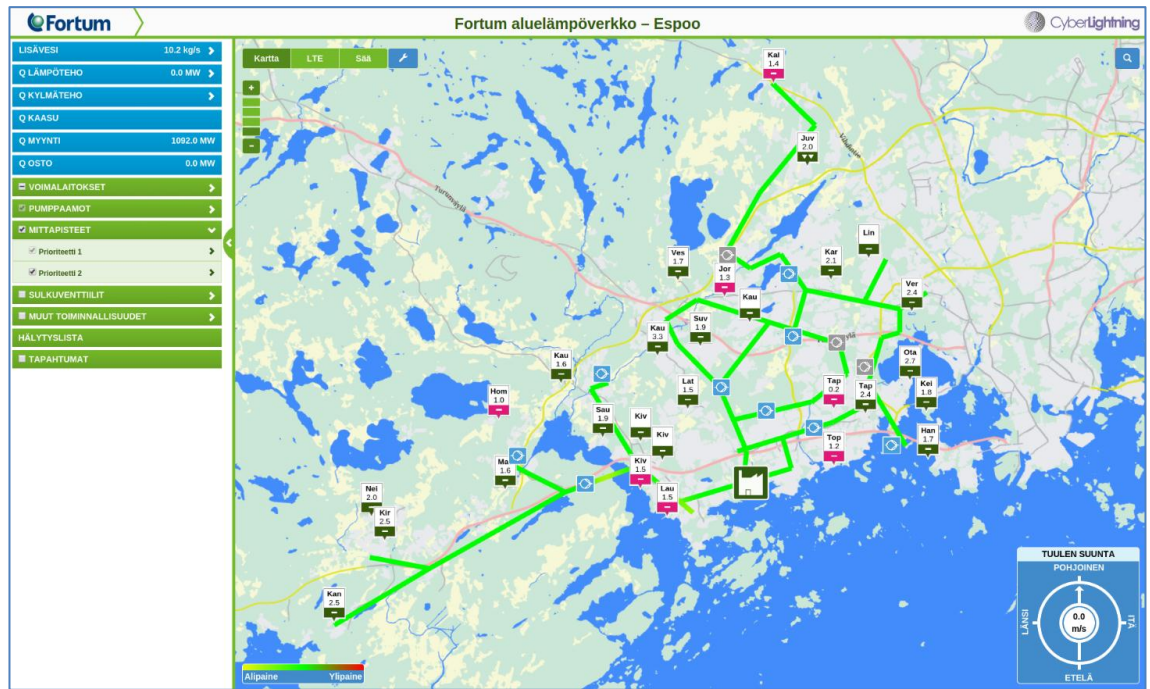
Tämän opinnäytetyön loppuvaiheessa käsitellään kuinka kaksi perusparannusta Espoon kaukolämpöverkkoon helpottavat operaattorin tehtäviä ja miten käyttöönotto on edennyt. Käytännössä operaattori on saanut kolme uutta seurattavaa ruutua joiden tehtävänä on hahmottaa kaukolämpöverkon tilanne helposti ymmärrettäväksi dataksi jonka perusteella on helppo tehdä muutoksia tarvittaessa. Periaatteessa nykyinen järjestelmä kykenee ohjaamaan kaukolämpöverkkoa automaattisesti eikä vaadi operaattorilta puuttumista tilanteeseen kuin poikkeustapauksissa. Metson säädin on helpottanut toimintojen yhtenäistämistä huomattavasti ja poistanut operaattoreiden välisiä eroja verkon operoinnissa.

7.2 Käyttöönotto ja koulutus

Molempien käyttöliittymien käyttöön tarjottiin koulutusta niisanottuna "vierihoitona" operaattori operaattorilta. Tämän opinnäytetyön tekijä selitti tehdyt uudistukset kullekin operaattorille henkilökohtaisesti ja esitteli jokaisen uuden toiminnon henkilökohtaisesti esimerkein tekemällä Suomenojan keskusvalvomossa.

7.2.1 Cyberville 1.0

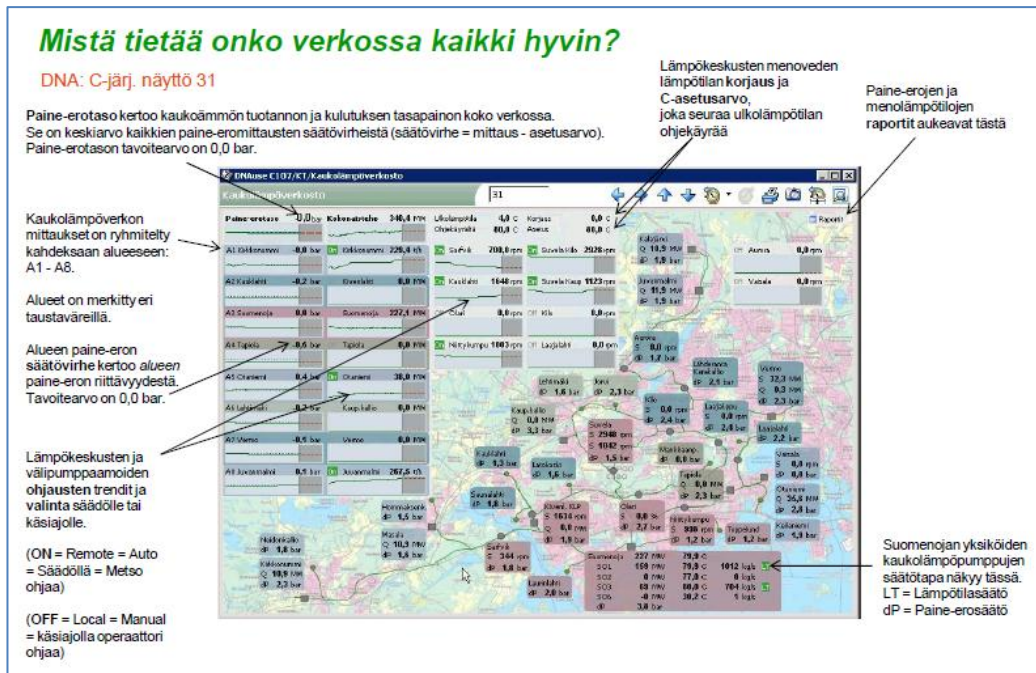
Cyberville 1.0:n ominaisuudet esiteltiin kunkin vuoron kaukolämpöoperaattorille henkilökohtaisesti. Koulutus niiden käyttöön oli erittäin helppoa, olivathan melkein kaikki operaattorit mukana ominaisuuksien kehitystyössä ja toiminnallisuudet joko tismalleen tai hyvin lähellä juuri niitä toivottuja. Cybervillen viimeistelty näkymä on hyvin jäsennelty ja sitä on erittäin selkeä lukea (Kuva 57).



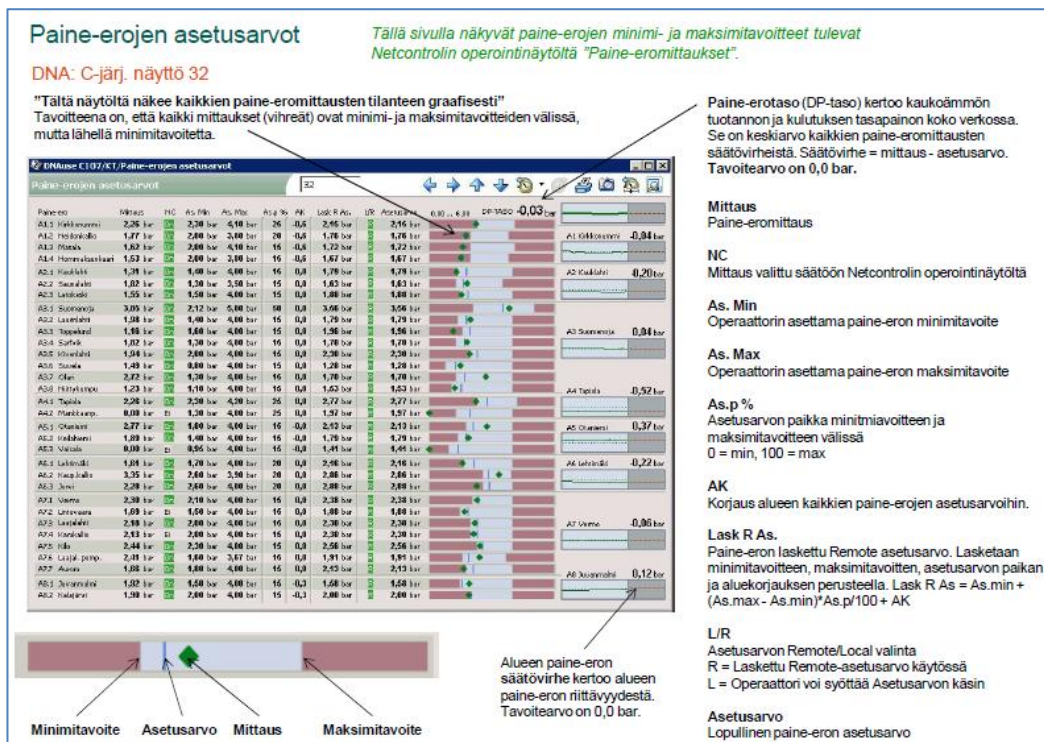
Kuva 57. Cyberville 1.0 viimeistely ulkoasu

7.2.2 Metso DNA remote säädin

Koulutus annettiin kaikille vuoroille noin kahden viikon kuluessa käyttöönotosta Tammi-kuussa 2015. Koulutusaika oli noin 2 h / käyttövuoro. Käyttökoulutukseen tehtiin omaa materiaalia kuvien muodossa jossa on selostus kustakin uudesta ominaisuudesta (Kuva 58) ja (Kuva 59). Joskin käyttöliittymä on tehty niin helpoksi että sen käyttö onnistuu todella helposti vain ohjausikkunaa katsomalla ja pääättelemällä toimintoja.



Kuva 58. Metson MPC säätimen yleisikkuna.



Kuva 59. Metson MPC säätimen arvoikkuna.

7.3 Käyttökokemukset ja kehitys

Suomenojan voimalaitoksen keskusvalvomossa työskentelee kaksi operaattoria, toinen operoi Suomenojan yksiköitä ja toinen kaukolämpöverkkoa. Tässä työssä rakennettujen kahden perustyökalun myötä molemmat voivat ohjata toistensa pulpetissa olevia yksiköitä ja näkevät selkeästi mikä verkon tila on milläkin hetkellä ja tarvitseeko automatiikan toimintoihin tehdä muutoksia manuaalisesti.

Cyberville 1.0 on operaattoreiden keskuudessa otettu vastaan menestyksenä. Tulos oli odotetunlainen, sillä kaikki kaukolämpöverkon operaattorit pääsivät osallistumaan käyttöliittymän ulkoasuun ja toimintoihin. Cyberville 1.0 tarjoaa tulevaisuuden ilmettä vanhaan 1990-luvulla kehitettyyn käyttöjärjestelmään jonka graafiset ulottuvuudet olivat erittäin alkeelliset.

Vaikka vanha automaatiojärjestelmä säilyy vielä toistaiseksi raakasiinaalien keruualustana kentältä lämpölaitosten ja pumppaamoiden paikallisautomaatiosta, Cyberville 1.0 käyttöliittymä tarjoaa huomattavasti monipuolisemman näkymän visuaalisesti verkon tilanteeseen ja on samalla mahdollistanut todella kalliin käyttöautomaation uusintainvestoinnin lykkäämisen usealla vuodella.

Kehitysnäkökohtina operaattorit olivat yksimielisiä siitä että Cyberville 2.0 tulee olla käyttöliittymä jossa kahdensuuntainen operointi on mahdollista, eli lämpökeskuksille ja pumppaamoille annettavat suorituskäskyt voitaisiin antaa Cyberville käyttöliittymän kautta. Toinen kehitysnäkökohta liittyy sään ennustevaikutuksiin kaukolämmön kulutuksen suhteessa. Seuraava versio Cyberville käyttöliittymästä osaisi ennustaa kaukolämmön kulutuksen sään muuttuessa kullakin kahdeksalla kaukolämmön vaikutusalueella. (10)

Metson MPC säätimen toiminta on ollut käyttöönoton jälkeisenä aikana moitteetonta. Maaliskuu 2015 osoitti että säädin suoriutuu paine-erojen säätämisestä hyvin vaikka kaukolämmön kulutus vaihtelee rajusti kelin ja vuorokaudenajan mukaan. Tulevaisuudessa säätimen toimintaan tehdään parannus jonka avulla säädin pystyy itse käynnistämään lämpökeskuksen tehovajeen ilmetessä ja vastaavasti sammuttamaan tehontarpeen kadotessa.

Lähteet

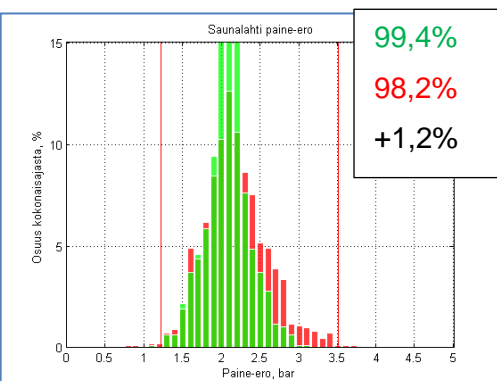
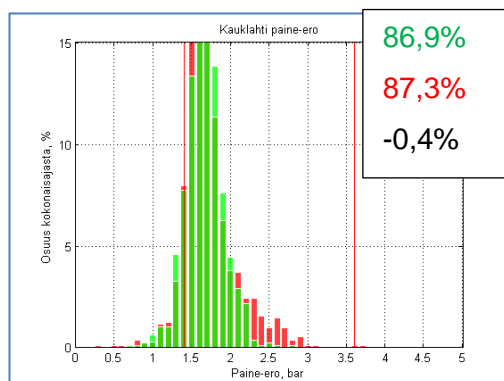
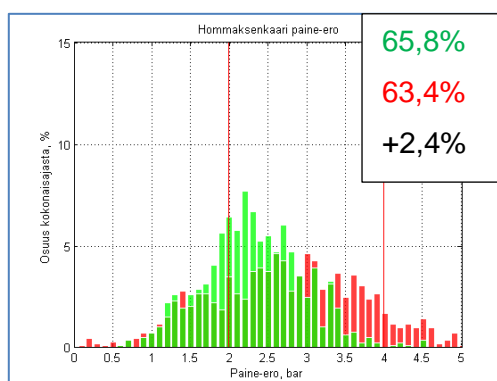
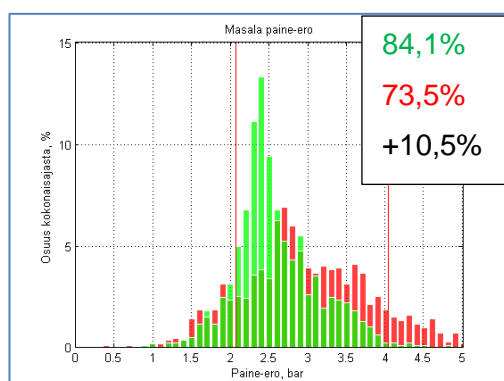
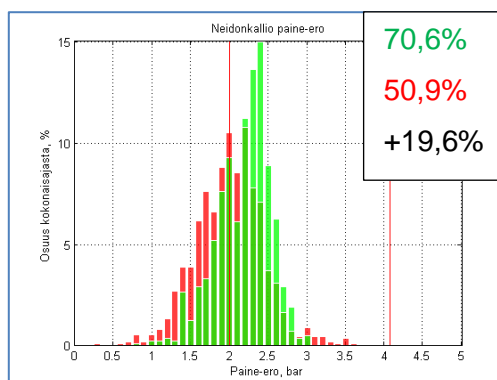
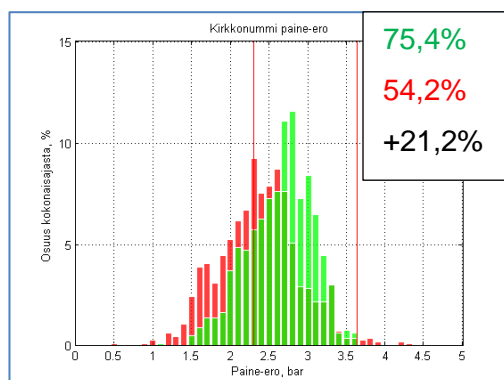
- 1 Fortum.2015. Verkkodokumentti.<<http://www.fortum.com/fi/energiantuotanto/sähkön-ja-lämmön-yhteistuotanto/suomessa/pages/default.aspx>>
- 2 Heimbürger, Harri ym. 2011. Valvomo, suunnittelun periaatteet ja käytännöt. Helsinki: Suomen Automaatioseura ry.
- 3 Sanna Jämsén.2014. Tehokkaampaan työympäristöön valvomo kehitettävä käyttäjän ehdoilla. Verkkodokumentti. <www.promaintlehti.fi/Tuotantotehokkuudenkehittaminen/Tehokkaampaan-tyoymparistoon-Valvomo-kehitettava-kayttajan-ehdoilla>
- 4 Työpaja kaukolämmön operoinnin käyttöliittymän kehittämiseksi. Espoo. Suomenojan voimalaitos. 17.4.2014.
- 5 Vesa Saarinen. System Manager. Fortum Power & Heat Oy. Cyberville asennuskaavio.2015. Espoo.
- 6 Jyri Kaivosoja. Specialist, Performance Services, Energy & Process Systems Valmet Automation. Kaukolämmön tutkimusraportti. Espoo. 2014.
- 7 Jani Uitti. Yleissuunnitteluinsinööri. Fortum Power & Heat Oy. Kaukolämmön suosituspaine-erot. 2014. Espoo.
- 8 Jyri Kaivososa. Specialist, Performance Services, Energy Process Systems, Valmet Automation. Haastattelu. Espoo. 2015.
- 9 Fortum Espoo Oy ym. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki: Energiateollisuus Ry.
- 10 Jukka Kannisto. Kaukolämpöoperaattori, Fortum Power & Heat Oy. Haastattelu 17.3.2015

Mittapisteiden minimi- ja maksimiasetusarvojen tarkastelu. Kirkkonummen, Neidonkallion, Masalan, Hommaksenkaaren, Kauklahten ja Saunalahden mittapisteet.

Säädöt päällä A%

Ilman säätöjä B%

Parannus C%



Mittapisteiden minimi- ja maksimiasetusarvojen tarkastelu. Kalajärven, Juvanmalmin, Suvelan, Tapiolan, Laajalahden ja Kaupunginkallion mittapisteeet.

Säädöt päällä A%

Ilman säätöjä B%

Parannus C%

