

Teemu Mäki

Kaukolämmön menoveden lämpötilan optimoimisen vaikutus verkon kestävyys- ja käyttöikään

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Insinöörityö

31.8.2018

Tekijä(t) Otsikko Sivumäärä Aika	Teemu Mäki Kaukolämmön menoveden lämpötilan optimoimisen vaikutus verkon kestävyys ja käyttöikä 27 sivua + 3 liitettä 31.8.2018
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Kone- ja tuotantotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Energia- ja ympäristötekniikka
Ohjaajat	Lehtori Jarmo Perttula Suunnittelupäällikkö Henriikki Nuutinen
<p>Insinööritöiden tavoitteena oli selvittää kaukolämmön menoveden lämpötilan optimoimisen vaikutusta kaukolämpöverkon kestävyys ja käyttöikä. Lujusteellisessa sekä käyttöikä tarkastelussa käytettiin kaukolämpöputkistoille määritettyä kansainvälistä standardia EN 13941. Standardissa on esitetty lämpötilan muutoksista aiheutuvista kuormanvaihteluista johtuvat jännitysvaihteluiden tyypit sekä jännitysvaihteluiden laskentaan käytettävät kaavat.</p> <p>Lähtötietoina oli vuonna 2016 tehty Valmet Oy:n Helsingin kaukolämpöverkon tehostamiseen suunnattu projekti, jonka yhteydessä esiteltiin Valmet District Heating Manager -kaukolämpöverkon optimointityökalu. Insinööritöiden kanssa samaan aikaan käynnissä oli Helen Oy:n sisäinen selvitys kaukolämpöverkon optimoimisesta sekä tuotannon ohjauksesta. Optimointiselvityksen tueksi pyrittiin selvittämään miten optimoimisesta aiheutuvat menoveden lämpötilojen muutokset vaikuttavat verkon elinkaareen ja mikä olisi hyväksyttävä optimoinnin taso.</p> <p>Kaukolämpöverkon menoveden optimoiminen ulkoilman lämpötilan mukaan toisi säästöjä kustannuksissa pienempien lämpöhäviöiden myötä. Energiavalvomo saisi myös suuntaa antavan arvon menoveden lämpötilalle ja säädön jyrkkyydelle, jotka toimisivat ohjearvona valvomon operaattoreiden tuotannon ohjaukselle.</p>	
Avainsanat	Kaukolämpö, kaukolämpöverkko

Author Title Number of Pages Date	Teemu Mäki The Effect of Optimizing the Temperature of the District Heating Flow on the Durability and Lifetime of the Network 27 pages + 3 appendices 31 August 2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical and Production Engineering
Specialisation option	Energy and Environmental Technology
Instructor(s)	Jarmo Perttula, Senior Lecturer Henrikki Nuutinen, Development Manager
<p>The aim of the thesis was to discover how optimizing the heat of the district heating water affects the durability and service life of the district heating network. The international standard EN 13941 defined for district heating pipelines was used when the network's strength and life cycle were examined. The standard describes the types of the stress fluctuations caused by temperature changes and the formulas used for calculating the stress variations.</p> <p>Baseline data of the thesis was Valmet's project aimed at enhancing the district heating network of the City of Helsinki. Valmet's project carried out in 2016 and the project introduced the district heating optimizing tool named Valmet District Heating Manager. The thesis was written at the same time as Helen's internal study on optimizing the district heating network and controlling the production. The aim of the thesis was to support Helen's internal study and, in addition, to analyze how the changes in supply water temperatures caused by optimizing affect the life cycle of the network and what the ideal level of optimizing would be.</p> <p>As a result, it was discovered that optimizing the flow of the district heating network by outdoor air temperature would decrease costs because of lower heat losses. Optimizing would also provide an indicative value for the flow temperature and the steepness of the control for the energy control room. This would act as a guideline for controlling the production of the operators.</p>	
Keywords	District heating, District heating network

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Helen Oy	2
2.1	Yritys	2
2.2	Kaukolämpö Helsingissä	3
3	Kaukolämpöjärjestelmä	4
3.1	Järjestelmän toiminta	4
3.2	Järjestelmän käyttö	5
4	Putkistorakenteet	6
4.1	Liikkuvat rakenteet	6
4.1.1	Betonikanavajohdot	6
4.1.2	Muovisuoja-kuorijohto	7
4.2	Kiinnivaahdotetut johdot	8
4.2.1	Rakenteet	8
4.2.2	1Mpuk ja 2Mpuk	10
4.3	Kiintopisteet ja tasaajat	12
5	Putkiston elinkaari	13
5.1	Vaatimukset	13
5.2	Lämpötilan muutoksista aiheutuvat jännitysvaihtelut	13
5.3	Lujuustarkastelu	15
6	Menoveden lämpötilat	16
6.1	Menoveden lämpötilan säätäminen	16
6.2	Menoveden lämpötilat laitoksilla	18
6.3	Menoveden lämpötilat pumppaamoilla ja tunneleissa	19
6.4	Menoveden lämpötilat asiakkailta	20

7	Verkon menoveden lämpötilan optimointi	21
7.1	Tavoitteet	21
7.2	Toteutus	22
8	Optimoinnin vaikutukset	23
8.1	Verkon kestävyys	24
8.2	Verkon käyttöikä	25
9	Yhteenveto	26
	Lähteet	27
	Liitteet	
	Liite 1. 2Mpuk-johdon tyyppikuva	
	Liite 2. 1Mpuk-johdon tyyppikuva	
	Liite 3. Laskelmat	

Lyhenteet

1Mpuk	Kiinnivaahdotettu kaukolämpöputki kahdella virtausputkella
2Mpuk	Kiinnivaahdotettu kaukolämpöputki yhdellä virtausputkella
DN	Putken nimellishalkaisija
Lämmityskausi	Se aika vuodesta, jolloin rakennuksia lämmitetään
PEH	Polyeteeni suojakuori kaukolämpöputkissa
SFS-EN	Suomen standarditoimiston julkaisema kansainvälinen standardi
sisKMR	Kaukolämpöverkon lujuuslaskentasovellus
VuZ	Vuosaaren välipumppaamo

1 Johdanto

Helsingin kaupungin omistama energiayhtiö Helen Oy on tutkinut mahdollisuutta parantaa energiatehokkuutta automatisoimalla lämmön tuotantoa ja jakelua. Kaukolämpöverkolla automatisointi tarkoittaa menoveden lämpötilojen optimoimista vuorokautisten ulkoilmanlämpötilojen sekä asiakkaiden kulutuskäyttäytymisen mukaan.

Tässä insinööriyössä selvitetään kaukolämmön menoveden lämpötilojen muutoksien vaikutusta kaukolämpöverkoston kestävyYTEEN ja käyttöikään. Selvityksen tarkoituksena on antaa energiavalvomolle raja-arvoja vuorokautisten lämpötilamuutosten vaihteluvälistä siten, ettei verkkoon kohdistu liian suuria rasituksia, eikä niiden myötä synny putkiston elinkaareen muutoksia. Mikäli menoveden lämpötilat olisivat hyvin lähellä kulutuksellista optimia, saavutettaisiin huomattavia säästöjä lämpöhäviöissä. Lämpöhäviöiden määrä vaikuttaa suoraan tuotantolaitosten polttoainekustannuksiin, pienemmillä lämpöhäviöillä syntyy pienemmät polttoainekustannukset.

Lämpöverkkoon kohdistuvia rasituksia lähdettiin selvittämään tämänhetkisten menoveden lämpötilojen muutoksien kautta. Rasituksia tutkittaessa käytettiin standardiin perustuvaa laskentaa, jossa jännitysvaihtelut kuvaavat lämpötilan muutoksia. Koska lämpötilaoptimointi ei ole vielä käytössä, pyrittiin verkkoon kohdistuvia rasituksia simuloimaan mahdollisilla toteutettavissa olevilla lämpötilatasoilla.

2 Helen Oy

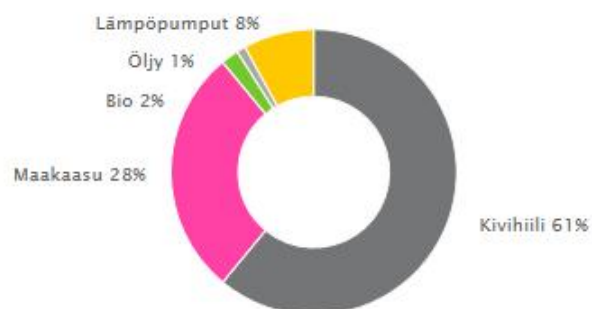
2.1 Yritys

Helen Oy on Helsingin kaupungin omistama energia-alan yritys, joka tuottaa ja myy sähköä, lämpöä ja jäähdytystä. Helen tunnettiin vuoteen 2015 asti nimellä Helsingin Energia. Yrityksellä on sähkönasiakkaita noin 400 000, kaukolämpöasiakkaita noin 15 000 ja kaukojäähdytysasiakkaita noin 1 500. Helen Oy:n kaukolämmöntuotanto kattaa Helsingin lämmöntarpeesta yli 90 %. Helen on lisäksi Suomen suurin kaukojäähdytyksen tuottaja. (Toimintakertomus 2017.)

Helen Oy:llä on Helsingissä kolme voimalaitosta ja 11 lämpölaitosta. Voimalaitoksista kaksi, Hanasaari ja Salmisaari, sijaitsevat keskustan läheisyydessä. Vuosaaren voimalaitos sijaitsee Helsingin Vuosaaren sataman läheisyydessä Itä-Helsingissä. Sähkön ja lämmöntuotantoon Helen Oy käyttää pääasiassa hiiltä ja maakaasua. Lisäksi kaukolämpöä ja kaukojäähdytystä tuotetaan Katri Valan pumppulaitoksella, jossa hyödynnetään myös jätevesistä saatua energiaa. Lämmöntuotannossa uusiutuvien energialähteiden käyttö on kasvussa, ja vuonna 2017 noin 10 % myydystä kaukolämmöstä tuotettiin lämpöpumpuilla ja pelleteillä. Kaukolämmön energialähteet on esitetty kuvassa 1. (Energiantuotanto Helsingissä 2017.)

Helen Oy:n toimitusjohtaja on Pekka Manninen, ja vuonna 2017 liikevaihto oli 805 miljoonaa euroa ja liikevoitto 81 miljoonaa euroa. Työntekijöitä yrityksellä on hieman yli 1000. (Toimintakertomus 2017.)

KAUKOLÄMMÖN ENERGIALÄHTEET



Kuva 1. Kaukolämmön tuotannon polttoaineet Helsingissä 2017

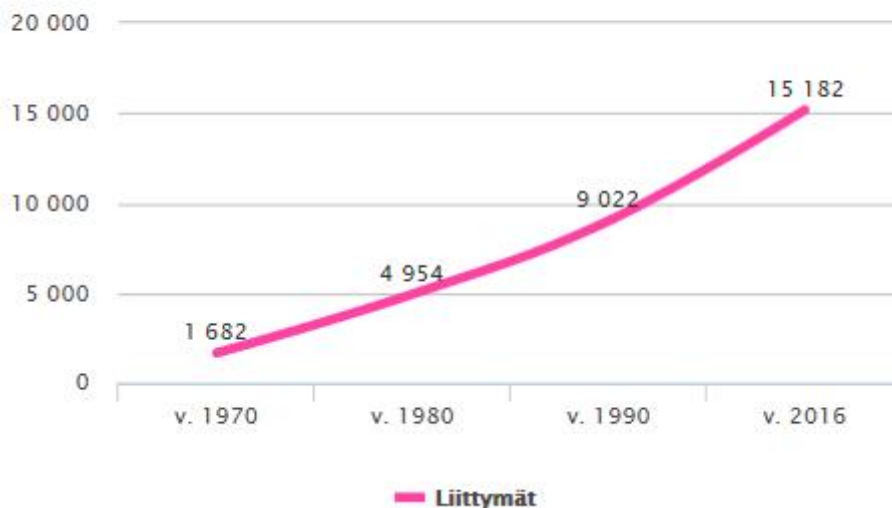
2.2 Kaukolämpö Helsingissä

Noin 90 % Helsingin rakennuksista käyttää lämmitysenergiana kaukolämpöä. Helsingin kaukolämpöverkon kokonaispituus on lähes 1 400 km, josta noin 50 kilometriä sijaitsee tunneleissa. Kaukolämpöverkko on jaettu erilleen itä- ja pääverkoksi. Verkot toimivat eri keskipaineilla, minkä vuoksi ne on kytketty toisiinsa lämmönsiirtimien avulla. Lämmönsiirrinasemia itä- ja pääverkon välillä on kolme kappaletta, ja ne sijaitsevat Herttoniemessä, Myllypurossa ja Vuosaarella. Helsinki edustaa noin 10 % koko Suomen lämmitystarpeesta. Suurin kaukolämmön tuottaja on Vuosaaren maakaasulaitos. Kaukolämpöliittymiä Helenillä on yli 15 000 kpl ja liittymien teho on 3500 MW. Kuvissa 2 ja 3 on esitetty kaukolämpöliittymien määrän sekä kaukolämpöliittymistehon kehitys 1970-luvulta tähän päivään.

Helenillä on myös kaksi lämmönsiirrinasemaa Vantaan Energian kaukolämpöverkon ja yksi lämmönsiirrinasema Fortumin Espoon kaukolämpöverkon välillä. Siirrinasemien välityksellä voidaan käydä kahdensuuntaista kaukolämmön energiakauppaa.

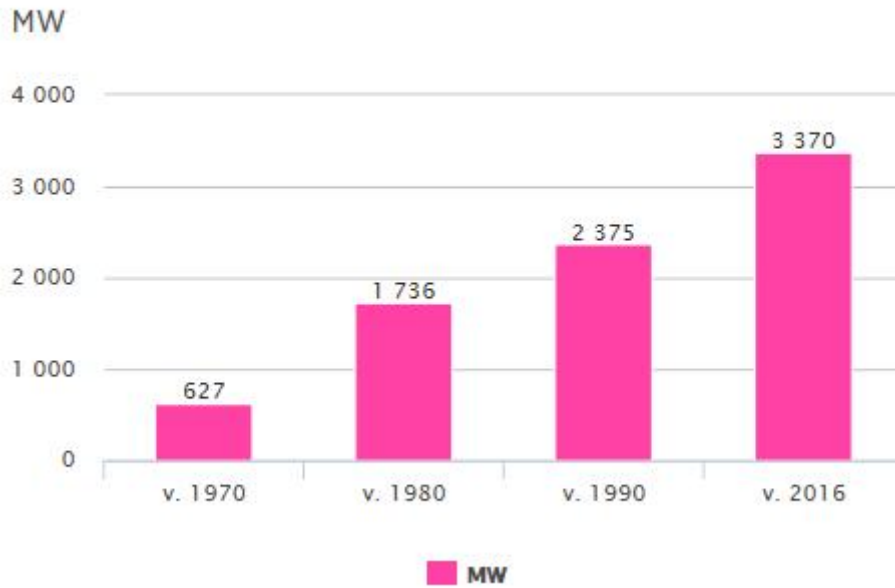
Kaukolämpöliittymät

Liittymien määrä



Kuva 2. Kaukolämpöliittymien määrä 1970–2016

Kaukolämpöliittymisteho



Kuva 3. Kaukolämpöliittymisteho 1970–2016

3 Kaukolämpöjärjestelmä

3.1 Järjestelmän toiminta

Kaukolämmitys on keskitetyllä tai hajautetulla tuotannolla toteutettu lämmitysjärjestelmä, jolla lämmitetään rakennukset ja tarvittava käyttövesi. Kaukolämpöverkossa siirtoaineena käytetään pääsääntöisesti vettä, jonka avulla voimalaitoksilla ja lämpölaitoksilla tuotettu lämpö siirretään asiakkaille eristettyjen teräksisten kaukolämpöputkistojen kautta kaksisuuntaisena järjestelmänä. Järjestelmään kuuluu meno- ja paluuputki, jossa vesi kiertää laitosten ja asiakaslaitteissa sijaitsevien lämmönvaihtimien välillä. Asiakkaiden kulutuksen mukaan jäähtynyt vesi palautuu laitoksille uudelleen lämmitykseen. Kaukolämpö on toimintavarma ja käyttäjälle helppokäyttöinen vesikiertoinen lämmitysjärjestelmä. (Energiateollisuus 2006.)

3.2 Järjestelmän käyttö

Kaukolämpöjärjestelmään syötetty lämpöteho on riippuvainen kaukolämpöveden virtausmäärästä sekä meno- ja paluuveden lämpötilaerosta. Menoveden lämpötilaa säädetään voimalaitosten lämmönsiirtimien tai lämmityslaitosten painekattiloiden avulla ja veden virtausta säätelevät laitosten pumpput sekä kuluttajat. Kaukolämpöverkon paine-ero säädetään pumppaamoissa kiertovesipumpuilla niin suureksi, että jokaiselle asiakkaalle riittää tarvittava paine-ero, vesikierron saavuttamiseksi lämmönvaihtimissa. Kaukolämpöverkon virtausta säättävät aina lopulta asiakkaat tehontarpeidensa mukaan säätöventtiilejä kuristamalla. Tarpeettoman suuri pumppauksen paine-eron ylläpito lisää pumppaukseen käytettyä sähköenergiaa ja lisäksi aiheuttaa ääniongelmia pumppaamojen läheisyydessä. Painetason säädöllä pidetään paine jokaisessa verkoston osassa ilmanpainetta korkeampana, ettei alipaine putkistossa laske veden kyllästymispaineen alapuolelle ja saa vettä höyrystymään. (Energiateollisuus 2006.)

Lämmöntuotannossa säädetään menoveden lämpötilaa ulkolämpötilan mukaan erillisissä sekoituspiireissä. Menoveden lämpötila ylläpidetään halutussa tasossa pumppausta säättämällä peruskuormalaitoksilta. (Energiateollisuus 2006.)

4 Putkistorakenteet

Putkistorakenteet ovat kehittyneet kaukolämpöalan kehityksen myötä. Nykyisin käytetään ns. kiinnivaahdotettuja johtorakenteita, joille ominaista ovat suuret aksiaalijännitykset johdon epäjatkuvuuskohdissa. Kiinnivaahdotettu putkijärjestelmä on osittain ns. kitkakiinnitetty suorilla johto-osuuksilla, joissa vastaavasti aksiaalijännitykset ovat suuria. Epäjatkuvuuskohdissa eli johdon liikevarsissa ja kulmakohdissa esiintyy maltillisia lämpöliikkeitä, joita hallitaan lenkein ja liikevarsin. Ennen nykyaikaisen kiinnivaahdotetun johtorakenteen kehitystä käytössä oli ajankohdasta ja putkiston koosta riippuen kahden tyyppistä liikkuvaa johtorakennetta. (Mäki 2017.)

4.1 Liikkuvat rakenteet

Kaukolämpöverkolla liikkuvina rakenteina käytetään vanhoja betonikanavajohtoja sekä muovisuojuakuorijohtoja. Liikkuvat rakenteet ovat poistumassa käytöstä, sitä mukaan, kun johtojen elinkaari tulee päätökseen tai virtausputkiin tulee vuotoja, minkä seurauksena linja saneerataan. Liikkuvat rakenteet on suunniteltu liikkumaan lämpötilamuutosten mukana, minkä johdosta äkillisen lämpötilanmuutoksen vaikutukset ovat pienet. (Nuutinen 2017.)

4.1.1 Betonikanavajohdot

Betonikanavajohtoja rakennettiin 1950-luvulta 1980-luvun loppuun asti. Betonikanavajohdossa virtausputkina toimivat teräsputket on asennettu betonisen suojuakuoren sisään. Teräsputket kannakoidaan kannatinkengillä kanavan pohjaan ja niiden lämpöliikkeitä ohjataan kiintopistein ja ohjauspistein tasaajiin tai liikevarsiin. Kiintopiste-elementteihin teräsputket kiinnitetään vetoteräksillä hitsaamalla. Teräsputkien tuennan ja lämpöliikkeiden ohjauksessa käytettävien osien myötä lämpöliikkeet saadaan kumottua ns. tasainkompensoinnilla. (Mäki 2017.)

Yleisimmin käytetyt betonikanavat ovat neljää eri tyyppiä, joiden eroavaisuudet ovat betonikanavan rakenteessa. Betonikanavatyyppit ovat *E-kanava* eli betonielementti kanava, *P-kanava* eli puolielementtikanava, *T-kanava* eli työpaikallavalettu kanava ja *Y-kanava* eli yläelementtikanava. Kanavassa olevat teräsputket on eristetty joko villalla tai kevyt-

betonilla. Kanavan rakennustapa ja eristysmateriaali eivät vaikuta teräsputkien toimintaan, sillä kaikissa kanavissa teräsputket kannatetaan pohjasta ja lämpöliikkeet hallitaan tasaajilla ja kiintopisteillä. Betonikanavia modernisoidaan niiden saavutettua teknisen käyttöiän tai johtoon ilmaantuneen vaurion myötä. Betonikanavat korvataan nykyaikaisilla kiinnivaahdotetuilla esieristetyillä putkilla. Betonikanavia on Helenin kaukolämpöverkossa käytössä vielä 128 kilometriä. Kuvassa 4 on esitetty E-tyyppin betonielementtikanava. (Mäki 2017.)



Kuva 4. Betonielementtikanava. Kansi ja villat on purettu.

4.1.2 Muovisuojakuorijohto

Muovisuojakuorijohtoja eli ns. Fiskars-johtoa rakennettiin 1960-luvun puolivälistä noin 20 vuoden ajan 1980-luvun puoliväliin asti. Fiskars-nimitys on syntynyt johtotyyppin valmistajan mallimerkinnästä Fiskatherm. Muovisuojakuorijohdoissa polyeteenisuojakuori ja lasikuituputki on liitetty yhteen polyuretaanieristeellä, mutta teräksinen virtausputki on liikkuvana kuoren ja eristeen sisällä. Virtausputki pääsee vapaasti liikkumaan lämpötilamuutosten vaikutuksesta ja liikkeet hallitaan tasaimilla ohjattuna kiintopiste-elementteihin. Lämpöliikkeiden kompensointi tapahtuu tasainkompensointina betonielementtikanan tyyliin.

Fiskars-johdot ovat alttiita ulkopuoliselle vedelle, mikäli johdon salaojaputki tukkeutuu maastoon syntyneiden muodostumien vuoksi ja jumiutuneen lian myötä vesi ei pääse

siellä virtaamaan. Erityisen alttiiksi vuotovesille joutuvat kellarit, joihin liittyvät talojohdot ovat kaadolla runkojohdosta seinään päin. Muovisuojakuorijohtoja modernisoidaan nykyaikaisilla kiinnivaahdotetuilla johtorakenteilla ennakoivana kunnossapitona, sekä ilmaantuneiden vuotojen kautta. Muovisuojakuorijohtoja on Helenin kaukolämpöverkossa käytössä vielä 154 km. Kuvassa 5 on esitetty Fiskars-muovisuojakuorijohdon rakenne. (Mäki 2017)



Kuva 5. Fiskars-muovisuojakuorijohtoja.

4.2 Kiinnivaahdotetut johdot

4.2.1 Rakenteet

Kitkakiinnitteisestä putkirakenteesta käytetään nimitystä kiinnivaahdotettu johtorakenne. Kiinnivaahdotetussa rakenteessa polyeteeni-suojakuori on kiinnivaahdotettu teräksiseen virtausputkeen polyuretaanilla. Polyuretaani toimii elementissä lämmöneristeenä. Lämpötilanvaihtelun kuormitukset otetaan vastaan aksiaalijännityksinä teräsputkeen vastus-

tamalla pituudenmuutoksia vaipan ja ympäröivän maan välisen kitkan avulla. Kiinnivaahdotettuja johtoja on kahdella eri rakenteella, 1Mpuk ja 2Mpuk. Virtausputkina käytettävä teräsputki on pituus- tai kierresaumahitsattua, materiaaliltaan P235GH, P235TR1 tai P235TR2. (Nuutinen 2017.)

Kiinnivaahdotettu johtotyyppi on ollut Suomessa käytössä 1970-luvun puolivälistä alkaen ja 1980-luvun puolivälin jälkeen yleisesti kaikki uudet johdot ovat kiinnivaahdotettuja, joko yksiputki- tai kaksiputkijärjestelmiä. Kiinnivaahdotetut putket syrjäyttivät nopeasti käytössä olleet rakenteet. Vanhoihin rakenteisiin nähden, kiinnivaahdotetun linjan rakentaminen on huomattavasti nopeampaa kuin esim. vanhanmallisten elementtikanavien. Virtausputken, kovan polyuretaanieristeen sekä suojakuoren muodostama elementti on helposti käsiteltävä, eikä johdon ympärillä olevan maa-aineksen painuminen aiheuta muutoksia johdon normaalissa toiminnassa. Suojakuoren ja eristeen rikkoutumisesta johtuvan virtausputken korroosio rajoittuu yleensä ainoastaan rikkoutuneeseen kohtaan, jolloin korjattava putkiosuus on huomattavasti pienempi. Toisin kuin vanhoissa kanavarakenteissa ulkopuolinen vesi ei pääsee kanavaan aiheutuneen vaurion myötä vapaasti virtaamaan kanavan sisällä ja näin ollen aiheuttamaan korroosiota pitkille putkiosuuksille. (Nuutinen 2017.)

Kiinnivaahdotetut johdot on varusteltu laajalla osavaliokimalla, johon kuuluvat mm. venttiilelementit, kulmakappaleet ja t-haaroitukset. Kaikki osat ovat tehdasvalmisteisia ja rakenne on sama kuin putkielementeissä. Osia voidaan yhdistää toisiinsa hitsaamalla teräsputket yhteen ja hitsausliitossaumakohdat voidaan eristää polyuretaania vaahdottamalla. Saumaukset viimeistellään joko pelti- tai holkkiliitoksilla, jolloin suojakuoresta tulee myös saumojen kohdalta vesitiivis. Eri valmistajien elementit sopivat keskenään yhteen eikä järjestelmään tarvitse tehdä erillisiä muutokseleita valmistajan vaihtuessa. Putkielementit valmistetaan tarkkojen laatustandardien mukaan. Suorille elementeille käytetään standardia EN 253:a, valmisosille EN 448:a ja venttiileille EN 488:a. Lisäksi liitoksille on käytössä oma standardi EN 489:a. (Logstor 2015.)

Tehdasosien ja suorien elementtien lisäksi järjestelmä pitää sisällään suunnanmuutoksissa käytettäviä raakateräskäyriä, raakaventtiilejä sekä supistuskappaleita. Teräsosilla tehtävät suunnanmuutokset ovat järjestelmän heikoimpia osia, mikäli suunnanmuutokset on tehty liian loivalla tai liian jyrkällä suunnanmuutoksella. Suurimmat jännitykset kohdistuvat 45°-kulmiin. Teräsosat eristetään vaahdottamalla polyuretaani PEH-muovista muovihitsaamalla rakennettuun vaippaan. (Nuutinen 2017.)

Kiinnivaahdotetun järjestelmän heikkoudet perustuvat pääsääntöisesti lämpötilavaihte-
luista aiheutuneisiin jännitysten vaihteluihin, mikäli johtoa suunniteltaessa lämpötilamuu-
toksia ei ole otettu huomioon. Jännitysten ohjaaminen ja rajoittaminen myös hankaloit-
tavat asennustöitä sekä liikevarat aiheuttavat maarakentamiselle enemmän tilankäyttöä,
joka on haastavaa kaupunkialueilla, joilla kadut ovat ahtaita ja muuta kunnallistekniikkaa
on maaperässä. Ulkopuolisia vauriotekijöitä vastaan muovikuori on heikompi kuin beto-
nikanava. Siinä missä betoni ei kärsi vaurioita, niin muovikuori ja eriste saattavat mennä
rikki, tällaisia tapauksia ovat esimerkiksi kaivinkoneen kauhan raapaisu, rakennettaessa
muuta kunnallistekniikkaa kaukolämpölinjan läheisyyteen. (Energiateollisuus 2006.)

4.2.2 1Mpuk ja 2Mpuk

Yksiputkijärjestelmä eli 1Mpuk perustuu meno- ja paluupuolen virtausputkiin, jotka on
yhdistetty yhden elementin sisään. Virtausputket ovat päällekkäin polyuretaanieristeen
ja muovisuojakuoren sisällä. Lämpöhäviöiden pienentämiseksi menoputki on asennettu
paluuputken alapuolelle. Yksiputkijärjestelmä voidaan rakentaa DN20-koosta DN250-
kokoon asti. Järjestelmän etuja ovat 2Mpuk järjestelmää pienempien lämpöhäviöiden
lisäksi pienempi tilan- ja materiaalityö. 1Mpuk -johtoa on Helenin kaukolämpöver-
kossa käytössä 4 km.

Yksiputkijärjestelmän elementin asentaminen ja siirtely on haastavaa elementin painon
vuoksi. Asennustyötä hankaloittaa myös aksiaalisten suunnanmuutosten myötä aiheu-
tu epäkeskoisuus, jolloin toisesta virtausputkesta joudutaan poistamaan materiaalia ja
toiseen putkeen lisäämään materiaalia. Suurin sallittu suunnanmuutos hitsausliitoksella
on 3°. Haaroitukset voidaan tehdä ilman paisuntalenkkejä, koska haaroitusliitos on mut-
katon eikä väliin tule teräskäyriä sekä meno- ja paluujohdon todellisten lämpöliikkeiden
pienuus johtuu putkien välisestä itsekorjautumisesta. Yksiputkijärjestelmän ja kaksiput-
kijärjestelmän yhdistäminen vaatii muutokappaleita, jotka ovat tehdasvalmisteisia.
(Energiateollisuus 2006.)

Kaksiputkijärjestelmä eli 2Mpuk on järjestelmä, jossa meno- ja paluuputki ovat omana
itsenäisenä elementtinään. Muovisuojakuori suojaa polyuretaanieristettä ja teräsputkea.
2Mpuk on laajimmin käytössä oleva putkityyppi, jota on Helenin kaukolämpöverkossa
876 km. Lämpötilojen muutoksesta aiheutuvien jännitysten ja putkiston kestoajan tarkas-
telu keskittyy 2Mpuk-linjoihin, koska rakenne on yleisimmin käytössä ja sen rakentami-
nen jatkuu edelleen. Kuvissa 6 ja 7 on asennettuna 1Mpuk- ja 2Mpuk-linjaa.



Kuva 6. 1Mpuk-linja Vallilassa



Kuva 7. 2Mpuk-linja Vuosaarella

4.3 Kiintopisteet ja tasaajat

Kaukolämpöverkolla käytetään lämpötilanmuutoksista johtuvien jännitysten hallintaan tasaimia ja kiintopisteitä. Tasaajat ovat putkenosia, joilla kompensoidaan lämpötilan muutoksista aiheutuvat aksiaaliset muutokset. Tasaajat minivoivat lämpöliikkeistä aiheutuvat jännitykset, jolloin putkeen kohdistuvat voimat saadaan pidettyä suunnitelluissa arvoissa. Tasaajia käytettäessä on tarkkaan huomioitava valmistajan antamia ohjeita. Kuvassa 8 on esitetty lukitut paljetasaimet elementtikanavassa. (Energiateollisuus 2006.)

Kiintopisteet ovat betonista valettuja raudoitettuja elementtejä, joiden avulla lämpöliikkeet ohjataan haluttuun suuntaan tai maaperään. Kiintopisteitä käytetään liikkuvissa rakenteissa ns. luonnollisena kompensointina, jolloin liikkeet ohjautuvat tasaajiin. Kitkakiinnitetyissä järjestelmissä kiintopisteitä ei juuri tarvitse käyttää kompensoimattoman järjestelmän johdosta ja niiden käyttöä tulee harkita tarkoin. Kitkakiinnitetyssä järjestelmässä kiintopisteiden tehtävänä on lähinnä suojata heikkoja putken osia esimerkiksi haaroituk-
sia tai tilanpuutteen johdosta aiheutuneita epätavallisia jyrkkiä suunnanmuutoksia. (Nuu-
tinen 2017.)



Kuva 8. Lukitut paljetasaimet elementtikanavassa

5 Putkiston elinkaari

5.1 Vaatimukset

Energiateollisuus määrittelee suosituksessaan kaukolämpöjohdoille vaaditun käyttöiän. Suosituksessa annetut arvot perustuvat laboratorio olosuhteissa testattuihin arvoihin. Kaukolämpöputkielementtien ja valmisosien lämpökestävyyden tulee olla vähintään 30 vuotta normaaleissa käyttökohteissa ja -olosuhteissa, jatkuvassa käyttölämpötilassa 120 °C. Jatkuvan lämpötilan ollessa 115 °C lämpökestävyyden tulee olla 50 vuotta ja alemmassa käyttölämpötilassa lämpökestävyyden tulee olla yli 50 vuotta. Lämpöverkolla käytettävien osien tulee kestää normaalin käytön aikana käyttölämpötilojen vaihteluista aiheutuvat jännitykset enimmäiskäyttölämpötilan ollessa 120 °C ja satunnaisesti 140 °C. (SFS-EN 13941 2011.)

Helenin kaukolämpöverkon vuosittainen keskimääräinen käyttölämpötila on noin 93 °C, jolloin johtojen laskennallinen käyttöikä on yli 50 vuotta. Korkeampi käyttöikä vähentää verkon modernisoinnin tarvetta ja kerryttää vähemmän modernisointivelkaa. Helsingin katualueiden ja uudiskiinteistöiden rakentamistahdilla on välttämätöntä saada uudisjohtojen maksimaallinen käyttöikä. Muuten tulevaisuudessa modernisointiin käytettävät kustannukset nousevat jättimäisiksi ja ohittavat uudisjohtoihin investoitavat kustannukset. Pitkä käyttöikä ja suuntaa antava tieto käyttöiästä helpottavat myös verkon kunnossapitoa ja kunnossapidon suunnittelua.

5.2 Lämpötilan muutoksista aiheutuvat jännitysvaihtelut

Kaukolämpöjohtojen elinkaaren aikaisten lämpötilojen vaihteluiden aiheuttamat jännitysten vaihtelut aiheuttavat virtausputkille väsyttävää kuormitusta, jonka suuruus määrittelee johtorakenteen teknisen käyttöiän. Eurooppalainen kaukolämmön suunnittelu- ja asennusstandardi EN 13941 määrittelee putkistolle keston jännitys- tai kuormanvaihtelun mukaan. Standardissa esitetään neljän rajatilalla mukaiset muutokset kaukolämpöjohdoissa. Rajatilalla A tarkoitetaan plastisen muodonmuutoksen aiheuttamaa vauriota, rajatilalla B tarkoitetaan väsymisen aiheuttamaa murtumaa, rajatilalla C tarkoitetaan putkiston tai sen osan epävakautta ja rajatilalla D tarkoitetaan putkiston toimintakyvyn menetystä.

Tässä tapauksessa kun tutkitaan lämpötilojen muutoksien vaikutusta putkistoon, käytetään tarkastelussa rajatilana rajatila B:tä eli väsymisen aiheuttamaa murtumaa. Väsymisen aiheuttama murtuma voi aiheutua myös suuresta kuormanvaihtoluvusta esimerkiksi kun iso johto on asennettu liian lähelle maanpintaa ja liikennekuorma on raskasta. Laskennassa keskitytään ainoastaan rasitukseen pienellä kuormanvaihtoluvulla, joka on rasitukseltaan lähimpänä lämpötilojen muutoksista aiheutuvien jännitysvaihtelujen rasitusta. Standardin mukaan väsymistarkastelu rajatilassa B suoritetaan Palmgren-Miner –yhtälön (taulukko 1 ja 2) mukaan:

$$\sum_n \frac{n_i}{N_i} \leq \frac{1}{\gamma_{fat}}$$

missä

n_1 = kuormanvaihtojen lukumäärä määrätyllä jännitysvaihtelulla i

γ_{fat} = varmuuskerroin väsymisen suhteen

i = erilaisten jännitysvaihtelutyypin indeksi

N_i = sallittu kuormanvaihtojen lukumäärä jännitysvaihtelulla i

$$N_i = \left(\frac{5000}{S_i} \right)^4$$

missä

S_i = jännitysvaihtelu (N/mm²)

Taulukko 1. Sallittu kuormanvaihtojen lukumäärä jännitysvaihtelulla N_i .

Johtotyyppi	Kuormanvaihtoluvun minimiarvo
Runkojohto	100
Jakelujohdot	250
Talojohdot	1000

Taulukko 2. Projektiluokka ja varmuuskerroin väsymisen suhteen (γ_{fat})

Projektiluokka	γ_{fat}
A <ul style="list-style-type: none"> Putken halkaisija pieni tai keskikokoinen sekä pienet aksiaali-jännitykset Putket joiden vaurioitumisriski on pieni, samoin kuin riski aiheuttaa vahinkoa ympäristölle Putket joiden kohdalla taloudelliset riskit ovat vähäisiä 	5
B <ul style="list-style-type: none"> Suuret aksiaali-jännitykset ja pieni tai keskikokoinen putken halkaisija 	6,67
C <ul style="list-style-type: none"> Suuri halkaisija ja/tai korkea paine Putket joilla on kohonnut riski aiheuttaa henkilö- tai ympäristövahinkoja Erikoiset ja monimutkaiset rakenteet 	10

Palmgren-Miner-yhtälön arvot ovat jännitysvaihtelua lukuun ottamatta taulukkoarvoja. Jännitysvaihteluiden laskenta on esitetty liitteessä 3. (SFS-EN-13941 – 2011; Energia-teollisuus 2006.)

5.3 Lujuustarkastelu

Kaukolämpöjohtoihin kohdistuu niiden käytön aikana jännityksiä paineen, kitkavoimien, lämpötilan muutosten ja taipumien johdosta. Verkon käyttöiän kannalta lämpöliikkeiden hallinnalla on merkittävä rooli. Kaukolämpöputkissa käytettävän teräksen P235GH lämpölaajenemiskerroin on $1,24 \cdot 10^{-5} \text{ 1 / } ^\circ\text{C}$. Käytännössä teräsputket laajenevat 0–120 °C lämpötilanmuutoksesta aksiaalisuuntaisesti noin 1,4 mm/m. Lämpötilanmuutoksesta johtuvan lämpöliikkeen pitää päästä tapahtumaan vapaasti, jotta jännitykset eivät rasita putkea ja näin ollen lyhennä huomattavasti putken käyttöikää. Lämpöliikkeet kompensoidaan käyttämällä luonnollista kompensointia, tasainkompensointia tai kompensoimattomaa järjestelmää.

Luonnollisella kompensoinnilla liikkeiden annetaan tapahtua vapaasti hallitsemalla liikkeiden suunta kiintopisteiden ja varsien avulla. Luonnollista kompensointia käytetään esim. liikkuvien putkijärjestelmien eli betonielementtikanaavien ja muovisuojuorijohtojen lämpötilamuutosten hallinnassa kanavarakenteiden kulmakohdissa. Luonnollisen kompensoinnin tavoin tasainkompensointia käytetään vanhojen rakenteiden lämpöliikkeiden hallinnassa suorilla putkiosuuksilla. Tasainkompensoinnissa lämpötilamuutokset hallitaan tasaimin kiintopisteillä ohjattuna. Tasainkompensointia voidaan käyttää myös kitkakiinnittyvissä rakenteissa, mutta yleensä tasainkompensointia käytetään vain johtosuuden käyttöönotossa ns. kertakäyttötasaimissa, jotka hitsataan kiinni esilämmityksen jälkeen. Kiinnivaahdotetussa järjestelmässä käytönaikaisia lämpöliikkeitä ei yleensä kompensoida erikseen, vaan putkisto suunnitellaan hyödyntäen suunnanmuutoksia ja liikevarsia. Tällöin lämpöliikkeet esiintyvät maltillisina ja hallittuina kulmakohdissa ja muissa epäjatkuvuuskohdissa tai liikevararakenteissa. Esim. 90 asteen suunnanmuutosten molemmiin puoliin on ns. kitkapituus, jonka sisällä putki ei ole täysin kiinnittynyt maan kitkan ansiosta. Vastaavasti johto on kitkakiinnittynyt suorilla putkiosuuksilla, mutta suora osuus ei saa ylittää 2x kitkapituutta, koska muuten aksiaalijännitykset nousevat myötörajan yli. Tätä kutsutaan kompensoimattomaksi järjestelmäksi. (Nuutinen 2017.)

6 Menoveden lämpötilat

6.1 Menoveden lämpötilan säätäminen

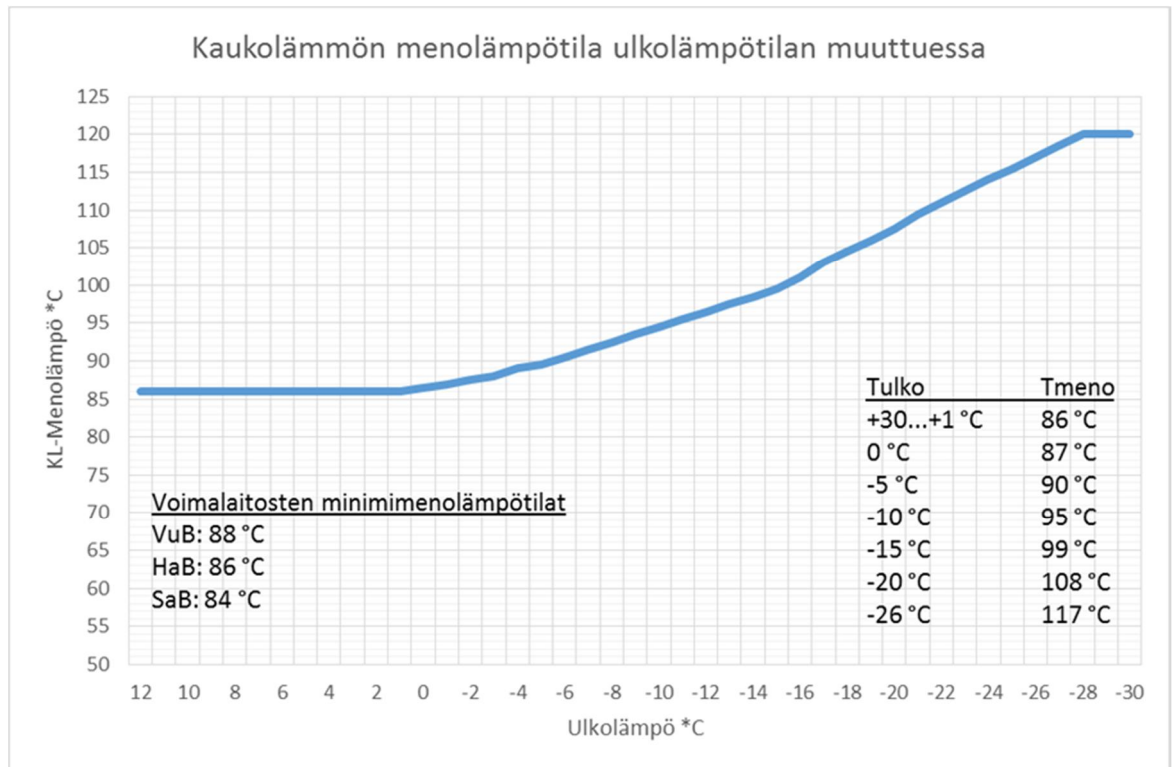
Kaukolämmön menoveden lämpötilaa säädetään ulkoilman lämpötilan ja asiakkaiden lämmöntarpeen mukaan. Menoveden liian korkea lämpötila aiheuttaa lämpöhäviöitä verkossa eikä alhaisella lämpötilalla saavuteta asiakkaiden lämpötehontarvetta. Kaukolämpöverkon lämpötehoon vaikuttavat veden virtausmäärä sekä meno- ja paluuveden lämpötilaero. Verkkoa voidaan myös käyttää ulkoilmanlämpötilasta poikkeavilla lämpötiloilla, jolloin hyödynnetään verkon akkumulointikykyä vuorokausittaisten lämpötehotarpeiden tyydyttämiseksi. Tällöin lämpöverkko toimii lämmönvaraajana. Käytettäessä verkkoa lämmönvaraajana tulee ottaa huomioon lämpötilan nousun nopeus, jotta verkoston rakenteet eivät joudu liian kovalle rasitukselle, ja näin ollen aiheuta vaurioita. (Ruokosalo 2017.)

Menoveden lämpötilalle alarajan asettavat asiakkaiden lämmönvaihtimien mitoitus. Energiateollisuus ry:n ohjeistuksen mukaan rakennusten lämmönvaihtimet on mitoitettava siten, että ensiöpuolen tulolämpötila voi alimmillaan olla 70 °C. Lämpötilan ylärajana pidetään EN13941:n mukainen jatkuva käyttölämpötila 120 °C. Ylärajan ja alarajan puitteissa määrittyy tavoitearvo, jossa lämpötilan nostaminen kasvattaa lämpöhäviöitä putkistossa ja lämpötilan laskeminen nostaa lämmönsiirtämiseen tarvittavan virtauksen kasvattamista pumppaamalla. Alempi menoveden lämpötila kasvattaa vastapaineturbiinin sähköntuotannon hyötysuhdetta. (Energiateollisuus 2006)

Näiden tekijöiden pohjalta Energiateollisuus ry on laatinut ohjekäyrän, jossa menoveden lämpötilan tavoitearvo on esitetty ulkoilman lämpötilan funktiona. Helsingin kaukolämpöverkolla menoveden lämpötilaa säädetään Energiateollisuuden ohjekäyrästä poikkeavan, itse määritetyn käyrän avulla. Helenin verkossa menoveden lämpötilan alimmaksi arvoksi on asetettu 86 °C, sillä Salmisaaren voimalaitoksella sijaitseva absorptiojäähdytimille tulevan menoveden lämpötilan alarajana tulee olla vähintään 84 °C. Molemmat ohjekäyrät antavat arvon, jolla asiakkaiden laitteet toimivat oikein ja asiakkaille luvattu lämpöteho saadaan siirrettyä verkon etäisimmille kiinteistöille asti. Kuvassa 9 on esitetty Helenin ohjekäyrä menoveden lämpötilasta, ulkoilman lämpötilan funktiona.

Energiavalvomossa vuorossa oleva operaattori säättää menoveden lämpötilaa oman harkintansa mukaan, kuitenkin noudattaen pääpiirteittäin Helenin ohjekäyrää. Lämpötilaa säädetään manuaalisesti tarkastelemalla ulkolämpötilaa ja laitosten pumppujen käyttöastetta. Lämpötilaa nostetaan, kunnes jonkin pumpun pyörimisnopeus saavuttaa 100 %. Lämpötilan nousulle on määritetty aika, joka on enimmillään 2 °C / vrk tai 1 °C / 2 h. Energiateollisuuden suositus sallitulle muutosnopeudelle on 1 °C / 6 min ja enintään 2 °C / 6 min. Helenin oman ohjeistuksen arvot ovat muodostuneet ajan kuluessa, perustuen käytännössä saatuihin kokemuksiin. (Ruokosalo 2017.)

Menoveden lämpötilan säätämisen ei ole huomattu vaikuttavan paluuveden lämpötilaan. Paluuveden lämpötilan määrittävät asiakkaiden laitteet, jolloin lämpötilan muutoksen vaikutukset eivät heijastu enää laitoksille saapuvan veden lämpötilaan. Paluuveden energiaa voidaan myös akkumuloida erillisellä ohitusventtiilillä, jolloin menoputken vettä sekoitetaan paluuputkeen. Tällöin paluuveden lämpötila saadaan lähelle menoveden lämpötilaa. Paluuveden akkumulointi toimii käytännössä ainoastaan lämpölaitosten käyttöön, koska silloin kattilalla lämmitettävän veden käytettävää energiaa säästyy. (Korhonen 2017.)

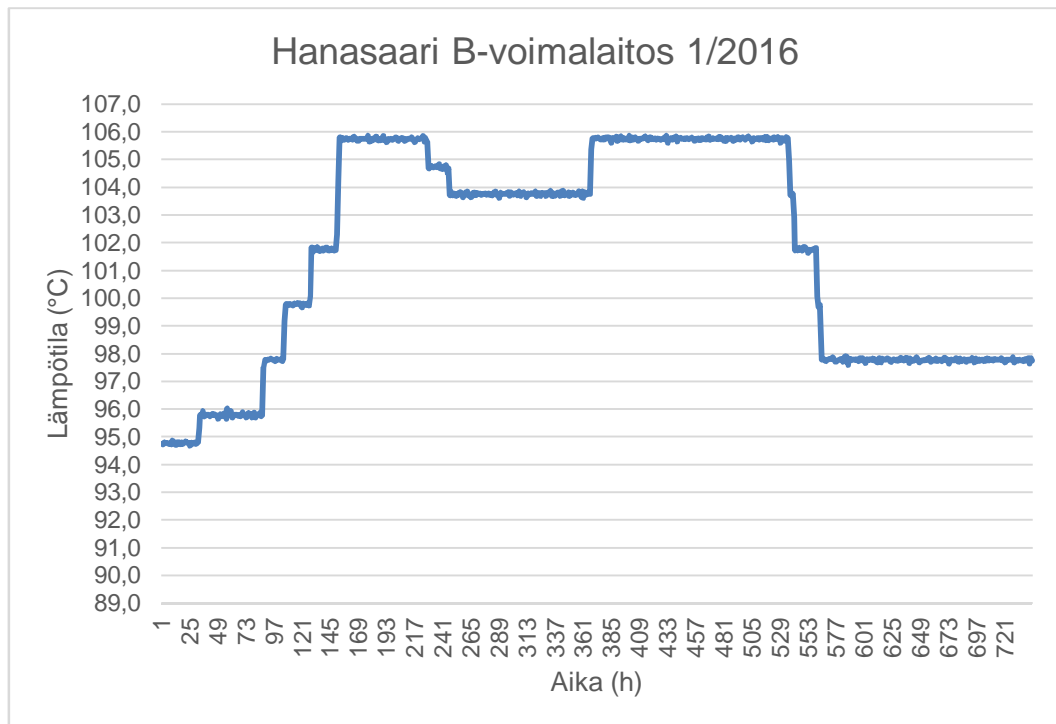


Kuva 9. Helenin ohjekäyrä

6.2 Menoveden lämpötilat laitoksilla

Helsingissä kaukolämpöä tuotetaan kolmella CHP-voimalaitosalueella, 11 lämpökeskuskella sekä kahdella lämpöpumppulaitoksella. Laitoksilta lähtevän menoveden lämpötilat pysyvät hyvin tasaisena. Lämpötilavaihtelut syntyvät ulkolämpötilojen mukaan, laitoksia säätämällä. Pienet ulkolämpötilan muutokset eivät vaikuta laitoksilta lähtevän menoveden lämpötilaan. Tuotannossa olevien laitosten verkkoon syötettävän veden lämpötilojen ero saa olla normaalitilanteessa 10 °C, sillä syöttöalueiden rajakohdissa jatkuva lämpötilojen nopea muuttuminen rasittaa johtorakenteita. (Energiateollisuus 2006)

Laitosten välittömässä läheisyydessä ei yleensä ole asiakkaita, jolloin lämmitetty vesi ajetaan runkolinjoja pitkin jakelujohdoille. Runkolinjassa lämpötilat voivat nousta hetimitäin hyvinkin korkeaksi. Vaikka lämpötilat ovat korkeita, niin lämpötilavaihtelut eivät ole merkittäviä vaan lämpö pysyy hyvin tasaisena laitoksen ollessa tuotannossa. Kuvassa 10 on esitetty Hanasaaren B-voimalaitoksen menoveden lähtevät lämpötilat tammi-kuussa 2016.

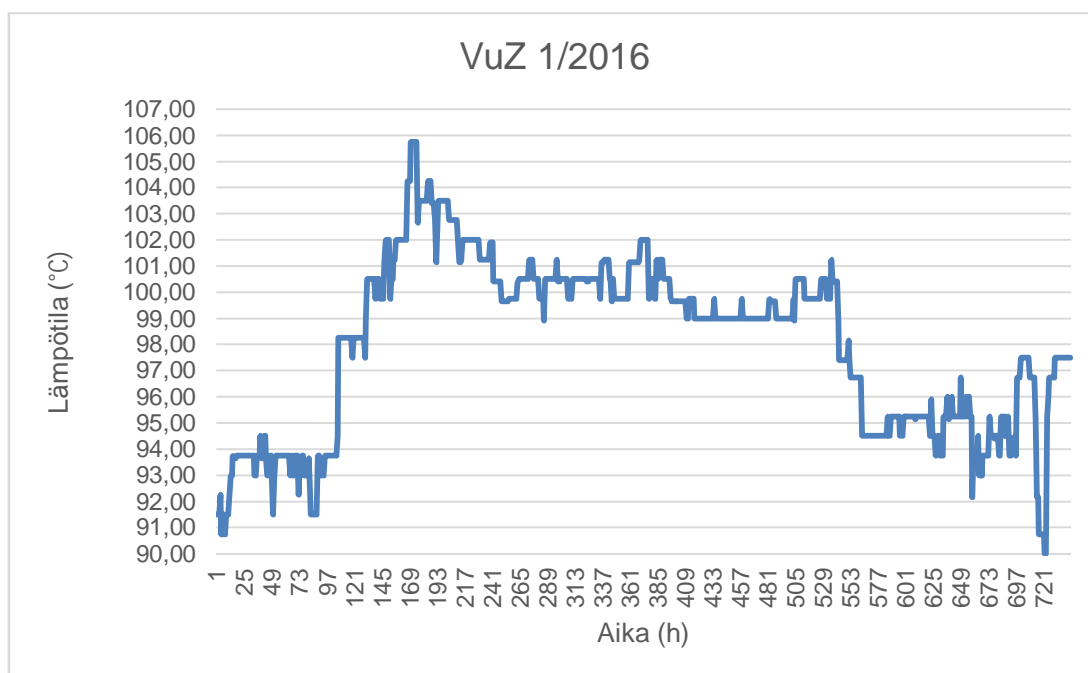


Kuva 10. Hanasaari B-voimalaitoksen lähtevän menoveden lämpötilat (tammikuu 2016)

6.3 Menoveden lämpötilat pumpppaamoilla ja tunneleissa

Isoissa kaukolämpöverkoissa käytetään välipumppaamoja asiakkaiden minimi paine-eron saavuttamiseksi. Pumppaamojen tehtävänä on pitää yllä tarvittavaa paine-eroa, jotta siirrettävä energia riittää asiakkaille koko verkon alueilla, vaikka laitos saattaisi olla maantieteellisesti kaukana. Pumppaamoilla pumpattavan menoveden lämpötilat myötäilevät hyvinkin paljon laitosalueiden lämpötiloja, mutta pienempiä lämpötilan vaihteluita syntyy. Helenin verkossa pumppaamot sijaitsevat tunneleissa, joilla energiaa siirretään koko Helsingin alueelle. Kuvassa 11 on esitetty Vuosaaren pumppausaseman menoveden lämpötilat tammikuussa 2016 (Korhonen 2017.)

Tunnelijohtot on rakennettu liikkuviksi rakenteiksi, jolloin lämpöliikkeet eivät rasita putkistoja ja lämpöliikkeet on hallittu tasaimin. Tunnelijohtojen ja pumppaamojen toiminta perustuu siihen, ettei vesi pääse seisahtumaan ja täten jäähtymään liiaksi. Jos pumppaamot ovat käytössä ja laitoksilla tuotanto päällä, ei tunnelijohtoihin kohdistu lämpötilan muutoksista johtuvia merkittäviä jännitysvaihteluita.

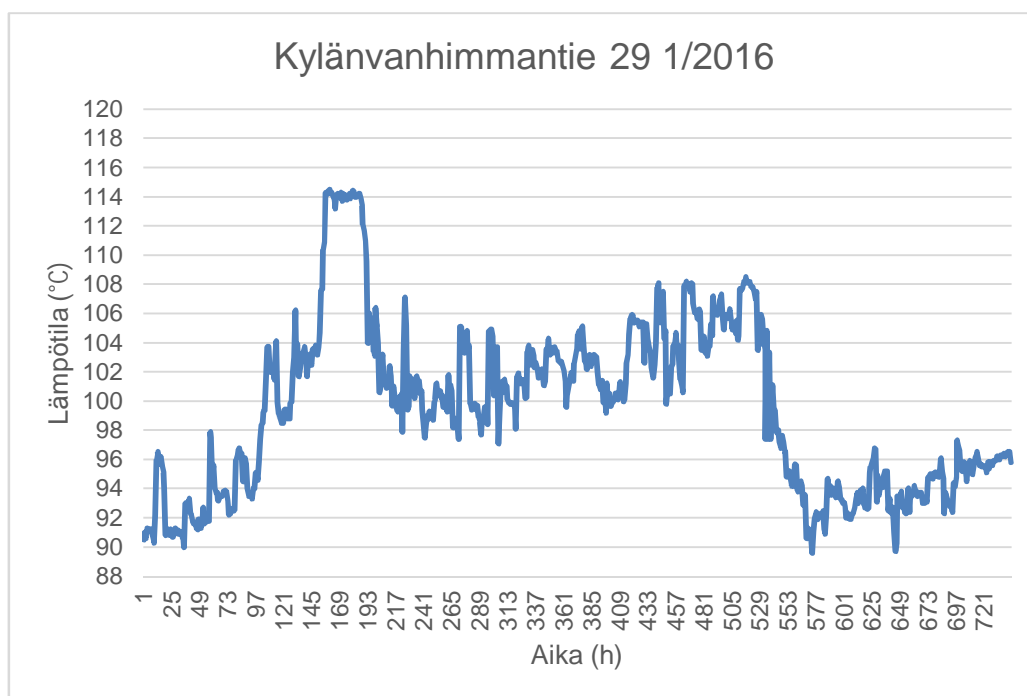


Kuva 11. Menoveden lämpötilat Vuosaaren pumppausasemalla (tammikuu 2016)

6.4 Menoveden lämpötilat asiakkailla

Asiakkaiden menoveden lämpötilat määräytyvät hyvin paljon kulutuskäyttäytymisestä. Asiakasjohdoissa lämpötilamuutokset ovat suurempia kuin runkojohdoissa, johtuen epä-säännöllisestä lämmön ja käyttöveden käytöstä. Myös asiakkaiden sijainnilla on määrävä tekijä lämpötiloihin. Mikäli asiakas on suuren runkojohdon varrella, saattavat lämpötilat nousta talojohdoissa paikoittain hyvinkin korkeaksi, verrattuna jakelujohtojen varrella sijaitseviin asiakkaisiin. Asiakasjohdot ovat usein pieniä DN25-DN150, jolloin ne kestävät joustavan rakenteensa ansiosta paremmin jännityksiä. (Korhonen 2017.)

Kuvasta 12 näkyy tammikuussa 2016 Patolan lämpökeskuksen käynnistyminen, jolloin lämpötila nousi hetkellisesti 115 °C:seen. Asiakas sijaitsee DN400-johdon vieressä. Asiakkaan talojohdo on DN65.



Kuva 12. Asiakkaan menoveden lämpötilat (tammikuu 2016)

7 Verkon menoveden lämpötilan optimointi

7.1 Tavoitteet

Vuonna 2016 Helen tilasi Valmetilta kaukolämpöverkon prosessitutkimuksen, jonka tavoitteena oli selvittää mahdollisuudet Helenin voimalaitosten, lämpökeskusten ja pumpuasemien ohjaamiseen koordinoitusti siten, että itä- ja pääverkkojen paine-erot ja menoveden lämpötilat voidaan hallita kaikissa olosuhteissa. Tutkimuksessa tuli esille parannusehdotuksia, joita olivat menoveden lämpötilan optimointi sekä pumppauksen optimointi. Tutkimuksen pohjalta havaittiin, että Helenin nykyinen ohjeistus, jossa menoveden lämpötilaa säädetään ulkolämpötilan mukaan, ei toteuteta kovinkaan tarkasti, vaan lämpötilatasot saattavat jäädä turhan korkeaksi, ulkoilman lämmitessä. Valmet teki tutkimuksen pohjana sille, että he voisivat tarjota Helenille Valmet District Heating Manager – verkonoptimointijärjestelmää.

Keväällä 2016 Helen toteutti testauksen, jossa kokeiluluontoisesti laskettiin menoveden lämpötila noin 82–83 °C:seen. Testauksessa saatujen havaintojen perusteella menoveden lämpötila ei saisi laskea alle 86 °C:n. Lämpötilan laskun johdosta Salmisaaressa

jäähdytysverkon tuotantoon käytettävät absorptiokoneet eivät lähteneet käyntiin. Koneet tarvitsevat käynnistyäkseen vähintään 84 °C lämpöistä kaukolämpövettä. Myöskään Salmisaassa sijaitsevia kaukolämpöakkuja ei voida ladata alle 84 °C lämpöisellä vedellä, sillä akuista ei saada purettua verkon ja kuluttajien kannalta tarpeeksi tehoa. Akuista puretun veden lämpötilaksi jää noin 76 °C, ja tällöin akun kapasiteetti supistuisi normaalista 1 000 MWh:sta noin puoleen eli 400 - 500 MWh:iin. Akku ja absorptiokoneet ovat myöskin riippuvaisia toisistaan, sillä akuista puretulla vedellä ei kyetä ylläpitämään absorptiokoneita. Lisäksi lämpötilan raja-arvoja luovat tunnelijohtojen isot vesimassat. Matalalla lämpötilalla ajamisesta riskinä aiheutuu tunnelijohtojen virtaussuuntien vaihtelu, jolloin virtauksen nollakohta jää tunnelijohtoon. Virtaussuunnan vaihtelun ja mahdollisen nollapisteen vuoksi tunnelijohdon lämpötilan taso saattaa pudota lämmityskauden ulkopuolella paikallisesti jopa 45 °C:seen. Huomioitavaa on myös asiakkaille riittävän menoveden lämpötilan taso, sillä verkon rakenteesta johtuen asiakkaiden ensiöpuolen lämpötilat saattavat laskea pahimmallaan lähelle 60 °C.

Tutkimuksen ja testauksen myötä ilmenneellä ajotavalla ja niiden optimoimisella on mahdollista saavuttaa taloudellista hyötyä mm. pienemmillä lämpöhäviöillä ja matalammilla polttoainekustannuksilla. Polttoainetaloudelliset hyödyt ilmenevät lämpökeskuksien käynnistystiheyden muutoksena. Verkkoa voidaan ajaa rohkeammin ilman lämpökeskuksia, koska sovellus antaa säätöarvoja ja niitä noudattamalla voidaan saada riittävä menoveden lämpötila pelkästään voimalaitoksia ja pumppaamoita käyttämällä.

7.2 Toteutus

Kaukolämpöverkon optimoimisella tavoitellaan optimaalista menoveden lämpötilaa, riippuen ulkoilman lämpötilasta sekä asiakkaiden kulutuskäyttäytymisestä. Lämpötilan ohjearvo perustuu ennustettuun ulkoilman lämpötilaan, hetkelliseen lämpötilaan sekä edellisten vuosien lämpötiloihin. Ohjelman tarkoituksena on antaa ohjearvoja, joita kaukolämpövalvomo seuraa. Lämpötilan säätö ei ole automaattista, vaan muutokset ovat valvomon vuoromiehen vastuulla. (Ruokosalu 2017)

Vuorokauden aikana ulkoilman lämpötila saattaa muuttua useita asteita, jolloin kaukolämpöverkon menoveden lämpötila ei voi reaaliaikaisesti seurata ulkoilman lämpötilaa. Ulkoilman muuttumiseen on reagoitava etukäteen ja tähän tarkoitukseen käytetään sää-

ennusteita. Koska kaukolämpöverkon lämpötilat eivät ole riippuvaisia ainoastaan ulkoilman lämpötiloista, pitää järjestelmän reagoida myös asiakkaiden kulutuskäyttäytymiseen. Aamuisin kulutus on huipussaan, asiakkaiden käytettäessä lämmintä vettä peseytymiseen. Aamuhuipuksi kutsuttuun kulutuspiikkiin pystytään reagoimaan jo yön aikana, nostamalla verkon lämpötilaa ennakkoon käyttämällä verkkoa akkuna, eli akkumuloimalla verkkoa.

Edellä mainittuihin muuttujiin perustuen pitää määrittää raja-arvot, paljonko verkonlämpötilaa voi muuttaa aikayksikköä kohden, siten ettei verkon rakenteisiin kohdistu rasittumista. Valmetin sovellukseen voidaan määrittää raja-arvot, jolloin ohjelma ei anna oletuslämpötilaksi niin matalaa tai korkeaa lämpötilaa, että ne menisivät annettujen aikayksikköä kohden määritettyä lämpötilamuutoksen yli. Valmet ehdottaa raportissaan lämpötilojen muutoksiin raja-arvoiksi $4\text{ °C} / 24\text{ h}$ lämpötilan nostoa ja $1\text{ °C} / 24\text{ h}$ lämpötilan laskua. Raja-arvot poikkeavat Helenin nykyisistä arvoista, jotka ovat $2\text{ °C} / 24\text{ h}$ lämpötilan nostoa tai $1\text{ °C} / 2\text{ h}$ lämpötilan laskua.

8 Optimoinnin vaikutukset

Lämpötilan muutoksista johtuvien vaikutusten selvittämiseksi lämpötilan muutossykliä määrää laskettiin ja simuloitiin esimerkkilaskennalla. Laskennassa putkikooksi valittiin DN600-johto, jonka kokoluokan johdot toimivat siirtojohtoina lämmönsiirtämiseksi alueelta toiselle. Johtokoko valittiin, koska isoihin johtoihin kohdistuvat suurimmat rasitukset. Putkien seinämävahvuudet vaihtelevat putkikokojen mukaan, mistä johtuen isommat johdot ovat jäykempiä pienempiin johtoihin verrattuna. Laskennan heikoimmaksi osaksi määriteltiin teräskäyrä 1,5 D:n säteellä. Laskennassa määriteltiin suorien putkiosuuksien kiinnittyminen maaperään, jolloin lämpötilan muutoksesta jännitykset ja jännitysvaihtelut kohdistuvat suorien osuuksien päähän, johon on asennettu teräskäyrä. Laskenta perustuu Kaukolämmönkäsikirjan esimerkkilaskentaan, mutta arvoja on muutettu vastamaan Helsingissä käytettyihin arvoihin. Muutoksia esiintyi mm. maaperän rakenteessa sekä putken peittosyvyydessä.

Putkistoon kohdistuvien voimien sauvaelementtimallinnukseen käytettiin apuna SisKMR- kaukolämpöjohtojen lujuuslaskentaohjelmaa. SisKMR on saksalaisten kehit-

tämä kaukolämpöverkkojen lujuustarkasteluun tarkoitettu ohjelma. Ohjelma käyttää laskennassa kansainvälistä standardia EN-13941. SisKMR:stä saadut jännitykset muuttuivat maksimilämpötilaa muuttamalla.

Jännityksiksi valittiin ainoastaan positiiviset momentit. Tällöin saatiin todellinen kuva putkiston käyttäytymisestä lämpötiloja nostettaessa. Mikäli laskentaan otetaan mukaan suurimmat jännitykset, saattaisivat ne olla myös negatiivisia, mikä puolestaan kuvaisi putken jäähtymistä.

8.1 Verkon kestävyys

Kaukolämpöverkon rasitusten minimoimiseksi olisi hyvä, mikäli verkkoa pystyttäisiin ajamaan tasaisella lämmöllä. Menoveden lämpötilaa joudutaan kuitenkin säätämään vuodenaikojen mukaan. Lämmityskaudella lämpötilat voivat olla jopa 115 °C ja lämmityskauden ulkopuolella 86 °C. Lämmityskaudella tarkoitetaan aikaa, jolloin rakennukset tarvitsevat lämpöä lämmitykseen. Vuodenajoista riippuvat menoveden lämpötilat voidaan toteuttaa hallitusti nostamalla veden lämpötilaa portaittain ulkoilman viiletessä ja laskeamalla veden lämpötilaa ulkoilman lämmitessä. Tällöin vuorokautiset lämpötilan muutokset pysyvät pieninä ja verkon rasitukset jakautuvat tasaisesti läpi elinkaaren.

Lämpöverkon optimoimisen myötä tulisi käyttöön työkalu, jolla verkon lämpötilaa voitaisiin muuttaa melkein reaaliaikaisesti ulkolämpötilan mukaan. Optimoimisen idea on hyvä ja sillä saadaan laskettua lämpötiloja lähelle optimia. Ongelmaksi muodostuu pohjoinen ilmasto, jolloin vuorokauden sisällä ulkoilman lämpötilat saattavat muuttua yli 10 °C. Tällöin lämpöverkko ei voi seurata ulkoilman lämpötilaa ilman verkkoon kohdistuvien rasitusten nousua. Rasituksilla on suora vaikutus verkonosien kestävyysasteeseen. Tasaisella kuormalla ajaessa verkon jännitysvaihtelu on vähäistä ja kuormanvaihdot ovat maltilliset lisäten putkiston elinkaarta, kun taas vuorokautistasoisilla muutoksilla jännitysvaihtelut kasvavat ja kuormanvaihtoja syntyy enemmän, lyhemmässä ajassa.

Laskennassa saadut tulokset antavat kuvan siitä, miten lämpötilan muutokset aiheuttavat muutoksia putkistoon kohdistuvissa jännityksissä. Jännitysvaihtelut ovat parin asteen

muutoksissa vielä hyvällä tasolla, mutta kun veden lämpötilaa nostetaan yli 5 °C vuorokauden aikana, alkavat putkiin kohdistuvat jännitykset kasvamaan liian nopeasti. Verrattuna maltilliseen 1–2 °C vuorokautiseen lämpötilan nostoon lämpötilasyklejä syntyy samassa ajassa useampia.

8.2 Verkon käyttöikä

Helenin kaukolämpöverkon suunnittelussa putkistoille arvioidaan standardin EN-13941 määrittelemän 30-vuoden käyttöiästä poiketen 50 vuoden käyttöikä. Suunnittelun lähtökohtana on käytönaikaisten lämpötilojen vaihteluista aiheutuneiden jännitysten huomioiminen sekä niiden kompensointi. Kun suunnitteluun lisätään vielä laadukas kunnonhallinta, niin tavoiteltuun käyttöikään päästään nykyisillä verkon ajotavoilla.

Verkon käyttöikään vaikuttavia tekijöitä ovat lämpötilan muutoksien lisäksi mm. ulkopuoliset vauriot, paineiskut ja asennusvirheet. Mikäli ulkopuolisia tekijöitä ei huomioida ja tarkastellaan vain jännityksien kautta putkiston kestoikää, pitäisi nykyisellä verkon ajotavalla päästä vähintään 50-vuoden käyttöikään. Ajotavan muutos tulee vaikuttamaan käyttöikään jossain määrin, mutta käytössä olevilla materiaaleilla ja laskentatyökaluilla tulokset olivat hieman epämääräisiä. Laskennan kautta saadut käyttöiät vaihtelivat 20 ja 130 vuoden välillä, riippuen tutkittavista voimista. Mikäli laskennasta jätettiin ulos jäähtymisen aiheuttamat jännitykset, putken käyttöiän arviot nousivat liian korkeaksi. Puolestaan kaikki lämpöliikkeet huomioitaessa putkiston käyttöikäksi muodostui liian pieni, sillä sauvaelementtimallilla suurimmat momentit ilmenivät nimenomaan putken jäähtymisestä.

Standardissa EN-13941 esitetty laskentatapa jännitysvaihteluiden lukumäärästä ei anna tarpeeksi tarkkaa kuvaa epäsäännöllisestä lämpötilan muutoksen vaikutuksesta putkiston käyttöikään. Koska kaukolämpöverkon lujuustarkasteluun tarkoitettu SisKMR-ohjelma käyttää laskennassa kyseistä standardia, ei tämän tyyppistä laskentaa voitu suorittaa ohjelmalla.

9 Yhteenveto

Helenin kaukolämpöverkon lämpötilat ovat nykyisessä mallissa hyvin tasaisia eikä lämpötilan muutoksia juuri tehdä päivittäisellä tasolla. Verkon kestävyys kannalta nykyinen käytäntö on ihanteellinen, koska tasaisilla lämpötiloilla saadaan minimoitua putkistoon kohdistuvat jännitykset. Menoveden lämpötilan vaihtelun optimoimisessa tulisi kiinnittää huomiota lämpötilan vaihtelujen määrään. Mikäli lämpötilojen muutosnopeus säilyy nykyisellä tasolla, joka on enimmillään $2\text{ °C} / \text{vrk}$ tai $1\text{ °C} / 2\text{ h}$, niin silloin optimoisesta ei synny verkoston jännitysten kannalta muutoksia nykyiseen tilanteeseen verrattuna. Mikäli optimointia käytetään tasaamaan lämpötiloja tai laskemaan lämmityskauden aikaisia huippuja, niin silloin verkko ei tule rasittumaan nykyistä mallia enempää.

Vuorokautinen menoveden lämpötilan säätö on pyrittävä pitämään maltillisena ja mieluiten kulutuspiikkejä tasattaisiin akkumuloimalla verkkoa. Edestakainen lämpötilan säätö voi aiheuttaa käyttövarmuuden laskemista, sillä lämpötilaerojen kasvaessa elinkaaren päässä olevien johtojen vauriot tulevat kasvamaan. Jos lämpötilasäätö on liian jyrkkää, kasvaa hallitsemattomien suurvuotojen riski, etenkin suurissa betonikanavarakenteissa, korkeiden jännitysten alaisissa kohdissa esimerkiksi kiintopisteissä, kulmakohdissa yms. varsinkin jos ulkopuolinen vesi on jo päässyt aiheuttamaan rakenteelle korroosiota. Mikäli lämpötilan muutoksista alkaa syntyä nykyistä enemmän vuotoja, niin silloin saadut taloudelliset hyödyt tulevat menemään kunnossapito- ja modernisointi-investointeihin.

Kaukolämpöverkon käytön näkökulmasta optimointi on tervetullut idea ja varmasti lisää energiatehokkuutta pienentämällä lämpöhäviöitä. Tarkka lämpötilan noston ja laskun muutosnopeus tulisi selvittää insinööriä tarkemmin esimerkiksi Energiatieteiden toimeksiantona lujuustekniikan ammattilaisille. Koska tarkkaa lämpötilan muutosnopeutta ei saatu selvitettyä, tulisi energiasäätöä noudattaa lämpötilan muutoksissa nykyistä mallia, joka on käytännön kautta todettu hyväksi.

Lähteet

Toimintakertomus 2017. Verkkodokumentti. Helen Oy. <https://www.helen.fi/vuosikertomus/vuosikertomus-2017/>. Luettu 20.03.2018.

Energiateollisuus ry. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki.

Korhonen Tero. 2017. Vanhempi asiantuntija, Helen Oy. Haastattelu 4.12.2017.

Mäki Teemu. 2017. Kaukolämpöverkon rakennuttamisen laatukäsikirja Sisäinen tietokanta. Helen Oy.

Nuutinen Henriikki. 2017. Suunnittelupäällikkö, Helen Oy. Haastattelu 4.12.2017

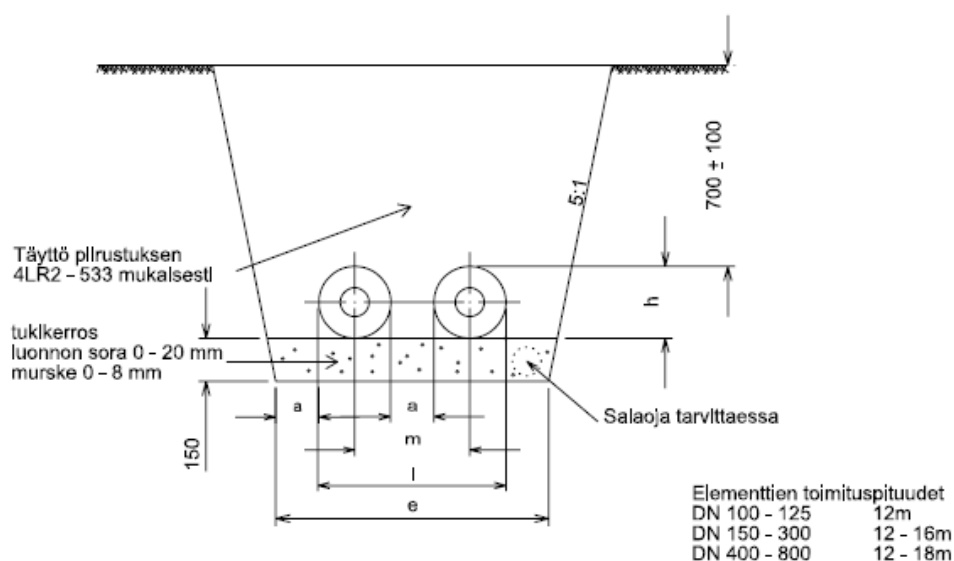
SFS-EN 13941. Design and installation of preinsulated bonded pipe systems for district heating. 2011. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

Ruokosalo Hannu. 2017. Käyttöinsinööri, Helen Oy. Haastattelu 6.11.2017.

Kaukolämpö käsikirja 2015. Verkkodokumentti. LOGSTOR Finland Oy. <https://www.logstor.com/media/5033/kaukolämpökäsikirja-2015.pdf>. Luettu 13.11.2017.


Energiantuotanto Helsingissä 2017. <https://www.helen.fi/yritys/energia/energiantuotanto/energiantuotanto2/>. Luettu 20.03.2018

2Mpuk- johdon tyypikuva

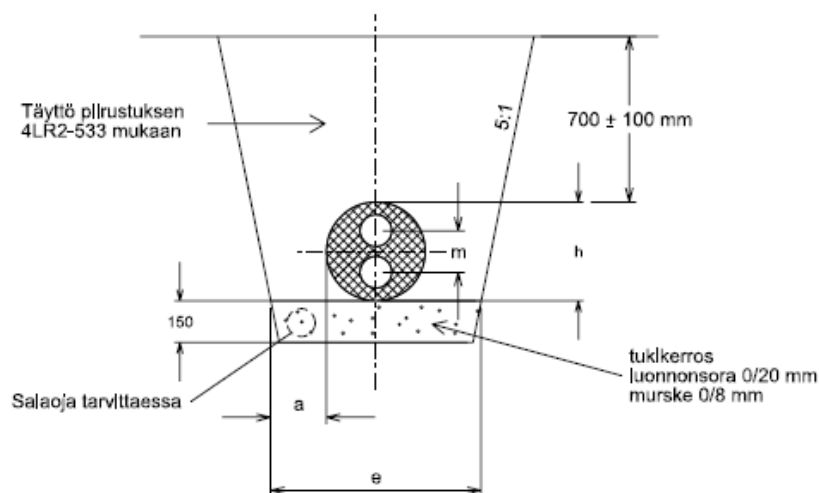


DN	Elementit		Putket		Kanavat				Kaivu	Pinta
	rakenne	m ³ /m	Du	m	h	e	l	a		
25	2M2	0,025	33,7	275	125	700	400	150	0,87	1,09
40	2M4	0,031	48,3	290	140	730	430	150	0,92	1,13
50	2M5	0,040	60,3	310	160	770	470	150	0,98	1,17
65	2M6	0,051	76,1	330	180	810	510	150	1,05	1,22
80	2M8	0,063	88,9	350	200	850	550	150	1,11	1,27
100	2M10	0,098	114,3	400	250	950	650	150	1,29	1,39
125	2M12	0,123	139,7	430	280	1010	710	150	1,40	1,46
150	2M15	0,156	168,3	465	315	1080	780	150	1,53	1,55
200	2M20	0,251	219,1	600	400	1400	1000	200	2,06	1,90
250	2M25	0,318	273,0	650	450	1500	1100	200	2,28	2,02
300	2M30	0,393	329,9	700	500	1600	1200	200	2,52	2,14
400	2M40	0,623	406,4	830	630	1860	1460	200	3,20	2,45
500	2M50	0,791	508,0	960	710	2170	1670	250	3,87	2,79
600	2M60	1,005	609,6	1050	800	2350	1850	250	4,17	3,01
700	2M70	1,570	711,2	1300	1000	2900	2300	300	6,05	3,64


L. Muutos tukikerrokseen 18.12.08 MNK

			Suunnittelija	JW
			Piikittynyt	JW
Kaukolämpöjohto 2Mpuk-elementtijohto			Tarkastanut	HeNu 3,12,15
			Hyväksynyt	
4LR1-756 L			Nähtynyt	
Suhde	Suhde	Suhde		

1Mpuk- johdon tyypikuva



DN	Elementti	Putket					Kanava			Kalvu	Pinta 1)
	tilavuus m³/m	Du mm	s mm	m mm	palno kg/m	vesilül. dm³/ johto-m	h mm	e mm	a mm	m²/m	m²/m
25	0,015	33,7	2,3	52,7	7,5	1,3	180	580	200	0,57	0,89
40	0,025	48,3	2,6	67,3	9,9	2,9	200	600	200	0,61	0,92
50	0,031	60,3	2,9	80,3	14,3	4,7	250	650	200	0,70	0,99
65	0,049	76,1	2,9	96,1	17,9	7,8	280	680	200	0,75	1,03
80	0,062	88,9	3,2	113,9	22,6	10,7	315	715	200	0,82	1,08
100	0,099	114,3	3,6	139,3	33,8	18,0	400	800	200	1,00	1,20
125	0,126	139,7	3,6	169,7	46,6	27,6	500	900	200	1,23	1,34
150	0,159	168,3	4,0	208,3	60,1	40,4	560	960	200	1,38	1,42
200	0,396	219,0	4,5	264,0	91,7	69,3	710	1110	200	1,80	1,63
250	0,636	273,0	5,0	318,0	137,4	108,7	900	1300	200	2,40	1,90

			Suunnittelija	HeNu
			Päätynyt	12.2.2014
Kaukolämpöjohto Mpuk-elementtijohto, suositus L1/2010			Tarkastanut	26.10.2015
			Hyväksynyt	
4LR1- 896 A			Nähtynyt	
Suhde	Suhde	Suhde		

Esimerkkilaskenta

Lähtötiedot:											
Peltto: Z=	1,4	m	Ulkokuori D=	0,8	m	Tmax=	120	°C	A=	13,45*10^3	13450 mm2
Pelttösyvyys	1	m	Teräsputki d=	0,61	m	Tmin=	10	°C		13,45*10^(-3)	0,01345 m2
pelttösyvyys z	1,1	m	Seinämä t=	0,0071	m	T=	60	°C	α=	0,0000124	1/°C
				7,1	mm	W=	0,002004	m3			
Teräskäyrä							p=	1000	kN/m2	E=	2,06*10^8 kN/m2
R=	2,5D	1219	mm								
Kitkakerroin μ=	0,4		Hiekkamassa c=	0							
tiheys γ=	18	kN/m3									
Kitkakulma φ =	35	°C									

Kitka:		Kitkavoima: F= 20,80 kN/m				Maaperän vastus:				Maaperävakio:				1,75		kitkakulma φ = 35		K= 9		Päälyste asfaltti: kerroin= 4					
Jännitys:		41958 kN/m2								pu= 907,2 kN/m															
L=		94,08 m								Pu= 725,76 kN/m															
Muodonmuutos:		0,033 m								Siirtymä y= 0,28 m															
Jännitykset:																									
ia1		ia2		ia3		ia4		ia5		iap		iap2		Nx		Vy		Vz		Mx		My		Mz	
1		4,315		1		1		8,631		1,16		2,158		kN -72,8		12,9		0		0		0		kN -74,3	
ia2=		4,315												N -72800		12900		0		0		0		N -74300	

Runkojohto: projekttiluokka C

Projektiluokka	y.fat	Johtotyyppi	kuormanvaihtoluvun min. Arvo
A	5	Runkojohto	100
B	6,67	Jakelojohto	250
C	10	Talojohto	1000

N= 1279,6
Kuormanvaihto: 128,0

Laskenta Helenin arvoilla

Lähtötiedot:

Peitto: Z=

Peittosyvyy s

peittosyvyy s

1.1

0.7

1.1

m

m

m

Teräskäyrä

R=

2,5D

1219

mm

Kitkakerroin μ=

tiheys γ=

Kitkakulma φ =

0.4

18

35

kN/m3

°C

Ulkokuori D=

Teräsputki d=

Seinämä t=

0.8

0.61

0.0071

m

m

m

d=

W=

0.6029

602.9

0.002004

m

mm

m3

Tmax=

Tmin=

T=

120

10

60

°C

°C

°C

A=

13,45*10^3

13,45*10^(-3)

α=

0.0000124

E=

2,06*10^8

mm2

m2

1/°C

kN/m2

kN/m2

Kitka:

Kitkavoima: F=

16,73

kN/m

Maaperän vastus:

Maaperävakio:

1,375

Kitkakulma φ =

35

K=

9

Päällyste asfaltti: kerroin=

4

Jännitykset:

Jännitys:

41958

kN/m2

pu=

712.8

kN/m

pu=

570.24

kN/m

Siirtymä γ=

0.22

m

Muodonmuutos:

0,041

m

ia1

1

ia2

4,315

ia3

1

ia4

1

ia5

8,631

iap

1,16

iap2

2,158

ia2=

4,315

Maksimiakselijännitys:

σa=

107,0

N/mm2

tai

-95,7

N/mm2

Referenssijännitys

411,02

N/mm2

Maksimileikkajännitys:

τ=

1,9

N/mm2

tai

-1,9

N/mm2

Jännitysvaihtelu

822,04

N/mm2

Maksimitangentiaalijännitys:

σt=

454

N/mm2

tai

-357

N/mm2

Nx

Vy

Vz

Mx

My

Mz

75,96

12,9

0

0

0

94,09

kN

kN

N

75960

12900

0

0

94090

N

N

Runkojohto: projektiluokka C

Projektiluokka

γfat

A

5

B

6,67

C

10

Johtotyyppi

kuormanvaihtoluvun min. Arvo

Runkojohto

100

Jakelujohto

250

Talojohto

1000

N=

1368,7

Kuormanvaihto

136,9

Kuormanvaihtojen max. arvo 115 °C

Lähtötiedot:

Peitto: Z=

1.1

m

Peittosyvys

0.7

m

peittosyvys z

1.1

m

Teräskäyrä

R=

2.5D

1219

mm

Kitkakerroin μ=

0.4

Kitkakerroin μ=

18

tiheys γ=

35

°C

Kitkakulma φ =

35

°C

Ulkokuori D=

0.8

m

Teräsputki d=

0.61

m

Seinäämä t=

0.0071

m

7.1

mm

Tmax=

120

°C

Tmin=

10

°C

T=

60

°C

A=

13,45*10^3

13450

mm2

13,45*10^(-3)

0,01345

m2

α=

0,0000124

1/°C

p=

1000

kN/m2

E=

2,06*10^8

2,06E+08

kN/m2

Maaperän vastus:

Maaperävakio:

1,375

kitkakulma φ = 35

K= 9

Päällyste asfaltti: kerroin=

4

Kitka:

Kitkavoima: F=

16,73

kN/m

Jännitys:

41958

kN/m2

L=

116,97

m

Jännitykset:

Muodonmuutos:

0,041

m

Arvot sisKMR:

Nx	Vy	Vz	Mx	My	Mz
45,88	12,9	0	0	0	48,73
N	45880	12900	0	0	48730
					N

Referenssijännitys

235,67

N/mm2

Jännitysvaihtelu

471,34

N/mm2

Johtotyypit

Runkojohto	100
Jakelojohto	250
Talojohto	1000

Projektuluokka

A	5
B	6.67
C	10

N=

12663,3

Kuormanvaihto=

1266,3

Runkojohto: projektuluokka C

Projektuluokka	y.fat
A	5
B	6.67
C	10

N=

12663,3

Kuormanvaihto=

1266,3

Kuormanvaihtojen max. arvo 120 °C

Lähtötiedot:

Peitto: Z=

1,1

m

Peittosyvyyt

0,7

m

peittosyvyyt z

1,1

m

Teräskäyrä

R=

2,5D

1219

mm

Kitkakerroin μ=

0,4

kn/m3

tiheys γ=

18

°C

Kitkakulma φ =

35

°C

Ulkkokuori D=

0,8

m

Teräsputki d=

0,61

m

Seinämä t=

0,0071

m

7,1

mm

d=

0,6029

m

602,9

mm

W=

0,002004

m3

Tmax=

120

°C

Tmin=

10

°C

T=

60

°C

p=

1000

kn/m2

A=

13,45*10^3

13450

mm2

13,45*10^(-3)

0,01345

m2

α=

0,0000124

1/°C

E=

2,06*10^8

2,06E+08

kn/m2

Kitka:

Kitkavoima: F=

16,73

kn/m

Maaperän vastus:

Maaperävakio:

1,375

kitkakulma φ = 35

K= 9

Päällyste asfaltti: kerroin=

4

Jännitykset:

Jännitys:

41958

kn/m2

L=

116,97

m

Muodonmuutos:

0,041

m

Arvot sisKMR:

Nx

51,74

kn

Vy

12,9

N

Vz

0

N

Mx

0

N

My

0

N

Mz

59,84

kn

Referenssijännitys

278,64

N/mm2

Jännitysvaihtelu

557,27

N/mm2

Runkojohto: projektiluokka C

Projektiluokka

V.fat

Johtotyyppi

kuormanvaihtoluvun min. Arvo

A

5

Runkojohto

100

B

6,67

Jakelujohto

250

C

10

Talojohto

1000

N=

6480,5

Kuormanvaihto:

648,1

Kuormanvaihtojen max. arvo 125 °C

Lähtötiedot:

Peitto: Z=

1,1

m

Peittosyvyy s

0,7

m

peittosyvyy s z

1,1

m

Teräskäyrä

R=

2,5D

1219

mm

Kitkakerroin μ=

0,4

tiheys γ=

18

kitkakulma φ =

35

°C

Ullokuori D=

0,8

m

Teräsputki d=

0,61

m

Seinämä t=

0,0071

m

d=

0,6029

m

W=

602,9

mm

W=

0,002004

m3

Tmax=

120

°C

Tmin=

10

°C

T=

60

°C

p=

1000

kN/m2

A=

13,45*10^3

mm2

13,45*10^(-3)

0,01345

m2

α=

0,0000124

1/°C

E=

2,06*10^8

2,06E+08

kN/m2

Kitka:

Kitkavoima: F=

16,73

kN/m

Jännitys:

41958

kN/m2

L=

116,97

m

Muodonmuutos:

0,041

m

Maaperän vastus:

Maaperävakio:

1,375

kitkakulma φ = 35

K= 9

Päällyste asfaltti: kerroin=

4

Jännitykset:

Arvot sisäMMR:

Nx	Vy	Vz	Mx	My	Mz
57,34	12,9	0	0	0	71,7
N	57340	12900	0	0	71700
kN					N

Maksimiaksaaliijännitys:

σa=

81,5

N/mm2

tai

-72,9

N/mm2

Maksimileikkausjännitys:

τ=

1,9

N/mm2

tai

-1,9

N/mm2

Maksimitangentiaaliijännitys:

σt=

357

N/mm2

tai

-260

N/mm2

Referenssiijännitys

324,53

N/mm2

Jännitysvaihtelu

649,06

N/mm2

Runkojohto: projektiluokka C

Projektiluokka	γ,fat	Johtotyyppi	kuormanvaihtoluvun min. Arvo
A	5	Runkojohto	100
B	6,67	Jakelojohto	250
C	10	Talojohto	1000

N=

3521,6

Kuormanvaihto

352,2

