



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

TATU SOIKKELI  
JÄMSÄN HALLIN KAUKOLÄMPÖVERKON OPTIMOINTI

Kandidaatintyö

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	KAUKOLÄMMITYS .....	2
2.1	Yleistä tietoa kaukolämmityksestä .....	2
2.2	Suomen kaukolämmityksen historia .....	3
2.3	Hallin kaukolämpöverkko .....	4
2.4	Kanaviston ja putkiston rakenne .....	5
3.	FLOWRA-OHJELMAN ESITTELY .....	8
4.	OPTIMOINTI JA SIMULOINTI.....	12
5.	TULOKSET .....	15
5.1	Kaukolämpöverkon tarkastelun tulokset.....	15
5.2	Manuntien tarkastelun tulokset .....	16
6.	YHTEENVETO .....	18
	LÄHTEET.....	19

LIITE A: ET-114C Mpuk-kanavan tyyppikuva

LIITE B: Ajoraportti Flowra-ohjelmalla

# 1. JOHDANTO

Kaukolämmitys on kasvava ala Suomessa. Yhä useammalla paikkakunnalla käytetään kaukolämpöä lämmittämään asuinrakennuksia ja julkisia tiloja. Kaukolämpöverkkoa käytetään siirtämään lämpö asiakkaalle. Jotta kaukolämpöä tuottava yritys ei joutuisi toimimaan tappiolla, pitää kaukolämpöverkko suunnitella ja optimoida hyvin.

Kandidaatintyö on tehty ProCadme Team Oy:lle ja sen tarkoituksena on tarkastella Jämsän Hallin kaukolämpöverkon optimointia. Työssä tutustutaan verkostonlaskentaohjelmaan nimeltä Flowra, lisäksi ohjelmalla mallinnetaan ja optimoidaan työssä tarkasteltava Hallin kaukolämpöverkko. Optimoinnin avulla pyritään löytämään sopivin ratkaisu siihen, että kaukolämpöverkon kannalta kaukolämmön tuotanto ja jakelu olisi mahdollisimman taloudellista.

Työssä pyritään mallintamaan tarkasteltava verkko mahdollisimman tarkasti ja etsimään sopivia menetelmiä ja ratkaisuja, jotta kaukolämpöverkkoa pystyttäisiin käyttämään ja operoimaan mahdollisimman tehokkaasti ja taloudellisesti. Kaukolämpöverkon tarkastelussa ei oteta huomioon kaikkia kustannuskomponentteja, vaan käytetään saatuja tietoja lämpölaitoksen lämmöntuotosta ja tehosta välittämättä sen enempää esimerkiksi mitä polttoainetta käytetään. Työssä tarkastellaan myös suunnitteilla olevaa osaa, joka olisi tarkoitus liittää osaksi kaukolämpöverkkoa. Suunnitteilla olevalle alueelle etsitään sopivin putkiko mallintamalle se ohjelmalla ja laskemalla tiettyjä arvoja eri putkikoille.

Työ alkaa kaukolämmön teoriaa käsittelevästä osasta, jossa esitetään aluksi yleistä teoriaa kaukolämmityksestä, sitten Suomen kaukolämmityksen historiaa, sen jälkeen Hallin kaukolämpöverkkoa ja viimeiseksi kaukolämpöverkossa käytettävän putkiston rakennetta. Seuraavaksi esitellään verkoston mallintamiseen käytettävää Flowra-verkostonlaskentaohjelmaa ja sen toimintaa. Näiden avulla olisi tarkoitus muodostaa kuva, jonka avulla pystytään hahmottamaan kaukolämpöverkon käyttöä ja miettimään sopivia ratkaisuja käytön optimoimiseen.

Teoria-osan jälkeen tulee kokeellinen osa, jossa kaukolämpöverkkoa mallinnetaan ja optimoidaan annettujen parametrien avulla. Valmista mallinnettua verkkoa simuloidaan kokeellisissa olosuhteissa ja verrataan oikealta lämpölaitokselta saataviin arvoihin ja tietoihin. Saadut tulokset kerätään lukuun 5, missä ne esitellään ja käydään läpi ja pohditaan mitkä ovat parhaat mahdolliset asetukset ja tiedot, joilla verkkoa voidaan ajaa. Viimeisenä on yhteenveto, jossa summataan työssä tehdyt asiat ja saadut tulokset.

## 2. KAUKOLÄMMITYS

### 2.1 Yleistä tietoa kaukolämmityksestä

Kaukolämmityksellä tarkoitetaan rakennusten ja käyttöveden lämmittämiseen tarvittavan lämmön keskitettyä tuotantoa ja julkista jakelua asiakkaina oleville kiinteistöille. Kaukolämmitystä varten organisoitu toiminta toteutetaan yleensä liiketoimintana. [1]

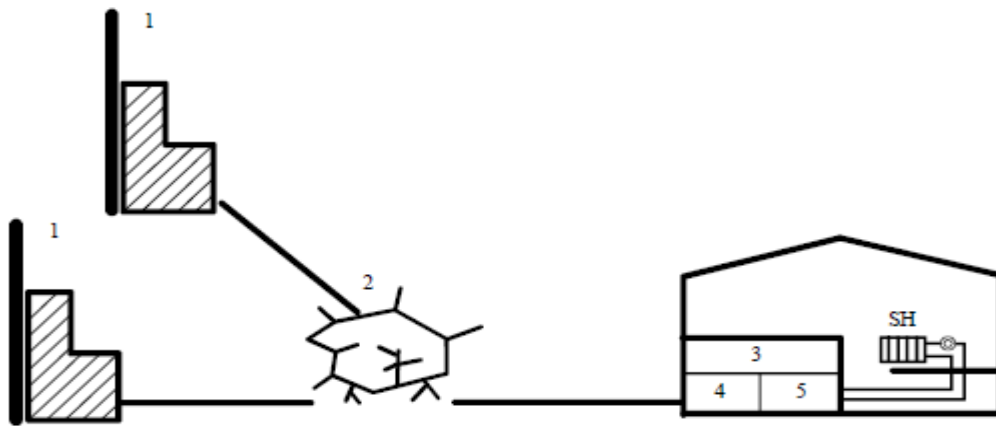
Kaukolämmityksen tyypillisiä ominaisuuksia ovat seuraavat:

- Lämpö tuotetaan keskitetyssä kohteessa tai kohteissa ja jaetaan verkon välityksellä asiakkaille.
- Siirtoaineena on vesi tai höyry.
- Asiakkaina ovat asuintalot, liikerakennukset ja julkiset rakennukset.
- Asiakkaat käyttävät lämpöä rakennuksen tilojen ja käyttöveden lämmittämiseen. [1]

Suurimmat edut, joita kaukolämmityksellä saadaan, ovat energiatehokkuus, ympäristöystävällisyys, kokonaistaloudellisuus ja toimintavarmuus. Energiatehokkuus perustuu sähkön ja lämmön yhteistuotantoon. Turbiinissa osittain jäähtynyt vesi lauhdutetaan takaisin vedeksi, jotta se voidaan sen jälkeen pumpata takaisin kattilaan höyrystettäväksi. Lämmönsiirrinten avulla saadaan hyödynnettyä lauhdutuslämpö kaukolämpöverkkoon. Tällä tavalla polttoaineesta saadaan hyödyksi suurempi osa kuin käyttämällä se pelkästään jäähdyttämiseen. Ympäristöystävällisyyden suurin etu tulee kaukolämmön yhteistuotannon kautta. Yhteistuotannossa samasta polttoainemäärästä saadaan hyödynnettyä enemmän, jolloin savukaasujen ja muiden haitallisten kasvihuonekaasujen päästömäärät vähenvät verrattuna perinteiseen erillistuotantoon lauhdutusvoimalaitoksissa ja rakennuskohtaisissa lämpökeskuksissa. [2]

Kaukolämpölaitoksissa pystytään myös helpommin ja tehokkaammin käyttämään uusiutuvia ja ympäristöystävällisiä polttoaineita, mikä vähentää muun muassa CO<sub>2</sub>-päästöjä. Kaukolämmityksen tuotantolaitoksissa pystytään parantamaan energiatehokkuutta verrattuna rakennuskohtaisiin lämmitysjärjestelmiin, koska suurten kattilalaitosten hyötysuhde on parempi verrattuna useamman pienemmän laitoksen yhteenlaskettuun hyötysuhteeseen. Suuremmissa laitoksissa pystytään käyttämään halvempia polttoaineita, ja niissä on ammattitaitoinen käyttöhenkilökunta sekä jatkuva valvonta. [2]

Nykyaikainen kaukolämpöjärjestelmä koostuu kolmesta pääkohdasta. Pääkohdat ovat lämmöntuotantolaitokset (lämmitysvoimalaitokset ja lämpökeskukset), kaukolämmön jakeluverkosto, sekä kaukolämmön asiakaslaitteet (mittakeskus ja lämmönjakokeskus). [2]

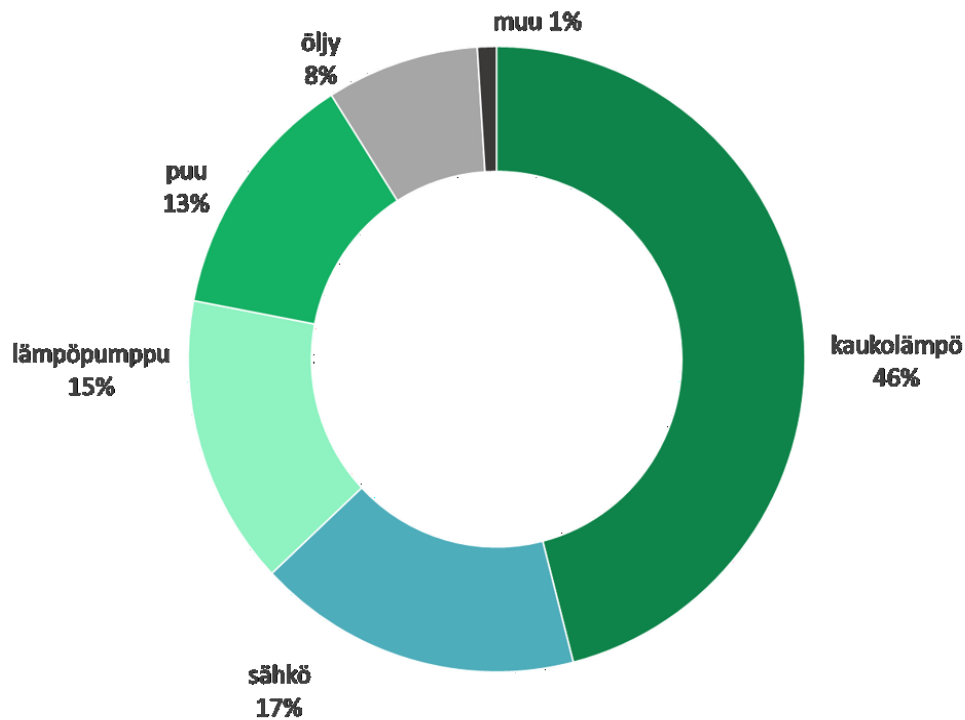


*Kuva 1. Kaukolämpöjärjestelmän pääosat [2]*

Kuvassa 1 on esitelty kaukolämpöjärjestelmän pääosat. Kaukolämpöjärjestelmän pääosiin kuuluvat kaukolämmön tuotantolaitos (numero 1), kaukolämpöverkko (numero 2), kaukolämmön mittauskeskus (numero 4) sekä lämmönjakokeskus (numero 5). Kaukolämmön mittauskeskuksesta ja lämmönjakokeskuksesta käytetään yhteisnimitystä kaukolämmön asiakaslaitteet (numero 3). [2]

## 2.2 Suomen kaukolämmityksen historia

Kaukolämmitys on teollisuudenalana varsin nuori. Suomeen ajatus kaukolämmöstä oli levinnyt 1800-luvun lopulla. 1920-luvulla Sähköinsinööriliitto kaavaili yhdistettyä sähkön- ja lämmöntuotantoa. Vuonna 1928 perustettu komitea laati asiasta mietintöä, jonka se sai valmiiksi 1939. Kehitystyö jäi vaisuksi toisen maailmansodan takia. Vuonna 1940 rakennettiin Suomen ensimmäinen kaukolämpöjärjestelmä Helsingin olympiakylään. Kaukolämmitystä ruvettiin harjoittamaan laajemmin vasta 1950-luvulla, kun Helsingin kaupungin sähkölaitos päätti 1953 kaukolämmityksen aloittamisesta. 1957 varsinainen vesikaukolämmitys käynnistyi Helsingissä. Laajemmassa mittakaavassa kaukolämmitystä ruvettiin harjoittamaan 1970-luvulla, kun vuoden 1973 energiakriisin seurauksena kaukolämmön merkitys kasvoi. 1980-luvulla kaukolämpöverkot laajenivat ympäri maata, ja 1990-luvulla kaukolämmitys vakiintui taajama-alueiden lämmitysmuodoksi. Kaukolämmitys laajeni yhä pienempiin taajamiin, joissa paikallisten polttoaineiden merkitys lämmitysratkaisuissa kasvoi. [1]



**Kuva 2.** Lämmitysten markkinaosuudet asuin- ja palvelusrakennuksissa vuonna 2017. Kaukolämmön osuus on 46 %. [3]

Vuonna 2017 Suomessa asuin- ja palvelurakennusten lämmityksestä noin 46 prosenttia tuotettiin kaukolämmön avulla, mikä näkyy kuvassa 2 esitetystä lämmityksen markkinaosuuksien ympyrädiagrammissa. Vuosi 2017 oli asteen normaalivuotta lämpimämpi ja tämän takia kaukolämmityksen käyttö kuukausittain oli normaalia vähäisempää, paitsi huhtikuussa, jolloin oli normaalia kylmempää. [3]

### 2.3 Hallin kaukolämpöverkko

Hallin kaukolämpöverkkoa aloitettiin rakentamaan vuonna 2003. Ensimmäinen vaihe saatiin valmiiksi 2004. Mimminkaaren asuinalue liitettiin verkkoon vuonna 2006. Kaukolämpöverkkoa on laajennettu joka toinen vuosi alkaen vuodesta 2007. 2009 rakennettiin Viilaajantien asuinalue, josta saatiin uusia asiakkaita 13 kappaletta. Vuonna 2016 rakennettiin Keskustiestä, Niilontiestä ja Vehkaojantiestä koostuva alue, mikä lisäsi 7 isompaa kiinteistöä kaukolämpöverkkoon. Vuonna 2017 verkkoon lisättiin Järvensivun asuinalue, mikä toi noin 25 asiakasta lisää. [4]

Vuonna 2018 päätettiin Manuntien lisäämisestä verkkoon, jolloin saadaan noin 10 asiakasta lisää. Manuntien rakentaminen olisi tarkoitus aloittaa kesällä 2018. Tämä verkko, mukaan lukien kesällä rakennettava Manuntien osuus, olisi tarkoitus mallintaa ja optimoida tässä työssä. [4]



*Kuva 3. 4MW:n biolämpölaitos, Halli [5].*

Kuvassa 3 on esitetty vuonna 2017 valmistunut biolämpölaitos, jossa on Tampereella valmistettu Laatukattilan Y-kattila, joka toimii kaasutusperiaatteella. Kattila käyttää polttoaineena pääosin metsähaketta. Kuvassa 3 näkyvällä laitoksella tuotetaan työssä tarkasteltavaan verkkoon tarvittava energia. Kattilan vesitilavuus on yli 20 m<sup>3</sup>. [4]

## 2.4 Kanaviston ja putkiston rakenne

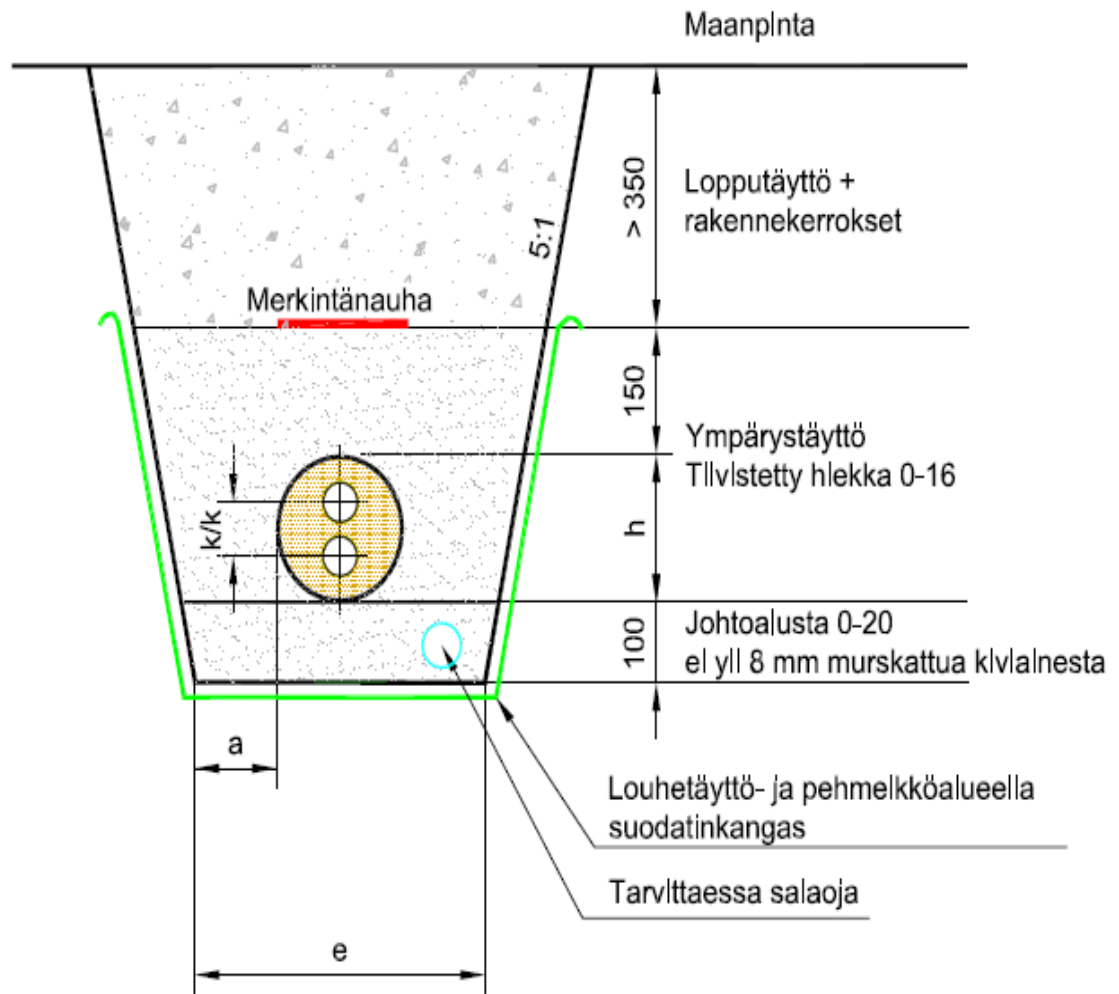
Verkoston rakentamisessa käytetään yksiputki eli 2Mpuk tai kaksiputki eli Mpuk putkia. Mpuk nimilyhenne tulee sanoista: M tarkoittaa erityis- tai johtoelementin polyeteenimuovista ulkokuorta, pu on lyhenne polyuretaanivaahdolle, jota käytetään putkessa eristeenä ja k tarkoittaa, että putket ovat kiinni eristyksessä. Kuvassa 4 on valokuva Mpuk100-putken sijoittumisesta kaivantoon. Kuva on otettu Jämsän Lukkoilantieltä vuodelta 2015.



***Kuva 4. Kaivantokuva Mpuk-johdosta***

Kaksiputkijohdossa sekä meno- että paluupuolen virtausputket ja yhteinen polyeteenikuori on liitetty kiinteästi yhteen polyuretaanieristeellä. Alempi putki on menoputki, joka on sijoitettu paluuputken alle lämpöhäviön vähentämiseksi. Kaksiputkisen johdon materiaalitarve on pienempi ja jatkosten tekeminen vähentyy puoleen verrattaessa yksiputkijohtoon. [1]



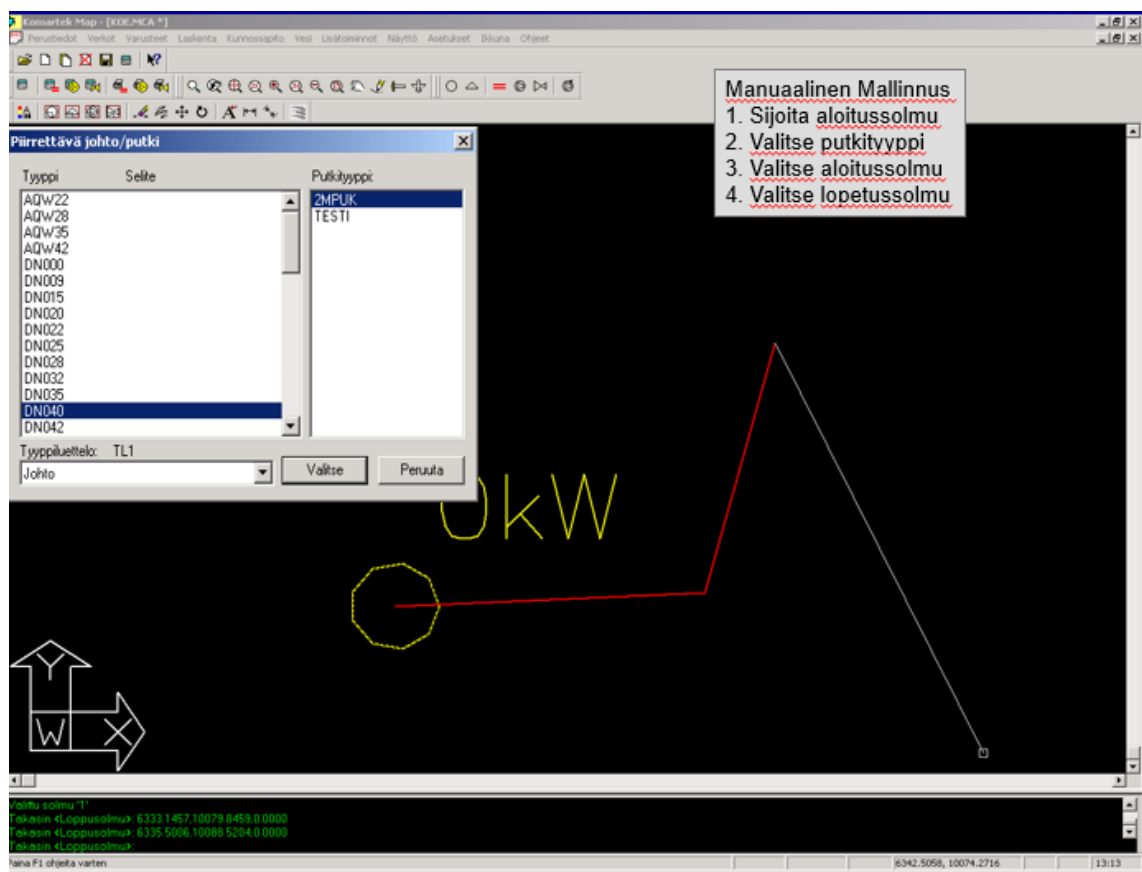


**Kuva 5.** Mpuk-putken tyypipiirustus. Kanavan poikkileikkaus.

Kuvassa 5 on esitelty kaksiputkijohdon Mpuk tyypipiirustus, josta näkee, miten putki sijoitetaan maahan verkostoa rakennettaessa. Liitteessä A on esitetty tarkemmin kuva 5 ja käyty läpi putkille kokovälillä DN15–DN250 olevat parametrit ja niiden merkitykset.

### 3. FLOWRA-OHJELMAN ESITTELY

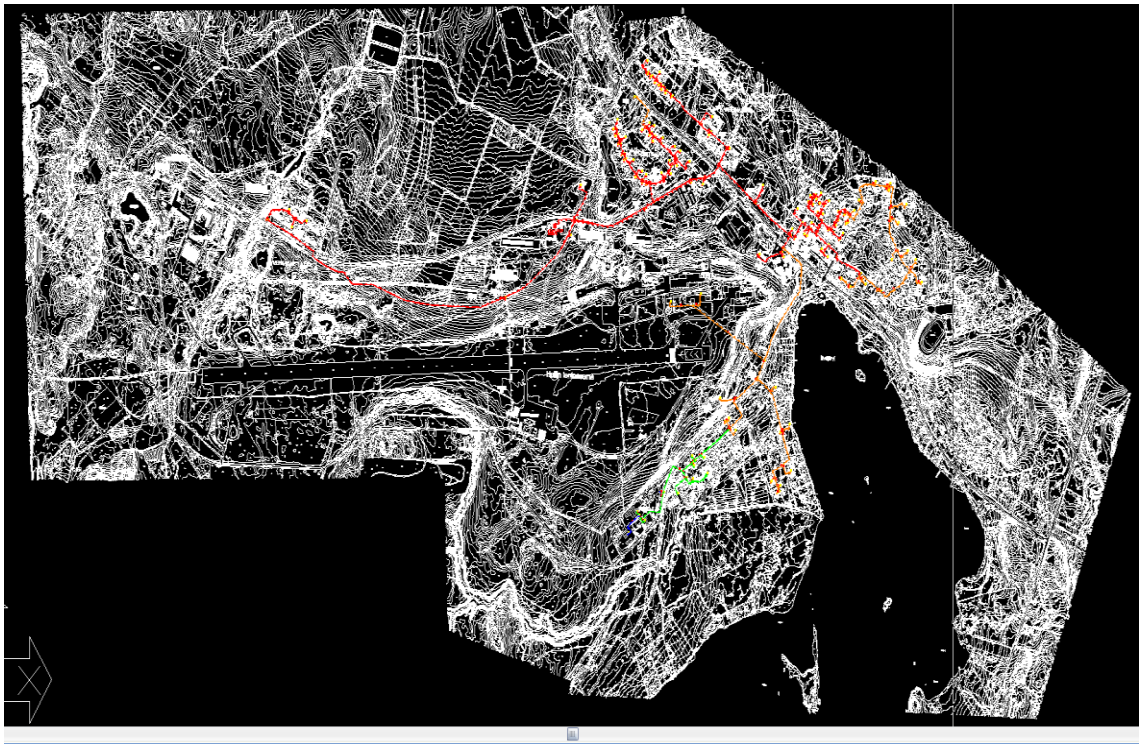
Tässä luvussa esitellään työssä käytettävää Logica MAP -verkostonlaskenta- ja mallin-  
nusohjelmaa, joka tunnetaan myös nimellä Flowra. Tarkoituksena on esitellä ohjelman  
toimintaa, jotta lukijan on helpompi ymmärtää tulevissa luvuissa esitettäviä kuvia ja rat-  
kaisuja. Ohjelmassa voidaan mallintaa verkkoa manuaalisesti ilman mitään apuvälineitä,  
tämä esitetään kuvassa 6. Aluksi sijoitetaan aloitussolmu haluttuun kohtaan ja sen jälkeen  
valitaan haluttu putkityyppi listasta. Putkityypin valinnan jälkeen aloitetaan piirtämään  
alotussolmusta vapaasti valittua reittiä pitkin. Kun on saatu piirrettyä haluttu alue, viiva  
liitetään lopetussolmuun kiinni.



**Kuva 6.** Verkon mallintaminen ilman apuvälineitä

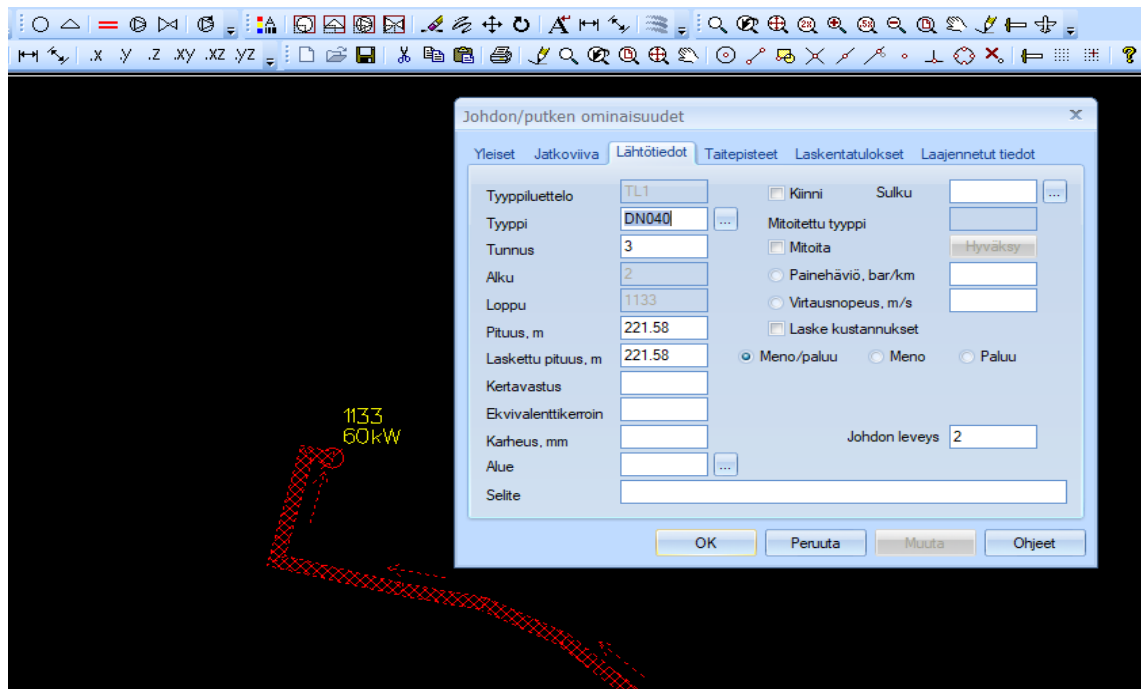
Mallintaminen ilman apuvälineitä voi olla hankalaa tässä tapauksessa, kun tarkoituksena  
on mallintaa kaupungin kaukolämpöverkkoa, joten tarvitaan muutamia apuvälineitä, esi-  
merkiksi kaupungin pohjakartta ja suunnitelma putkiverkoston kulkupaikasta. Verkosto  
mallinnetaan kaupungin vektorimuotoisen kartan päälle, joka on annettu koordinaateissa  
(ETRS-TM35FIN). Kartta muokataan AutoCAD-ohjelmalla Flowralle sopivaksi ja siitä  
poistetaan turhia osia, kuten puita ja pensaita, sekä pyritään saamaan sen tiedostokoko

mahdollisimman pieneksi. Kartta tallennetaan dwg-muodossa, jotta se on helposti avattavissa Flowralla. Flowra tukee yli 30:tä eri tiedostomuotoa, mutta dwg-tiedostomuotoa on helpointa käsitellä ja muokata. Mallinnuksessa otetaan huomioon halutut putkikoot, korkeusasemat sekä Jämsän Aluelämpö Oy:ltä saatavat tiedot kattiloiden tehoista, pumpuista ja asiakkaista (tilaustehot). Kuvassa 7 on esitetty työssä käytettävä Hallin kaupungin kartta, jonka päälle on tarkoitus mallintaa käsiteltävä kaukolämpöverkko. Kartta on saatu Jämsän kaupungilta dwg-muodossa. Kartta on esitetty mustavalkoisena selvyiden vuoksi.



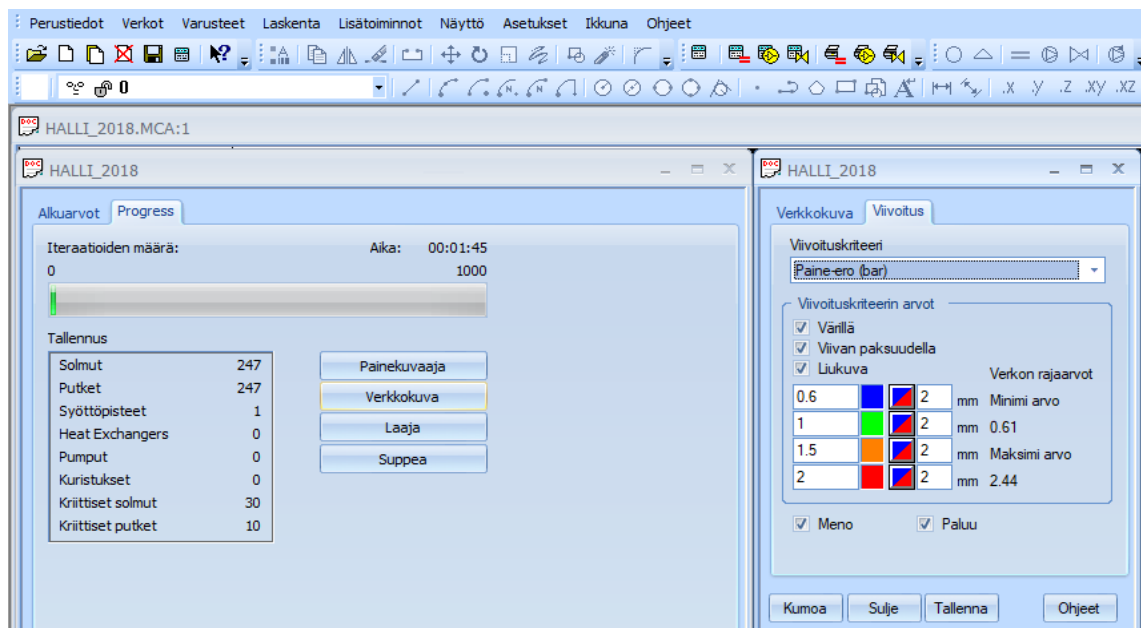
*Kuva 7. Hallin kaupungin vektorimuotoinen kartta*

Sijoitettuja solmuja ja piirrettyjä putkia ja niiden tietoja voidaan muokata valitsemalla ohjelmasta kysely ja valitsemalla sen jälkeen muokattava kohde. Kun muokattava kohde on valittu, esimerkiksi putki, aukeaa kuvan 8 mukainen ikkuna, jossa on annettuna putken sen hetkiset tiedot. Avatusta ikkunasta voidaan muuttaa putken kokoa, voidaan asettaa putkelle karheus ja voidaan sulkea koko putki, jolloin siinä ei virtaa enää vettä. Lisäksi kuvasta 8 näkee, että ikkuna sisältää myös muita välilehtiä, mutta näistä työlle olennaisin on lähinnä vain laskentatulokset-välilehti.



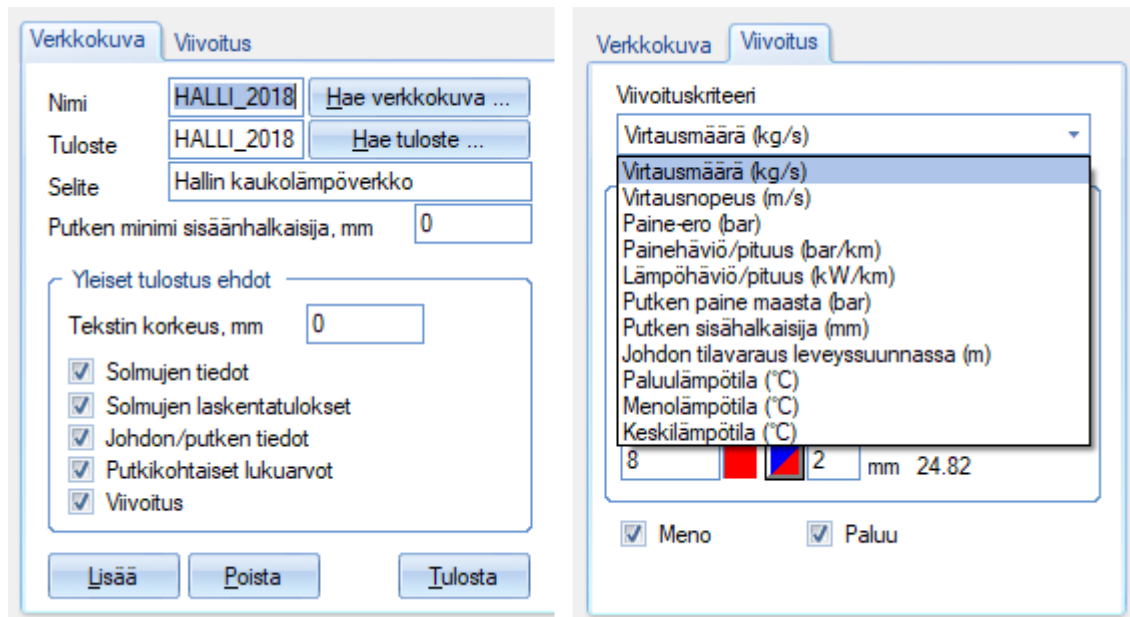
**Kuva 8.** Putken tietojen muokkausikkuna

Kun verkosto on saatu mallinnettua, voidaan sillä suorittaa erilaisia laskentoja ja saatuja arvoja voidaan verrata todellisiin arvoihin lämpölaitoksella. Laskemaan Flowralla pääsee valitsemalla päävalikosta laskenta- kohdan alapuolelta kohdan laskenta. Näytölle aukeaa kuvan 9 mukainen ikkuna, josta voidaan valita, halutaanko tarkastella painekuvaajaa, verkkokuva tai halutaanko tulostaa suppea tai laaja raportti koko verkostosta.



**Kuva 9.** Verkoston laskentaikkunat

Kuvasta 9 näkee myös, kun painaa verkkokuva- painiketta, niin pääsee valitsemaan au-keavasta ikkunasta viivoitus- välilehden alta mitä haluaa verkossa tarkastella. Verkkokuva- vassa voi tarkastella esimerkiksi putkissa olevaa paine-eroa, painehäviötä, virtausmäärää, virtausnopeutta, lämpöhäviöitä ja lämpötiloja. Tarkasteltavat arvot on merkattu väreillä, minimi arvossa käytetään väriä sininen ja maksimi arvossa väriä punainen, mutta värit voi itse valita ja muuttaa tilanteeseen sopiviksi.

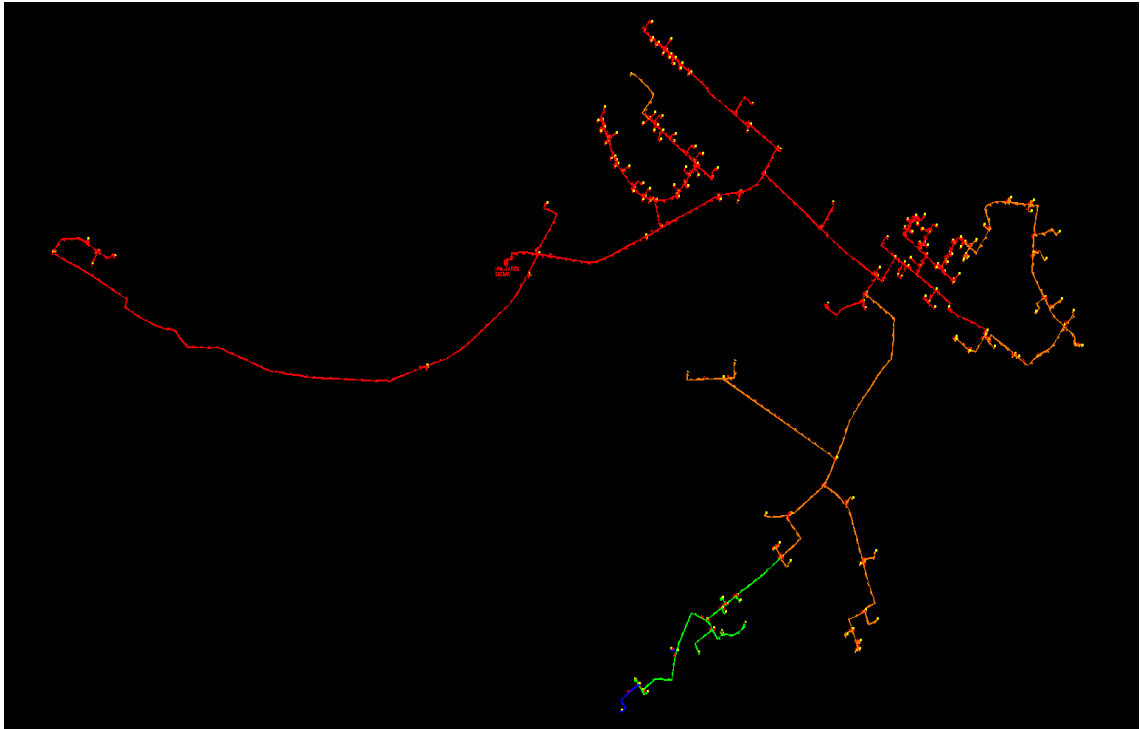


**Kuva 10.** Verkkokuva- välilehti ja tarkempi listaus tarkasteluparametreista

Kuvassa 10 on esitelty tarkempi listaus valittavissa olevista tarkasteluparametreista. Kuvasta 10 näkee myös mitä asioita voi valita tulostusnäkyymään, näitä ovat muun muassa solmujen tiedot, johdon tai putken tiedot ja viivoitus. Työssä tarkastellaan tarkemmin kaukolämpöverkoston paine-eroja, virtausnopeuksia ja lämpötilaeroja, joten nämä parametrit ovat tärkeimpiä kuvassa 10 näkyvästä kriteerilistasta.

## 4. OPTIMOINTI JA SIMULOINTI

Kun verkosto on saatu kokonaan mallinnettu Flowralla, voidaan sitä ruveta testaamaan eri parametreillä ja vertailla saatuja tuloksia todellisiin arvoihin. Kuvassa 11 on esitetty valmiiksi mallinnettu kaukolämpöverkko.



*Kuva 11. Valmiiksi mallinnettu kaukolämpöverkko*

Tarkoituksena on tarkastella kuinka putkikoon valinta tai alueen rengastus vaikuttaa asiakkaalle menevään lämpötilaan ja paine-eroon. Suurin osa verkosta on jo valmiiksi rakennettu ja toiminnassa, joten voimme vain tarkastella simuloimalla, kuinka hyvin kaukolämpöverkon aikaisempi mitoitus on onnistunut. Vertailemalla saatuja tuloksia oikeisiin lämpölaitokselta saataviin tietoihin saadaan laskenta kalibroitu. Manuntien osuutta ei olla vielä rakennettu, joten sitä aluetta tarkastelemme tässä työssä tarkemmin ja selvitämme mitkä olisivat parhaat putkikoot ja tarvitseeko käyttää apuna alueen rengastusta. Rengastuksella tarkoitetaan sitä, että vesi pystyisi kiertämään ympyrämäisesti jonkin lämmitettävän alueen, eikä joutuisi palaamaan samaa reittiä takaisin.

Otsaketiedot Laskentaparametrit Verkkomallin näkymä Verkon mallinnuksen asetukset

Lämpötilatiedot (°C)		Paineiden kiinnitystiedot (bar)	
Ulkoilma	-35	Minimi paine-ero	0.6
Menovesi	112	Paluupaine	2
<input checked="" type="radio"/> Kiinteä jäähdytys	50	Menopaine vapaassa syöttöpisteessä	8
<input type="radio"/> Liukuva syöttölämpötila vastaava jäähdytys		Paluupaine vapaassa syöttöpisteessä	4
Maksimi toisiolämpötila		Minimi paine-ero	0.5
<input type="checkbox"/> Laske solmun jäähdytys regressiosuorien mukaan		Menopaine	8
Muut parametrit		Laskennan ohjaustiedot	
Putkikarheus (mm)	0.03	Paineiden tarkkuus (%)	0.1
Kinemaattinen viskositeetti (m <sup>2</sup> /s)	0.0000004	Virtauksen tarkkuus (%)	0.1
Nesteen tiheys (kg/m <sup>3</sup> )	985.4	Iteraation kiihdytyskerroin	1.2
Nesteen ominaislämpö (J/kgK)	4186	Max. iteraatioiden lukumäärä (kpl)	1000
Tehokertoimen valinta			
<input checked="" type="radio"/> Kiinteä tehokerroin (%)	70		
<input type="radio"/> Tehokerroin ulkolämpötilan funktiona (%)	70.0		
<input type="checkbox"/> Laske solmun tehot regressiosuorien mukaan			
Lämpötilat		Tehot (%)	
Min. lämpötila	-27	Max. teho	100
Käännelämpötila	8	Vakioteho	20

*Kuva 12. Laskentaparametrit*

Kuvassa 12 on esitetty laskennassa käytettävät parametrit. Minimi Paine-eroksi on määritetty 0,6 baaria, mikä on energiateollisuuden määrittämä minimi paine-ero asiakkaalla. Kiinteä jäähdytys on 50 celsius astetta. Kiinteällä jäähdytyksellä tarkoitetaan meno- ja tuloveden erotusta, eli sitä kuinka paljon vesi jäähtyy, kun se käy kääntymässä asiakkaalla. Kiinteä tehokerroin on määritetty 70 %:iin. Tehokertoimen avulla simuloidaan verkon maksimilämpötehoa, koska asiakkaiden lämmöntarve risteilee ajankohdasta riippuen. Mitoituslämpötila vaihtelee Suomen eri osissa ja Jämsässä mitoituslämpötila on -35 celsiusastetta [1]. Mitoituslämpötiloja eri paikkakunnille löytyy Kaukolämmön käsikirjasta [1] ja lisätietoja putkien mitoista ja asennustiedoista voi tarkistaa Logstorin julkaisemasta Kaukolämpökäsikirja 2015:sta [6].

Ohjelma laskee tulokset nopeasti ja vaivattomasti, mutta osa tuloksista pystytään myös laskemaan käsin, jos tiedetään tarvittavat parametrit. Kaukolämpöputkien mitoitus tehdään jokaiselle verkoston osalle niiden tarpeiden mukaisesti. Merkittävimmät muuttuvat tekijät mitoituksessa, siirrettävän tehon lisäksi, ovat meno- ja paluuputken välinen lämpötilaero eli kaukolämpöveden jäähtymä, sekä lämpimän käyttöveden tehontarpeen vaihtelu ja sen huomiointi laskelmissa. Kaukolämpötehon ja kaukolämpöveden jäähtymän välinen yhteys voidaan kuvata yhtälöllä [2]

$$\Phi = \rho q_v c_p \Delta t, \quad (1)$$

missä  $\Phi$  on kaukolämpöteho (kW),  $\rho$  on kaukolämpöveden tiheys ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ ),  $q_v$  on kaukolämpöveden virtaama ( $\text{dm}^3/\text{s}$ ),  $c_p$  on kaukolämmön ominaislämpökapasiteetti ( $\text{kJ}/\text{kg K}$ ) ja  $\Delta t$  on kaukolämpöveden jäähtymä eli meno- ja paluuv veden välinen lämpötilaero (K).

Putkikoko saadaan laskettua vesivirran ja mitoituksessa käytettävän veden virtausnopeuden perusteella. Laskennallinen putkihalkaisija saadaan laskettua käyttäen yhtälöä

$$d_{lask} = \sqrt{\frac{4q_v}{\pi v_{mit}}}, \quad (2)$$

missä  $d_{lask}$  on laskennallinen putkihalkaisija (m),  $q_v$  on kaukolämpöveden virtaama ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) ja  $v_{mit}$  on mitoituksessa käytettävä kaukolämpöveden virtausnopeus (m/s). [2]

Virtausnopeus riippuu yleensä putkimateriaalista ja putkelle sallitusta painehäviöstä. Käytettäväksi putkeksi valitaan sisähalkaisijaltaan kokoa suurempi putki putkitaulukosta. Valintaa tehtäessä tulee myös huomioida laskennassa käytettävien parametrien tarkkuus sekä mahdollinen tieto käyttötarkoituksesta ja käytön muutoksista. Lisäksi putkikoon mitoituksessa otetaan huomioon mahdolliset tehon lisäykset ja niiden aikataulut. [2]

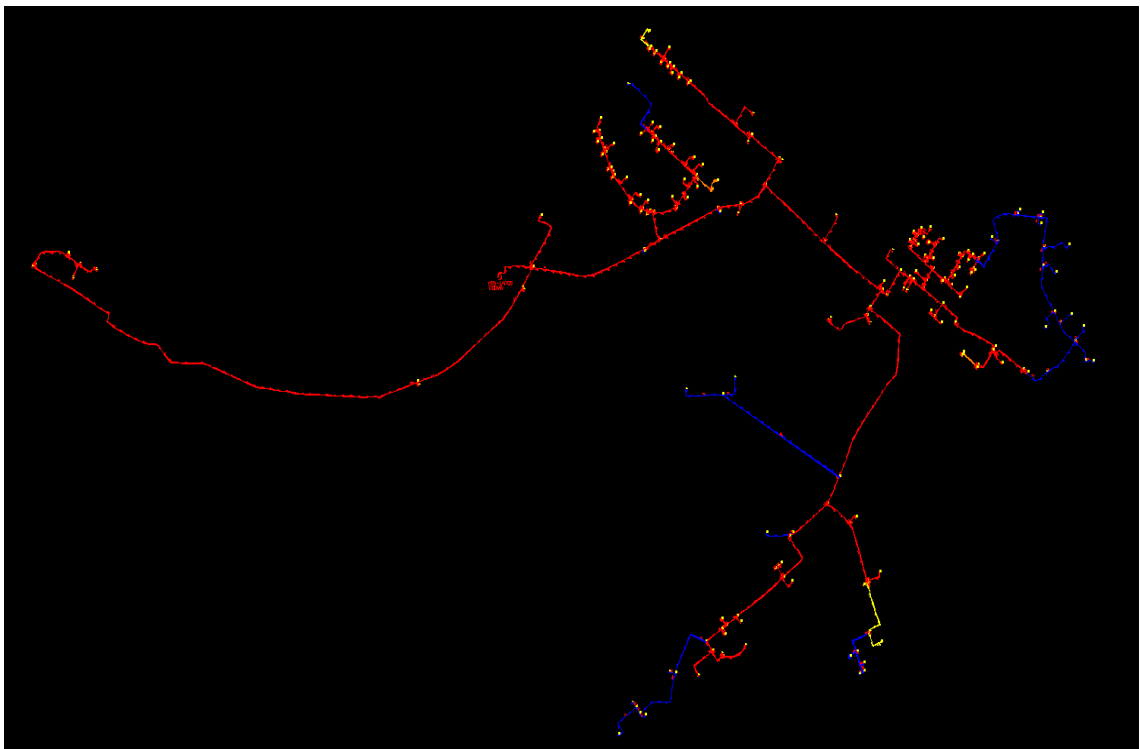


## 5. TULOKSET

Tässä luvussa esitellään saadut tulokset mallinnetusta verkosta. Luvussa esitetään myös oma ratkaisuehdotus kesällä 2018 rakennettavalle Manuntien osuudelle.

### 5.1 Kaukolämpöverkon tarkastelun tulokset

Kuvassa 13 on esitetty kaukolämpöverkko menoveden lämpötilaa tarkasteltaessa. Kuvassa sinisellä olevat putket on suljettu tarkasteltavasta verkosta, koska niitä ei ole vielä rakennettu ja osaa niistä tarkastellaan erikseen tässä työssä.



*Kuva 13. Kaukolämpöverkon menoveden lämpötilatarkastelu*

Kuvasta 13 näkee että menoveden lämpötila pysyy hyvin 100 celsiusasteen yläpuolella eli punaisella, lukuun ottamatta muutamaa kellertävää kohtaa joissa lämpötila putoaa 95 asteen paikkeille. Verrattuna 21 helmikuuta otettuun raporttiin lämpölaitokselta, menoveden lämpötilan keskiarvoksi on ilmoitettu 106,5 celsiusastetta, mikä on melkein sama tulos, joka on saatu simuloimalla.

**Taulukko 1.** *Otos Hallin kaukolämpöverkon tuntiraportista, päiväys 21.2.2018.*

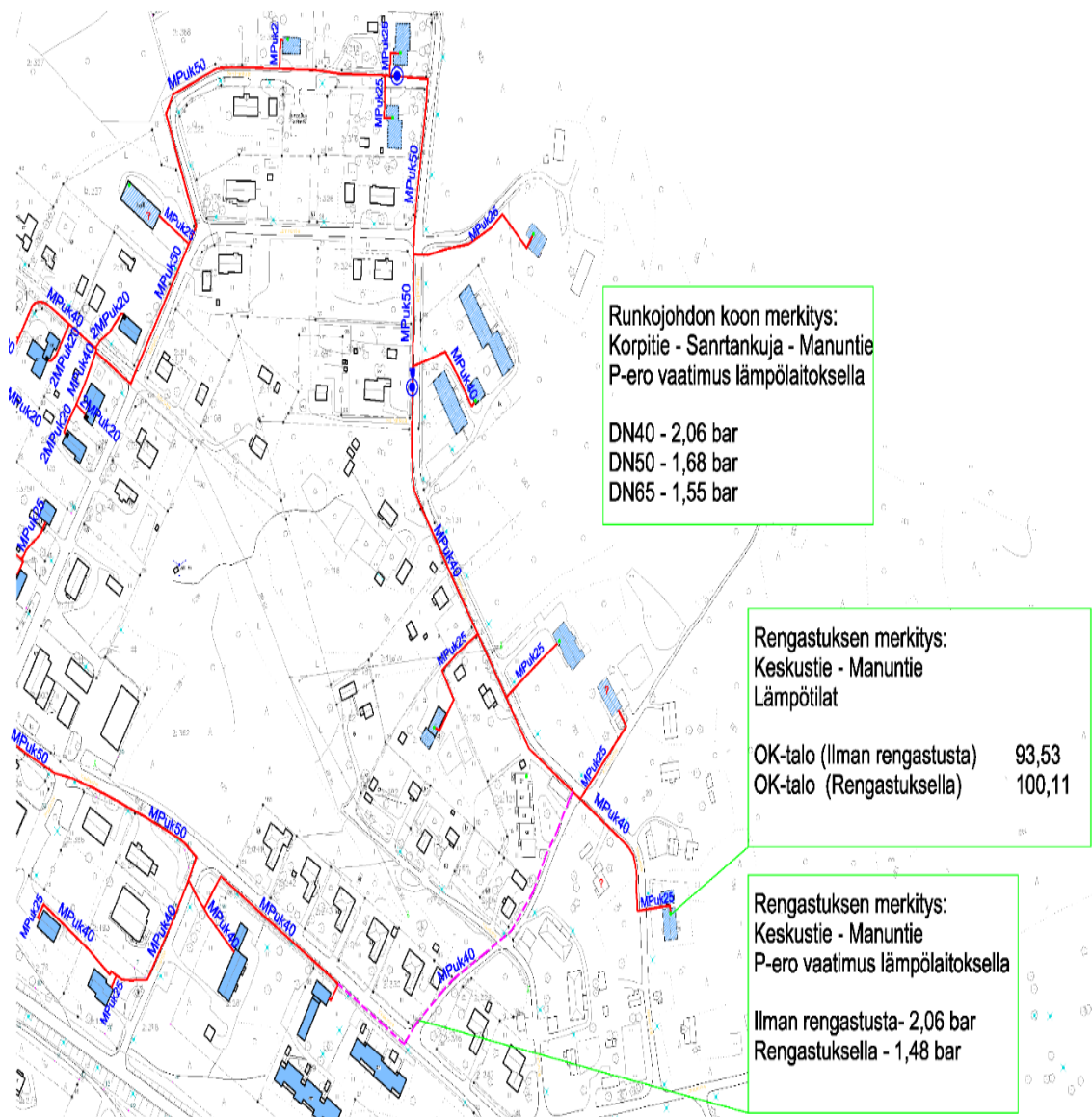
	Ulkolämpö- tila (°C)	Lämpölaitok- sen teho (MW)	Virtaus (m <sup>3</sup> /h)	Meno- ja pa- luuveden lämpötilaero (°C)	Paine-ero (bar)
<b>Minimi</b>	-23,4	3,25	56,1	49,2	1,42
<b>Keskiarvo</b>	-17,3	3,9	63,3	50,5	1,69
<b>Maksimi</b>	-8,5	4,68	71,7	51,8	1,96

Taulukossa 1 on esitetty pätkä lämpölaitoksen tuntiraportista helmikuun 21 päivälle. Taulukosta 1 näkee minimi-, maksimi- ja keskiarvot muun muassa päivän ulkolämpötilalle, laitoksen teholle, virtaukselle tai paine-erolle. Laitoksen paine-eroksi saatiin simuloidulla 1,39 baaria, joka on hyvin lähellä todellista arvoa.

## 5.2 Manuntien tarkastelun tulokset

Kuvassa 14 on esitelty Manuntien tarkemman tarkastuksen tulokset. Alkuperäisissä piirustuksissa oli esitetty, että uusi liitos verkkoon tehtäisiin DN40-putkea käyttäen ja ilman rengastusta. Käyttämällä suunnitelmien mukaista DN40-putkea, saadaan paine-eroaati-mukseksi lämpölaitoksella 2,06 baaria, mikä on hieman yli mitä ollaan tavoiteltu.

Rengastuksen avulla paine-eroa saataisiin laskettua, rengastus tehtäisiin myös käyttäen putkikokoa DN40. Rengastuksen avulla mitattuna saataisiin paine-eroaati-mukseksi 1,48 baaria, mikä olisi 0,58 baaria vähemmän kuin ilman rengastusta. Rengastus vaikuttaa myös viimeisen omakotitalon saamaan lämpötilaan, ilman rengastusta asiakkaalle tulee 93,53 celsiusasteen lämpöistä vettä ja rengastuksen avulla se nousee 100,11 celsiusasteeseen.



**Kuva 14.** Manuntien tarkastelu

Runkolinjan putkikokoa muuttamalla suuremmaksi saadaan myös pienennettyä paine-erovaatimusta. Kasvattamalla putkikokoa DN50:een saadaan paine-ero laskettua 1,68 baariin eli ero pienempään DN40:een on 0,38 baaria. Kasvattamalla kokoa vielä kokoon DN65 paine-eroksi tulisi 1,55 baaria. Putkikoon DN65 käyttäminen ei ole kannattavaa, koska paine-ero putkikokojen DN50 ja DN65 on niin pieni ja putken DN65 materiaali-kustannukset ovat paljon suuremmat verrattuna DN50:n kustannuksiin. Rengastuksen tekeminen tulisi myös kalliimmaksi kuin siitä saatu hyöty, joten sitä ei ehdoteta tehtäväksi. Lopulta päädyttiin tulokseen, että runkolinja tehtäisiin DN50- putkea käyttäen, koska sillä päästään halutun 2,0 baarin paine-eron alle.

## 6. YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli mallintaa ja optimoida Hallin kaukolämpöverkko ja sen ensi kesänä tuleva liitosalue. Lisäksi oli tarkoitus oppia käyttämään kaukolämpöverkon mallinnukseen ja simulointiin käytettävää verkostonlaskentaohjelmaa Flowraa. Mallinnus tehtiin kaupungin vektorimuotoisen kartan päälle, joka on koordinaateissa ETRS-TM35FIN. Karttapohja saatiin ystävällisesti pyytämällä Jämsän Kaupungilta. Kartta muokattiin AutoCAD ohjelmalla verkostonlaskentaohjelmalle sopivaksi ja siitä siistittiin ylimääräiset kuvakkeet pois tiedostokoon pienentämiseksi.

Kaukolämpöverkko mallinnettiin verkostonlaskentaohjelmaan piirtämällä se annettuja kaavoituksia pitkin. Verkostonlaskentaohjelman luotettavaa toimintaa varten piti selvittää erinäisiä ohjelman vaatimia alku- ja vakioarvoja, esimerkiksi kuluttajien ominaisuudet tai putkien kokoluokkaan liittyvät ominaisuudet. Verkostonlaskentaohjelman antamat tulokset olivat lähellä todellisuutta. Verkoston tulokset olisi pystytty laskemaan myös käsin, mutta se olisi vienyt paljon aikaa. Tuloksia pystytään tarkastelemaan ohjelmassa tai niistä voidaan tulostaa laajempia tai suppeita raportteja tai karttoja eri ajotilanteista. Liitteessä B on esitetty verkostonlaskentaohjelmalla suoritettu suppea raportti, josta voi tarkastella mallinnetun kaukolämpöverkon tietoja.

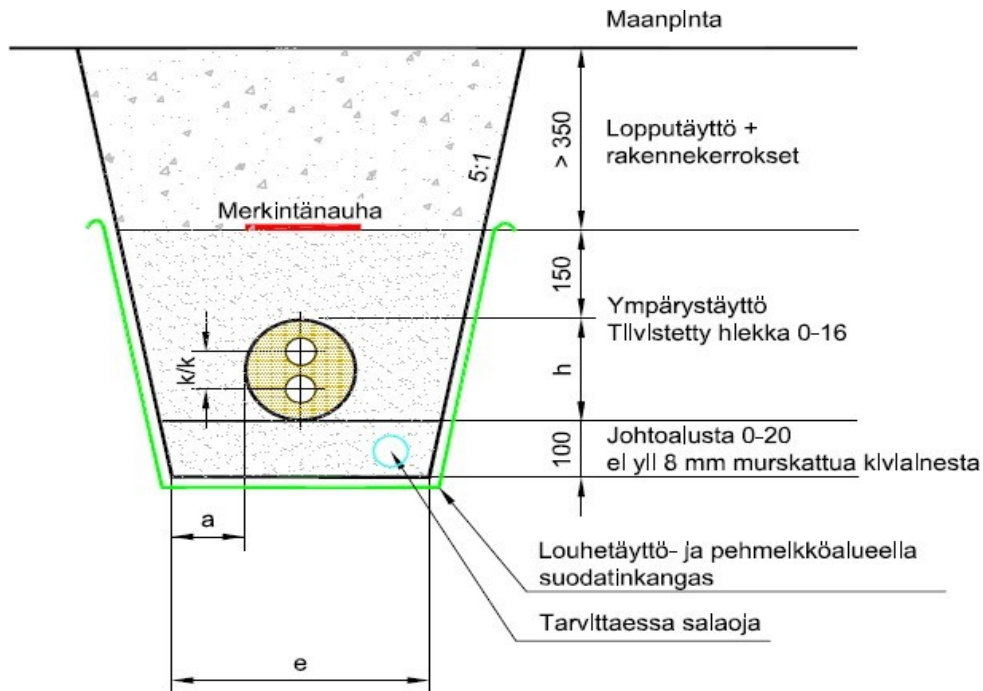
Työssä tarkasteltiin lisäksi tulevana kesänä rakennettavan uuden liitosalueen mallinnusta ja optimointia, sekä etsittiin taloudellisesti parasta vaihtoehtoa toteuttaa kyseinen liitos. Alkuperäisesti suunniteltu putkikoko ei ollut riittävä tehtyjen simulaatioiden perusteella, joten päädyttiin putkikoon kasvattamiseen DN40:stä DN50:een. DN50-putkella suoritettut testit osoittivat, että putkikoko olisi riittävä kyseisellä alueella. Lisäksi kokeiltiin myös alueen rengastamista, mikä olisi laskenut haluttua paine-eroa ja nostattanut viimeisen omakotitalon lämpötilaa. Rengastaminen koettiin kuitenkin tarpeettomaksi toteuttaa, koska jo pelkästään putkikokoa kasvattamalla päästiin halutun paine-eron alle.

## LÄHTEET

- [1] L. Koskelainen, A. Nuorkivi, R. Saarela, K Sipilä, Kaukolämmön käsikirja, Energiateollisuus, Kaukolämpötoimiala ja Energiateollisuus, 2006
- [2] V. Mäkelä, J. Tuunanen, Suomalainen kaukolämmitys, Mikkelin ammattikorkeakoulu, 2015, Viitattu 7.2.2018, Saatavissa <URN:ISBN:978-951-588-506-7>
- [3] Energiateollisuus, Energiavuosi 2017- Kaukolämpö, 2018, viitattu 7.2.2018, Saatavissa: [https://energia.fi/ajankohtaista\\_ja\\_materiaalipankki/materiaalipankki/energiavuosi\\_2017\\_-\\_kaukolampo.html#material-view](https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/energiavuosi_2017_-_kaukolampo.html#material-view)
- [4] H. Soikkeli, Toimitusjohtaja, Henkilökohtainen tiedonanto, Jämsän Aluelämpö Oy, 26.2.2018
- [5] Jämsän Aluelämpö Oy, verkkosivu, Viitattu 20.4.2018, Saatavissa: <http://www.jamsanaluelampo.fi/>
- [6] Logstor, Kaukolämpökäsikirja 2015, Saarijärvi: Logstor Finland Oy, 2015

## LIITE A: ET – 114 C\_MPUK KANAVAN TYYPIKUVA

### MPUK-JOHTO. TYYPIPIIRUSTUS. KANAVAN POIKKILEIKKAUS



**HUOM!** Liitoskohdissa tulee huomioida hitsaus- ja liitostöiden vaatima työvara

DN	Elementti tilavuus m <sup>3</sup> /m	Putket				Kanava			Täyttö m <sup>3</sup> /m	Kaivu m <sup>3</sup> /m	Pinta 1) m <sup>2</sup> /m	Pinta 2) m <sup>2</sup> /m
		d <sub>u</sub> mm	s mm	k/k mm	vesitilavuus dm <sup>3</sup> /johto-m	h mm	e mm	a mm				
15	0,020	21,3	2,0	40,3	0,47	160	560	200	0,50	0,54	0,86	1,26
20	0,020	26,9	2,0	45,9	0,82	160	560	200	0,50	0,54	0,86	1,26
25	0,025	33,7	2,3	52,7	1,33	180	580	200	0,52	0,57	0,89	1,29
32	0,031	42,4	2,6	61,4	2,17	200	600	200	0,55	0,61	0,92	1,32
40	0,031	48,3	2,6	67,3	2,92	200	600	200	0,55	0,61	0,92	1,32
50	0,049	60,3	2,9	80,3	4,67	250	650	200	0,60	0,70	0,99	1,39
65	0,062	76,1	2,9	96,1	7,76	280	680	200	0,63	0,75	1,03	1,43
80	0,078	88,9	3,2	113,9	10,69	315	715	200	0,67	0,82	1,08	1,48
100	0,126	114,3	3,6	139,3	18,02	400	800	200	0,75	1,00	1,20	1,60
125	0,196	139,7	3,6	169,7	27,58	500	900	200	0,84	1,23	1,34	1,74
150	0,246	168,3	4,0	208,3	40,36	560	960	200	0,89	1,38	1,42	1,82
200	0,396	219,0	4,5	264,0	69,27	710	1110	200	1,01	1,80	1,63	2,03
250	0,636	273,0	5,0	318,0	108,65	900	1300	200	1,13	2,40	1,90	2,30

Täyttö, Kaivu ja Pinta laskettu kuvan mukaisilla minimimitoilla

Täyttö = Rakenneteoreettinen m<sup>3</sup>/m

Kaivu = Kiintoteoreettinen m<sup>3</sup>/m

Pinta 1) = Kaivannon pintojen yli

Pinta 2) = Kaivannon pinta+asfaltti 200 mm kaivannon reunojen yli

Energiateollisuus ry	Päiväys <b>15.4.2010</b>
Nimitys Kaukolämpöjohto; Mpuk-kanava	Piir.no. <b>ET - 114 C</b>

## LIITE B AJORAPORTTI FLOWRA OHJELMALLA

Logica Laskennan yhteenvetotuloste 05.04.2018  
 Flowra Laskentatiedosto: HALLI\_2018 Selite: Tulostustiedosto: HALLI\_2018 Sivu:1

Laskennan päivämäärä 05.04.2018  
 Laskennan aloitus 12.08.36. Laskennan lopetus 12.08.38.

### Laskentatarkkuus

11 iteraatioiden määrä.  
 0.000000 painelaskennan suhteellinen virhe menopuolella.  
 0.000000 painelaskennan suhteellinen virhe paluupuolella.  
 0.000007 virtauslaskennan suhteellinen tasepoikkeama menopuolella.  
 0.000006 virtauslaskennan suhteellinen tasepoikkeama paluupuolella.  
 0.000763 Suhteellinen tehotasepoikkeama

### Lämpövirrat

Syöttölämpövirtojen summa 5 953.22 kilowattia.  
 Kulutusten summa 5 194.00 kilowattia.  
 Lämpöhäviöiden summa 763.76 kilowattia.  
 Liityntäteho 7 420.00 kilowattia.

### Verkoston tiedot

Meno 245 solmua, 244 putkea, 0 pumppua, 0 kuristusta.  
 Paluu 245 solmua, 244 putkea, 0 pumppua, 0 kuristusta.

Verkoston solmutaso 9  
 Verkoston vesitilavuus 273.15 m<sup>3</sup>  
 Menoputkien yhteispituus 16 161.1 m  
 Paluuputkien yhteispituus 16 161.1 m.

TYYPPIKOHTAISET PUTKIPITUUDET						
Tyyppi	Meno		Paluu		Yhteensä	
	Lukumäärä, kpl	Pituus, m	Lukumäärä, kpl	Pituus, m	Lukumäärä, kpl	Pituus, m
DN020	33	919.7	33	919.7	66	1 839.5
DN025	47	1 519.7	47	1 519.7	94	3 039.4
DN040	68	3 817.8	68	3 817.8	136	7 635.6
DN050	33	1 954.1	33	1 954.1	66	3 908.2
DN065	20	896.8	20	896.8	40	1 793.5
DN080	16	1 944.6	16	1 944.6	32	3 889.1
DN100	9	1 196.3	9	1 196.3	18	2 392.5
DN125	3	110.7	3	110.7	6	221.4
DN150	10	3 146.2	10	3 146.2	20	6 292.4
DN200	1	7.8	1	7.8	2	15.6
DN250	4	647.5	4	647.5	8	1 295.0

Logica	Laskennan yhteenvetotuloste			05.04.2018
Flowra	Laskentatiedosto: HALLI_2018	Selite:	Tulostustiedosto: HALLI_2018	Sivu:2
Verkon nimi	HALLI_2018		Perusverkko	Ei
Selite	Jämsän Aluelämpö Oy		Putkikarheus (mm)	0.03
Suunnitelukohde	Hallin kaukolämpöverkko		Menoveden lämpötila (°C)	112
Suunnittelija	Tatu Soikkeli			
Ajotunnus				
Ajovuosi	2018			
Minimi paine-ero ja paluupaine		Kyllä		
Minimi paine-ero (bar)	0.60		Paluupaine (bar)	2.00
Menopaine ja paluupaine vapaassa syöttöpisteessä		Ei		
Menopaine (bar)	8.00		Paluupaine (bar)	4.00
Minimi paine-ero ja menopaine		Ei		
Minimi paine-ero (bar)	0.50		Menopaine (bar)	8.00
Tehokerroin (%)		Kyllä	(%)	70.00
Ulkoilman lämpötila		Ei	(°C)	-35.00
Kiinteä jäähdytys		Kyllä	(°C)	50.00
Liukuva jäähdytys		Ei		
Syöttölämpötilaa vastaava jäähdytys			(°C)	0
Maksimi toisiolämpötila			(°C)	0
Lämpötila (°C)	-27.00		Teho (%)	100.00
Käänneaste	8.00		Vakio	20.00
Kinemaattinen viskositeetti (kg/ms)	0.0000004710			
Tiheys (kg/m <sup>3</sup> )	985.40			
Ominaislämpö (J/kgK)	4186.00			
Iteraation kiihdytyskerroin	1.20			
Virtauksen tarkkuus (%)	0.10			
Paineiden tarkkuus (%)	0.10			



Logica  
FlowraLaskennan yhteenvetotuloste  
Laskentatiedosto: HALLI\_2018

Selite:

Tulostustiedosto: HALLI\_2018

05.04.2018  
Sivu:3

SYÖTTÖPISTEET						
Nimi	Solmu	Vapaa	Teho (kW)	Kulutus (kg/s)	Korkeus (m)	P-ero (bar)
KPA-LAITOS	KPA-LAITOS	X	5 953.22	-24.82	118.00	2.44

SYÖTTÖPISTEET								
Nimi	Solmu	Vapaa	Paine,Maa(bar)		Paine,Nolla(bar)		Lämpötila (°C)	
			Meno	Paluu	Meno	Paluu	Meno	Paluu
KPA-LAITOS	KPA-LAITOS	X	6.41	3.97	18.03	15.59	112.00	54.69

KRIITTISET SOLMUPISTEET					
Suurimmat menopaineet maasta		Pienimmät paluupaineet maasta		Pienimmät paine-erot	
Solmu	Paine (bar)	Solmu	Paine (bar)	Solmu	Paine (bar)
99	6.81	365	2.00	354	0.60
119	6.81	367	2.01	350	0.60
120	6.81	368	2.01	355	0.61
121	6.80	323	2.39	275	0.61
122	6.80	334	2.46	353	0.61
123	6.80	330	2.59	349	0.62
124	6.79	259	2.72	272	0.65
125	6.79	325	2.87	273	0.69
100	6.79	324	3.05	271	0.69
126	6.79	333	3.05	348	0.69

KRIITTISET PUTKET							
Suurimmat kitkapainehäviöt / pituus							
Putken		Painehäviö ( bar/km)		Nopeus (m/s)		Massavirta (kg/s)	
Alku	Loppu	Meno	Paluu	Meno	Paluu	Meno	Paluu
169	114	1.635	1.635	0.79	0.79	1.14	1.14
114	115	1.502	1.502	0.76	0.76	1.09	1.09
115	116	1.374	1.374	0.72	0.72	1.04	1.04
116	117	1.252	1.252	0.69	0.69	0.99	0.99
73	74	1.135	1.135	0.65	0.65	0.94	0.94
117	118	1.135	1.135	0.65	0.65	0.94	0.94
74	75	1.024	1.024	0.62	0.62	0.89	0.89
118	363	0.919	0.919	0.58	0.58	0.84	0.84
35	455	0.851	0.851	0.56	0.56	0.80	0.80
87	405	0.787	0.787	0.54	0.54	0.77	0.77