

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Ympäristötekniikan koulutusohjelma

BH10A0300 Ympäristötekniikan kandidaatintyö ja seminaari

KAUKOLÄMPÖVERKON LÄMPÖHÄVIÖT PUTKIJATKOKSISSA

Heat losses of pipe joints in district heating network

Työn tarkastaja: Professori Risto Soukka

Työn ohjaaja: DI Mika Luoranen

Lappeenrannassa 28.5.2009

Markus Nurmiainen

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO	3
1 JOHDANTO	4
2 LÄMPÖHÄVIÖT KAUKOLÄMPÖVERKOSSA.....	5
2.1 LÄMPÖHÄVIÖIHIN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	6
2.1.1 Eristepaksuus	6
2.1.2 Eristemateriaali ja suojakuori	6
2.1.3 Maaperän lämmönjohtavuus.....	8
2.2 Lämpöhäviöiden määrittäminen.....	8
2.2.1 Lämpövastusten laskentayhtälöitä	11
2.2.2 Maaperän lämpövastus	13
2.2.3 Maaperän lämpötilajakauma.....	13
3 KIINNIVAAHDOTETTU JOHTO	14
3.1 Yksiputkijohto 2MpuK.....	15
3.2 Kaksiputkijohto MpuK.....	16
4 KIINNIVAAHDOTETTUIEN KAUKOLÄMPÖJOHTOJEN LIITOSTEN ASENNUS	17
4.1 Liitoskohtien esivalmistelut	17
4.2 Asennuksen työjärjestys	18
4.3 Kutisteliitokset ja kutistettavat holkkiliitokset.....	18
4.4 Liitosten tarkastukset.....	19
4.5 Liitosten eristäminen	20
4.6 Eristysten tarkastukset	21
5 CASE DN500: RUNKOLINJAN JATKOSTEN LÄMPÖHÄVIÖT	21
5.1 Lämpökamerakuvaukset	22
5.2 Tehdasvalmisteisen putken lämpöhäviöt	26

5.3 Jatkosten lämpöhäviöt	29
5.4 Tulokset	31
6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	32
LÄHDELUETTELO.....	34

SYMBOLILUETTELO

λ	lämmönjohtavuus	[W/mK]
Φ	lämpöhäviö	[W]
Φ'	lämpöhäviövirta	[W/m]
K	lämmönläpäisy-luku	[W/mK]
T	lämpötila	[K]
R	lämpövastus	[mK/W]

Alaindeksit

60	60 °C lämpötila
g	maaperä
i	eriste/vaippa
ikä	ikä
konv	konvektiovirtauksen aiheuttama lisäys
kost	kosteus
m	meno
p	paluu
tot	kokonais-

Johtojen nimilyhenteet

2	kaksi erillistä johtoa
k	putket kiinni eristeessä
M	polyeteenimuovinen ulkokuori
pu	polyuretaanivaaho lämpöeristeenä

1 JOHDANTO

Lämmönjakelukustannuksista verkon lämpöhäviöiden kustannukset ovat suurin käyttö-kustannuserä. Lämpöhäviöt ovat suurissa kaukolämpöverkoissa suuruusluokkaa 4-10 %, kun putkikoot ovat keskimäärin halkaisijaltaan kokoa DN 150. Lämpöhäviöt koostuvat usein monen eri tekijän summasta. Yksi näistä tekijöistä on eristystyön mahdollinen heikko laatu. Eristystyön laatua tarkkailemalla voidaan jatkosten eristysten laatua parantaa, minkä kautta verkoston lämpöhäviöiden kustannuksia on mahdollista pienentää.

Tässä työssä tutkitaan Lappeenrannan kaukolämpöverkoston uuden valmistella olevan runkolinjan yksiputkijohdon lämpöhäviöitä liitos- eli jatkoskohdissa. Jatkoskohtien lämpöhäviöitä voidaan täten vertailla tehdasvalmisteisen putken lämpöhäviöihin, jolloin saadaan selville onko eristystyön laatu hyvällä tasolla. Tätä kandidaatintyötä voidaan hyödyntää ikään kuin laaduntarkkailun välineenä. Lämpöhäviöiden vertailu jatkoskohtien ja tehdasvalmisteisessa putkessa saadaan tehtyä kuvaamalla jatkoskohtia lämpökameralla. Otettujen lämpökamerakuvien perusteella voidaan selvittää suojakuorien pinta-lämpötilat, joiden avulla taas lämpöhäviöt saadaan määriteltyä ja laskettua erilaisten lämmönsiirto yhtälöiden avulla.

2 LÄMPÖHÄVIÖT KAUKOLÄMPÖVERKOSSA

Lämpöhäviöt ovat pienissä kaukolämpöverkoissa suuruusluokkaa 10-20 %, kun putkikoot ovat keskimäärin DN 50, ja suurissa verkoissa 4-10 % putkikokojen ollessa keskimäärin DN 150. Suuremmat suhteelliset häviöt pienemmissä verkoissa johtuvat suuremmasta vaippapinta-alasta suhteessa siirtokykyyn. (Energiateollisuus ry 2006, 203.)

Kaukolämpöjohdoissa lämpö siirtyy johdoista maaperään ja siitä edelleen maaperän kautta ympäristöön. Lämmön johtuminen on suoraan verrannollinen putken sisällä virtaavan veden ja ympäristön lämpötilaeroon. Menoputken lämpötila on korkeampi kuin paluuputken lämpötila, joten kaikki lämpö ei siirry ympäristöön vaan osa siirtyy maaperän välityksellä menoputkesta paluuputkeen. Paluuputkeen siirtyvä lämpö ei päädy suoraan häviöiksi, vaan palaa lämmöntuotantolaitokselle hyödynnettäväksi. (Energiateollisuus ry 2006, 203.)

Eristemateriaalina kaukolämpöjohdoissa käytetään nykyisin suurimmaksi osin polyuretaania. Vanhoissa betonikanavajohdoissa käytettiin yleisesti mineraalivillaa. Eristyksen lämmönjohtavuus λ_i saadaan laskemalla yhteen eri tekijöiden (käyttölämpötila, kosteus, tilavuuspaino ja eristyksen ikä) aiheuttamat lämmönjohtavuudet

$$\lambda_i = \lambda_{60} + \lambda_{ikä} + \lambda_{kost} + \lambda_{konv} \quad (1)$$

λ_{60} = uuden eristeen keskimääräinen lämmönjohtavuus 60 °C lämpötilassa

$\lambda_{ikä}$ = eristeen käyttöiän aiheuttama lämmönjohtavuuden muuttuminen

λ_{kost} = kosteuden aiheuttama muutos

λ_{konv} =eristyksen raoissa, saumoissa ja onteloissa esiintyvien hallitsemattomien konvektiovirtausten aiheuttama lisäys (ilmenee lähinnä villaeristeissä)

2.1 LÄMPÖHÄVIÖIHIN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Lämmön jakelukustannuksista verkon lämpöhäviöiden kustannukset ovat suurin käyttökustannuserä. Verkon lämpöhäviöt koostuvat usein monen eri tekijän summasta. Häviöihin vaikuttavat mm. verkon liian korkea käyttölämpötila, eristepaksuus, maaperän lämmönjohtavuus ja eristystyön heikko laatu (Energiateollisuus ry 2006, 209). Seuraavaksi käsitelläänkin tarkemmin eristepaksuuden, eristemateriaalin ja maaperän lämmönjohtavuuden vaikutuksia lämpöhäviöiden muodostumiseen.

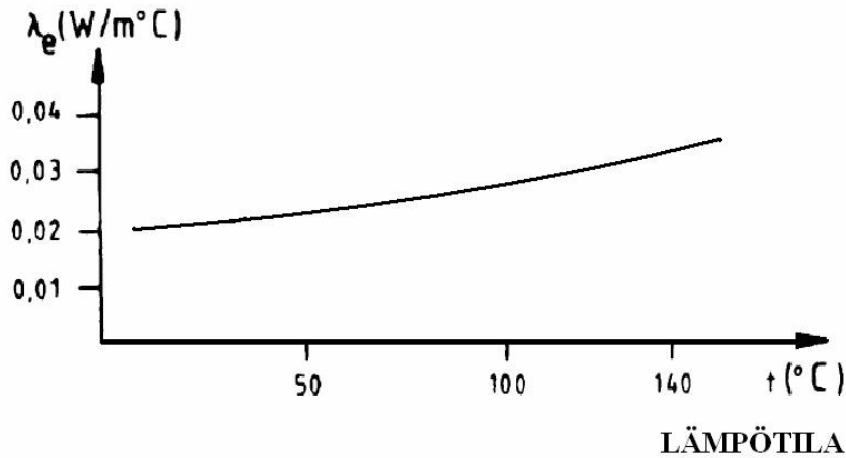
2.1.1 Eristepaksuus

Ehdottomasti suurin lämpöhäviöihin vaikuttava tekijä on putken ympärillä oleva eristekerros. Esimerkiksi Energiateollisuus ry:n suosituksen mukaan kaukolämpöputkielementin polyuretaanieriste aiheuttaa yli 80 % virtausputken ja ympäristön välisestä lämpövastuksesta (Energiateollisuus ry 2006, 141). Eristekerroksen kasvattaminen pienentää lämpöhäviöitä, mutta eristepaksuuden lisääminen on kannattavaa vain tiettyyn pisteeseen asti. Eristepaksuudelle on laskettavissa taloudellinen optimiarvo. Tässä työssä käsiteltävän DN 500 kaukolämpölinjan polyuretaanieristeen paksuuden tulee olla 94 mm (Lögstör Finland Oy 2008, 33).

2.1.2 Eristemateriaali ja suojakuori

Eristemateriaalina käytetään polyuretaanisolumuovia, joka on erinomainen eristemateriaali. Sitä valmistetaan sekoittamalla lisäaineita sisältävä polyoliseos isosyanaatin kanssa. Tunnusomaista PU-eristeelle on sen hyvä lämmöneristävyys, lujuus, muodon pysyvyys ja keveys. Kuten alla olevasta kuvasta 1 nähdään, sen terminen kestävyys riittää mainiosti kaukolämpökäyttöön, koska lämmönjohtavuus ei kasva kovinkaan paljoa lämpötilan noustessa menopotken maksimilämpötilaan 120 °C.

LÄMMÖNJOHTAVUUS



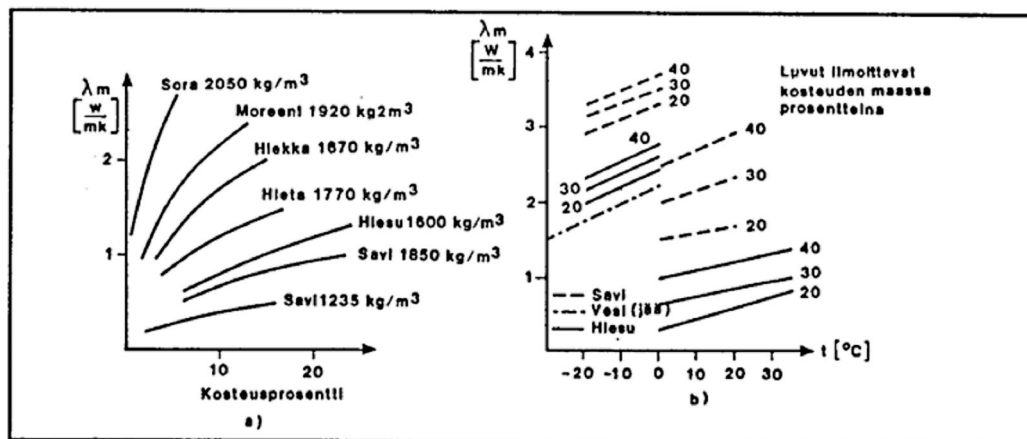
Kuva 1. Lämpötilan vaikutus eristemateriaalin lämmönjohtavuuteen. (Lögstör Finland Oy 2008, 33)

Polyuretaanin hyvä lämmöneristyskyky perustuu umpisolurakenteeseen ja solujen sisältämään kaasuun. Jos polyuretaanieristettä ei suojattaisi, ilma pyrkisi diffuusion vaikutuksesta soluihin ja vastaavasti solukaasu ulos. Polyuretaanin eristyskyky heikkenee hitaasti, koska solukaasun lämmönjohtavuus on vain kolmasosa ilman lämmönjohtavuudesta. Näin ollen ulkoinen musta polyeteenisuojakuori antaa mekaanisen kestävyyslisäksi erinomaisen suojan diffuusiota vastaan. (Energiateollisuus ry 2006, 144.) Suojakuoret ovat putkielementin valmistusmenetelmästä riippuen joko valmiita polyeteeniputkia tai eristyksen päälle valettavia suojakuoria. Suojakuoren pinnoissa ei saa esiintyä uurteita ja muita pintavirheitä, jotka voivat heikentää putken toiminnallisia ominaisuuksia. Suojaputket ovat yleensä ns. corona- käsittelyllä karhennettu sisäpinnaltaan eristeen tarttuvuuden parantamiseksi. (Lögstör Finland Oy 2008, 34.)

Polyuretaanin laatua valvotaan mm. solukokoa, minimitiheyttä, puristuslujuutta sekä veden imeytymisominaisuuksia seuraamalla. Valmiin elementin lämmönjohtavuuden täytyy olla pienempi kuin 0,033 W/m, K. Nykyisillä syklopentaania paisutusaineena käytävillä uretaaneilla elementtien lämmönjohtavuus on noin 0,026- 0,029 W/mK. (Energiateollisuus ry 2006, 140.) Polyuretaanieristeen lämmönjohtavuus on pienimmillään tiheydessä 40 kg/m³. Kaukolämpöelementeissä eristeen minimitiheys on 60 kg/ m³, koska tällöin taataan eristeen riittävä mekaaninen kestävyys. Kiinnivaahdotetun johdon toiminnan kannalta tärkeä ominaisuus on polyuretaanin riittävä leikkauslujuus uretaanin ja suorakuoren sekä uretaanin ja virtausputken välillä. (Lögstör Finland Oy 2008, 34.)

2.1.3 Maaperän lämmönjohtavuus

Maanperän lämmönjohtavuus riippuu voimakkaasti maaperän koostumuksesta, tiheydestä ja kosteuspitoisuudesta. Lukuarvo vaihtelee tyypillisimmin välillä 0,7 ó 2,5 W/m°C (Lögstör Finland Oy 2008, 34). Jos putkiston peittösyvyyyttä kasvatetaan, pienenevät lämpöhäviöt. Kuvasta 2 saadaan kyseiset maan lämmönjohtavuudet määriteltyä maaperän laadun ja kosteuden mukaan.



Kuva 2. Maan lämmönjohtavuuden vaihtelu eri maalajeittain. (Energiateollisuus ry 2006, 203)

2.2 Lämpöhäviöiden määrittäminen

Maansisäisten putkistojen lämpöhäviöiden laskemiseksi on kehitetty useita menetelmiä. Häviöiden tarkkaa laskentaa varten on huomioitava lukuisia eri tekijöitä ja tunnettava niiden riippuvuus toisistaan, joten tarkka laskenta onnistuu vain tietokoneen avulla. Riittäväällä tarkkuudella häviöitä voidaan arvioida vain pitkällä aikavälillä (yli 1kk), jolloin voidaan soveltaa lämmönsiirron stationääritilan eli ajasta riippumattoman tilan yhtälöitä. Hetkittäisten häviötehojen laskeminen saattaa johtaa virheellisiin tuloksiin. (Lögstör Finland Oy 2008, 33.)

Tarkastellaan lämpöhäviön määrittämistä eri komponenttien pohjalta kuvan 3 mukaisesti. Osakuvan A mukaisesti lasketaan menoputken ja paluuputken lämpöhäviöt yhtälöistä:

$$\Phi'_m = K_{1m}(T_m - T_g) - K_{2m}(T_p - T_g) \quad (2)$$

$$\Phi'_p = K_{1p}(T_p - T_g) - K_{2p}(T_m - T_g) \quad (3)$$

Kun putket ovat symmetrisesti ($K_{1m} = K_{1p} = K_1$ ja $K_{2m} = K_{2p} = K_2$),
saadaan kokonaislämpöhäviöiksi

$$\Phi'_{\text{tot}} = \Phi'_m + \Phi'_p = 2(K_1 - K_2) \left[\frac{T_m + T_p}{2} - T_g \right] \quad (4)$$

T_m = menolämpötila

T_p = paluulämpötila

T_g = häiriöttömän maaperän lämpötila upotussyvyydellä

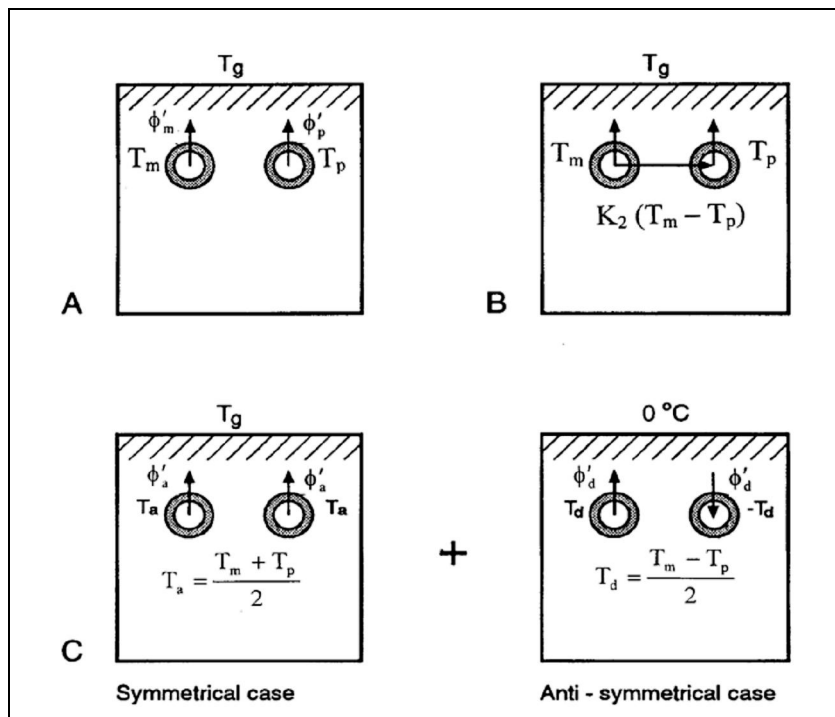
K_1 ja K_2 ovat lämmönläpäisylukuja, jotka määritellään yhtälöillä 7 ja 8.

Osakuvan B (kuva 3) mukaan yhtälöt voidaan kirjoittaa myös seuraavasti

$$\Phi'_m = (K_1 - K_2)(T_m - T_g) + K_2(T_m - T_p) \quad (5)$$

$$\Phi'_p = (K_1 - K_2)(T_p - T_g) - K_2(T_m - T_p) \quad (6)$$

Yllä olevista yhtälöistä 5 ja 6 huomataan, että menoputken lämpöhäviö koostuu lämpövirrasta menoputkesta maaperään sekä lämpövirrasta menoputkesta paluuputkeen. Lämmönläpäisyluku K liittyy siis menoputken ja paluuputken väliseen lämmönsiirtoon.



Kuva 3. Maahan upotettujen kaukolämpöputkien lämpöhäviöiden määrittäminen. (Energiateollisuus ry 2006, 204)

Putkien ollessa symmetrisesti saadaan lämmönsiirtokertoimet K_1 ja K_2 yhtälöillä 7 ja 8

$$K_1 = \frac{R_g + R_i}{(R_g + R_i)^2 - R_m^2} \quad (7)$$

$$\text{ja } K_2 = \frac{R_m}{(R_g + R_i)^2 - R_m^2} \quad (8)$$

R_g = maaperän lämpövastus/pituus, sisältää lämpövastuksen kanavan pinnalla

R_i = eristeen ja vaipan lämpövastus/pituus

R_m = putkien keskinäisen vaikutuksen huomioiva lämpövastus/pituus

Putkien keskinäisen vaikutuksen huomioiva lämpövastus saadaan laskettua

$$R_m = \frac{1}{4\pi\lambda_g} \ln \left(1 + \left(\frac{2H}{E} \right)^2 \right) \quad (9)$$

E = putkien keskikohtien välinen etäisyys

λ_g = maaperän lämmönsiirtokerroin

H = korjattu putken sijaintisyvyys

Kokonaislämmönsiirtymiskerroin saadaan ottamalla huomioon maaperän, eristeen ja vaipan sekä putkien keskinäisen vaikutuksen huomioivan lämpövastuksen

$$K_1 - K_2 = \frac{1}{R_g + R_i + R_m} \quad (10)$$

2.2.1 Lämpövastusten laskentayhtälöitä

Eristämättömän putken tapauksessa maaperän lämpövastus lasketaan yhtälöstä

$$R_g = \frac{1}{2\pi\lambda_g} \ln \left[\frac{2H}{D_c} + \sqrt{\left(\frac{2H}{D_c} \right)^2 - 1} \right] \quad (11)$$

$D_c = D_i$ = eristeen ulkohalkaisija (m) (kiinnivaahdotetun johdon tapaus)

Jos putket ovat betonikanavassa, jonka sisällä on ilmatila, lisätään betonin pinnan lämpövastus R_{hg} maaperän lämpövastukseen. Maanpinnan lämpövastus muutetaan tavallisesti ekvivalenttiseksi maakerrokseksi, jolloin korjattu putken sijaintisyvyys saadaan yhtälöstä

$$H = H' + \frac{\lambda_g}{\lambda_{gs}} \quad (12)$$

h_{gs} = lämmönsiirtokerroin maanpinnalla (yleensä 12- 15 W/(m²,°C))

λ_{eg} = maaperän lämmönjohtavuus (W/(m °C))

H' = putken todellinen sijaintisyvyys (m)

Veden ja putken rajapinnan sekä putkien seinämän lämpövastukset jätetään huomiotta.

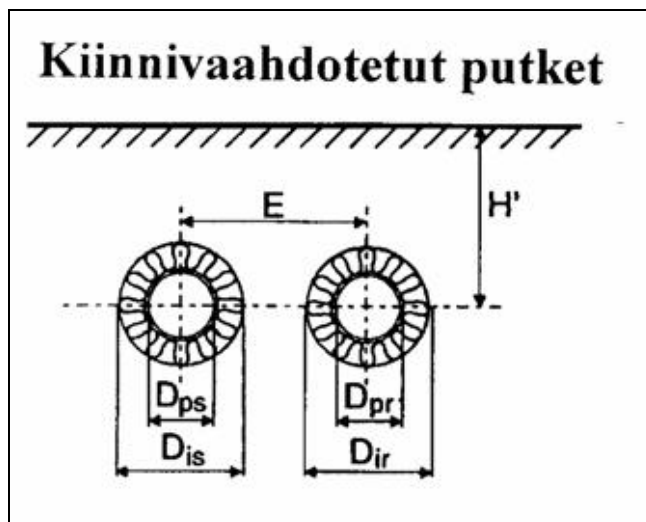
Eristettyjen putkien eristeen ja vaipan lämpövastus lasketaan seuraavasti

$$R_i = \frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln \frac{D_i}{D_p} + \frac{1}{2\pi\lambda_c} \ln \frac{D_c}{D_i} + R_{hi} \quad (13)$$

D_p = eristeen sisähalkaisija = putken ulkohalkaisija (m)

R_{hi} = lämpövastus eristeen pinnalla betonikanavassa, jossa on ilmatila.

(Kiinnivaahdotetun putken tapauksessa arvo on 0)



Kuva 4. Kiinnivaahdotettujen johtojen lämpövastukset. (Energiateollisuus ry 2006, 207)

2.2.2 Maaperän lämpövastus

Tavallisesti kaukolämpöputket ovat maahan upotettuja eristettyjä putkia. Eristetyille putkille maaperän lämpövastus voidaan yleensä määrittää riittävän tarkasti yhtälöllä

$$R_g = \frac{1}{2\pi} \ln \left[\left(\frac{4H}{D_c} \right) \right] \quad (14)$$

Jos maaperän lämpövastus halutaan laskea tarkemmin, voidaan käyttää monimutkaisempaa yhtälöä

$$R_g = \frac{1}{2\pi\lambda_g} \left[\ln \left(\frac{4H}{D_c} \right) - \frac{\left(\frac{D_c}{2E} \right)^2 + \left(\frac{D_c}{4H} \right)^2 + \frac{D_c^2}{4(4H^2 + E^2)}}{\frac{1+\beta}{1-\beta} - \left(\frac{D_c}{2E} \right)^2} \right] \quad (15)$$

$$\beta = \frac{\lambda_g}{\lambda_i} \ln \left(\frac{D_i}{D_p} \right) \quad (16)$$

Yhtälöä 14 käytettäessä virhe on alle 3 % ja yhtälöä 15 käytettäessä alle 0,5 %. Laskettaessa lämpöhäviöitä muille kuin pyöreille kaukolämpökanaville muotoa approksimoidaan. Esimerkiksi suorakulmainen kanava voidaan redusoida vastaavanlaiseksi pyöreäksi putkeksi.

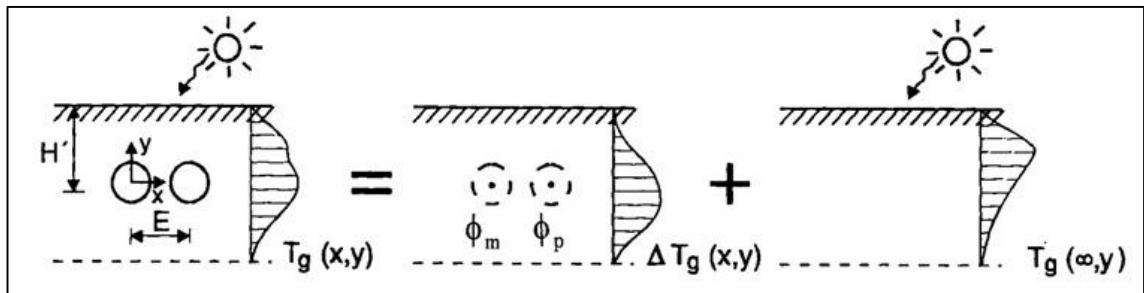
2.2.3 Maaperän lämpötilajakauma

Maaperän lämpötilakenttä voidaan määrittää seuraavalla yhtälöllä, joka perustuu viivalähde teoriaan:

$$\Delta T_g(x, y) = T_g(x, y) - T_g(\infty, y) = \frac{\phi'_m}{2\pi\lambda_g} \ln \sqrt{\frac{x^2 + (2H - y)^2}{x^2 + y^2}} + \frac{\phi'_p}{2\pi\lambda_g} \sqrt{\frac{(E - x)^2 + (2H - y)^2}{(E - x)^2 + y^2}} \quad (17)$$

Yllä olevassa yhtälössä 17 H on korjattu putken sijaintisyyvyys, joka huomioi maan lämmönjohtavuuden sekä lämmönsiirtokertoimen maan pinnalla. H määritetään yhtälöllä 12.

Seuraavassa kuvassa 5 on esitetty superpositioperiaate. Kahden viivalämmönlähteen, eli kahden kaukolämpöputken, aiheuttama lämpötilakenttä maaperään saadaan vähentämällä häiriintymättömän maaperän lämpötilakenttä $T_g(\infty, y)$ todellisesta maaperän lämpötilakentästä $T_g(x, y)$.



Kuva 5. Lämpötilakenttä maaperässä. Kahden viivalämmönlähteen ja ilmaston yhteisvaikutus. (Energiateollisuus ry 2006, 208)

Yhtälön 4 parametrit saadaan määriteltyä esimerkiksi mittaustulosten perusteella. Maanpinnan lämpötilat ovat voimakkaasti riippuvia lämmönsiirtokertoimesta kun taas lämmönjohtavuuden vaikutus on vähäisempi. Maanpinnan alapuolella lämmönsiirtokertoimen vaikutus pienenee ja maaperän lämmönjohtavuuden vaikutus kasvaa merkittävästi.

3 KIINNIVAHDOTETTU JOHTO

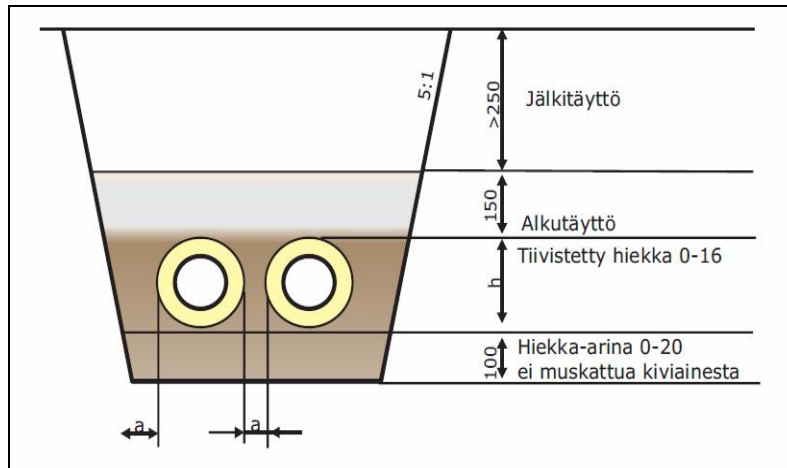
Kiinnivaahdotetuissa kaukolämpöjohdoissa (MpuK, 2MpuK) on polyuretaanieristeellä liitetty kiinteästi yhteen virtausputki ja polyeteenisuojakuori. Virtausputkina käytetään hitsattuja tai saumattomia teräsputkia. Joustavissa johdoissa voidaan käyttää virtausputkena myös kupariputkea tai ohutseinäistä korrugoitua (aallotettua tai poimutettua) teräsputkea. Kiinnivaahdotettu suojakuori otettiin Suomessa käyttöön 1970-luvun puolivälis-

sä ja se syrjäytti nopeasti muut käytössä olleet johtotyypit. Lähestulkoon kaikki 1980-luvun puolivälin jälkeen rakennetut kaukolämpöjohdot ovat rakennettu tällä johtotyypillä. (Energiateollisuus ry 2006, 138.)

Kiinnivaahdotetulla johdolla on monia hyviä puolia. Johtoa on helppo käsitellä, koska virtausputki, kova polyuretaanieriste ja suojaputki muodostavat yhdessä kompaktin paketin. Johtotyyppi ei ole herkkä maanpinnan painumiselle, vaan sen toiminta pysyy normaalina maan painumisesta aiheutuvista ulkoisista voimista huolimatta. Ulkoisen tekijän aiheuttaessa suojakuoren tai eristeen rikkoutumisen virtausputken korroosiouhka rajoittuu vain rikkoontumiskohtaan. Kaukolämpölinjastojen rakentaminen kiinnivaahdotetuilla johdoilla on helppoa, koska kiinnivaahdotettuun johtotyyppiin kuuluu täydellinen osavalikoima liitostarvikkeineen ja eri valmistajien elementit ovat yhteensopivia. Lisäksi elementtien valmistusta on helppo valvoa, jolloin laatukin pysyy tasaisena. (Energiateollisuus ry 2006, 138.)

3.1 Yksiputkijohto 2MpuK

Yksijohtoputkessa on erilliset meno- ja paluujohdot, joissa virtausputki ja polyeteenisuojakuori on polyuretaanieristeellä liitetty kiinteästi yhteen. Yksiputkijohtoa valmistetaan yleensä kokoluokissa DN 20- DN 600, mutta tarvittaessa DN 1200 asti. Putkien pituus on kokoluokasta riippuen 6, 12, 16 tai 18 m (Energiateollisuus ry 2006, 139). Tässä työssä käsitellään DN 500 johtoa, jotka putket ovat 16 metriä pitkiä. Alla olevassa kuvassa 6 nähdään kiinnivaahdotetun yksiputkisen johdon leikkauskuva. Kuvasta nähdään myös rakennusvaiheessa täytössä käytettävien maa-ainesten laadut ja niiden paksuudet ja sekä putkien sijainti toisiinsa.

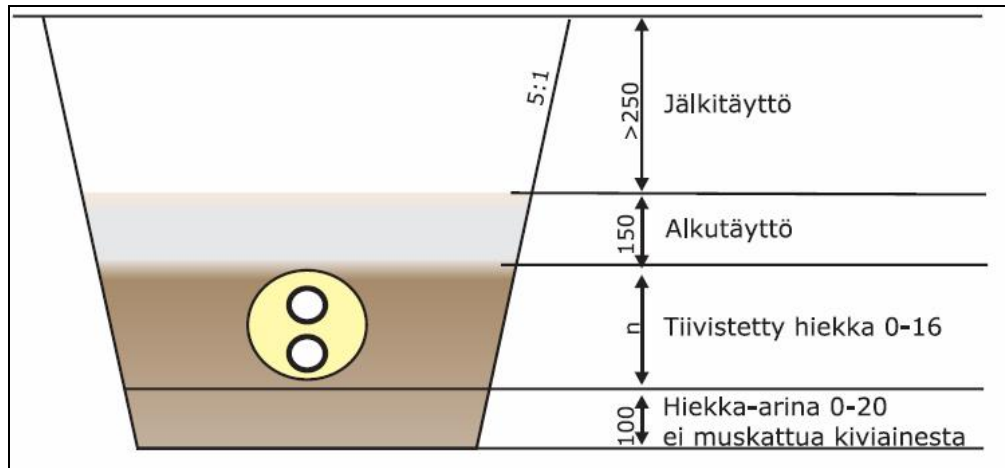


Kuva 6. Leikkauskuva kiinnivaahdotetusta yksiputkijohdosta sekä peittotyön vaatimat maalajien kerros- paksuudet. (Energiateollisuus ry 2006, 139)

3.2 Kaksiputkijohto MpuK

Kaksiputkijohdossa on sekä paluu- että menopuolen virtausputket ja yhteinen polyeteenisuojaputki liitetty kiinteästi yhteen polyuretaanieristeellä. Kuvasta 7 nähdään, että putket ovat sijoitettu polyuretaanieristeeseen päällekkäin. Rakennusvaiheessa putki pyritään asentamaan siten, että menoputki tulee paluuputken alapuolelle. Tällöin menoputki lämmittää paluuputkea, joten lämpöhäviöt saadaan pienemmiksi.

Kaksiputkijohtoa valmistetaan yleensä kokoluokissa DN 2x20- DN 2x200. Putkien pituus on luokasta riippuen 6 tai 12 m. Yksiputkijohdosta verrattuna putkien kokoluokat ovat kaksiputkijohdossa pienempiä. Materiaalia tarvitaan kaksiputkijohdon valmistamiseen vähemmän, ja jatkoksiakaan ei tarvitse tehdä kuin puolet yksiputkijohdotosten lukumäärästä. (Energiateollisuus ry 2006, 139.)



Kuva 7. Leikkauskuva kiinnivaahdotetusta kaksiputkijohdosta sekä peittotyön vaatimat maalajien kerros- paksuudet. (Energiateollisuus ry 2006, 140)

4 KIINNIVAAHDOTETTUJEN KAUKOLÄMPÖJOHTOJEN LIITOSTEN ASENNUS

Laadukkaiden työsuoritusten varmistamiseksi suositellaan, että liitostyöt sekä suoja-putkisaumausten että eristystöiden osalta annetaan vain Suomen Kaukolämpö ry:n lämmönjakelutoimikunnan tai Muoviteollisuus ry:n laadunvarmistusjärjestelmän mukaiset asennusoikeudet omaaville urakoitsijoille. Pätevyys liitostyön suorittamiseen voidaan osoittaa em. laadunvarmistusjärjestelmän mukaisella voimassaolevalla liitostyötodistuksella. Lisäksi jokaisella liitostöitä suorittavalla asentajalla tulee olla tulityökortti. Jokaisen liitoseristyksen ja suojakuorisauituksen asentajat tulee dokumentoida ja on myös suositeltavaa, että työmaalla asentaja merkitsee jokaiseen liitokseen tekijän tunnistamiseksi puumerkinsä ja asennuspäivämäärän. (Suomen kaukolämpö ry 2003, 14.)

4.1 Liitoskohtien esivalmistelut

Liitosten esivalmisteluun kuuluu monia eri seikkoja, jotka tulee muistaa huolellisesti. Ensinnäkin työkohteessa on muistettava varata riittävän suuret työskentelytilat liitoskohtia asentaessa. Putken ympärillä tulee olla vähintään 20- 30 cm vapaa tila, riippuen tietysti johtokoosta, jotta asennustyö pystyttäisiin tekemään kunnolla. Ennen teräsputkien hitsausta on putkien päät puhdistettava huolellisesti uretaanista sekä kaikki ennako-

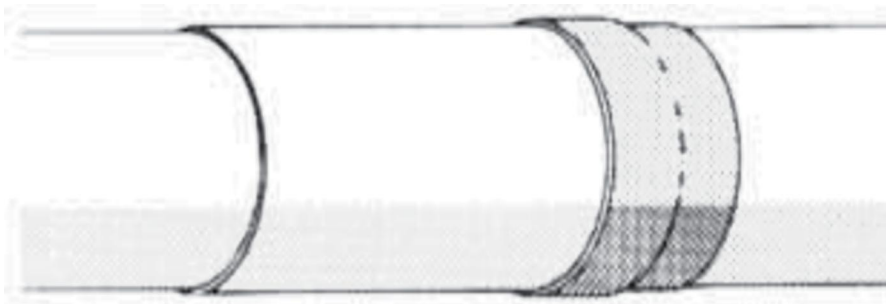
asennukset, kuten jatkosholkit (mitoiltaan ja tyypeiltään oikeat), tulee olla laitettu paikoilleen. Työskentelyolosuhteiden täytyy myös olla kuivat: turhat vedet ja lumet pois kaivannoista. Vesi- tai lumisateen varalta on olemassa katos, jonka alla pystytään työskentelemään normaalisti. Ennen työn aloitusta on vielä varmistuttava siitä, että työhän osallistuvilla on asianmukaiset luvat kunnossa. (Suomen kaukolämpö ry 2003, 15.)

4.2 Asennuksen työjärjestys

Kutisteliitoksia tehtäessä, pois lukien kutistettavat holkit, ensin suoritetaan teräsputken hitsaus ja tiiveyskokeet. Niiden jälkeen liitoskohta eristetään ja sen jälkeen vasta kutisteteet kutistetaan. Tällä suoritusmenetelmällä liitoskohdat voidaan peittää nopeasti heti suojaputkien saumauksen jälkeen ja näin vältetään putken ulkopinnan suuren päivä- ja yöaikaisen lämpötilaeron aiheuttamilta rasituksilta tai jopa mahdollisilta vaurioilta. Lisäksi vaahdotustyön tuloksia on helpompi tarkastella ennen kutistamista. Kutistettavia holkkeja, mekaanisia liitoksia tai hitsausliitoksia käytettäessä vaahdotus tehdään vasta suojaputkisaumauksen jälkeen. (Suomen kaukolämpö ry 2003, 15.)

4.3 Kutisteliitokset ja kutistettavat holkki-liitokset

Kiinnivaahdotetun johdon jatkokset voidaan toteuttaa polyeteenisen jatkosholkin tai peltijatkoksen avulla kutiste- ja hitsausliitoksina tai mekaanisina kiilamuhviliitoksina. Holkkijatkokset ja kutisteliitokset sekä peltijatkokset ja kutisteliitokset tehdään saumalapulla. Holkkijatkokset valmistetaan sähköhitsaamalla ja liitosrakenne voidaan myös tehdä kiilamuhvijatkoksella. (Energiateollisuus ry 2006, 141.)



Kuva 8. Holkkijatkos ja kutisteliitokset saumalapulla. (Energiateollisuus ry 2006, 142)

Holkkiliitosta käytettäessä on varmistettava ehdottomasti, että holkki on keskitetty oikein ja tiiveys suojaputkeen nähden kunnossa. Apuna voidaan käyttää esimerkiksi kiilalistaa ja vetoliinoja. Lisäksi tulee huomioida, että keskitetyn holkin ja suojaputken välykset ei saa olla elementin suojaputken ainepaksuutta suurempi. Vaahdotuksen, saumauksen ja koko liitoksen kokonaisvaltaisessa onnistumisessa välyksen merkitys on erittäin suuri. (Suomen kaukolämpö ry 2003, 16)

Jatkospelti tulee asentaa keskeisesti jatkoskohdan ympärille ja se kiristetään liinoilla. Pellin ja elementin suojaputken väliin ei saa hädä välystä. Pellin pituussauma kiinnitetään matalakantaisilla ruuveilla riittävän tiheästi. DN 300 ja isommilla dimensioilla ruuveja tulee laittaa kahteen riviin (Suomen kaukolämpö ry 2003, 16). Pellin kiinnityksen jälkeen jatkokset tulee tiivistää kutisteilla. Tiivistys tehdään lämmittämällä kutistetta ja liitokseen annettavaa lämpö määrää ohjataan lämmitysaikaa säätämällä. Kutistustyötä ei suositella tehtäväksi alle $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ pakkasilla. (Suomen kaukolämpö ry 2003, 17.)

Kutistustyön jälkeen kutisteen pinnan tulisi olla sileä. Hyvästä työtuloksesta kertoo myös pieni pituusliukuma sekä se, että kutisteen päistä on kauttaaltaan pursunut ulos tiivistysmassaa. Tiivistysmassan tulee olla kauttaaltaan pehmennyt, minkä saa selville esimerkiksi sormella painelemalla. Valmiin liitoksen on annettava jäähtyä kädenlämpöiseksi ennen kuin sitä voidaan mekaanisesti rasittaa. Lopuksi liitoskohdat tulee peittää mahdollisimman nopeasti ja suojata auringonvalolta kaasukuplien muodostumisen ehkäisemiseksi. (Suomen kaukolämpö ry 2003, 19.) Kutistettavaa jatkosholkkia käytettäessä tulee suorittaa samat esivalmistelut kuin tavanomaisilla kutisteliitoksilla.

4.4 Liitosten tarkastukset

Kaukolämpöputkistojen rakennusvaiheessa kaikkien liitosten tiiveys tulisi testata ilmallalla tai muulla sopivalla kaasulla, mikäli tämä on vain mahdollista kyseessä olevalle rakenteelle. Mikäli liitoksen tiiveyttä ei rakenteellisista syistä pystytä painekokeella testaamaan (esim. ns. peltiliitos), tulee tiiveys varmistaa 100 %:sti visuaalisella tarkastuksella ja pistokoemaisella rikkovalla koestuksella liitosmateriaalitoimittajien ohjeiden

mukaisesti. (Energiateollisuus ry 2006, 195.) Silmämääräinen tarkastus tulee tehdä kaikille liitoksille. Erityisesti on kiinnitettävä huomiota liitoksen alapuolen tarkastamiseen. Apuna laadun tarkastamisessa voidaan käyttää esimerkiksi varsipeiliä. Käytettäessä liitosratkaisuna jatkospeltiä ja leveää kutistetta on jälkitarkkailun avulla varmistettava, että kutisteen alle ei jää eikä muodostu kaasua. Kaasua voi muodostua esimerkiksi liian nopean vaahdotuksen jälkeen tapahtuvan kutistamisen tai auringon lämmittävän vaikutuksen seurauksena. (Energiateollisuus ry 2006, 196.)

Tiivyskoe yli-ilmanpaineella tulee suorittaa alle 40 °C lämpötilassa. Koepaine riippuu liitostyyppistä (normaalisti 0,2 bar ylipaine), ja se pidetään vähintään kaksi minuuttia. Vuodon toteamiseen käytetään sopivaa vuodonilmaisunestettä. Liitoksille, joiden tiiveyttä ei voida painekokeen avulla varmistaa, voidaan tehdä ainetta rikkova koestus. On suositeltavaa tarkastaa tarttuvuus, tiiveys ja työn laatu pistokoemaisesti repimällä liitoksia auki satunnaisesti. (Energiateollisuus ry 2006, 196.)

4.5 Liitosten eristäminen

Jatkoseristeenä liitoksissa käytetään polyuretaania, joka valmistetaan työmaalla erillisten vaahdotusainesten avulla tai konevaahdotuksena. Runkolinja DN 500 liitoskohdat vaahdotettiin konevaahdotuksen avulla paikallavaahdotuksena. On mahdollista käyttää myös valmiita eristekouruja, mutta se rajoittuu lähinnä erikoiskohteisiin kuten pieniin rakennuskohteisiin ja kuumiin teräsputkipintoihin.

Eristyksen valmistuksessa työkohteella on otettava huomioon muutamia erittäin tärkeitä seikkoja eristystyön onnistumisen takaamiseksi. Asennuspaikan, liitospintojen ja raaka-aineiden lämpötilat tulee ottaa huomioon. Ennen jatkosten eristämistä täytyy varmistua siitä, että putki on jatkoskohdassa puhdas ja elementtien eristepäät kuivat. Kaikkien vaahdon kanssa kosketuksiin tulvien pintojen tulee vaahdotettaessa olla vähintään +15 °C, eivätkä lämpötilat saa ylittää 80 °C. Kylmän jatkoksen vaahdotus saattaa epäonnistua. Hyvän sekoittumisen ja vaahtoutumisen kannalta optimaalinen lämpötila on yleensä 20- 30 °C. Yli + 45 °C korkeammissa lämpötiloissa tulee välttää uretaanin annostelua suoraan teräsputkien päälle. (Suomen kaukolämpö ry 2003, 21.) Raaka-aineiden sekoittaminen pitää tehdä huolellisesti, jos ei käytetä konevaahdotusta.

4.6 Eristysten tarkastukset

Valmiin jatkoseristyksen laatua voidaan tarkastella purseista visuaalisesti, pintalämpötilamittauksilla tai tulppänäytteillä. Visuaalinen tarkastus tehdään kaikkien paikallavaahdotusten onnistumisesta ilmausreiän purseista. Hyvälaatuiset purseet ovat yleensä merkki myös liitoskohdan täyttymisestä kokonaan. Eristyskouruja käytettäessä on syytä aina varmistua, että kourut sahataan tarkasta liitoskohdan mittojen mukaan. Lämpökamerakuvauksilla ja pintalämpötilamittauksilla on suositeltavaa tarkkailla liitostyön onnistumista pistokoemaisesti. Menetelmä soveltuu myös kourueristysten tarkastamiseen. Tulppänäytteet on lämpökamerakuvaukselle vaihtoehtoinen menettely liitoseristysten laadun tarkastamiseen. Ainetta rikkovat koestukset ovat lämpökamerakuvausten ohella ainoa tapa jatkosholkkeja vaahdotettaessa varmistua siitä, että eristys täyttää liitostilan kokonaisuudessaan.

5 CASE DN500: RUNKOLINJAN JATKOSTEN LÄMPÖHÄVIÖT

Lappeenrannassa hyödynnetään kaukolämpöä laajalla mittakaavalla. Kaukolämpöverkoston pituus on yhteensä noin 320 km. Nykyään kaukolämpöä tuotetaan 1970-luvulla valmistuneessa Mertaniemen maakaasuvoimalaitoksella Voisalmen kaupunginosassa. Nyt valmisteilla on Kaukaan Voiman biovoimalaitos, jonka koekäytöt alkavat syksyllä 2009. Lopullinen uuden voimalaitoksen liittäminen kaukolämpöverkkoon tulee valmiiksi vuoden 2009 aikana. Kaupalliseen käyttöön voimalaitoksen on tarkoitus tulla vuoden 2010 alusta. (Lappeenrannan Energia Oy, 8). Voimalaitokselta pystytään tuottamaan kaukolämpöä noin 100 MW teholla. Kaukolämpö pitää pystyä siirtämään Kaukaan voimalaitokselta jakeluverkkoon, joten rakenteilla on uusi DN 500 runkolinja, joka on merkitty alla olevaan kuvaan 9 punaisella värillä. Kuvassa mustalla värillä on merkitty jo olemassa olevat kaukolämpöjohdot.



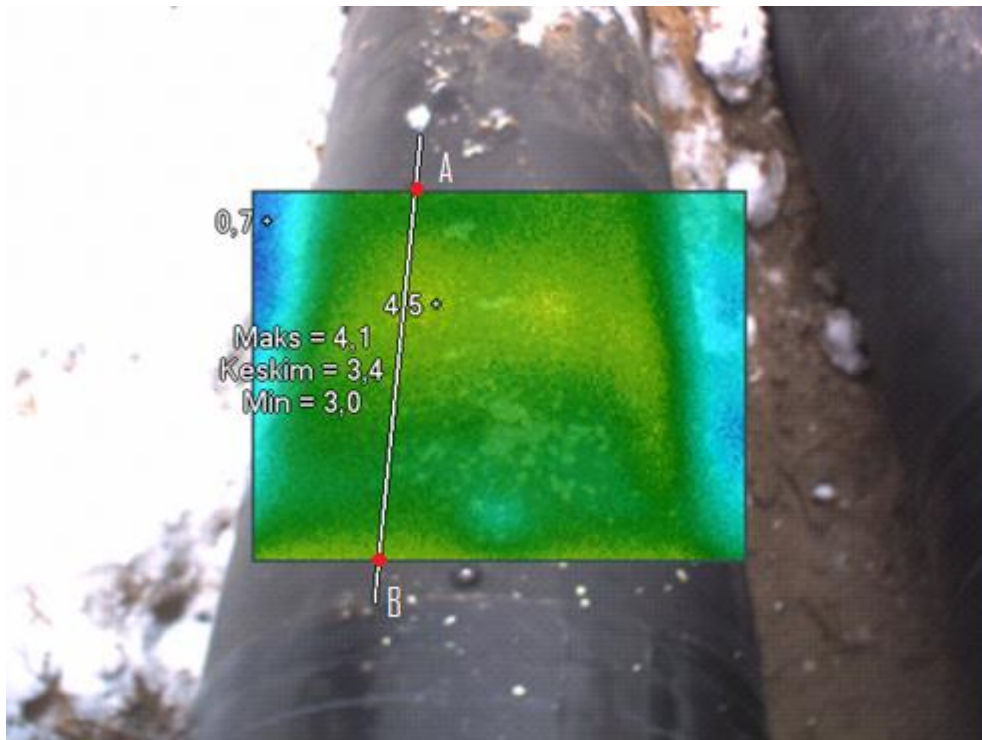
Kuva 9. Lappeenrannan kaukolämpöverkosto sekä sen uusi runkolinja.punaisella värillä.

5.1 Lämpökamerakuvaukset

Lämpökamerakuvausten avulla pyrittiin tarkkailemaan liitoskohtien laatua ja saamaan tietoa runkolinjan putkijatkosten lämpöhäviöistä. Jatkoksissa lämpöhäviöihin vaikuttaa eniten liitoskohdan eristystyön onnistuminen. Kuvausten avulla pystytään siis tarkastamaan eristystyön laatua ja kuvia tulkitsemalla saadaan selville putkien suojakuorten pintalämpötilat, joiden avulla saadaan lämpöhäviöt määriteltyä. Täten pystytään vertailemaan runkolinjan jatkosten lämpöhäviöitä tehdasvalmisteisen johdon lämpöhäviöihin.

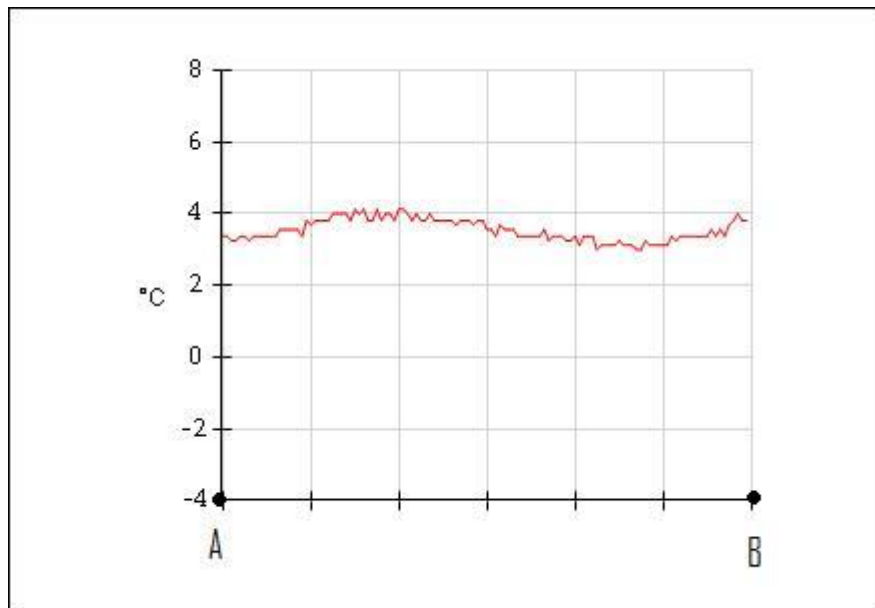
DN 500 runkolinjan lämpökamerakuvaukset tehtiin Fluke Ti9- lämpökameralla. Liitoskohtia kuvattiin yhteensä 20 kappaletta, 10 menopuolen liitosta ja 10 paluupuolen liitosta. Kuvaushetkellä ulkolämpötila oli noin $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, paluuputken veden lämpötila $52\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja menoputken veden lämpötila $92\text{ }^{\circ}\text{C}$. Runkolinjan DN 500 pituus tulee olemaan rakennustyön jälkeen yhteensä noin 1,5 km. Liitoskohtien lukumääräksi yhteensä runkolinjassa voidaan karkeasti olettaa, 16 m putkipituudella, noin 200. Noin 10 % otannalla voidaan saada jo suuntaa antavia tietoja eristystyön onnistumisesta ja yleisestä laadun tasosta. Aina tietysti olisi parempi, jos saataisiin otantaa kasvatettua, mutta näilläkin tutkimuksilla saadaan jonkinlaista uutta tietoa liitoskohdista uudessa runkolinjassa.

Kuvasta 10 nähdään erään paluupuolen johdon jatkoskohdan kuvatun osan lämpötilajakauma putken suojakuoressa. Keltaisella värillä kuvassa merkitään kuuminta lämpötilaa, ja lämpötilan laskiessa väri muuttuu vihreän kautta siniseksi. Kuvasta voidaan havaita lämpötilan vaihtelevan maksimissaan noin 1,5 °C. Aivan liitoksen keskellä on havaittavissa kylmempi kohta jossa lämpötila on 3 °C (sama kuin tehdasvalmisteisen johdon). Lämpötila alkaa hieman nousta kun mennään tehdasvalmisteista johtoa kohti. Lämpimimmillään suojakuoren pintalämpötila on noin 4,5 °C kuvatulla alueella. Kuvassa näkyvä maksimilämpötila 4,1 °C on maksimilämpötila pisteestä A pisteeseen B piirretyllä viivalla. Kuvasta ei pystytä kunnolla havaitsemaan koko liitoskohdan lämpötilajakaumaa, mutta kuvan alareunasta huomataan, että lämpötila alkaa nousta myös mentäessä toiseen suuntaan putkea pitkin. Tulee kuitenkin muistaa, että kuvista voidaan päätellä lämpötiloja vain suuntaa antavasti. Mittausepä tarkkuutta voi aiheuttaa lumihangon heijastama lämpötila ja kokemattomat kameran käyttäjät.



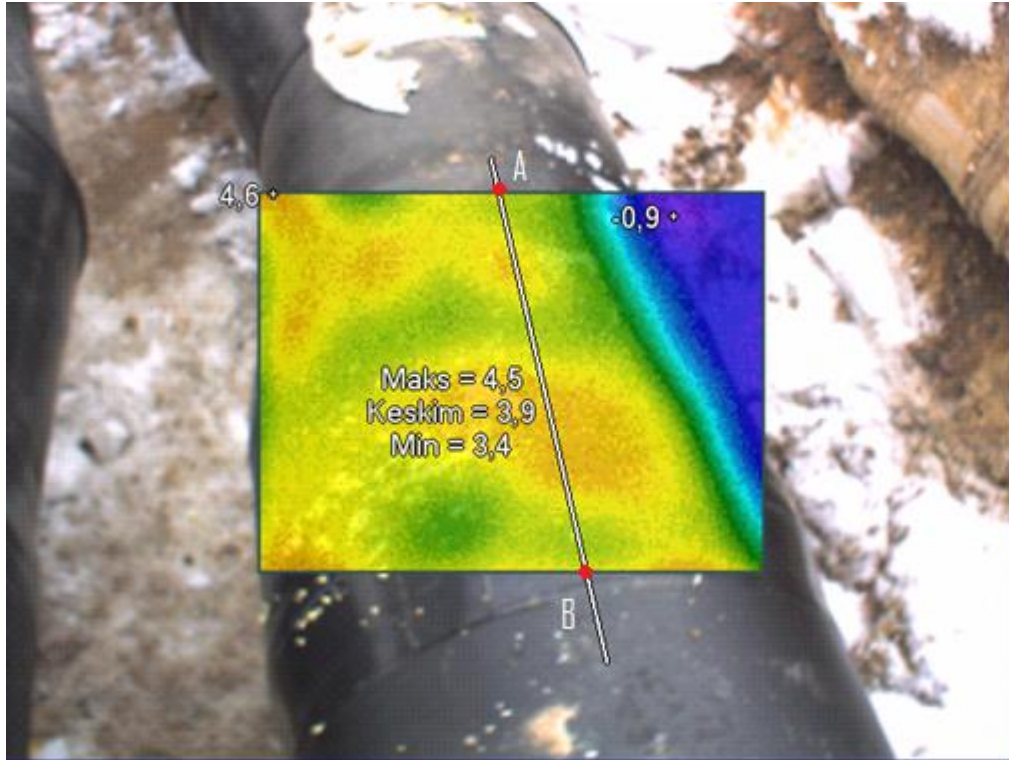
Kuva 10. Paluuputken lämpökamerakuva osasta jatkoskohtaa.

Kuvasta 11 nähdään lämpötilan jakauma kuvaajamuodossa. Kuvaaja poimii pintalämpötilat kuvassa 10 olevasta valkoisesta lineaarisesta viivasta, joka kulkee jatkoskohdan yli pisteestä A pisteeseen B johdon suuntaisesti.



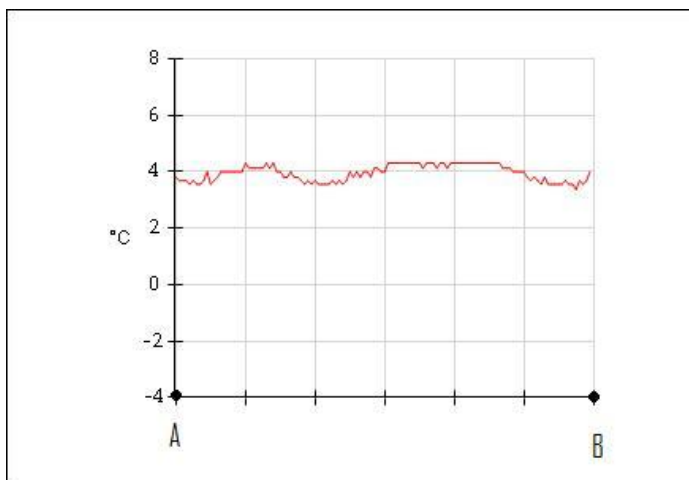
Kuva 11. Suojakuoren pintalämpötilan jakauma paluuputken pinnalla pisteen A ja B välillä.

Kuvasta 12 nähdään erään menopuolen johdon jatkoskohdan lämpötilajaukauma putken yläpuolella suojakuoressa. Pintalämpötila vaihtelee menopuolen jatkoskohdassa suurin piirtein samoin kuin paluupuolen kuvassa 10. Suojakuoren pintalämpötila on noin puoli astetta paluupuolen suojakuorta lämpimämpi. Lämpimimmillään suojakuoren lämpötila on noin 4,5 °C. Myös menoputkessa aivan keskellä liitoskohtaa on viileä kohta, jonka molemmilla puolilla lämpötila alkaa kasvaa johdon suuntaisesti.



Kuva 12. Menoputken lämpökamerakuva osasta jatkoskohtaa.

Kuvasta 13 nähdään pintalämpötilan jakauma kuvaajamuodossa samanlailla kuin kuvasta 11. Kuvaaja poimii pintalämpötilat kuvassa 12 olevasta valkoisesta lineaarisesta viivasta, joka kulkee jatkoskohdan yli pisteestä A pisteeseen B johdon suuntaisesti.



Kuva 13. Suojakuoren pintalämpötilan jakauma menoputken pinnalla pisteen A ja B välillä..

Lämpökamerakuvien perusteella voidaan tehdä lämpöhäviölaskelmat runkolinjan liitoskohdille olettaen ensin muutamia asioita. Keskimääräisesti pintalämpötila nousee jatkoskohdissa noin 1,1 °C sekä meno- että paluupuolella, joten tehdään laskelmat olettaen, että koko runkolinjan matkalla lämpötila nousisi kyseisen 1,1 °C. Kuvista on erittäin vaikea tulkita kuinka pitkä osuus jatkoskohdissa on juuri 1,1 °C korkeammassa lämpötilassa. Mutta laskelmat noilla oletusarvoilla antavat jo suuntaa antavaa tietoa jatkosten vaikutuksesta kokonaislämpöhäviöihin DN 500 runkolinjassa.

5.2 Tehdasvalmisteisen putken lämpöhäviöt

Taulukossa 1 on annettu alkuarvot lämpöhäviölaskelmille. Jotkut arvot eivät ole juuri Lappeenrannan olosuhteiden mukaisia, esimerkiksi maan lämmönjohtavuus, vaan ne on oletettu esimerkkilaskelmista. Mutta näillä oletuksillakin saadaan selville tärkein asia eli tietoa jatkosten lämpöhäviöistä. Lämpöhäviöiden ero tehdasvalmisteisessa ja jatkoskohdassa saadaan määritettyä lämpökamerakuvista määritettyjen pintalämpötilojen perusteella.

Taulukko 1. Alkuarvot DN 500 runkolinjalle (Energiateollisuus ry 2006, 141)

Syvyys maanpinnalta putken keskikohtalle	$H\phi = 1 \text{ m}$
Eristeen lämmönjohtavuus	$\lambda_i = 0,029 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$
Maan lämmönjohtavuus	$\lambda_g = 2,3 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$
Menoveden keskimääräinen lämpötila	$T_m = 85 \text{ }^\circ\text{C}$
Paluueden keskimääräinen lämpötila	$T_p = 55 \text{ }^\circ\text{C}$
Maaperän keskimääräinen lämpötila	$T_g = 5 \text{ }^\circ\text{C}$
Eristeen ulkohalkaisija	$D_i = 696 \text{ mm}$

Eristeen sisähalkaisija eli teräsputken ulkohalkaisija	$D_p = 508 \text{ mm}$
Eristepaksuus	$D_e = 94 \text{ mm}$
Putkien keskipisteiden etäisyys toisistaan	$E = 0,7 \text{ m}$

Lasketaan ensin eristettyjen putkien eristeen ja vaipan lämpövastus lasketaan yhtälöllä 13

$$R_i = \frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln \frac{D_i}{D_p} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 0,029 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}} \ln \frac{696 \text{ mm}}{508 \text{ mm}} = 1,728 \frac{\text{m}^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

Maanpinnan lämpövastus muutetaan tavallisesti ekvivalenttiseksi maakerrokseksi, jolloin korjatun putken sijaintisyvyys saadaan yhtälöllä 12

$$H = H' + \frac{\lambda_g}{\lambda_{gs}} = 1 \text{ m} + \frac{2,3 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}}{13 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C}}} = 1,178 \text{ m}$$

Maan lämpövastus saadaan yhtälöllä 14

$$R_g = \frac{1}{2\pi} \ln \left[\left(\frac{4H}{D_c} \right) \right] = \frac{1}{2\pi} \ln \left[\left(\frac{4 \cdot 1,178 \text{ m}}{0,696 \text{ m}} \right) \right] = 0,1323 \frac{\text{m}^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$D_c = D_i$$

Putkien keskinäisen vaikutuksen huomioiva lämpövastus saadaan laskettua kaavalla 9

$$R_m = \frac{1}{4\pi\lambda_g} \ln\left(1 + \left(\frac{2H}{E}\right)^2\right) = \frac{1}{4\pi \cdot 2,3 \frac{W}{m^{\circ}C}} \ln\left(1 + \left(\frac{2 \cdot 1,178m}{0,7m}\right)^2\right) = 0,0869 \frac{m^{\circ}C}{W}$$

Kokonaislämpövastukseksi tulee

$$K_1 - K_2 = \frac{1}{R_g + R_i + R_m}$$

$$= \frac{1}{0,1323 \frac{m^{\circ}C}{W} + 1,728 \frac{m^{\circ}C}{W} + 0,0869 \frac{m^{\circ}C}{W}} = 0,5136 \frac{W}{m^{\circ}C}$$

ja kokonaislämpöhäviövirraksi tehdasvalmisteisessa johdossa

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

$$= 2 \cdot 0,5136 \frac{W}{m^{\circ}C} \left(\frac{85^{\circ}C + 55^{\circ}C}{2} - 5^{\circ}C \right) = 66,768 \frac{W}{m}$$

Lämpöhäviöiksi saadaan 1,5 km pituisella runkolinjalla

$$\Phi = 1500 m \cdot 66,755 \frac{W}{m} = 100,13 kW$$

Häviöenergiaksi saadaan vuoden tarkastelujaksolla $t = 8760 h/a$

$$E_t = \Phi \cdot t = 100,13 kW \cdot 8760 \frac{h}{a} = 877 MWh/a$$

5.3 Jatkosten lämpöhäviöt

Jatkosten aiheuttama lämpöhäviön lisäys saadaan laskemalla lämpöhäviöt jatkoskohdissa aivan samalla periaatteella kuin tehdasvalmisteisessa putkessa. Lämpökamerakuvien perusteella jatkoskohdissa lämpötila oli tietyissä kohdissa n. 1,1 astetta suurempi kuin tehdasvalmisteisessa putkessa. Tämä lämpötilaero kertoo eristeellä olevan hieman huonompi eristävyyskyky kyseisissä kohdissa. Lämpötilaeron avulla pystytään määrittämään eristeelle uusi lämmönjohtavuus λ_i .

Eristeen lämpövastus laskettiin seuraavalla kaavalla

$$R_i = \frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln \frac{D_i}{D_p} \quad (18)$$

Kokonaislämmönsiirtovirraksi saatiin $66,755 \frac{W}{m}$, jonka avulla pystytään määrittämään eristeen uusi lämmönjohtavuus.

Lämmönsiirron määritelmän mukaan (Incropera, DeWitt 2002, 92)

$$\Phi' = U(\Delta T) \Leftrightarrow \Phi' = \lambda_i(\Delta T) \quad (19)$$

$$\Phi' = \lambda_i(\Delta T)$$

Kuvasta 12 voidaan havaita, että pintalämpötila on maksimissaan $4,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ja minimissään $3,4 \text{ }^\circ\text{C}$.

Lasketaan molemmilla arvoilla lämpövirrat

$$\Phi'_2 = 0,029 \frac{W}{m^\circ\text{C}} \cdot (92 - 3,4)^\circ\text{C} = 2,5694 \text{ W} / m$$

$$\Phi_2' = 0,029 \frac{W}{m^{\circ}C} \cdot (92 - 4,5)^{\circ}C = 2,5375 W / m$$

Ja uudeksi lämmönjohtavuudeksi

$$2,5694 W / m = \lambda_i (92 - 4,5)^{\circ}C$$

$$\lambda_i = 0,029365 \frac{W}{m^{\circ}C}$$

Uudeksi eristeen lämmönvastukseksi saadaan

$$\begin{aligned} R_i &= \frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln \frac{D_i}{D_p} \\ &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 0,029365 \frac{W}{m^{\circ}C}} \ln \frac{696 \text{ mm}}{508 \text{ mm}} = 1,7066 \frac{m^{\circ}C}{W} \end{aligned}$$

Kokonaislämpövastukseksi tulee

$$\begin{aligned} K_1 - K_2 &= \frac{1}{R_g + R_i + R_m} \\ &= \frac{1}{0,1323 \frac{m^{\circ}C}{W} + 1,7066 \frac{m^{\circ}C}{W} + 0,0869 \frac{m^{\circ}C}{W}} = 0,51926 \frac{W}{m^{\circ}C} \end{aligned}$$

ja kokonaislämpöhäviövirraksi

$$\begin{aligned}\Phi'_{\text{tot}} &= 2(K_1 - K_2) \left[\frac{T_m + T_p}{2} - T_g \right] \\ &= 2 \cdot 0,51926 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}} \left(\frac{85^\circ\text{C} + 55^\circ\text{C}}{2} - 5^\circ\text{C} \right) = 67,50 \frac{\text{W}}{\text{m}}\end{aligned}$$

Lämpöhäviöiksi saadaan 1,5 km pituisella runkolinjalla, jos suojaputken pintalämpötila kauttaaltaan on 1,1 °C korkeampi

$$\Phi = 1500 \text{ m} \cdot 67,50 \frac{\text{W}}{\text{m}} = 101,3 \text{ kW}$$

Häviöenergiaksi vuoden tarkastelujaksolla $t = 8760 \text{ h/a}$

$$E_t = \Phi \cdot t = 101250 \text{ W} \cdot 8760 \frac{\text{h}}{\text{a}} = 887,0 \text{ MWh/a}$$

5.4 Tulokset

Taulukosta 2 nähdään tehtyjen lämpöhäviölaskelmien tulokset koottuna yhdestä jatkoskohdasta ja tehdasvalmisteisesta johdosta. Suojakuoren pintalämpötilojen erot tehdasvalmisteisen ja jatkoskohdan välillä oletettiin 1,1 °C suuruisiksi, mikä laskelmien mukaan aiheuttaa vain pienen eron 1,5 kilometrin pituisen runkojohdon lämpöhäviövirrasa ja kokonaislämpöhäviössä. Lämpöhäviöksi muodostuu jatkoskohdassa 101,25 kW, joka on vain noin 1 kW suurempi kuin tehdasvalmisteisen johdon lämpöhäviö. Tuloksissa pitää vielä ottaa huomioon oletus, että pintalämpötila on suurempi koko johdon pituudelta eikä vain tietyissä kohdissa liitoskohtia, mikä pienentää todellista lämpöhäviötä koko runkolinjassa. Tulosten perusteella voidaan todeta jatkosten lämpöhäviöiden vaikutuksen olevan minimaalinen verrattuna runkolinjan kokonaislämpöhäviöihin. Tulokset kertovat eristystyön onnistuneen erinomaisesti.

Taulukko 2. Lämpöhäviöt jatkoskohdissa ja tehdasvalmisteisessa johdossa.

Putkityyppi	Putkikoko	suojakuoren pintalämpötila [°C]	Linjan pituus [m]	Häviölämpövirta [W/m]	Lämpöhäviö [kW]
Jatkos	DN 500	4,5	1500	67,50	101,25
Tehdas- valmisteinen	DN 500	3,4	1500	66,77	100,13

6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä tutkittiin Lappeenrannan kaukolämpöverkoston uuden valmisteilla olevan runkolinjan yksiputkijohdon lämpöhäviöitä liitos- eli jatkoskohdissa. Jatkoskohtien lämpöhäviöt saatiin selvitettyä kuvaamalla liitoskohtia lämpökameralla. Kuvista saatiin selville suojakuoren pintalämpötilat ja niiden vaihtelut jatkoskohdissa. Pintalämpötilojen perusteella pystyttiin laskemaan jatkoskohtien lämpöhäviöt, joita sitten verrattiin tehdasvalmisteiden johdon lämpöhäviöihin.

Saatujen tulosten valossa voidaan sanoa, että kokonaisuudessaan runkojohdon jatkosten vaikutus kokonaislämpöhäviöihin on erittäin pieni, vaikka pintalämpötiloissa havaittiinkin eroavaisuuksia jatkoskohdissa. Mutta kokonaisuutta ajatellen muutokset ovat vain erittäin pienillä alueilla, joten kokonaisvaikutus on pieni. Karkeasti voidaan arvioida, että 1,5 km linjassa yhteensä on noin 200 liitoskohtaa, kun putket ovat 12 metrin mittaisia. Vaikka oletettaisiin, että jokaisessa liitoskohdassa lämpötila olisi yhden asteen suurempi kuin tehdasvalmisteisessa putkessa, niin kokonaisuudessaan se vastaa vain 60 m metrin matkaa, eikä aiheuta suuria muutoksia runkojohdon kokonaislämpöhäviöissä.

Haastavana seikkana ensinnäkin on kuvien tulkinta. On melko vaikeaa päätellä kuvista mitään selkeää logiikkaa, jonka mukaan pintalämpötilat vaihtelisivat eri liitoskohdissa. Mutta kuitenkin tehtyjen tutkimusten ja päätelmien mukaan eristystyö näyttää olevan onnistunut tutkituissa liitoskohdissa erinomaisesti, eikä missään kohdasta löytynyt huomionarvoisia pintalämpötilapoikkeavuuksia. Tietysti paras vaihtoehto olisi ollut kaikkien liitoskohtien kuvaaminen, minkä kautta oltaisi otantaa saatu suuremmaksi sekä

tuloksia varmemmiksi. Kattavamman tutkimuksen tekeminen olisi vaatinut enemmän aikaa ja kuvaukset olisivat tapahtuneet paljon pitemmällä aikavälillä.

LÄHDELUETTELO

Energiateollisuus ry. Kaukolämmön käsikirja 2006. 566 s. Helsinki 2006. ISBN 952-5615-08-1.

Incropera Frank P, DeWitt David P. 2002. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Viides painos. 981 s.

Lappeenrannan Energia Oy. Elämää & Energiaa 2/2008, Lappeenrannan Energia Oy:n asiakaslehti. 19 s.

Lögstör Finland Oy. Suunnitteluohjeet 2008. Kaukolämpöesitteet. [PDF-dokumentti]. 39 s. Saatavissa: <http://www.logstor.com/getfile.php?objectid=3203674>

Suomen kaukolämpö ry. Suositus L2/2003, Kiinnivaahdotettujen kaukolämpöjohtojen liitokset. Sky-kansio 2/1. 34 s. ISSN 1238-9307.