



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
MEHAANIKATEADUSKOND

Soojustehnika instituut  
Soojusjõuseadmete õppetool

MSJ40LT

*Heliis Pikkor*

## **Võru kaugküttevõrgu osade rekonstrueerimise efektiivsus**

Autor taotleb  
tehnikateaduse bakalaureuse  
akadeemilist kraadi

Tallinn  
2014

## AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis Aleksandr Hlebnikovi juhendamisel.

“.....” .....2014 .a.

Töö autor

..... allkiri

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

“.....” .....2014 a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

Soojusenergeetika õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....” .....2014 a.

..... allkiri

## BAKALAUREUSETÖÖÜLESANNE

2014. aasta kevadsemester

Üliõpilane: Heliis Pikkor 112858

Õppekava: MASB02/09

Eriala: Soojusenergeetika

Juhendaja: dotsent Aleksandr Hlebnikov

Konsultandid: Juhan Agurauja, AS Danpower Eesti projektiinsener

### BAKALAUREUSETÖÖ TEEMA:

(eesti keeles) Võru kaugküttevõrgu osade rekonstrueerimise efektiivsus

(inglise keeles) Reconstruction efficiency of the Võru district heating network parts

### Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1.	Töö teoreetiliste alustega tutvumine	märts 2014
2.	Teoreetiliste soojuskadude arvutamine	aprill 2014
3.	Potentsiaalse sojussäästu ning projekti majandusliku tasuvuse hindamine	aprill 2014
4.	Rekonstrueeritud trassi iseloomustavate suuruste leidmine ning nende võrdlemine eelmise kütteperioodi näitajatega	mai 2014
5.	Bakalaureusetöö lõplik vormistamine ning esitamine	30. mai 2014

### Lahendatavad insenertehinilsed ja majanduslikud probleemid:

Kaugküttevõrgu soojuskadude leidmine ning sojussäästu hindamine, trassi soojuslähikandegurite leidmine ning võrdlemine varasemate kütteperioodidega, trassi rekonstrueerimise mõttekuse ning tasuvuse hinnang.

### Täiendavad märkused ja nõuded: -

**Töö keel:** eesti keel

Kaitsmistootlus esitada hiljemalt 12.05.2014 **Töö esitamise tähtaeg** 30.05.2014

Üliõpilane Heliis Pikkor /allkiri/ ..... kuupäev.....

Juhendaja Aleksandr Hlebnikov /allkiri/ ..... kuupäev.....

# SISUKORD

AUTORIDEKLARATSIOON .....	2
BAKALAUREUSETÖÖÜLESANNE .....	3
SISUKORD .....	4
EESSÕNA .....	5
SISSEJUHATUS .....	6
1. VÕRU LINNA JA SOOJAMAJANDUSE ÜLDISELOOMUSTUS .....	7
1.1. Linna asend, looduslikud tingimused, asustus ja rahvastik .....	7
1.2. Võru linna soojamajandus.....	8
1.3. Rekonstrueeritavate lõikude seisundi hinnang enne trassi uuendamist .....	9
2. TÖÖ TEOREETILISED ALUSED .....	11
2.1. Kaugkütte soojusvõrke iseloomustavad suurused.....	11
2.2 Erinevate soojustrassitüüpide arvutuslikud soojuskaod .....	13
2.2.1. Maa-aluses kanalis asuva trassi soojuskadude arvutus .....	13
2.2.2. Eelisoleeritud torudest maa-aluse soojustrassi soojuskadude arvutus.....	16
2.3 Kaugküttevõrgu optimeerimine .....	17
3. TEOREETILISED SOOJUSKAOD ENNE JA PÄRAST TRASSI REKONSTRUEERIMIST	19
3.1 Maa-aluses kanalis asuva trassi soojuskaod .....	19
3.2 Eelisoleeritud torudest maaaluse trassi soojuskaod.....	23
3.3. Soojustrassi rekonstrueerimise teoreetiline kasu.....	25
3.4 Soojustrassi rekonstrueerimise majanduslik tasuvus .....	25
4. SOOJUSKAOD PÄRAST TRASSI REKONSTRUEERIMIST .....	27
5. TEGELIKE JA TEOREETILISELT VÄLJA ARVUTATUD TULEMUSTE VÕRDLUS.....	29
KOKKUVÕTE .....	33
SUMMARY .....	34
KASUTATUD KIRJANDUS .....	35

## EESSÕNA

Antud lõputöö teema on välja pakutud Tallinna Tehnikaülikooli Mehaanikateaduskonna Soojustehnika instituudi dotsendi Aleksandr Hlebnikovi poolt, kes oli ühtlasi ka käesoleva lõputöö juhendaja.

Töös kasutatavad andmed on saadud AS Danpower Eestilt, konsultatsioonide ja andmete kogumisega aitas firma projektiinsener Juhan Agurauja.

## SISSEJUHATUS

Antud bakalaureusetöö teema on välja pakutud lõputöö juhendaja Aleksander Hlebnikovi poolt koostöös Võru linna soojatootja AS Danpower Eestiga. Valisin selle teema, kuna valdkond on huvipakkuv ning teema on aktuaalne.

2013/2014 aasta kütteperioodi eel vahetati 3,4 km ulatuses vanades betoonkanalites paiknevaid torusid uute eelisoleeritud torude vastu. Vana soojatross oli kuni 45 aastat vana ning torude kehva seisundi tõttu olid soojuskaod suured.

Töö eesmärk on leida Võru Kesklinna küttevõrgu soojuskaod enne trassiosade rekonstrueerimist, arvutada teoreetiline soojuskadude vähenemine, mis kaasneb vanade betoonkanalis torude vahetamisega eelisoleeritud torude vastu, leida soojuskaod pärast rekonstrueerimist ning vaadelda, kuidas muutub võrgu üldine soojuslähikandetegur pärast torude vahetamist. Lisaks sellele hindan projekti majanduslikku mõttekust ning tasuvusaega.

Töö esimeses osas tutvustan Võru linna ning selle soojamajandust, teises osas soojuskadude arvutamise teoreetilisi aluseid, kolmandas ja neljandas osas leian teoreetilise ning reaalse soojussäästu ning töö viimases osas võrdlen neid omavahel.

# 1. VÕRU LINNA JA SOOJAMAJANDUSE ÜLDISELOOMUSTUS

## 1.1. Linna asend, looduslikud tingimused, asustus ja rahvastik

Võru linn on Kagu-Eestis Otepää ja Haanja kõrgustiku vahelises Võru-Hargla nõos paiknev Võru maakonna majanduslik ja administratiivne keskus.

Linna territooriumil asuvad kolm järve - Tamula (229 ha), Kubija (15,9 ha) ja Kubija Veskijärv (1,7 ha). Põhjast ja loodest piirab linna Võhandu jõgi, linna läbib Koreli oja. [1]

Võru linn koosneb Kesklinna, Võrusoo ja Kubija linnaosadest ning Võrukivi, Liitva ja Nõõrimaa asumitest.

Kesklinna all mõistetakse ajaloolist Võru linna. Sellesse osasse jäävad enamjaolt haldus-, teenindus-, kultuuri- ja haridusasutused ning äriettevõtted. Kesklinnast loodesse jäävad Võrukivi ja Liitva asumid on peamiselt väikeelamurajoonid. Nõõrimaa asum paikneb Kesklinnast kirdes. Tegu on elamurajooniga, mis kagu suunast on kokku kasvanud Võrusoo tööstuspiirkonnaga. Võrusoo nime kannab ala, kus asub suurem osa linna tööstus-, ehitus- ja laondusettevõtetest ja transpordirajatistest ning mitu erineva vanusega eluasumit. Tegu on linna kõige rahvarohkema piirkonnaga. Kubija on metsarikas elu- ja puhkerajoon, mille piires on hotell-turismikeskus, Kuperjanovi Üksik-jalaväepataljoni linnak, maakonna suurim haigla, hulk korruselamuid ja eramuid. [1]

2012. aasta seisuga elab Võru linnas 13 482 ja maakonnas 36403 inimest. Linna pindala on 13,2 km<sup>2</sup>. Linna ümbritseb 4 500 elanikuga Võru vald. [2]

## 1.2. Võru linna soojamajandus

Võru linna varustab soojusega Saksa energiafirmale Danpower GmbH kuuluv Danpower Eesti AS (endise nimega AS Võru Soojus).

Võrus on kolm kaugküttepiirkonda: Kesklinna, Võrukivi ja Laane, millest suurim on Kesklinna. Sinna alla kuuluvad Vabaduse ja Võrusoo katlamajade soojusvõrgud.

Danpower Eesti AS-i installeeritud tootmisvõimsus on 59 MW, millest maksimaalselt kasutatakse umbes 30 MW. Ettevõttele kuuluvate soojustrasside kogupikkus on 24,8 km. [3]

Kesklinna küttevõrgu pikkus on 23,3 km, millest vanas maa-aluses kanalis paikneva torustiku pikkus on 11,3 km, rekonstrueeritud maapealse osa pikkus 2,4 km ning uutest eelisoleeritud torudest trassiosa pikkus 9,6 km.

Tabel 1.1. Võru Kesklinna kaugküttevõrgu osade pikkused sõltuvalt toru läbimõõdust ja tüübist.

Toru läbimõõt DN, mm	Uute eelisoleeritud torudega trassiosa pikkus L, m	Vana betoonkanalisse paigaldatud trassiosa pikkus L, m	Rekonstrueeritud maapealse trassiosa pikkus L, m
32	42,5	370	0
40	78	370	0
50	1238	800	0
65	1011	250	0
70	120	1141	0
75	0	40	0
80	972,5	1420	0
100	1517	2306	0
125	364	400	0
150	1560	826	0
200	267,5	445	0
250	2471	2850	1983
315	0	118	0
350	0	0	380
Kokku:	<b>9641,5</b>	<b>11336</b>	<b>2363</b>
Kõik kokku:		<b>23341</b>	

2013. aasta suvel rekonstrueeriti osa trassist, mille käigus vahetati 3,4 km ulatuses vanu betoonkanalis paiknevaid torusid uute eelisoleeritud torude vastu.



### **1.3. Rekonstrueeritavate lõikude seisundi hinnang enne trassi uuendamist**

Võru linna soojustrassid on ehitatud väga erinevatel aegadel lõikude kaupa ja on kuni 45 aastat vanad. Põhiosa soojusvõrgust asub maa-aluses betoonkanalis. Võrusoo katlamajast väljuvad maapealsed magistraaltrassid, mida kõrge põhjavee taseme tõttu polnud võimalik maa-alusesse kanalisse paigaldada. Erinevatel aegadel ehitatud trassid on ehitatud erinevat tehnoloogiat kasutades - vanemad trassid on paigutatud betoonkünadesse ja isoleeritud klaasvatiga, uuemad trassid on ehitatud eelisooleeritud torudest.

Sõltuvalt ehituse ja paigutuse eripärast (pinnavee kõrgus, ehituse kvaliteet) on trassid väga erinevates seisukordades. Võib juhtuda, et uuem trass on avariiohtlikus seisukorras, aga vanem korralikult ehitatud ja kuivas pinnases paiknev trass on heas seisukorras.

Vanadel maa-alustel soojustrassidel puudub drenaaž vihmavee eemalejuhtimiseks. Isegi seal, kuhu drenaaž oli rajatud, ei olnud vett kuhugi edasi juhtida, sest Võrus puudus sadeveekanaliseerimine või seda ei rakendatud tööle (Võrusoo piirkonda rajati osaliselt sadeveekanaliseerimine, kuid see ei tööta tänaseni). Aja jooksul on keraamilisest torustikust drenid kokku vajunud või sadestunud liiva täis ning neid ei ole võimalik enam ilma tõsise renoveerimiseta tööle rakendada. Kesklinna piirkonnas ühendati drenid linna kanalisatsiooniga, kuid kanalisatsiooni ummistumisel juhtis dren kanaliseeritava vee soojatrassi, mistõttu on trasside isolatsioon tugevalt rikutud ja torustik intensiivselt korrodeerunud. Betoonkanalite bituumenist hüdroisolatsiooni kiht on lagunenuk ning künad on muutunud väga hapraks ja ei pea enam niiskust kinni. Pidevalt trassi jaotuskambrite põhjas olev vesi rikub kambrite konstruktsioone ja seal asuvat armatuuri, mis omakorda tõstab kambrite remondikulusid. Niiskuse tulemusena on muutunud ka betoonkanali ja kaevude vastupidavus pinnase ja transpordi survele, mistõttu võib kanal kokku variseda.

Pinnas Võru soojusvõrkude asukohas on põhiliselt savine ja mitmes kohas on veesooni. Võrusoo piirkonnas on pinnas soine ning põhjavee tase on kõrge (eriti suuremate sadude puhul). Võrusoo piirkonna trasside ehitamisel rajati mitmed kraavid ja jäeti alles looduslikud kanalid vee ärajuhtimiseks. Praeguseks on looduslikud kanalid kinni kasvanud ja rajatud

kanalid kinni aetud, sest nad ei sobinud linnapilti. Seetõttu on aga soojustrasside olukord tunduvalt halvenenud.

Kanalis olev torustik on isoleeritud mineraalvati ja ruberoid-pilbasvõrguga või fooliumruberoidiga. Kasutatud mineraalvatt on võrdlemisi kõrge happesusega, mis kokkupuutel niiskusega tekitab happelise keskkonna ja soodustab torustiku kiiret korrodeerumist. Samuti on niiskuse tulemusena mineraalvatt vajunud torustiku alumisele küljele, suurendades tunduvalt soojakadusid. Maa-aluses kanalis paiknevaid soojustrasse mõjutab suurel määral ka aasta-aeg – kevade ja sügise vihmastel perioodidel on osa trassist suure tõenäosusega vee all. Halvasti ehitatud ja liikuvatel tugeudel trassid on kukkunud tugevalt maha kanali põhja, kus torude alumised pooled on tugevalt korrodeerunud. Tänavate all kulgevatele soojatrassidele mõjub halvasti ka talvine teede soolamine, mistõttu soolane lumesulavesi voolab läbi asfaldipragude soojatrassi kanalisse.

Kõige selle tõttu vajab iga-aastaselt umbes 20 kuni 25 kohta trassides avariilist remonti. [4]



Sele 1.1. Võru vana maa-aluses kanalis paiknev soojustrass.

## 2. TÖÖ TEOREETILISED ALUSED

### 2.1. Kaugkütte soojusvõrke iseloomustavad suurused

Kaugküttesoojusvõrgu efektiivsust kõige paremini iseloomustav suurus on soojuskaotegur  $q_{ksj}$ . See näitab, milline osa soojusvõrku väljastatud soojusest ei jõudnud tarbijateni. Soojuskaotegur ei sõltu mitte ainult soojusisolatsiooni efektiivsusest, vaid on määratud nelja iseloomustava näitajaga:

- üldine soojuslähikandetegur  $K_{ii}$ ,  $W/(m^2K)$ , mis iseloomustab soojusisolatsiooni efektiivsust;
- torude eripind  $A/L$ ,  $m^2/m$ , mis iseloomustab soojustrassi torude keskmist suurust;
- kraad-tundide arv ehk temperatuuriintegraal  $\int \theta d\tau$ ,  $^{\circ}Ch$ , mis iseloomustab soojuskandja temperatuuritaset sõltuvalt aasta keskmisest välisõhutemperatuurist;
- soojusvõrgu pikkusühiku kohta väljastatud soojushulk ehk soojusvõrgu erikoormus  $Q/L$ ,  $MWh/m$ , mis iseloomustab soojustarbimise tihedust. [6]

Soojusvõrgu üldise soojuslähikandeteguri võib arvutada välja, teades soojustrassi konstruktsiooni ja kasutatud soojusisolatsioonmaterjale, või hinnata tema suurust soojuskaomõõtmistest. Antud töös on üldine soojuslähikandetegur leitud teades soojuskadu, mis on saadud aasta jooksul soojusvõrku väljastatud ja tarbijate saadud soojushulkade vahena. Algandmed realselt soojusvõrku väljastatud ja tarbijate saadud soojushulkade kohta on saadud soojustootjate käest, samuti on teada reaalsed soojuskandja ja välisõhu temperatuurid. Tarbijate kasutatavate soojusmõõtjate suhteline viga nominaalkoormusel võib olla piirides  $\pm 5$  %. Sama viga võib olla ka soojusvõrku väljastatava soojushulga mõõtmisel. [6]

Soojusvõrgu soojuskaoteguri saab leida järgmise valemi abil:

$$q_{ksj} = \frac{Q_{ksj}}{Q} = K_{ii} \cdot \frac{(A/L) \cdot \int \theta d\tau}{(Q/L)} \quad (2.1)$$

kus

$Q_{ksj}$  - soojusvõrgu jaotussoojuskadu aasta jooksul  $MWh$ ;

$Q$  - soojusvõrku aasta jooksul antud soojushulk  $MWh$ ;

$K_{ii}$  – üldine soojuslähikandetegur  $W/(m^2K)$ ;

$A/L$  – torude eripind  $m^2/m$ ;

$\int \theta d\tau$  - temperatuuriintegraal  $^{\circ}Ch$ ;

$Q/L$  – soojusvõrgu erikoormus  $MWh/m$ .

Mida suurem on üldine soojuslähikandetegur, torude eripind, temperatuuriintegraal ning mida väiksem on erikoormus, seda suurem on soojuskaotegur.

Üldine hinnanguline soojuslähikandetegur on järgmine:

$$K_{ii} = \frac{q_{ksj}}{\left[ \frac{(A/L) \cdot \int \theta d\tau}{(Q/L)} \right]}, \quad W/(m^2 K) \quad (2.2)$$

Soojusvõrgu torude keskmine diameeter on leitud järgmiselt:

$$d_a = \frac{A/L}{2 \cdot \pi}, \quad m \quad (2.3)$$

Temperatuuriintegraal ehk kraad-tundide arv on leitud järgmiselt:

$$\int \theta d\tau = \left( \frac{t_p + t_t}{2} - t_{\delta} \right) \cdot \tau, \quad ^{\circ}Ch \quad (2.4)$$

kus

$t_p$  - vee temperatuur pealevoolutorus  $^{\circ}C$ ,

$t_t$  - vee temperatuur tagasivoolutorus  $^{\circ}C$ ,

$t_{\delta}$  - välisõhu temperatuur  $^{\circ}C$ ,

$\tau$  – kütteperioodi kestus h.

Soojusvõrkude soojuskadude uurimisel jagatakse soojuskaotegur  $q_{ksj}$  kaheks: üldiseks soojuslähikandeteguriks ja jaotusteguriks.

Jaotustegur on järgmine:

$$q_{jt} = \frac{(A/L) \cdot \int \theta d\tau}{(Q/L)}, \quad (m^2K)/W \quad (2.5)$$

Jaotustegur väljendab võrgu potentsiaali omada teatud suhtelist jaotussoojuskadu. Mida väiksem on jaotustegur, seda väiksem on soojuskaotegur. Üldine soojuslähikandetegur on

proportsionaalsuskonstant, mis väljendab soojuskadude vähendamise võimalust soojusisolatsiooni efektiivsuse tõstmise kaudu. [6]

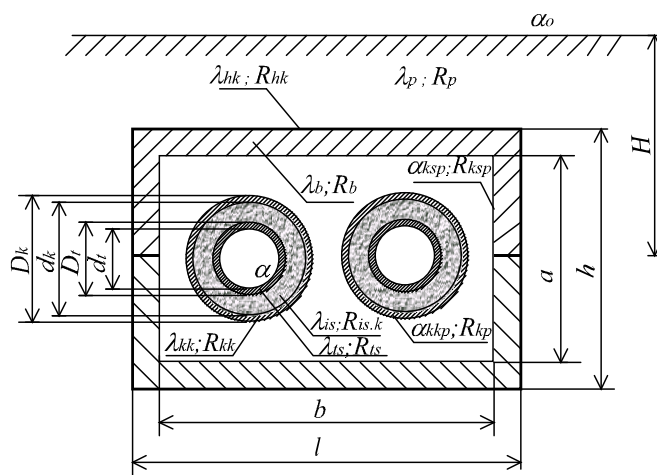
## 2.2 Erinevate soojustrassitüüpide arvutuslikud soojuskaod

### 2.2.1. Maa-aluses kanalis asuva trassi soojuskadude arvutus

Selleks, et välja arvutada maa-aluse trassi soojuskadu, on vaja teada, millised on torude soojuslähikandetegurid sõltuvalt toru läbimõõdust, trassiosade pikkused ja soojuskandja ning välisõhu temperatuuride vahe. [6]

Soojuslähikandeteguri leidmiseks on vaja teada, milliseid soojusisolatsioonmaterjale on kasutatud, kui paksud on soojusisolatsiooni kihid ning kui sügaval asub betoonkanal. Samuti on vaja teada, mis tüüpi pinnases ta asub. Nende põhjal saab arvutada soojusisolatsiooni kõigi üksikute kihtide termilised takistused. Samuti tuleb arvestada sellega, et toimub soojusvahetus kahe toru vahel. Pealevoolutoru (tänu kõrgemale vee temperatuurile) annab osaliselt soojust tagasivoolutorule ära ja kompenseerib mingil määral tema soojuskadusid. [6]

Maaaluses kanalis asuva soojustrassi skeemil (sele 2.1.) on näidatud termilise kogutakistuse koostisosad. [6]



Sele 2.1. Maa-aluses kanalis asuv soojustrass

Sellise soojustrassi paigutuse korral määratakse pealevoolutoru soojuśläbikandetegur järgmiselt:

$$K_p = \frac{1/R_{p, is} \cdot (1/R_{t, is} + 1/R_{k-o})}{1/R_{p, is} + 1/R_{t, is} + 1/R_{k-o}} \text{ W/(mK)} \quad (2.6)$$

Tagasivoolutoru soojuśläbikandetegur määratakse järgmiselt:

$$K_t = \frac{1/R_{t, is} \cdot (1/R_{p, is} + 1/R_{k-o})}{1/R_{p, is} + 1/R_{t, is} + 1/R_{k-o}} \text{ W/(mK)} \quad (2.7)$$

Pealevoolutoru ja tagasivoolutoru soojušvahetust arvestav soojuśläbikandetegur on määratud järgmiselt:

$$K_{p,t} = K_{t,p} = \frac{1/R_{p, is} \cdot 1/R_{t, is}}{1/R_{p, is} + 1/R_{t, is} + 1/R_{k-o}} \text{ W/(mK)}, \quad (2.8)$$

kus

$R_{p, is}$  - pealevoolutoru isolatsiooni termiline takistus (mK)/W,

$R_{t, is}$  - tagasivoolutoru isolatsiooni termiline takistus (mK)/W,

$R_{k-o}$  - kanali ja pinnase termiline takistus (mK)/W.

Toru isolatsiooni termiline takistus koosneb järgmistest osadest:

$$R_{is} = R_{isp} + R_{ts} + R_{is.k} + R_{is.kk} + R_{kkp} \text{ (mK)/W}, \quad (2.9)$$

kus

$R_{isp}$  - toru sisemise pinna termiline takistus (mK)/W,

$R_{ts}$  - toru seina termiline takistus (mK)/W,

$R_{is.k}$  - soojušisolatsioonikihi termiline takistus (mK)/W,

$R_{is.kk}$  - isolatsiooni kattekihi termiline takistus (mK)/W,

$R_{kkp}$  - toru kattekihi välispinna termiline takistus (mK)/W.

Betoonkanali ja pinnase termiline takistus koosneb järgmistest osadest:

$$R_{k-o} = R_{ksp} + R_{ks} + R_{hk} + R_p \text{ (mK)/W,} \quad (2.10)$$

kus

$R_{ksp}$  - kanali sisemise pinna termiline takistus (mK)/W,

$R_{ks}$  - kanali seinä termiline takistus (mK)/W,

$R_{hk}$  - kanali hüdroisolatsioonikihi termiline takistus (mK)/W,

$R_p$  - pinnase ja pinnase pinna termiline takistus (mK)/W.

Soojustrassi pealevoolu- ja tagasivoolutorude soojuskadu on järgmine:

$$q_p = K_p(t_p - t_{\bar{o}}) - K_{p,t}(t_t - t_{\bar{o}}) \text{ W/m,} \quad (2.11)$$

$$q_t = K_t(t_t - t_{\bar{o}}) - K_{t,p}(t_p - t_{\bar{o}}) \text{ W/m,} \quad (2.12)$$

kus

$K_p$  - pealevoolutoru soojuslähikandetegur W/(mK),

$K_t$  - tagasivoolutoru soojuslähikandetegur W/(mK),

$K_{p,t} = K_{t,p}$  - peale- ja tagasivoolutoru soojusvahetust arvestav soojuslähikandetegur W/(mK),

$t_p$  - vee temperatuur pealevoolutorus °C,

$t_t$  - vee temperatuur tagasivoolutorus °C,

$t_{\bar{o}}$  - välisõhu temperatuur °C.

Kui pealevoolu- ja tagasivoolutoru soojuslähikandetegurid on võrdsed, siis võib maa-aluse soojustrassi soojuskao leida järgmise valemi abil:

$$q = q_p + q_t = 2 \cdot (K_1 - K_0) \cdot \left( \frac{t_p + t_t}{2} - t_{\bar{o}} \right) = 2 \cdot U \cdot \Theta \text{ W/m,} \quad (2.13)$$

kus

$K_1 = K_p = K_t$ ,  $K_0 = K_{p,t} = K_{t,p}$ ,

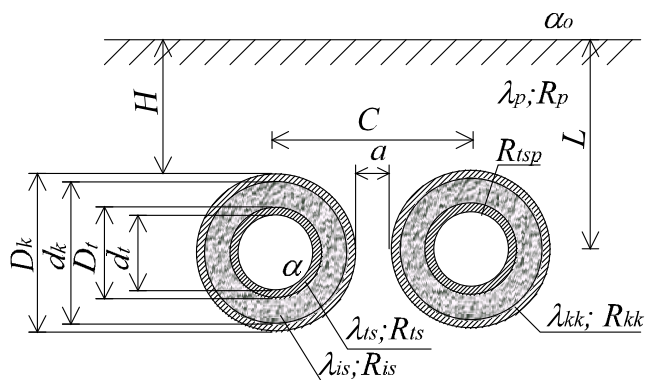
$U = K_1 - K_0$  – soojuslähikandetegur W/(mK),

$\Theta = \frac{t_p + t_t}{2} - t_{\bar{o}}$ , °C.

## 2.2.2. Eelisooleeritud torudest maa-aluse soojustrassi soojuskadude arvutus

Eelisooleeritud torudest maa-aluse soojustrassi skeemil (sele 2.2.) on näidatud termilise kogutakistuse koostisosad.

Kogu soojuskadu koosneb peale- ja tagasivoolutorude soojuskadudest. Samal ajal tuleb arvestada sellega, et torude vahel toimub soojusvahetus. See tähendab, et pealevoolutoru annab soojust tagasivoolutorule ära. Antud juhul toimub torudevaheline soojusvahetus pinnase kaudu, kuna torude vahel ei ole õhk nagu kanalises asuvatel torudel vaid pinnas. [6]



Sele 2.2. Eelisooleeritud torudest maa-alune soojustrass

Soojustrassi soojuskadu arvutatakse välja punktis 2.2.1 toodud valemite 2.11, 2.12 ja 2.13 abil, mis on toodud maaaluses kanalises asuva soojustrassi jaoks. Arvesse tuleb võtta teisiti arvutatavaid torude ja pinnase soojuslähikandetegureid. [6]

Pealevoolutoru soojuslähikandetegur määratakse järgmiselt :

$$K_p = \frac{R_{t, is} + R_{t, pin}}{(R_{p, is} + R_{p, pin}) \cdot (R_{t, is} + R_{t, pin}) - R_c^2} \text{ W/(mK)} \quad (2.14)$$

Tagasivoolutoru soojuslähikandetegur määratakse järgmiselt:

$$K_t = \frac{R_{p, is} + R_{p, pin}}{(R_{p, is} + R_{p, pin}) \cdot (R_{t, is} + R_{t, pin}) - R_c^2} \text{ W/(mK)} \quad (2.15)$$



Pealevoolutoru ja tagasivoolutoru soojusvahetust arvestav soojuslähikandetegur arvutatakse järgmiselt:

$$K_{p,t} = K_{t,p} = \frac{R_c}{(R_{p,is} + R_{p,pin}) \cdot (R_{t,is} + R_{t,pin}) - R_c^2} \text{ W/(mK)} \quad (2.16)$$

kus

$R_{p,is}$  - pealevoolutoru isolatsiooni termiline takistus (mK)/W,

$R_{t,is}$  - tagasivoolutoru isolatsiooni termiline takistus (mK)/W,

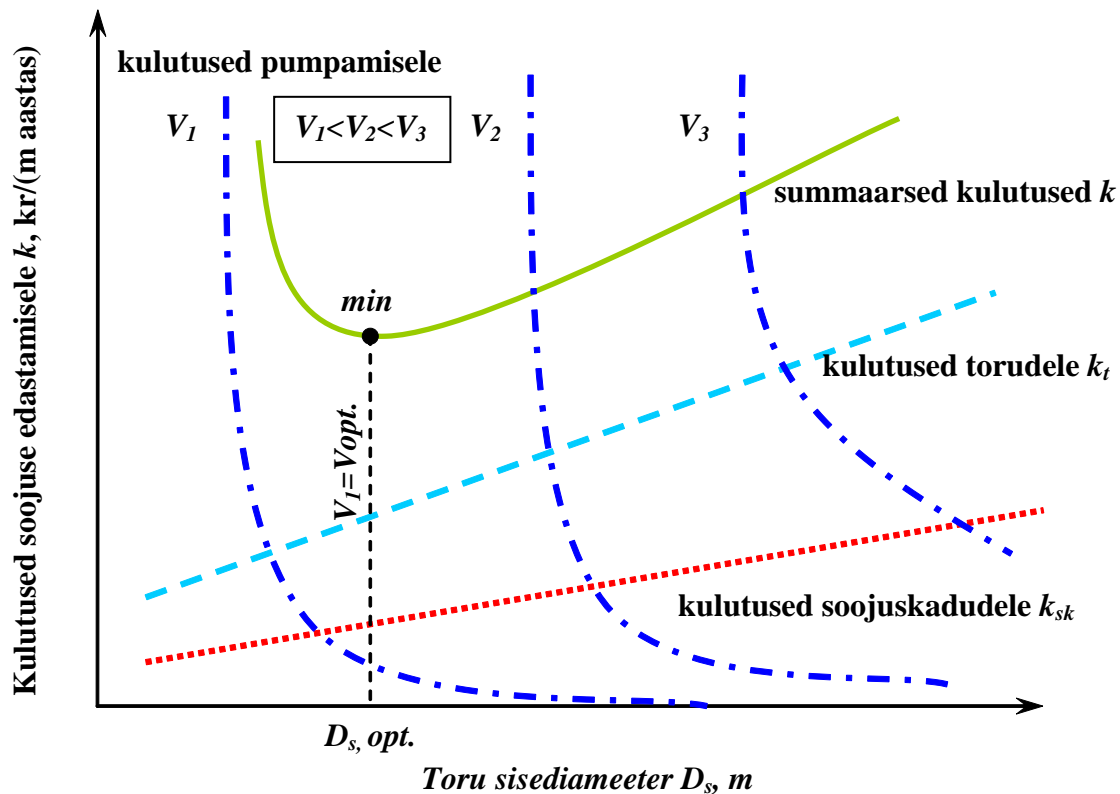
$R_{p,pin}$  - pinnase termiline takistus pealevoolutorule (mK)/W,

$R_{t,pin}$  - pinnase termiline takistus tagasivoolutorule (mK)/W,

$R_c$  - pealevoolutoru ja tagasivoolutoru soojusvahetust arvestav termiline takistus (mK)/W.

## 2.3 Kaugküttevõrgu optimeerimine

Soojuskandjat edasi kandva torustiku optimaalse diameetri leidmiseks tuleb vaadelda klassikalist optimeerimise ülesannet (sele 2.3). Soojuskandja edastamisega kaasnevad kulud koosnevad torustiku ja pumpade maksumusest ning rajamiskulutustest, kulutustest soojuskadudele ja pumpamisele kulutatava energia maksumusest. Kulutused torudele ja soojuskadudele suurenevad mõõdukalt torude sisediameetri suurendamisega, pumpamiskulud aga vähenevad sisediameetri suurendamisega kiiresti, sest kulud on võrdelised sisediameetri viienda astmega ( $K_p \sim D_s^5$ ). Selline optimeerimisülesanne lahendatakse maksimaalsele koormusele vastava konstantse kulu korral toru sisediameetrit muutes. [4]



Sele 2.3. Kaugküttevõrgu toru majanduslikult optimaalse sisediaameetri leidmine. [4]

Kindla soojuskoormuse juures sõltub sisediaameetri suurus peamiselt soojuskandja temperatuurirežiimist (ehk sellest, kui palju soojuskandja temperatuur tarbija sojussõlmes langeb). [4]

Kaugküttevõrkude magistraaltorude sisediaameetrite valikul peab alati jääma varu, arvestades soojuskoormuse võimalikku suurenemist. Seega tuleb enne kaugküttevõrgu rekonstrueerimist arvestada viimastel aastatel toimunud muutustega tarbimises (kaugküttest loobunud ning liitunud tarbijad) ja arvestada võimalike uute tarbijate liitumisega. Ühtlasi tuleb kontrollida, kas rekonstrueeritavas torustiku osas lubab võrgu hüdrauliline režiim kasutada väiksema diameetriga torusid. [4]

### **3. TEOREETILISED SOOJUSKAOD ENNE JA PÄRAST TRASSI REKONSTRUEERIMIST**

#### **3.1 Maa-aluses kanalis asuva trassi soojuskao**

Vana maa-aluses kanalis paikneva soojustrassi osade soojuskadude leidmiseks enne trassi rekonstrueerimist on vaja teada torude soojuslähikandetegureid sõltuvalt toru läbimõõdust, trassiosade pikkuseid ja soojuskandja ning välisõhu temperatuuride vahet.

Torude läbimõõdust sõltuvate soojuslähikandegurite leidmiseks on vaja määrata trassi üldine soojuslähikandegur. Üldine soojuslähikandegur on leitud trassi soojuskao järgi, mis on saadud aasta jooksul soojatootja poolt soojusvõrku väljastatud ja tarbijateni jõudnud soojushulkade vahena. Soojuskadude järgi saab hinnata kaugküttevõrgu soojusisolatsiooni tegelikku seisundit. Kasutades erinevate konstruktsioonidega torudest koosneva soojusvõrgu soojuskadude arvutamise programmi, on leitud üldise soojuslähikandeguri järgi vana võrguosa soojuslähikandegurid erinevate läbimõõtudega torude jaoks.

Antud töös on kasutatud soojatootja AS Danpower Eesti käest saadud algandmeid reaalselt võrku väljastatud ja tarbijateni jõudnud soojushulkade kohta. Soojuskadu on saadud aasta jooksul väljastatud ja tarbitud soojushulkade vahena (tabel 3.1.). Teada on ka reaalsed soojuskandja ja välisõhu temperatuurid (tabel 3.2.). Arvutused on tehtud tuginedes 2012. aasta andmetele.

Tabel 3.1. Kesklinna võrku väljastatud ja tarbitud soojusenergia hulgad 2012. aastal.

	Kesklinna võrku väljastatud soojusenergia, MWh	Kesklinna võrgus tarbitud soojusenergia hulk, MWh	Kesklinna võrgu soojuskadu, MWh
Jaanuar	10 353	8 673	1 680
Veebruar	12 065	10 533	1 532
Märts	8 063	6 916	1 147
Aprill	5 640	4 299	1 341
Mai	1 786	950	836
Juuni	1 248	608	640
Juuli	1 263	563	700
August	1 228	557	671
September	1 776	983	793
Oktoober	5 454	4 395	1 059
November	6 880	5 838	1 042
Detsember	10 724	9 350	1 374
Kokku	<b>66 480</b>	<b>53664</b>	<b>12 816</b>

Tabel 3.2. Kesklinna võrgu soojuskandja ja välisõhu temperatuurid 2012. aastal.

	Soojuskandja temperatuur pealevoolutorus $T_p$ , °C	Soojuskandja temperatuur tagasivoolutorus $T_t$ , °C	Välisõhu temperatuur $T_0$ , °C
Jaanuar	87,0	52,8	-6,3
Veebruar	91,1	56,5	-12,9
Märts	84,1	50,8	-1,6
Aprill	80,8	50,7	5,0
Mai	76,1	55,9	15,5
Juuni	73,7	55,8	17,9
Juuli	75,1	56,7	22,5
August	75,0	55,4	17,1
September	74,6	52,7	11,8
Oktoober	81,0	48,3	5,0
November	82,5	49,4	1,5
Detsember	89,2	52,6	-7,7
Keskmine	<b>80,8</b>	<b>53,1</b>	<b>5,7</b>

Kütteperioodi pikkuseks on üks aasta ehk 366 päeva ehk 8784 tundi. Valemi 2.4 järgi saab leida temperatuuriintegraali ehk kraad-tundide arvu

$$\int \theta d\tau = \left( \frac{80,8 + 53,1}{2} - 5,7 \right) \cdot 8784 = 538020 \text{ } ^\circ\text{Ch}$$

Valemi 2.1 järgi leian soojusvõrgu soojuskaoteguri

$$q_{ksj} = \frac{12816}{66480} = 0,193$$

Soojusvõrgu torude pikkus on  $L=23341$  m ning pindala  $A=21804 \text{ m}^2$ . Valemi 2.2 järgi saab arvutada võrgu üldise hinnangulise soojuslähikandeteguri

$$K_{\ddot{u}} = \frac{0,193}{\left[ \frac{(21804/23341) \cdot 538020}{(66480/23341)} \right]} \cdot 10^6 = 1,1 \frac{W}{m^2 K}$$

Jaotusteguri saab leida valemi 2.5 järgi

$$q_{jt} = \frac{(21804/23341) \cdot 538020}{(66480/23341)} = 0,176$$

Saadud üldise soojuslähikandeteguri järgi on leitud torude soojuslähikandetegurid sõltuvalt toru lähimõõdust. Teades ka rekonstrueeritavate trassiosade pikkuseid ning soojuskandja ja välisõhu temperatuure saab leida rekonstrueeritava trassiosa soojuskaot järgmise valemi järgi:

$$Q = 2 \cdot L \cdot U \cdot \int \theta \, d\tau \quad MWh \quad (3.1)$$

kus

$U$  – toru lähimõõdust sõltuv soojuslähikandetegur  $W/(mK)$

Arvutuste tulemused on toodud tabelis 3.3

Tabel 3.3. Rekonstrueeritavate osade soojuskadu.

Trassi asukoht	Toru mõõt,	Trassi pikkus m	Soojuslähikandegur U	Soojuskadu aastas
	isolatsioon		W/(mK)	MWh
Kreutzwaldi tn-Kreutzwaldi 58B	DN100/225	75	0,577	46,6
Kreutzwaldi tn-Kreutzwaldi 54	DN65/160	70	0,509	38,4
Kreutzwaldi tn-Kreutzwaldi 52	DN50/140	45	0,441	21,4
Kreutzwaldi tn-Kreutzwaldi 31	DN32/125	25	0,383	10,3
Kreutzwaldi tn-Kreutzwaldi 26	DN50/140	12	0,441	5,7
Kreutzwaldi tn-Kreutzwaldi 22	DN65/160	16	0,509	8,8
Kreutzwaldi tn-Kreutzwaldi 15	DN65/160	12	0,509	6,6
Kreutzwaldi tn-Katariina allee 11	DN65/160	12	0,509	6,6
Vilja tn - Vilja 18A	DN80/180	62	0,507	33,9
Vilja 18A - Vilja 16B	DN50/140	50	0,441	23,8
Kreutz-Vabaduse tn ristm Tamula suunas	DN150/280	220	0,738	174,9
Vabaduse tn-Kreutzwaldi 34	DN50/140	12	0,441	5,7
Vabduse tn - osaliselt Liiva 26A	DN65/160	40	0,509	21,9
Vabaduse tn -hotell Tamula	DN65/160	50	0,509	27,4
Vabaduse tn-Mäe tn magistraal	DN200/355	175	0,902	170,1
Mäe tn -Lembitu tänavale	DN100/225	70	0,577	43,5
Lembitu tn trassilt- Lembitu 5	DN50/140	30	0,441	14,3
Lembitu tn trassilt- Vabaduse 6	DN50/140	30	0,441	14,3
Kreutzwaldi tänava magistraal	DN250/400	430	1,012	468,8
Kreutzwaldi tänava magistraal	DN150/280	280	0,738	222,6
Petseri tänav alates Kreutz tn	DN150/280	250	0,738	198,8
Petseri tn alates Jüri ristmikust	DN125/250	104	0,703	78,8
	DN65/160	80	0,509	43,9
Olevi tänava soojatrass	DN200/355	240	0,902	233,2
Olevi tänava soojatrass	DN150/280	78	0,738	62,0
	DN100/225	82	0,577	51,0
	DN80/180	69	0,507	37,7
Liiva 11, Liiva 11a, alates Liiva 13	DN100/225	80	0,577	49,7
	DN65/160	20	0,509	11,0
	DN32/125	45	0,383	18,6
Liiva 12c ja Liiva 12b uus trass	DN80/180	54	0,507	29,5
	DN65/160	34	0,509	18,6
Soojakamber Kreutzwaldi 55	DN250/400	8	1,012	8,7
Seminari tn. soojatrass-Koidula 6	DN80/160	160	0,507	87,4
Petseri tn - Petseri 2/2a	DN65/160	100	0,509	54,8
Petseri tn 43b-43c-43a-43	DN65/160	135	0,509	74,0
	DN50/140	94	0,441	44,7
Jüri 11- Jüri 25	DN50/140	20	0,441	9,5
<b>Kokku</b>		<b>3369</b>		<b>2477,3</b>

## 3.2 Eelisoleeritud torudest maaaluse trassi soojuskaod

Eelisoleeritud torudest koosneva soojustrassi osade soojuskadude leidmiseks pärast rekonstrueerimist on vaja teada samasid suuruseid, mis vana trassi puhul – trassiosade pikkuseid, soojuskandja ja välisõhu temperatuuride vahet ning soojuslähikandetegureid.

Trassiosade pikkused ning soojuskandja ja välisõhu temperatuuride vahe jäävad samaks. Kuna tegu on standardsete eelisoleeritud torudega, on torude läbimõõdust sõltuvad soojuslähikandetegurid täpselt teada.

Rekonstrueeritud soojusvõrgu soojuskaod saab leida valemi 3.1 järgi. Arvutustulemused on toodud tabelis 3.4.

Tabel 3.4. Rekonstrueeritud võrguosade soojuskadu.

Trassi asukoht	Toru mõõt, isolatsioon	Trassi pikkus m	Soojuslähikandetegur U W/(mK)	Soojuskadu aastas MWh
Kreutzwaldi tn-Kreutzwaldi 58B	DN100/225	75	0,274	22,1
Kreutzwaldi tn-Kreutzwaldi 54	DN65/160	70	0,236	17,8
Kreutzwaldi tn-Kreutzwaldi 52	DN50/140	45	0,202	9,8
Kreutzwaldi tn-Kreutzwaldi 31	DN32/125	25	0,159	4,3
Kreutzwaldi tn-Kreutzwaldi 26	DN50/140	12	0,202	2,6
Kreutzwaldi tn-Kreutzwaldi 22	DN65/160	16	0,236	4,1
Kreutzwaldi tn-Kreutzwaldi 15	DN65/160	12	0,236	3,1
Kreutzwaldi tn-Katariina allee 11	DN65/160	12	0,236	3,1
Vilja tn - Vilja 18A	DN80/180	62	0,243	16,2
Vilja 18A - Vilja 16B	DN50/140	50	0,202	10,9
Kreutz-Vabaduse tn ristm Tamula suunas	DN150/280	220	0,303	71,8
Vabaduse tn-Kreutzwaldi 34	DN50/140	12	0,202	2,6
Vabduse tn - osaliselt Liiva 26A	DN65/160	40	0,236	10,2
Vabaduse tn -hotell Tamula	DN65/160	50	0,236	12,7
Vabaduse tn-Mäe tn magistraal	DN200/355	175	0,361	68,1
Mäe tn -Lembitu tänavale	DN100/225	70	0,274	20,7
Lembitu tn trassilt- Lembitu 5	DN50/140	30	0,202	6,5
Lembitu tn trassilt- Vabaduse 6	DN50/140	30	0,202	6,5
Kreutzwaldi tänava magistraal	DN250/400	430	0,348	161,2
Kreutzwaldi tänava magistraal	DN150/280	280	0,303	91,4
Petseri tänav alates Kreutz tn	DN150/280	250	0,303	81,6
Petseri tn alates Jüri ristmikust	DN125/250	104	0,329	36,9
	DN65/160	80	0,236	20,3
Olevi tänava soojatrass	DN200/355	240	0,361	93,3
Olevi tänava soojatrass	DN150/280	78	0,303	25,5
	DN100/225	82	0,274	24,2
	DN80/180	69	0,243	18,1
Liiva 11, Liiva 11a, alates Liiva 13	DN100/225	80	0,274	23,6
	DN65/160	20	0,236	5,1
	DN32/125	45	0,159	7,7
Liiva 12c ja Liiva 12b uus trass	DN80/180	54	0,243	14,1
	DN65/160	34	0,236	8,6
Soojakamber Kreutzwaldi 55	DN250/400	8	0,348	3,0
Seminari tn. soojatrass-Koidula 6	DN80/160	160	0,243	41,9
Petseri tn - Petseri 2/2a	DN65/160	100	0,236	25,4
Petseri tn 43b-43c-43a-43	DN65/160	135	0,236	34,3
	DN50/140	94	0,202	20,5
Jüri 11- Jüri 25	DN50/140	20	0,202	4,4
Kokku		<b>3369</b>		<b>1034,1</b>



### 3.3. Soojustrassi rekonstrueerimise teoreetiline kasu

Võrreldes teoreetiliselt välja arvatud soojuskadusid rekonstrueeritava vana maa-aluses betoonkanalis paikneva trassiosa puhul ja sama trassiosa puhul pärast torude vahetamist uute eelisoleeritud torude vastu, saab teada soojussäästu, mille oleks pidanud trassi rekonstrueerimine teoreetiliselt tagama.

Antud juhul on soojuskadu vana trassi puhul 2477,3 MWh aastas ning uue trassi puhul 1034,1 MWh aastas. See tähendab, et soojussäästu potentsiaal on 1443,2 MWh võrra aastas ehk soojuskaod väheneksid umbes 2,4 korda.

### 3.4 Soojustrassi rekonstrueerimise majanduslik tasuvus

Alates 2013. aasta 1. jaanuarist Võrus soojusenergia hind 55,27 €/MWh. [3] See tähendab, et soojuskadude vähenemisega 1443,2 MWh võrra oleks rahaline sääst umbes 79 765€ aastas.

Soojustrassi rekonstrueerimise orienteeruv maksumus oleks 550 € meetri kohta, seega 3369 m pikkuse trassiosa uuendamise maksumus oleks 1 852 950 €. Projekti lihttasuvusaeg oleks seega 23 aastat.

Projekti reaalse tasuvusaja kujunemisel mängivad olulist rolli ka soojuse hinna suhteline tõus aastas ning intressimäärad. Tabelis 3.5 on hinnatud projekti tasuvusaega erinevate intressimäärade ning soojusenergia hinna suhtelise tõusu protsentide juures.

Tabel 3.5. Projekti tasuvusaeg erinevate intressimäärade ja soojusenergia hinna suhtelise tõusu juures.

Soojuse hinnatõus Intressimäär	0 %	3 %	5 %
0 %	23	16	14
5 %	-	24	19
7 %	-	30	23
9 %	-	39	27

Projekti tasuvusajad on küll üsna pikad ning võrreldavad isegi umbes poole rekonstrueeritud trassi elueaga, kuid arvestades trassi vanade betoonkanalis paiknevate torude olukorda, oli nende vahetamine eelisooleeritud torude vastu möödapääsmatu ning pikemas perspektiivis väga mõttekas.

## 4. SOOJUSKAOD PÄRAST TRASSI REKONSTRUEERIMIST

AS Danpower Eestilt on saadud andmed esimese kütteperioodi kohta pärast trassiosade rekonstrueerimist. Andmed sisaldavad 2013. aasta septembrist 2014. aasta aprillini kestnud kütteperioodi jooksul võrku väljastatud ja tarbitud soojushulkasid (tabel 4.1) ning sama aja kohta välisõhu ning soojuskandja temperatuure (tabel 4.2).

Tabel 4.1. Kesklinna võrku väljastatud ja tarbitud soojusenergia hulk 2013/2014 aasta kütteperioodil.

	Kesklinna võrku väljastatud soojusenergia, MWh	Kesklinna võrgus tarbitud soojusenergia hulk, MWh	Kesklinna võrgu soojuskadu, MWh
September	1940	1217	723
Oktoober	5350	4339	1011
November	6411	5278	1133
Detsember	8072	6646	1426
Jaanuar	11561	9798	1763
Veebruar	8033	6813	1220
Märts	6923	5547	1376
Aprill	4747	3738	1009
<b>Kokku</b>	<b>53037</b>	<b>43376</b>	<b>9661</b>

Tabel 4.2. Kesklinna võrgu soojuskandja ja välisõhu temperatuurid 2013/2014 aasta kütteperioodil.

	Soojuskandja temperatuur pealevoolutorus $T_p$ , °C	Soojuskandja temperatuur tagasivoolutorus $T_t$ , °C	Välisõhu temperatuur $T_0$ , °C
September	74,5	55,8	10,1
Oktoober	75,3	48,5	5,9
November	77,6	47,9	2,5
Detsember	81,7	49,9	0,1
Jaanuar	89,0	54,3	-9,7
Veebruar	82,5	50,2	-1,4
Märts	80,8	49,4	1,2
Aprill	79,3	49,8	5,4
<b>Keskmine</b>	<b>80,1</b>	<b>50,7</b>	<b>1,8</b>

Kütteperioodi pikkuseks on 8 kuud ehk 242 päeva ehk 5808 tundi. Valemi 2.4 järgi saab leida temperatuuriintegraali ehk kraad-tundide arvu

$$\int \theta d\tau = \left( \frac{80,1 + 50,7}{2} - 1,8 \right) \cdot 5808 = 369389 \text{ } ^\circ\text{Ch}$$

Valemi 2.1 järgi leian soojusvõrgu soojuskaoteguri

$$q_{ksj} = \frac{9661}{53037} = 0,182$$

Soojusvõrgu torude pikkus on  $L=23341$  m ning pindala  $A=21804 \text{ m}^2$  (rekonstrueerimise käigus torude läbimõõtu ei muudetud). Valemi 2.2 järgi saab arvutada võrgu üldise hinnangulise soojuslähikandeteguri

$$K_{\ddot{u}} = \frac{0,182}{\left[ \frac{(21804/23341) \cdot 369389}{(53037/23341)} \right]} \cdot 10^6 = 1,19 \frac{W}{m^2K}$$

Jaotusteguri leian valemi 2.5 järgi

$$q_{jt} = \frac{(21804/23341) \cdot 369389}{(53037/23341)} = 0,152$$

## 5. TEGELIKE JA TEOREETILISELT VÄLJA ARVUTATUD TULEMUSTE VÕRDUS

Selleks, et vaadelda trassi rekonstrueerimise efektiivsust, võrdleme saadud tulemusi 2012/2013 aasta sama pika kütteperioodiga (september kuni aprill).

Arvutuste jaoks on välja toodud vaadeldava kütteperioodi jooksul võrku väljastatud ja tarbitud energia (tabel 5.1) ning soojuskandja ja välisõhu keskmised temperatuurid (tabel 5.2).

Tabel 5.1 Kesklinna võrku väljastatud ja tarbitud soojusenergia hulk 2012/2013 aasta kütteperioodil.

	Kesklinna võrku väljastatud soojusenergia, MWh	Kesklinna võrgus tarbitud soojusenergia hulk, MWh	Kesklinna võrgu soojuskadu, MWh
September	1776	983	793
Oktoober	5454	4395	1059
November	6880	5838	1042
Detsember	10724	9350	1374
Jaanuar	11561	9929	1632
Veebruar	8456	7326	1230
Märts	10371	8671	1700
Aprill	5673	4634	1039
<b>Kokku</b>	<b>60895</b>	<b>51126</b>	<b>9769</b>

Tabel 5.2 Kesklinna võrgu soojuskandja ja välisõhu temperatuurid 2012/2013 aasta kütteperioodil.

	Soojuskandja temperatuur pealevoolutorus $T_p$ , °C	Soojuskandja temperatuur tagasivoolutorus $T_t$ , °C	Välisõhu temperatuur $T_0$ , °C
September	74,6	52,7	12,8
Oktoober	81,0	48,3	6,4
November	82,5	49,4	2,9
Detsember	89,2	52,6	-6,3
Jaanuar	86,8	51,2	-7,3
Veebruar	80,8	50,6	-3,3
Märts	90,4	55,3	-7,3
Aprill	83,7	51,8	4,3
<b>Keskmine</b>	<b>83,6</b>	<b>51,5</b>	<b>0,3</b>

Kütteperioodi pikkuseks on võetud samuti 8 kuud ehk 5808 tundi. Valemi 2.4 järgi saab leida temperatuuriintegraali ehk kraad-tundide arvu

$$\int \theta d\tau = \left( \frac{83,6 + 51,5}{2} - 0,3 \right) \cdot 5808 = 390762 \text{ } ^\circ\text{Ch}$$

Valemi 2.1 järgi leian soojusvõrgu soojuskaoteguri

$$q_{ksj} = \frac{9769}{60895} = 0,160$$

Soojusvõrgu torude pikkus on  $L=23341$  m ning pindala  $A=21804 \text{ m}^2$ . Valemi 2.2 järgi saab arvutada võrgu üldise hinnangulise soojuslähikandeteguri

$$K_{\ddot{u}} = \frac{0,160}{\left[ \frac{(21804/23341) \cdot 390762}{(60895/23341)} \right]} \cdot 10^6 = 1,14 \frac{W}{m^2K}$$

Jaotusteguri leian valemi 2.5 järgi

$$q_{jt} = \frac{(21804/23341) \cdot 390762}{(60895/23341)} = 0,140$$

Kütteperioode iseloomustavate näitajate võrdlus on toodud tabelis 5.3.

Tabel 5.3. 2012/2013 ja 2013/2014 aastate kütteperioodide võrdlus.

	2012/2013	2013/2014
Võrku väljastatud soojusenergia, MWh	60895	53037
Tarbitud soojusenergia, MWh	51126	43376
Soojuskadu, MWh	9769	9661
Soojuskadu, %	16,0	18,2
Soojuskandja temperatuur pealevoolutorus, °C	83,6	80,1
Soojuskandja temperatuur tagasivoolutorus, °C	51,5	50,7
Välisõhu temperatuur, °C	0,3	1,8
Temperatuuriintegraal, °Ch	390762	369389
Üldine soojuslähikandegur, $\frac{W}{m^2K}$	1,14	1,19

Tulemusi analüüsid on näha, et soojuslühikandegur praktiliselt ei muutunud. Tegelikult on tõenäoline, et soovitud muutus toimus, kuid oodatud soojussääst jäi soojusmõõtjate mõõtevea piiridesse ning seda ei suudetud registreerida.

Soojusmõõtjate lubatud vead on kindlaks määratud Euroopa mõõtestandardiga EN 1434. Võrus on peamiselt kasutusel Kamstrup Multical 602 soojusmõõtjad ultraheli kuluanduritega. Uute ultraheliandurite mõõtetäpsus on  $\pm 2\%$ , koos temperatuurianduritega on koguviga  $\pm 5\%$ . Vanade andurite puhul on koguviga 8%.

Oodatud soojussääst oli 1443 MWh. 2013/2014 aasta kütteperioodil mõõdetud soojustoodang oli 53 037 MWh. Kui arvestada seda, et soojusmõõtjate veaprotsent on keskmiselt  $\pm 5\%$ , tähendab see, et vea suurus võib olla umbes  $\pm 2600$  MWh. Järelikult ei ole võimalik täpselt muutust registreerida, sest oodatud sääst jääb mõõtevea piiridesse.

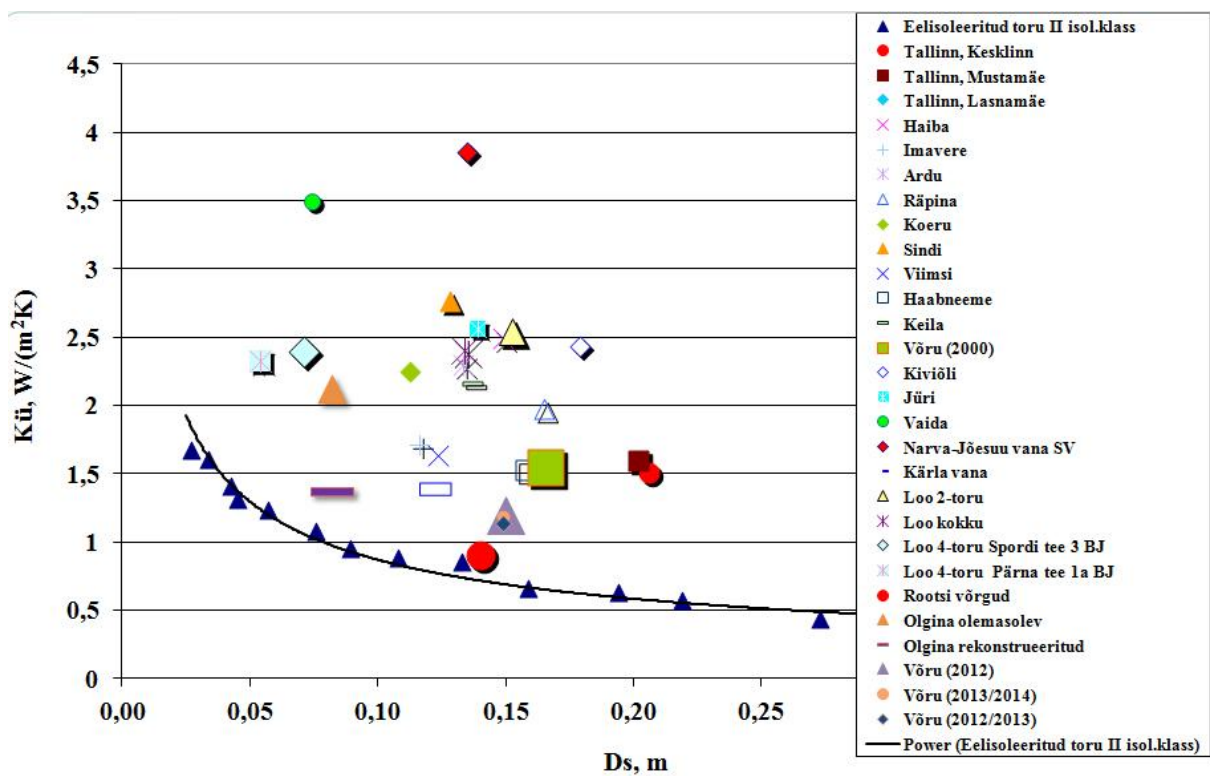
Soojuskaod oleks täpsemalt teada saanud, kui soojusmõõtjate kasutamise asemel oleks leitud kuuma veega täidetud lõigu jahtumisaeg nagu Tallinnas Laagna trassi puhul. Uuritav lõik täideti enne ja pärast rekonstrueerimist kuuma veega, tagati töörežiimile vastav soojuskandja kulu ning registreeriti soojuskandja temperatuuri langust ja ka väliskeskkonna temperatuuri muutust. Tulemuste võrdlemisel sai soojuskadude muutumise täpsemalt välja arvutada. Arvutuste tulemusel leiti, et soojuskaod vähenesid 4,8 korda. Nii suure soojuskadude vähenemise tagas ka see, et eelisoleeritud torude asemel kasutati vahtpolüuretaankoorikuid, mistõttu isolatsioonikiht oli paksem kui eelisoleeritud torudel. Võrus poleks ilmselt võimalust sellist eksperimenti läbi viia.

Kui võrrelda Võru Kesklinna küttevõrgu rekonstrueeritud torustiku osa kogu võrguga, siis on näha, et rekonstrueeritud osa on tegelikult suhteliselt väike (moodustab trassi pikkusest 14,4% ning soojusvahetuspinna 12,7%). Kui rekonstrueerida veel vähemalt sama suur osa trassist, oleks tulemuste ilmnemine tõenäolisem.

Ka võrreldud kütteperioodid on tegelikult üsnagi erinevad – viimasel kütteperioodil oli talv väga soe ning kütteperioodi keskmine temperatuur seega tunduvalt kõrgem. Seetõttu oli ka toodetud soojusenergia hulk väiksem ning võrgu koormus madalam. Erinevate temperatuuride ja koormuste juures on ka soojusmõõtjate mõõtevead erinevad. Pinnas võis olla ka niiskem,

mistõttu soojuslähikandegur oli suurem. Täpsemate tulemuste saamiseks tuleks vaadelda pikemat aega kui üks kütteperiood.

Võrreldes paljude teiste kaugküttevõrkudega on aga Võrus erinevatel aegadel teostatud trassi rekonstrueerimistega saavutatud suhteliselt madal üldine soojuslähikandegur (sele 5.1). Samas on ka veel üsna palju halvas olukorras trassiosasid, mille rekonstrueerimine tagaks väiksema soojuslähikandeguri ning seega ka suurema soojussäästu.



Sele 5.1. Erinevate kaugküttevõrkude soojuslähikandegurid.



## KOKKUVÕTE

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli hinnata Võru linna soojusvõrgu osalise rekonstrueerimise efektiivsust. Selleks arvutasin välja teoreetilise soojussäästu, mis oleks pidanud vanade torude väljavahetamisega kaasnema, ning võrdlesin omavahel kahte viimast kütteperioodi iseloomustavaid näitajaid, et hinnata rekonstrueerimise efektiivsust.

Teoreetiliselt välja arvatud soojuskadu vana trassi puhul on 2477,3 MWh aastas ning uue trassi puhul 1034,1 MWh aastas. Võimalik soojussääst peaks seega olema on 1443,2 MWh aastas ehk soojuskadud väheneksid umbes 2,4 korda. Alates 2013. aastast kehtiva soojusenergia hinna 55,27 €/MWh korral tähendaks see, et rahaline sääst oleks umbes 79 765€ aastas. 3369 m pikkuse trassiosa uuendamise orienteeruv maksumus on 1 852 950 €. Projekti lihttasuvusaeg oleks seega 23 aastat, mis on küll pikk aeg ning võrreldav isegi uue trassi poole elueaga, kuid arvestades torude varasemat olukorda oli rekonstrueerimine mõödapääsmatu.

Kaugküttevõrgu rekonstrueerimise efektiivsuse hindamiseks leidsin üldised soojuslähikandetegurid enne rekonstrueerimist 2012/2013 aasta kütteperioodil ning pärast trassi uuendamist 2013/2014 aasta kütteperioodil. Tulemused olid mõnevõrra üllatavad, sest oodatud soojuslähikandeteguri vähenemist ei ilmnenu (2012/2013 aastal oli vastav näitaja  $1,14 \frac{W}{m^2K}$  ning 2013/2014 aastal  $1,19 \frac{W}{m^2K}$ ).

Tegelikult ilmselt soovitud muudatus toimus, kuid eeldatud soojussääst jäi soojusmõõtjate mõõtevea piiridesse ning seetõttu ei suudetud seda registreerida. Kuna rekonstrueeritud trassiosa on üsna väike (moodustab trassi pikkusest 14,4% ning soojusvahetuspinna 12,7%), siis tuleks uuendada vähemalt sama suur osa trassist, et soojussääst oleks suurem kui mõõtevead ning soojusmõõtjad saaksid selle registreerida.

Tulemust mõjutab ka võrreldud aastate suur erinevus. 2013/2014 aasta kütteperioodil oli väga soe talv, mistõttu oli ka kütteperioodi keskmine temperatuur tunduvalt kõrgem ja toodetud soojusenergia hulk väiksem ning võrgu koormus madalam. Samuti võis tulemust mõjutada ka erinev pinnase niiskus. Täpsemate tulemuste saamiseks tuleks vaadelda rekonstrueeritud trassi pikema perioodi vältel kui üks kütteperiood.

## SUMMARY

The aim of this bachelor thesis is to evaluate the efficiency of reconstructing parts of the district heating network in Võru. For that the theoretical amount of saved heat was calculated. After getting data from the local heat provider in Võru last two heating periods were compared to each other to see the results of reconstruction.

The theoretical heat loss before reconstruction is 2477,3 MWh in a year and after replacing some of the old pipes for preinsulated pipes it is 1034,1 MWh. It means that the amount of saved heat is 1443,2 MWh (2,4 times less). From the beginning of 2013 the heating costs in Võru are 55,27 €/MWh which means that 79 765€ could be saved every year. The cost of this reconstruction is approximately 1 852 950 €. The payback time of this project is quite long (23 years) but considering the condition of old pipes this reconstruction was definitely necessary.

To evaluate the efficiency of reconstruction the heat transfer coefficients before and after the reconstruction were calculated. In the heating period of 2012/2013 the coefficient was  $1,14 \frac{W}{m^2K}$  and in 2013/2014 it was  $1,19 \frac{W}{m^2K}$ . The results were quite surprising because they were different from the expected outcome - the heat transfer coefficient stayed practically the same.

In reality it is quite certain that the expected change occurred but the amount of saved heat was not registered by the heat meters due to their inaccuracies. Since the reconstructed part was quite small at least the same amount of pipes should be replaced to register the change accurately.

Another reason for the unexpected outcome is that the two heating periods that were compared to each other were quite different. In the last heating period the average temperature was much higher due to warm winter and less heat was produced. Different humidity of ground could also affect the heat transfer coefficient. To get more accurate results the district heating network should be observed over a longer period of time.

## KASUTATUD KIRJANDUS

1. Eesti Entsüklopeedia [WWW] <http://entsyklopeedia.ee/artikkel/v%C3%B5ru1> (15.04.2014)
2. Võru linna kodulehekülg [WWW] <http://www.voru.ee/index.php> (15.04.2014)
3. AS Danpower Eesti kodulehekülg [WWW] <http://www.danpower.ee/> (15.04.2014)
4. Hlebnikov, A. (2013). Võru kaugküttevõrgu trassilõikude soojuskadude vähenemise potentsiaali hinnang.
5. Kask, Ü., Tehver, J., Hlebnikov, A., Kask, L. (2007-2008). Võru linna soojusmajanduse arengukava aastani 2020.
6. Hlebnikov, A. Soojusvarustussüsteemide konspekt.
7. Frederiksen, S., Werner, S. (2012). District Heating and Cooling.
8. Kamstrup A/S kodulehekülg [WWW] <http://kamstrup.com/> (23.05.2014)