



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND

Energiatehnoloogia instituut

BALTICCONNECTORI JÄÄKSOOJUSE UTILISEERIMISE  
VÕIMALUSED PALDISKI NING PUIATU  
KOMPRESSORJAAMA NÄITEL

BALTICCONNECTOR PROJECT'S WASTE HEAT UTILISATION POSSIBILITIES  
BASED ON PALDISKI AND PUIATU COMPRESSOR STATIONS

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Allar Ostrak

Üliõpilaskood: 163510MASM

Juhendaja: Eduard Latõsov

Tallinn 2019

## AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” ..... 2019

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“.....” ..... 2019

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....” .....2019

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## Energiatehnoloogia instituut

### LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Allar Ostrak, 163510

**Õppekava, peeriala:** MASM02/15, Energiatehnoloogia ja soojusenergeetika

**Juhendaja(d):** Eduard Latõšov, dotsent, 620 3908

#### Lõputöö teema:

Balticconnectori jääsoojuse utiliseerimise võimalused Paldiski ning Puiatu kompressorjaama näitel.

Balticconnector Project's Waste Heat Utilisation Possibilities based on Paldiski and Puiatu Compressor Stations

#### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Balticconnector'i projekti mõju analüüsimine Eesti gaasisüsteemile
2. Paldiski ning Puiatu kompressorjaamades tekkiva jääsoojuse hindamine
3. Jääsoojuse utiliseerimise võimalused, erinevate alternatiivide väljatöötamine ning tasuvuse hindamine

#### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Lõputöö kinnitamine, vormistusnõuetega tutvumine, algandmete päring firma Elering AS esindajalt	Veebruar 2019
2.	Teoreetilise osa kirjutamine	Märts-aprill 2019
3.	Arvutuste teostamine	Mai 2019
4.	Sissejuhatuse ning kokkuvõtte kirjutamine. Töö lõplik vormistamine ning esitamine	Mai 2019

**Töö keel:** eesti keel

**Lõputöö esitamise tähtaeg:** "....." .....2019. a

**Üliõpilane:** Allar Ostrak

..... "....." .....2019. a

/allkiri/

**Juhendaja:** Eduard Latõšov

..... "....." .....2019. a

/allkiri

*Kinnise kaitsmise ja/või avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel*

# SISUKORD

SISUKORD .....	4
JOONISTE LOETELU.....	6
TABELITE LOETELU .....	7
EESSÕNA.....	8
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU .....	9
1. SISSEJUHATUS .....	10
2. ÜLEVAADE EESTI MAAGAASISÜSTEEMIST JA ÜLEKANDEVÕRGUST .....	12
2.1. Eesti maagaasisüsteem .....	12
2.2. Eesti maagaasi ülekandevõrk ning selle parameetrid.....	12
2.3. Eesti gaasimõõtejaamad .....	13
3. BALTICCONNECTORI PROJEKTI TÄHTSUS EESTI GAASISÜSTEEMILE NING TEHNILISED PARAMEETRID .....	15
3.1. Balticconnectori projekti maht.....	15
3.2. Torustiku ning gaasimõõtejaamade tehnilised parameetrid .....	15
3.3. Kompessorjaama ning seadmete tööpõhimõte .....	16
3.4. Kompessorjaamade tehnilised parameetrid .....	17
4. TINGIMUSED NING PARAMEETRID KOMPRESSORJAAMADE KÄITAMISGRAAFIKU MÄÄRAMISEKS .....	18
5. PALDISKI NING PUIATU KOMPRESSORJAAMADE KÄITUSEL TEKKIV JÄÄKSOOJUS.....	23
5.1. Kompressorseadme käitamisgraafiku prognoos.....	23
5.1.1. Suvine tarbimine .....	23
5.1.2. Keskmine talvine tarbimine.....	24
5.1.3. Talvine tiputarbimine .....	24
5.2. Tekkiv jääksoojus ning selle utiliseerimise võimalused .....	25
6. KOMPRESSORIST VÄLJUVA GAASI JAHUTAMISEL TEKKIV JÄÄKSOOJUS .....	26

6.1.	Gaasi jahutamisel tekkiva jääsoojuse arvutamine .....	26
7.	TEHNILIS-MAJANDUSLIK ANALÜÜS KOMPRESSORJAAMAS TEKKIVA JÄÄKSOOJUSE UTILISEERIMISEL.....	31
7.1.	Realse olukorra hindamine.....	31
7.2.	Alternatiiv 1. Õhk-soojusvaheti asendamine vesi-soojusvahetiga ning soojuspumbaga temperatuuri tõstmine.....	32
7.2.1.	Tekkiv soojushulk .....	32
7.2.2.	Soojusvaheti valik.....	33
7.2.3.	Soojuspumba parameetrid ning valiku alused .....	34
7.2.4.	Soojuspumba käitamisele kuluv elektrienergia ning selle maksumus sõltuvalt tarbijahinnaindeksist.....	34
7.2.5.	Kaugküttevõrgule üle antav koguvõimsus ning energia .....	37
7.2.6.	Rajatava torustiku potentsiaalne asendiplaan ning paigaldusmeetod Paldiski kaugküttevõrguga ühendamisel.....	37
7.2.7.	Rajatava torustiku hüdraulika arvutused .....	40
7.2.8.	Piirhinna arvutused jääsoojuse müümisel Paldiski kaugküttevõrku .....	43
7.2.9.	Alternatiiv 1 rakendamine Puiatu kompressorjaama jääsoojuse utiliseerimisel ...	45
7.2.10.	Alternatiiv 1 tasuvuse hinnang.....	46
7.3.	Alternatiiv 2. Jääsoojusest elektri tootmine.....	47
	KOKKUVÕTE .....	49
	SUMMARY .....	52
	KASUTATUD KIRJANDUS.....	55
	LISAD .....	58
	Lisa 1 – Hüdrauliliste arvutuste simulatsioon (keskmine talvine tarbimine, Soome -> Eesti) ....	58
	Lisa 2 – Hüdrauliliste arvutuste simulatsioon (suvine tarbimine, Soome -> Eesti) .....	59
	Lisa 3 – Hüdrauliliste arvutuste simulatsioon (keskmine talvine tarbimine, Eesti -> Soome) .....	60

## JOONISTE LOETELU

Joonis 1.1 - Eesti maagaasi ülekandevõrk.....	12
Joonis 3.1 – Eesti aastase gaasitarbimise statistika ning prognoos järgnevas kümneks aastaks...	19
Joonis 3.2 - Maagaasi tarbimine Balti regioonis aastatel 2013-2018.....	20
Joonis 3.3 - Eesti keskmine välisõhu temperatuur aastatel 2010-2018.....	20
Joonis 3.4 - Tüüpilised gaasivood Eesti ülekandesüsteemis .....	21
Joonis 5.1 - Gaasi jahutamiseks kasutatav õhk-soojusvaheti.....	26
Joonis 6.1 - Jääksoojuse ülekandmise skeem kaugküttevõrgule Alternatiiv 1 rakendamisel.....	32
Joonis 6.2 - Gaasi jahutamisest tekkiva jääksoojuse kogus sõltuvalt jahutustemperatuurist .....	33
Joonis 6.3 - Soojuspumba küttevõimsus sõltuvalt gaasi jahutustemperatuurist.....	36
Joonis 6.4 - Soojuspumba aastane kulu elektrienergiale sõltuvalt gaasi .....	36
Joonis 6.5 - Trasseeringulahendus ühendamaks olemasolevat Paldiski katlamaja ning rajatavat Paldiski kompressorjaama.....	38
Joonis 6.6 - Paldiski kompressorjaama jääksoojuse aastane müügitulu.....	43
Joonis 6.7 - Jääksoojuse piirhind Paldiski kaugküttevõrku sõltuvalt jääksoojuse kogusest.....	44
Joonis 6.8 - Puiatu kompressorjaama üldplaneering .....	45
Joonis 6.9 - Jääksoojusest ORC-tehnoloogiaga elektritootmise töösükkel.....	47

## TABELITE LOETELU

Tabel 1.1 - Eesti maagaasi ülekandevõrku kirjeldavad parameetrid .....	13
Tabel 1.2 - Eesti gaasiülekandevõrgu sisendpunktide läbilaskevõime .....	14
Tabel 2.1 - Balticconnector torustiku tehnilised parameetrid .....	16
Tabel 2.2 - Gaasimõõtejaamade tehnilised parameetrid.....	16
Tabel 2.3 - Paldiski kompressorjaama tehnilised näitajad .....	17
Tabel 2.4 - Puiatu kompressorjaama tehnilised näitajad.....	17
Tabel 3.1 - Balticconnector süsteemi simulatsioonide tulemused .....	22
Tabel 4.1 - Puiatu ning Paldiski kompressorseadmete võimsused, .....	23
Tabel 4.2 - Puiatu ja Paldiski kompressorseadmete võimsused, .....	24
Tabel 4.3 – Puiatu ning Paldiski kompressorseadmete võimsused, .....	25
Tabel 4.4 - Aastane tarbimismaht Paldiski ning Puiatu.....	25
Tabel 4.5 - Paldiski ning Puiatu kompressorseadme käitamisest tekkiv jääksoojus .....	25
Tabel 5.1 - Paldiski kompressorjaamas gaasi jahutamisest tekkiv jääksoojus .....	29
Tabel 5.2 - Puiatu kompressorjaamas gaasi jahutamisest tekkiv jääksoojus.....	30
Tabel 6.1 - Erinevate tootjate soojuspumpade nimivõimsused, efektiivsusnäitajad, külmutusagensid, soojuskandjad ning väljastatavad temperatuurid .....	34
Tabel 6.2 - Elektrihiinda mõjutavad komponendid ning nende ühikväärtused .....	35
Tabel 6.3 - Kaugküttevõrgule üle antud koguvõimsus ning energia .....	37
Tabel 6.4 - Erinevate kohttakistustüüpide takistustegurid .....	42
Tabel 6.5 - Jääksoojuse piirhinna sõltuvus tarbija kaugusest (€/MWh).....	46

## EESSÕNA

Käesoleva magistriõppe lõputöö teema saavutati suheldes töö juhendaja, Eduard Latõšoviga. Peamiseks ajendiks oli Balticconnector'i projekti mahu unikaalsus Eesti gaasisüsteemi mastaabis. Lõputöös uuritakse Balticconnector'i jääsoojuse utiliseerimise võimalusi Paldiski ning Puiatu kompressorjaamade näitel. Sealhulgas pakkuda välja võimalikke alternatiive jääsoojuse utiliseerimiseks ning tasuvushinnangute andmiseks.

Materjalide kogumisel ja lõputöö koostamisel oli lisaks juhendajale Eduard Latõšovile suureks abiks ettevõtte Elering AS gaasisüsteemide spetsialist Kristo Lillepõld. Töö autor soovib tänada kõiki informatsiooni jaganud ning koostamisel abiks olnud isikuid.



## LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

GMJ – gaasimõõtejaam

GJJ – gaasijaotusjaam

COP – soojuspumba efektiivsuse näitaja

ORC – orgaaniline Rankine'i tsükkel

# 1. SISSEJUHATUS

Antud magistritöö eesmärgiks oli hinnata Balticconnectori projekti raames Eestisse rajatavate Paldiski ning Puiatu kompressorjaamade jääsoojuse utiliseerimise võimalusi. Sealhulgas hinnata reaalselt olukorda ning analüüsida ka võimalike alternatiivide tasuvust. Kuna Balticconnectori projekt on Eesti mastaabis äärmiselt suur, siis on jääsoojuse utiliseerimise võimaluste uurimine antud juhul vajalik ning huvitav. Jääsoojuse utiliseerimise suurimaks põhjuseks on just energiasektori üldine efektiivsuse tõstmine ning globaalse jalajälje vähendamine.

Töö on tinglikult jagatud kolmeks osaks. Esimeses osas tutvustatakse Eesti gaasisüsteemi ning Balticconnectori projekti tähtsust Eestile. Tutvutakse praeguste kitsaskohtadega Eesti gaasisüsteemis ning lähiajal teostavate rekonstrueerimistöödega. Sealhulgas tutvutakse kompressorjaamade tehniliste parameetritega, mis on jääsoojuse hindamisel vajalikud. Teises osas tehakse kompressorjaamade käitamisgraafiku prognoosid, tuginedes maagaasi tarbimisprognoosidele nii Eestis kui lähiriikides, sesoonsele tarbimisele aasta lõikes ning välisõhu temperatuurile. Lisaks arvestatakse süsteemi üldiste käitamisparameetritega, milleks on gaasi voolusuund ning Kiili gaasirõhureguleerjaama kasutus, mis määrab, kas maagaasi tarnitakse Ida-Eestile Väandra gaasimöödujaama kaudu Venemaalt või uue torustiku kaudu vastavalt siis Soomest või Lätist. Kolmandas osas tehakse tehnilis-majanduslikud analüüsid vastavalt reaalsele olukorrale ning töö koostaja poolt välja pakutud alternatiivsetele lahendustele.

Jääsoojuse koguse hindamisel on eraldi arvestatud nii kompressorseadmete käitamisel tekkiva soojuse kui kompressorist väljuva gaasi jahutamisel tekkiva jääsoojusega. Esimesel juhul on määravaks faktoriks kompressorseadmete käitamiseks kasutatav energia. Gaasi jahutamisel tekkiva jääsoojuse puhul on määravaks faktoriks aga jahutist väljuva gaasi temperatuur.

Paldiski ning Puiatu kompressorjaamade puhul tehakse esmased jääsoojuse utiliseerimise tehnilis-majanduslikud analüüsid ning hinnangud vastavalt reaalsele olukorrale. Lisaks on töö koostaja omalt poolt välja pakkunud ka võimalikke alternatiive jääsoojuse efektiivsemaks utiliseerimiseks, süsteemi üldise kasuteguri tõstmiseks ning raha teenimiseks. Väljapakutud alternatiivide puhul on uuritud erinevate tehnoloogiate kasutust jääsoojuse talletusel ning muudetud ka kasutatavaid väljundparameetreid jahutist väljuva gaasi temperatuuri näol.

Viimaks on töö koostaja teinud tasuvusanalüüsid jääsoojuse kasutamisel omatarbeks ning müümisel kaugküttevõrku või tööstustarbijatele. Sealhulgas on arvestatud nii trassi rajamiskuludega kompressorjaamast tarbijani, ehituslike piirangute ning kujadega pakutud trassi lahendusel ning teostatud on ka trassi hüdraulika arvutused. Saadud tulemuste põhjal on antud jääsoojuse utiliseerimise tasuvushinnang nii Paldiski kui Puiatu kompressorjaama puhul.

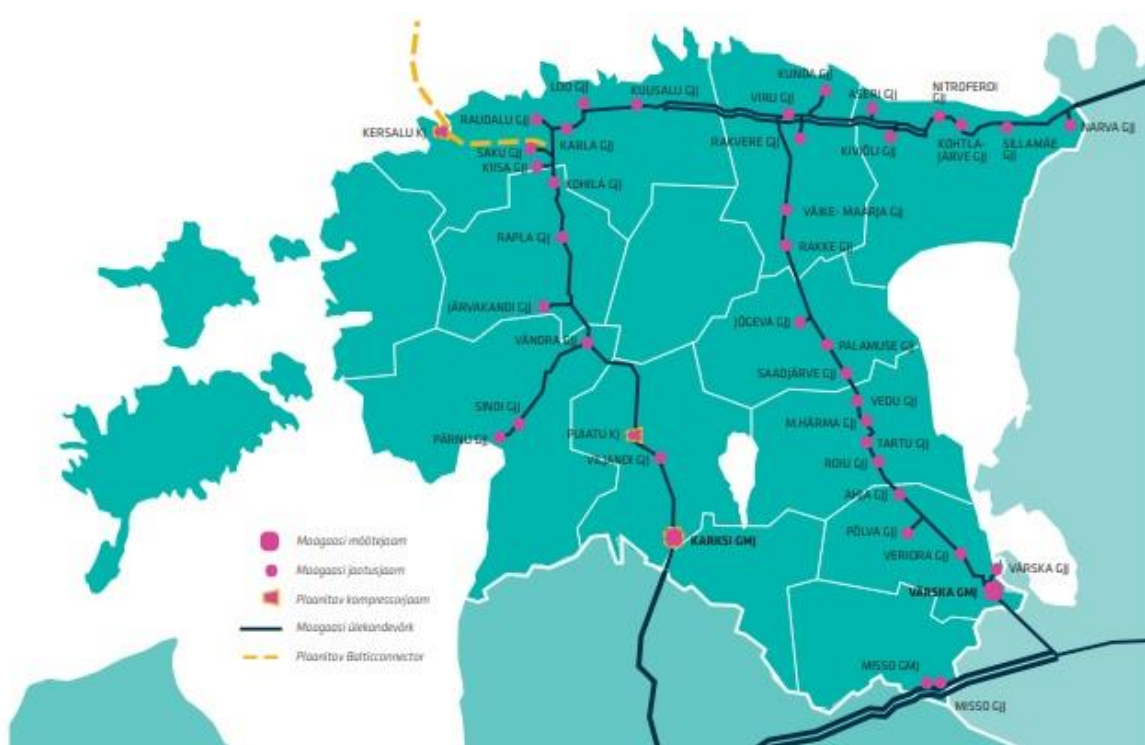
## 2. ÜLEVAADE EESTI MAAGAASISÜSTEEMIST JA ÜLEKANDEVÕRGUST

### 2.1. Eesti maagaasisüsteem

Eesti gaasisüsteem on osa regionaalsest gaasisüsteemist ja gaasiturust. Seetõttu tuleb maagaasi ülekandevõrgu arendamisel arvestada naaberriikide ja lähiregiooni ülekandevõrkudega. Eestis gaasitootmist ei toimu ning 2019. aasta alguse seisuga on Eesti maagaasivõrk veel Lääne-Euroopa gaasiturust isoleeritud, mistõttu imporditakse kogu tarbitav gaas tänasel päeval kas Venemaalt, Lätist Inčukalnsi maagaasihoidlast või Leedust Klaipeda LNG terminalist [1].

### 2.2. Eesti maagaasi ülekandevõrk ning selle parameetrid

Eesti maagaasi ülekandevõrk koosneb 885 km gaasitorustikust, 2 gaasimõõtejaamast, kus toimub ülekandevõrku siseneva gaasi koguste mõõtmine ja gaasi kvaliteedi määramine ning 36 gaasijaotusjaamast, kus toimub ülekandevõrgust väljuva gaasi rõhu redutseerimine, koguste mõõtmine, lõhnastamine ja kokkulepitud tarbimisrežiimi tagamine. Kogu süsteem on visuaalselt kujutatud ka allpool oleval joonisel (vt. Joonis 2.1) [2].



Joonis 2.1 - Eesti maagaasi ülekandevõrk

Lisaks on Eesti ülekandevõrk transiitkoridoriks gaasi liikumisel Venemaa ja Läti vahel. Seoses ülekandevõrkude tugeva integreeritusega on avarii korral oht mõjutada terve regiooni gaasisüsteemi. Ülekandevõrgu täpsemad parameetrid on toodud välja järgnevas tabelis (vt. Tabel 2.1) [1].

Tabel 2.1 - Eesti maagaasi ülekandevõrku kirjeldavad parameetrid

Torustik	Pikkus (km)	Toru nimiläbimõõt (DN)	Maksimaalne lubatud töö rõhk (bar <sub>g</sub> )	Vanus (aastat)
Vireši - Tallinn	202,4	700	49,6	27
Vändra - Tallinn	50,2	250	54	13
Tallinn - Kohtla-Järve I	97,5	200	≤ 30	66
Tallinn - Kohtla-Järve II	149,1	500	≤ 30	51
Kohtla-Järve - Narva	45,1	350/400	≤ 30	59
Irboska – Värskas GMJ	10,1	500	53,7	44
Värskas GMJ - Tartu	75,6	500	45,9	42
Tartu - Rakvere	133,2	500	45,2	40
Irboska – Inčukalns	21,3	700	49,2	35
Pihkva - Riia	21,3	700	51,4	47
Harutorustikud	79,2			
<b>Kokku</b>	<b>885,0</b>			

NB! Balticconnector ehitusest sõltuvalt on 2018. aastal tehtud olemasolevatele torustikele sisediagnostika. Diagnostika eesmärgiks on kontrollida torustike tegelikke lubatud rõhke antud lõigus. Kuna Balticconnector projekti raames peavad torustikud töötama rõhul 54 bar<sub>g</sub>, siis on mitmed lõigud tarvis välja vahetada [1].

### 2.3. Eesti gaasimõõtejaamad

Tabel 2.2 annab ülevaate Eesti gaasiülekandevõrgu sisendpunktide läbilaskevõimest erinevatel rõhutingimustel. Gazpromilt saadud informatsiooni kohaselt ei ole alates 2019. aastast Narva ühendus kasutatav Gazpromi poolt teostatava renoveerimise tõttu [1].

Tabel 2.2 - Eesti gaasiülekandevõrgu sisendpunktide läbilaskevõime <sup>1</sup>

	Tehniline läbilaskevõime (mln m <sup>3</sup> /päevas / GWh/päevas). Gaasi rõhk ühenduspunktis: Karksi GMJ – 40-42 bar Värskas GMJ – 40-42 bar Narva 28-30 bar	Läbilaskevõime tavatingimustel (mln m <sup>3</sup> /päevas / GWh/päevas). Gaasi rõhk ühenduspunktis: Karksi GMJ – 34-36 bar Värskas GMJ – 34-36 bar Narva 22-24 bar	Minimaalne läbilaskevõime (mln m <sup>3</sup> /päevas / GWh/päevas). Gaasi rõhk ühenduspunktis: Karksi GMJ – 24-26 bar Värskas GMJ – 24-26 bar Narva 18-20 bar
Narva ühendus <sup>2</sup>	3 / 31,5	1,2 / 12,6	0,8 / 8,4
Värskas GMJ	4 / 42,0	3,4 / 35,7	2,2 / 23,1
Karksi GMJ	7 / 73,5	6,0 / 63,0	4,0 / 42,0
<b>Kokku</b>	<b>14 / 147</b>	<b>10,6 / 111,3</b>	<b>7 / 73,5</b>

**Tehniline läbilaskevõime** on arvutuslik torustike läbilaskevõime maksimaalsetel rõhkudel sisendpunktides, mida torustike tehniline seisukord võimaldab rakendada.

**Läbilaskevõime tavatingimustel** on arvutuslik torustike läbilaskevõime tavapärasel rõhkudel sisendpunktides.

**Minimaalne läbilaskevõime** on arvutuslik torustike läbilaskevõime erakordselt madalatel sisendrõhkudel sisendpunktides [1].

NB! Seoses Balticconnector'i projekti ehitusega ehitatakse reversiivne Karksi gaasimõõtejaam, mille läbilaskevõime tavatingimustel oleks 105 GWh/päevas. Täpsemalt uuritakse Balticconnector'i projekti mõju Eesti gaasisüsteemile ja ülekandevõrgule järgmises peatükis [1].

<sup>1</sup> Tabel 2.2-s väljatoodud läbilaskevõimed on indikaativsed. Iga ühenduspunkti tegelik läbilaskevõime sõltub sellest, milline on hetke tarbimine süsteemis, milline on gaasirõhk sisendpunktis, kui kaugel asub tarbimine varustatavast ühenduspunktist, kas gaasivarustus käib läbi ühe või enama ühenduspunkti ja arvestades ülekandevõrgu süsteemi terviklikkust ja võrgu tõhusat toimimist.

<sup>2</sup> Alates 2019. aastast pole Narva ühendus kasutatav Gazpromi poolt teostatava renoveerimise tõttu [1].

### **3. BALTICCONNECTORI PROJEKTI TÄHTSUS EESTI GAASISÜSTEEMILE NING TEHNILISED PARAMEETRID**

#### **3.1. Balticconnector projekti maht**

Balticconnector on Eesti ja Soome maagaasi ülekandevõrke ühendava torustiku projekt ning koos Eesti-Läti gaasi ülekandevõimsuste tugevdamise projektiga on vaieldamatu prioriteet Eesti maagaasi ülekandevõrgu investeringute hulgas. Projektid on tehniliselt teineteisega seotud ning moodustavad ainult koos rakendamisel tervikliku klatri, mis võimaldab saavutada soovitud ülekandevõimsusi ja turgude integreeritust [1].

Balticconnector projekti rahastatakse:

- Erinevate uuringute läbiviimist
- Merealuse toru ehitusega seotud tegevusi
- Kiili-Paldiski torulõigu ehitust
- Paldiski kompressorjaama ja gaasimõõtejaama ehitust
- Kiili gaasirõhu reguleerjaama ehitust

Eesti-Läti projektiga rahastatakse:

- Puiatu kompressorjaama ehitust
- Karksi gaasimõõtejaama ehitust
- Lilli liinikraanisõlme ehitust

#### **3.2. Torustiku ning gaasimõõtejaamade tehnilised parameetrid**

Balticconnector ja Eesti-Läti projektide ühenduse eesmärgiks on ühendada Baltimaade ja Soome gaasi ülekandevõrgustik ning seeläbi luua eeldused Baltimaade ja Soome ühtse gaasituru loomiseks. Investeringute realiseerumisel paraneb piirkondlik varustuskindlus ning tekib positiivne keskkond toimiva piirkondliku gaasituru arenguks. Leedu-Poola vahelise ühenduse (GIPL) valmimisel integreeritakse Baltimaad koos Soomega ühtsesse Euroopa gaasi ülekandevõrku [1].

Ehitatava Balticconnector'i projekti torustiku tehnilised parameetrid on välja toodud järgnevas tabelis (vt. Tabel 3.1).

Tabel 3.1 - Balticconnector'i torustiku tehnilised parameetrid

	Siuntio-Inkoo maismaatorustik Soomes	Inkoo-Paldiski merealune torustik Soome lahes	Paldiski-Kiili maismaatorustik Eestis
<b>Torustiku pikkus (km)</b>	20	77	55
<b>Toru nimiläbimõõt (DN)</b>	500	500	700
<b>Maksimaalne töö rõhk (bar<sub>g</sub>)</b>	80	80	54

Tabel 3.2-s on kujutatud Balticconnector'i klasteri projekti raames ehitatavate gaasimõõtejaamade tehnilised parameetrid. Kõik gaasimõõtejaamad ehitatakse reversiivsetena, mis tähendab, et gaasikogust on võimalik mõõta mõlemas suunas.

Tabel 3.2 - Gaasimõõtejaamade tehnilised parameetrid

	Inkoo GMJ	Paldiski GMJ	Karksi GMJ
<b>Ülekandevõimsus (GWh/päevas)</b>	81,2	81,2	105

### 3.3. Kompessorjaama ning seadmete tööpõhimõte

Lisaks riike ühendavale maagaasitorustikule paigaldatakse Inkoosse, Paldiskisse ning Puiatusse ka kompressorjaamad, mille ülesandeks on tagada torustiku piisav ülekandevõimsus. Paldiski ja Inkoo kompressorjaamadel siis vastavalt Soome lahte paigaldatavas merealuses osas ning Puiatu kompressorjaamas Eesti-Läti ülekandevõrgu vahel [1].

Kompressorjaama tööpõhimõtteks on gaasi rõhu tõstmine, et torustikus toimuks pidev maagaasi voolamine. Rõhku tõstetakse vastavalt maagaasi tarbimisele. Kompessorjaama põhilisteks komponentideks on kompressorid, jõumasinad, filtrid/skraberid, jahutus-, avariiseiskamis- ning juhtimissüsteemid. Lisaks toimub kompressorjaamas ka gaasi vooluhulga mõõtmine [3].

Skraberit kasutatakse tahkete osakeste ning niiskuse eemaldamiseks gaasist. Gaasi komprimeerimisel tõuseb gaasi temperatuur, siis järgneb gaasi komprimeerimisele selle jahutamine. Jahutamine on tähtis, sest gaasi temperatuuri tõustes väheneb torustiku läbilaskevõime. Lisaks väheneb mitmeastmelise komprimeerimistsükli jaoks vajalik töö. Peale gaasi jahutamist tarnitakse gaas ülekandetorustiku kaudu juba järgneva kompressor- või jaotusjaamani [3].

Kompressorjaamad lisavad torustikus voolavale gaasile energiat, et ületada torustikus liikumisest tekkiv hõõrdetakistus ning saavutada vajalik rõhk ja vooluhulk määratletud punktis.



Kompressorjaamad koos neid ühendatava torustikuga moodustavad tervikliku süsteemi, kus ühe kompressorjaama väljundrõhu ning järgneva kompressorjaama sisendrõhkude vahe on gaasi liikumapanevaks jõuks torustikus. Balticconnectori projekti puhul kasutatakse kompressorjaamades ka möödaviigusüsteemi. Näiteks kui Paldiski kompressorjaamas pole gaasi vaja komprimeerida, on gaasi liikumapanevaks jõuks torustikus Puiatu ning Inkoo kompressorjaamade väljund- ning sisendrõhkude vahe [3] [4].

### 3.4. Kompressorjaamade tehnilised parameetrid

Käesolevas peatükis tuuakse täpsemalt välja kompressorjaamade tööparameetrid. Paldiski kompressorjaama näitajad on järgnevas tabelis (vt. Tabel 3.3) [4].

Tabel 3.3 - Paldiski kompressorjaama tehnilised näitajad

Parameeter	Väärtus
Tarbitav võimsus (MW)	6-10
Maksimaalne vooluhulk (m <sup>3</sup> /h)	322 000
Imirõhu töövahemik (MPa)	3,1 – 4,5
Surverõhu töövahemik (MPa)	4,4 – 6,3
Minimaalne imirõhk (MPa)	3,1
Maksimaalne surverõhk (MPa)	8,1

Puiatu kompressorjaama andmed on kujutatud allpool olevas tabelis (vt. Tabel 3.4) [4].

Tabel 3.4 - Puiatu kompressorjaama tehnilised näitajad

Parameeter	Väärtus
Tarbitav võimsus (MW)	6-10
Maksimaalne vooluhulk (m <sup>3</sup> /h)	416 000
Imirõhu töövahemik (MPa)	3,1 – 4,5
Surverõhu töövahemik (MPa)	4,4 – 5,5
Minimaalne imirõhk (MPa)	2,4
Maksimaalne surverõhk (MPa)	5,5

## 4. TINGIMUSED NING PARAMEETRID KOMPRESSORJAAMADE KÄITAMISGRAAFIKU MÄÄRAMISEKS

Käesoleva töö raames on äärmiselt tähtis võimalikult täpselt hinnata tekkiva jääksoojuse kogust ning sellest tulenevalt koostada vastavad koormusgraafikud. Selleks on kasutatud AS Eleringi poolt edastatud hüdraulilise analüüsi raportist<sup>3</sup> koondatud andmed ning koostatud nii Paldiski kui Puiatu kompressorjaamade käitamisgraafikud [4].

Käitamisgraafikut mõjutavad tööparameetrid ning -tingimused on järgnevad [4]:

- Gaasi vooluhulk:
  - Maksimaalne gaasikogus (vastavalt arvutustele, kus määravaks parameetrik on kompressorjaamade nimivõimsused)
  - 2,8 mld m<sup>3</sup>/aastas (7,73 mln m<sup>3</sup>/päevas, 322 000 m<sup>3</sup>/h)
  - 2,0 mld m<sup>3</sup>/aastas (5,47 mln m<sup>3</sup>/päevas, 228 000 m<sup>3</sup>/h)
  - 1,0 mld m<sup>3</sup>/aastas (2,74 mln m<sup>3</sup>/päevas, 114 000 m<sup>3</sup>/h)
  - 0,4 mld m<sup>3</sup>/aastas (1,2 mln m<sup>3</sup>/päevas, 50 000 m<sup>3</sup>/h), mis on minimaalne kogus Karksi gaasimöötejaama käituseks ning Eesti suvise tarbimiskoormuse tagamiseks
- Gaasi liikumise voolusuund
  - Läti -> Eesti -> Soome
  - Soome -> Eesti -> Läti
- Gaasi tarbimine sõltuvalt aastaajast:
  - Talvine tipukoormus
  - Keskmine talvine tarbimiskoormus
  - Suvine tarbimiskoormus
- Gaasi lisavarustuse tagamine:
  - Kiili gaasirõhu reguleerjaam on avatud
  - Kiili gaasirõhu reguleerjaam on suletud

Kui Kiili gaasirõhu reguleerjaam on avatud, siis tarnitakse Läti ja/või Soome poolt maagaasi ka Ida-Eestile. See tähendab, et gaasi ei impordita Vändra gaasimöödujaama kaudu Venemaalt.

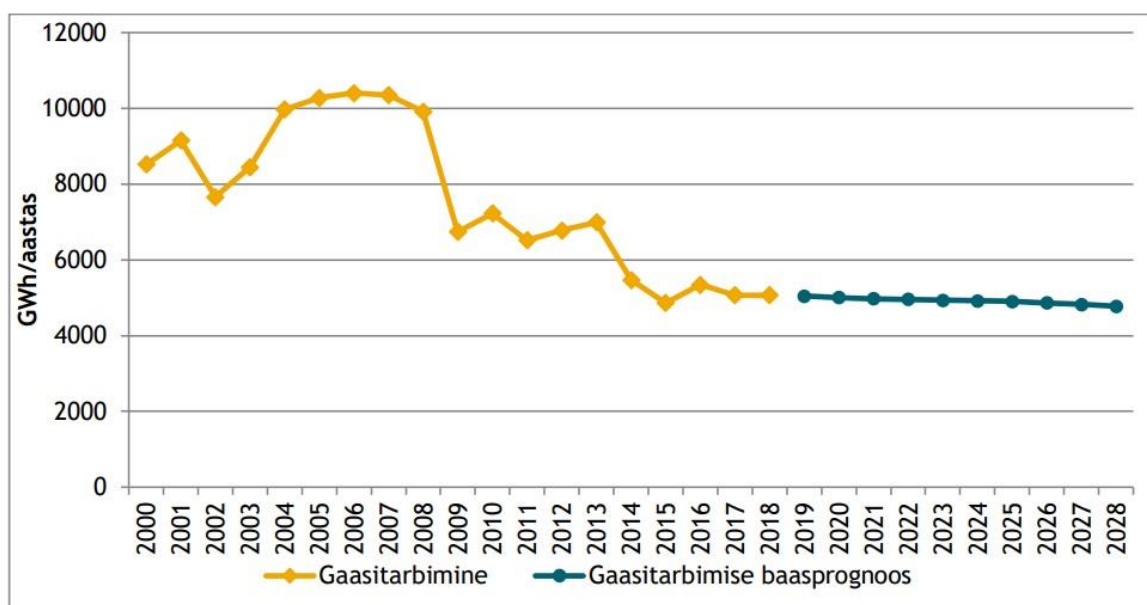
---

<sup>3</sup> Koormusgraafikute koostamiseks kasutatud hüdraulilise analüüsi raport on koostatud Paldiski ning Puiatu kompressorjaamade tööparameetrite ning kasutatavate seadmete määramiseks

- Kompressorjaamade ekspluatatsioon gaasisüsteemis:
  - Inkoo, Paldiski ning Puiatu kompressorjaamad
  - Inkoo ja Paldiski kompressorjaamad
  - Inkoo ja Puiatu kompressorjaamad
  - Paldiski ja Puiatu kompressorjaamad
  - Inkoo kompressorjaam
  - Paldiski kompressorjaam
  - Puiatu kompressorjaam

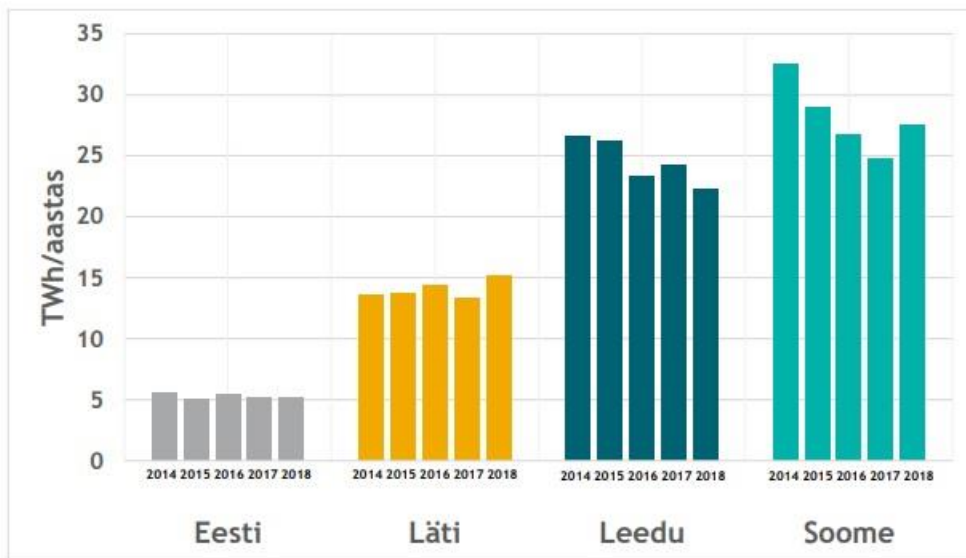
Kompressorjaamade ekspluatatsiooni all peetakse silmas, kas kompressorjaamas üldse komprimeeritakse gaasi või mitte. Näiteks gaasi liikumisel Soomest Inkoo kompressorjaamast Läti Inčukalnsi maagaasihoidlasse pole ilmingimata tarvis gaasi komprimeerimist Paldiski ja/või Puiatu kompressorjaamas. Gaas läbib küll mõlemat jaama, kuid vastavalt tarbimisele võib gaasi suunata kompressorseadmest endast möödaviigutorustikuga mööda, mille korral potentsiaalset jääksoojust ei teki [4].

Lisaks eelpool välja toodud hüdrauliliste arvutuste parameetritele peab arvestama Eesti ning lähipiirkonna maagaasi tarbimisandmete ning prognoosidega. Esmalt vaadeldakse ning analüüsitakse Eesti gaasitarbimise statistikat ning prognoosi järgnevatiks aastateks, mis on kujutatud järgneval joonisel (vt. Joonis 4.1) [1].



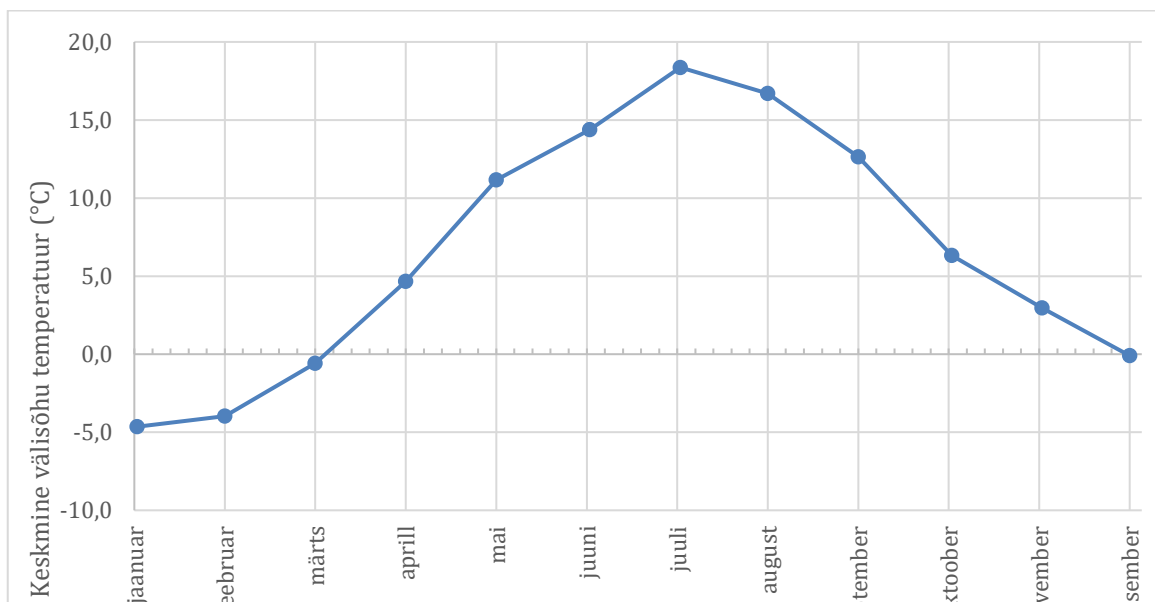
Joonis 4.1 – Eesti aastase gaasitarbimise statistika ning prognoos järgnevatiks kümneks aastaks

Suurema faktorina mõjutab kompressorjaamade käitamist aga Leedu, Läti ja Soome maagaasi tarbimine. Selle põhjuseks on lähiriikide kõrgem maagaasi tarbimine ning maagaasi transiit läbi Eesti. Lähiriikide maagaasi tarbimist väljendab järgmine joonis (vt. Joonis 4.2) [1].



Joonis 4.2 - Maagaasi tarbimine Balti regioonis aastatel 2013-2018

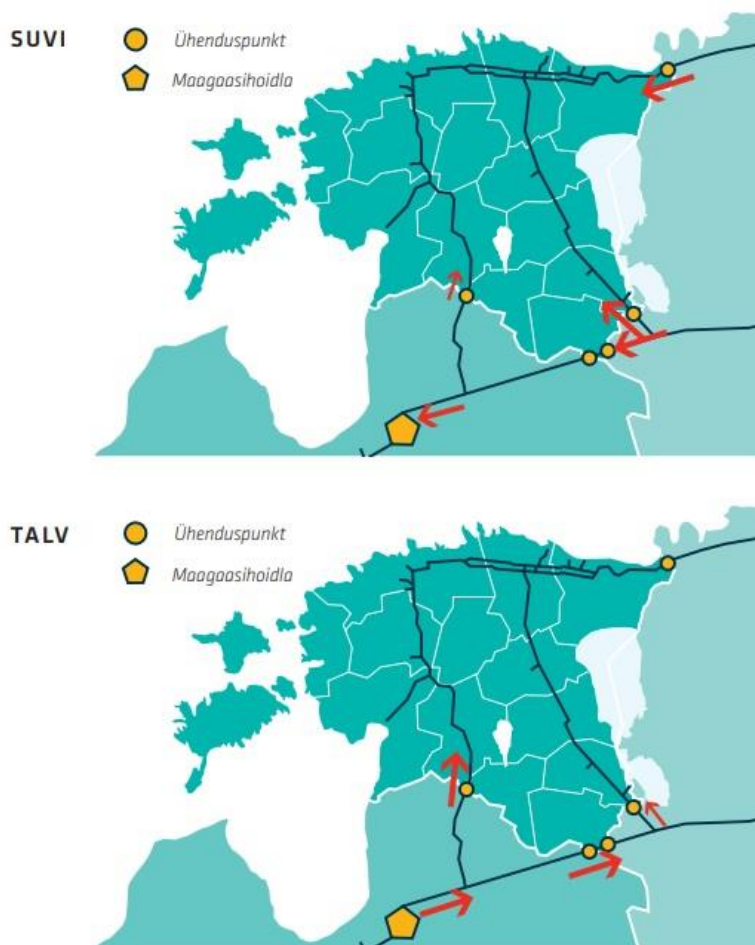
Järgmise lähteparameetrina tuleb määrata suvise ning talvise tarbimise piirpunktid. Selleks tuginetakse Eesti keskmisele välisõhu temperatuurile aastatel 2010-2018, mis on kujutatud järgneval joonisel (vt. Joonis 4.3) [5].



Joonis 4.3 - Eesti keskmine välisõhu temperatuur aastatel 2010-2018

Talvise ning suvise tarbimise piirtemperatuuriks on valitud 5°C, ning seetõttu on suvise tarbimise alguseks 1. aprill ning talvisel tarbimisel vastavalt 16. oktoober. Suvise tarbimise perioodi pikkus on seega 198 päeva, keskmise talvise tarbimise perioodi pikkus on 161 päeva ning talvise tiputarbimise kestvus 6 päeva.

Järgmiseks mõjuriks käitamisgraafiku määramisel on maagaasi tarne suvisel ning talvisel ajal. Täpsemalt on seda kujutatud järgneval joonisel (vt. Joonis 4.4) [2].



Joonis 4.4 - Tüüpilised gaasivood Eesti ülekandesüsteemis

Enne Balticconnector projekti käitust käib suvisel perioodil Eesti gaasivarustus läbi Karksi ja Vändra gaasimõõtejaama ning Narva ühenduse. 2019. aasta alguse seisuga on seoses Gazpromi poolt tehtavate rekonstureerimistöödega Narva ühendus gaasi impordiks suletud. Lisaks tarnitakse gaasi läbi paralleelkorustiku (Irboska-Inčukalns ja Pihkva-Riia) suunaga Läti Inčukalnsi maagaasihoidlasse. Seda gaasi kasutatakse talveperioodil regiooni varustamiseks. Talvisel perioodil käib gaasivarustus

peamiselt läbi Karksi gaasimõõtejaama, kuna gaas tuleb Lätist Inčukalnsi maagaasihoidlast ning Leedu Klaipeda LNG terminalist [2].

Balticconnectori projekti täiemahulisel käitamisel ning Karksi gaasimõõtejaama kahe-suunaliseks muutmiseks antud vood mingil määral kindlasti muutuvad. Täpsemate arvutuste tegemisel peab tuginema ka 2016. aastal Tallinna Tehnikaülikoolis edukalt kaitstud magistritööle „Eesti-Soome gaasiühenduse projektiga kaasnevate Puiatu ja Kersalu kompressormasinade planeerimisfaasi kaalutlused“, mille autoriks on Kristo Lillepõld. Vastavad eeldused on välja toodud järgnevas tabelis (vt. Tabel 4.1) [6].

Tabel 4.1 - Balticconnectori süsteemi simulatsioonide tulemused

	Gaasivoolu suund	
	Soome-Eesti-Läti	Läti-Eesti-Soome
<b>Suvine tarbimine</b>	Balticconnectori kasutus 98%. Soome poolt voolab maksimaalne kogus gaasi. Töös on 2 kompressorjaama, Inkoo ja kas Kersalu või Puiatu.	Balticconnectori kasutus 65 % eeldades, et gaas jõuab alati Karksi gaasimõõtejaama rõhul 34 bar <sub>g</sub> . Vastav kogus võrdub Soome tarbimisega, seega maksimumkogus, mida on võimalik saata Soome poole. Töös on 2 kompressorjaama, Inkoo ja üks Eestis paiknevatest kompressorjaamadest.
<b>Keskmine talvine tarbimine</b>	Balticconnectori kasutus 92 %. Soome poolt voolab maksimaalne kogus gaasi. Töös on 2 kompressorjaama, Inkoo ning Kersalu või Puiatu.	Balticconnectori kasutus 100 % eeldades, et gaas jõuab alati Karksi gaasimõõtejaama rõhul 34 bar <sub>g</sub> (mõlema maksimaalse, Tallinn-Vireši torustiku, rõhu korral 49 või 54 bar <sub>g</sub> ). Kõik kolm kompressorjaama on töös.
<b>Talvine tiputarbimine</b>	Balticconnectori kasutus 0 %. Soome on talve maksimaalse tarbimise juures võimeline Eesti-Läti suunal tarnima väikese koguse gaasi.	Balticconnectori kasutus 51 % eeldades, et gaas jõuab alati Karksi gaasimõõtejaama rõhul 34 bar <sub>g</sub> ja Tallinn-Vireši lõigul on rõhk 49 bar <sub>g</sub> .  Balticconnectori kasutus 61 % eeldades, et gaas jõuab alati Karksi gaasimõõtejaama rõhul 34 bar <sub>g</sub> ja Tallinn-Vireši rõhk on 54 bar <sub>g</sub> . Ainult Inkoo ja Puiatu kompressorjaamad töötavad (limiteerivaks teguriks on Läti torustiku maksimaalne lubatav töö rõhk).

Jääksoojuse koguse hindamisel on viimase faktorina tähtis, kuidas toodetakse kompressorjaamade käitamiseks elektrit. Esialgelt plaaniti kasutada võrgugaasi ning toota elektrit gaasiturbiini või -mootoriga. Täiendavate tasuvusarvutuse analüüsi tulemusena otsustati siiski elektrienergia kasutamisele otse 110/20 kV alajaamadest, mis rajatakse kompressorjaamade toiteks nii Paldiski kui Puiatu kompressorjaamade juurde [1].

## 5. PALDISKI NING PUIATU KOMPRESSORJAAMADE KÄITUSEL TEKKIV JÄÄKSOOJUS

Jääksoojuse all peetakse silmas kompressorseadme käitusest tingitud seadme ülessoojenemist ning vastavalt eelmises peatükis väljatoodud teguritele on koondatud ka kompressorseadmete käitamisgraafikud.

### 5.1. Kompressorseadme käitamisgraafiku prognoos

#### 5.1.1. Suvine tarbimine

Suvisel tarbimisel on kompressorjaamade käitamise peamiseks määramisteguriks võetud gaasi voolusuund. Varasemalt on suvisel perioodil maagaasi imporditud Venemaalt Väandra GMJ ja Narva ühenduste kaudu Inčukalnsi maagaasihoidlasse Lätis. Seda gaasi kasutatakse talvisel perioodil regiooni maagaasiga varustamisel ning talviste tippude katmisel. Balticconnectori projekti käivitumisel võetakse aluseks sarnane gaasi liikumissuund. Kompressorjaamade tööd silmas pidades, tulemuste keskmistamiseks ning võimalike hälvete esinemist silmas pidades tarnitakse viiendik suvisest perioodist maagaasi suunal Läti-Eesti-Soome ning 80% ajast suunal Soome-Eesti-Läti. Suvise perioodi kestvus antud töös on 1. aprill – 15. oktoober.

Eespool mainitud faktorid arvesse võttes on allpool kujutatud tabelis Puiatu ning Paldiski kompressorseadmete võimsused, töötunnid ning tarbimismaht suvisel tarbimisel (vt. Tabel 5.1).

Tabel 5.1 - Puiatu ning Paldiski kompressorseadmete võimsused, töötunnid ning tarbimismaht suvisel tarbimisel

Kompressorjaama võimsus (MW)			Kestvus (tunnid)	Kompressorseadme tarbimismaht (MWh/aastas)	
Puiatu	Paldiski	Inkoo		Puiatu	Paldiski
3,9	3,7	Sõltuvalt Soome maagaasi tarbimisest	240	936	888
0	5,8	Sõltuvalt Soome maagaasi tarbimisest	240	0	1 392
3,8	0	8,8	336	1 276,8	0
6,2	3,3	Sõltuvalt Soome maagaasi tarbimisest	192	1 190,4	633,6
3,2	0	Sõltuvalt Soome maagaasi tarbimisest	792	2 534,4	0
1,7	1,7	Sõltuvalt Soome maagaasi tarbimisest	1 392	2 366,4	2 366,4
1,8	0	Sõltuvalt Soome maagaasi tarbimisest	1 080	1 944	0
0	0	Sõltuvalt Soome maagaasi tarbimisest	480	0	0
<b>Kokku</b>			<b>4 752</b>	<b>10 248</b>	<b>5 280</b>

### 5.1.2. Keskmise talvine tarbimine

Keskmise talvise tarbimise puhul on kompressorseadmete käitamisgraafiku määramisel samuti peamiseks faktoriks voolusuund. Varasemalt on talvisel perioodil maagaasi tarne Eestisse toimunud peamiselt Lätist Inčukalnsi maagaasihoidlast ning Klaipeda LNG jaamast. Antud töös tehakse ka sel puhul eeldus, et 75% talvise perioodi kestvusest tarnitakse maagaasi suunal Läti-Eesti-Soome. Talvise perioodi kestvus antud töös on 16. oktoober – 31. märts.

Sarnaselt suvise tarbimise kompressorseadme käitamisgraafiku prognoosile üritatakse keskmistada prognoositud tulemusi. Kõiki väljatoodud aspekte arvestades on järgnevas tabelis kujutatud Puiatu, Paldiski ning Inkoo kompressorseadmete võimsused, töötunnid ning tarbimismaht keskmisel talvisel tarbimisel (vt. Tabel 5.2).

Tabel 5.2 - Puiatu ja Paldiski kompressorseadmete võimsused, töötunnid ning tarbimismaht keskmisel talvisel tarbimisel

Kompressorjaama võimsus (MW)			Kestvus (tunnid)	Kompressorseadme tarbimismaht (MWh/aastas)	
Puiatu	Paldiski	Inkoo		Puiatu	Paldiski
2,0	3,0	Sõltuvalt Soome maagaasi tarbimisest	192	384	576
2	0	Sõltuvalt Soome maagaasi tarbimisest	240	480	0
3,8	3,6	Sõltuvalt Soome maagaasi tarbimisest	120	456	432
0	5,8	Sõltuvalt Soome maagaasi tarbimisest	120	0	696
3,8	0	Sõltuvalt Soome maagaasi tarbimisest	312	1 185,6	0
6,5	1,2	Sõltuvalt Soome maagaasi tarbimisest	528	3 432	633,6
0	2	Sõltuvalt Soome maagaasi tarbimisest	408	0	816
0	0	Sõltuvalt Soome maagaasi tarbimisest	720	0	0
5,7	3,2	Sõltuvalt Soome maagaasi tarbimisest	144	820,8	460,8
0	4,1	Sõltuvalt Soome maagaasi tarbimisest	720	0	2 952
3	0	Sõltuvalt Soome maagaasi tarbimisest	360	1 080	0
<b>Kokku</b>			<b>3 864</b>	<b>7 838</b>	<b>6 566</b>

### 5.1.3. Talvine tiputarbimine

Talvise tiputarbimise puhul on varasemate aastate tiputarbimise põhjal määratud perioodi kestvuseks 6 päeva. Kompressorseadme töötamisgraafiku määramisel on põhifaktoriks jällegi gaasi voolusuund, mis tiputarbimise korral on suunal Läti-Eesti-Soome. Selle põhjuseks on Soome vähene või täiesti puuduv maagaasi tarne Eestisse talvisel tiputarbimisel. Jääksoojuse koguse keskmistamiseks tarnitakse siiski 24 tundi maagaasi ka suunal Soome-Eesti-Läti [6] [7].



Kompressorseadmete võimsused, töötunnid ning aastane tarbimisaht talvisel tiputarbimisel on kujutatud allpool olevas tabelis (vt. Tabel 5.3).

Tabel 5.3 – Puiatu ning Paldiski kompressorseadmete võimsused, töötunnid ning tarbimisaht talvisel tiputarbimisel

Kompressorjaama võimsus (MW)			Kestvus (tunnid)	Kompressorseadme tarbimisaht (MWh/aastas)	
Puiatu	Paldiski	Inkoo		Puiatu	Paldiski
6,1	3,2	Sõltuvalt Soome maagaasi tarbimisest	24	146,4	76,8
3,1	0	Sõltuvalt Soome maagaasi tarbimisest	120	372	0
<b>Kokku</b>			<b>144</b>	<b>518,4</b>	<b>76,8</b>

## 5.2. Tekkiv jääsoojus ning selle utiliseerimise võimalused

Kogu tarbimisaht aastase perioodi jooksul Paldiski ning Puiatu kompressorseadmete käitamiseks on kujutatud järgnevas tabelis (vt. Tabel 5.4).

Tabel 5.4 - Aastane tarbimisaht Paldiski ning Puiatu kompressorseadmete käitamiseks

	Kompressorseadme tarbimisaht (MWh)	
	Paldiski	Puiatu
Suvine tarbimine	5 280	10 248
Keskmine talvine tarbimine	6 566,4	7 838,4
Talvine tiputarbimine	76,8	518,4
<b>Aastane tarbimisaht kokku</b>	<b>11 923,2</b>	<b>18 604,8</b>

Eespool kujutatud andmete põhjal on võimalik määrata ka kompressorseadmete käitisest tingitud jääsoojuse maht aastas. Kuna kompressorseadmete käitamiseks kasutatakse elektrienergiat, mis saadakse otse alajaamast, on tekkiv jääsoojus seadmete käitamisel marginaalne. Arvestuslikult tekib elektrienergiat kasutades jääsoojust vaid 2% kogu seadme tarbimismahust, mis on kujutatud järgnevas tabelis (vt. Tabel 5.5).

Tabel 5.5 - Paldiski ning Puiatu kompressorseadme käitisest tekkiv jääsoojus

Tekkiv jääsoojus (MWh)	
Paldiski	Puiatu
<b>238,5</b>	<b>372,1</b>

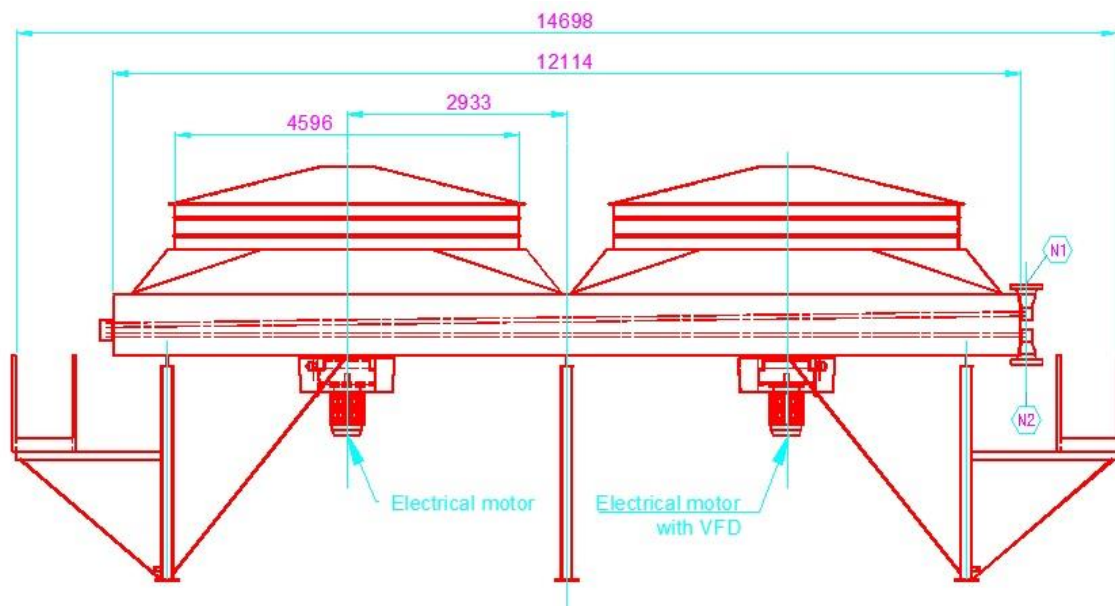
## 6. KOMPRESSORIST VÄLJUVA GAASI JAHUTAMISEL TEKKIV JÄÄKSOOJUS

### 6.1. Gaasi jahutamisel tekkiva jääksoojuse arvutamine

Lisaks kompressorseadme käitamisel tekkivale jääksoojusele on jääksoojust võimalik talletada ka kompressorist väljuva gaasi jahutamisel. Fikseerides gaasi temperatuuri kompressorjaamast väljudes ning jahutisse sisenedes, on võimalik määrata jääksoojuse maht, analüüsida selle erinevaid utiliseerimisvõimalusi ning tasuvust utiliseerimisel.

Gaasi jahutamisel tekkiva jääksoojuse arvutamiseks on esmalt vaja määrata süsteemi algparameetrid. Vastavalt hüdraulilisele raportile jahutatakse komprimeeritud gaasi temperatuurini  $t_{jahuti} = 40^{\circ}\text{C}$  [4].

Gaasi jahutamiseks kasutatakse õhk-soojusvahetit, mis on kujutatud järgneval joonisel (vt. Joonis 6.1) [8].



Joonis 6.1 - Gaasi jahutamiseks kasutatav õhk-soojusvaheti

Antud joonisel on N1 ning N2 tähistusega märgitud ka maagaasi sisenemine jahutisse ning väljumine jahutist. Sisendid ning väljundid ei ole aga üheselt määratud ning sõltuvad gaasi voolusuunast süsteemis. Jahuti on varustatud ka sagedusmuunduriga, mis suudab täisvõimsuse saavutada ligi 10 minutiga.

Märkusena tuleb lisada, et kui gaasi komprimeerimisel temperatuur ei tõuse üle 40°C, siis mõistetavalt ei toimu ka gaasi jahutust.

Kompressorjaamade käitamise graafikud on nii Paldiski kui Puiatu puhul antud töös juba määratud ning vastavalt koondatud ka järgnevas tabelites (vt. Tabel 6.1 ning Tabel 6.2). Antud käitamisgraafikutest saame töötundide arvu kindlal töötamisrežiimil.

Vooluhulk ning temperatuur kompressorist väljudes saadakse hüdraulilisest raportist. Kui tabelilahtris väärtus puudub, siis antud töötamisrežiimil gaasi komprimeerimist vastavas kompressorjaamas ei toimu.

Gaasi tihedus on määratud juba antud töös kasutatud hüdraulilises raportis ning vastavalt gaasi koostisele ning parameetritele on selle väärtus  $\rho_{normaaltingimus} = 0,693 \frac{kg}{m^3}$ . Gaasi tihedus määrati normaaltingimustel, milleks on  $t_{normaaltingimus} = 20^\circ C$  ning  $p_{normaaltingimus} = 1 \text{ atm} = 101\,325 \text{ Pa}$  [4].

Viimase algparameetrina on vaja määrata gaasi erisoojus. Erisoojuseks nimetatakse soojushulka, mida vajab teatud kogus ainet muutmaks oma temperatuuri ühe ühiku võrra. Kuna erisoojus defineeritakse soojushulga abil, mis on protsessifunktsioon, siis ka keha erisoojus sõltub sellest, millise protsessiga on tegemist. Soojustehnikas leiavad ulatuslikult kasutust aine isohoorne ning isobaarne erisoojus. Püsimahuline ehk isohoorne erisoojus  $c_v$  saadakse, kui termodünaamilise keha maht erisoojuse määramisel jääb konstantseks. Termodünaamilise keha isohoorne erisoojus võrdub siseenergia osatuletisega temperatuuri järgi püsival mahul [9].

$$c_v = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \quad (6-1)$$

Antud juhul on paslik kasutada maagaasi isohoorset erisoojust. Põhjuseks just gaasi temperatuuri jahutamisest tingitud ruumala muutumatus torustikus.

Maagaasi isohoorne erisoojus ülal juba mainitud normaaltingimustel on  $c_v = 1,85 \frac{kJ}{kg \cdot K}$  ning antud väärtus võetakse käesolevas töös aluseks ka soojushulga arvutustel [10] [11].

Erisoojuse määramisega on kõik vajalikud algparameetrid kindlaks tehtud ning on võimalik arvutada ülekantav soojushulk gaasi jahutamisel. Ülekantav soojushulk tuletatakse energia jäävuse seaduse valemist [12]:

$$Q = \Delta U - W \quad (6-2)$$

kus  $Q$  – ülekantav soojushulk (J),  
 $\Delta U$  – süsteemi siseenergia muutus (J),  
 $W$  – süsteemiväline töö (J).

Kuna antud juhul süsteemiväliselt tööd ei tehta, on  $W = 0$ . Selle eelduse tõttu on ülekantav soojushulk lihtsustatult võimalik välja kirjutada seosena, kus soojushulk on võrde siseenergia muutusega. Siseenergia muutus arvutatakse allpool kujutatud valemiga [12]:

$$Q = \Delta U = c_v m (T_{\text{kompressor}} - T_{\text{jahuti}}) \quad (6-3)$$

Torustikku läbiva vooluhulga abil on võimalik tuletada maagaasi mass torustikus. Selleks tuleb vooluhulk vastava töötamisrežiimi korral korrutada töötundidega antud käitamisgraafikul ning gaasi tihedusega.

$$Q = c_v * Q_{\text{vooluhulk}} * t_{\text{töötunnid}} * \rho_{\text{gaas}} (T_{\text{kompressor}} - T_{\text{jahuti}}) \quad (6-4)$$

Üleval tuletatud valemi järgi on võimalik arvutada kompressorist väljuva gaasi jahutamisest saadav lisasoojus kilodžaulides. Antud töö puhul on ühikuteks mõistlik kasutada megavatt-tunde, mille vahekord kilodžaulidega on järgmine:

$$1 \text{ kJ} = \frac{1}{3\,600\,000} \text{ MWh} \quad (6-5)$$

Kõiki eelpool välja toodud aspekte arvesse võttes, on võimalik arvutada nii Paldiski kui Puiatu kompressorjaamade käitamisega kompressorseadmest väljuva gaasi jahutamisel tekkiv jääksoojus. Tabeli ülesehitus on sarnaselt käitamisgraafikute prognoosile ehitatud üles sesoonsele tarbimisele. Lisaks on tabelis kujutatud maagaasi vooluhulk kindlal töörežiimil, selle kestvus tundides, gaasi temperatuur kompressorseadmest väljudes ning gaasi jahutamisel tekkiv soojushulk nii kilodžaulides kui megavatt-tundides.

Paldiski kompressorjaamas gaasi jahutamisest tekkiv jääsoojus on kujutatud allpool oleval tabelis (vt. Tabel 6.1).

Tabel 6.1 - Paldiski kompressorjaamas gaasi jahutamisest tekkiv jääsoojus

Periood	Vooluhulk (m <sup>3</sup> /h) [4]	Kestvus (tunnid)	Gaasi temperatuur kompressorist väljudes (°C) [4]	Soojushulk (kJ/aastas)	Soojushulk (MWh/aastas)
Suvine tarbimine	319 200	240	42,02	198 394 879	55,11
	322 000	240	60,69	2 049 899 489	569,42
	-	336	-	-	-
	322 000	192	37,30	-	-
	234 000	792	54,56	3 459 452 541	960,96
	228 000	1 392	31,35	-	-
	-	1 080	-	-	-
	-	480	-	-	-
Keskmine talvine tarbimine	322 000	192	35,87	-	-
	-	240	-	-	-
	322 000	120	41,79	88 673 757	24,63
	322 000	120	60,30	1 005 629 764	279,34
	-	312	-	-	-
	259 000	528	23,02	-	-
	175 000	408	41,61	147 376 776	40,94
	-	720	-	-	-
	322 000	144	36,53	-	-
	243 000	720	57,00	3 813 226 956	1 059,23
-	360	-	-	-	
Talvine tiputarbimine	322 000	24	36,76	-	-
	-	120	-	-	-
<b>Kokku</b>				<b>10 762 654 160</b>	<b>2 989,63</b>

Paldiski kompressorjaamas tekib määratud käitamisgraafikute korral gaasi jahutamisel jääsoojust 2 990 MWh/aastas.

Sarnaselt Paldiskile arvutatakse ka Puiatu kompressorjaamas gaasi jahutamisest tekkiv jääksoojus, mis on kujutatud järgneval tabelis (vt. Tabel 6.2).

Tabel 6.2 - Puiatu kompressorjaamas gaasi jahutamisest tekkiv jääksoojus

Periood	Vooluhulk (m <sup>3</sup> /h) [4]	Kestvus (tunnid)	Temperatuur kompressorist väljudes (°C) [4]	Soojushulk (kJ/aastas)	Soojushulk (MWh/aastas)
Suvine tarbimine	322 000	240	43,83	379 464 236	105,41
	-	240	-	-	-
	319 200	336	43,31	455 129 637	126,42
	336 100	192	61,44	1 773 778 903	492,72
	-	792	-	-	-
	225 200	1 392	31,65	-	-
	225 200	1 080	32,27	-	-
	-	480	-	-	-
Keskmise talvine tarbimine	239 000	192	33,92	-	-
	239 000	240	34,03	-	-
	317 500	120	43,58	174 869 056	48,57
	-	120	-	-	-
	317 500	312	43,32	421 639 578	117,12
	342 000	528	62,84	5 287 630 405	1 468,79
	-	408	-	-	-
	-	720	-	-	-
	326 500	144	58,52	1 116 327 499	310,09
	-	720	-	-	-
	246 000	360	43,33	378 082 699	105,02
Talvine tiputarbimine	332 110	24	60,73	211 834 874	58,84
	252 110	120	44,48	173 761 795	48,27
<b>Kokku</b>				<b>10 372 518 683</b>	<b>2 881,26</b>

Vastavalt ülal kujutatud tabelile (vt. Tabel 6.2) on Puiatu kompressorjaama käitamisel gaasi jahutamisel tekkiv jääksoojus samas suurusjärgus Paldiski kompressorjaamaga. Täpsemalt on see väärtus 2 881 MWh/aastas.

## 7. TEHNILIS-MAJANDUSLIK ANALÜÜS KOMPRESSORJAAMAS TEKKIVA JÄÄKSOOJUSE UTILISEERIMISEL

### 7.1. Reaalse olukorra hindamine

Potentsiaalse jääkoojuse reaalseks utiliseerimise hindamiseks analüüsitakse Paldiski ning Puiatu kompressorjaamade olukordi koos. Antud kompressorjaamade puhul on komprimeeritud gaasi jahutamisel tekkiv jääksoojus hetkel kasutatava tehnoloogia ning soojusparameetrite tõttu äärmiselt raskendatud.

Esimeseks põhjuseks on seadmete käituse tulemusena tekkiv väike jääksoojuse kogus, mis Paldiskis on vaid 238,5 MWh/aastas ning Puiatu puhul 372,1 MWh/aastas (vt. Tabel 5.5). Sellise koguse kasulikuks utiliseerimiseks on investeeringumahud piiratud ning tasuvusaeg väga pikk või täiesti kättesaamatu.

Teiseks pärssivaks faktoriks on gaasi jahutamisel tekkiva jääksoojuse madal temperatuur. Jahutist väljuv temperatuur on vaid 40°C ning seda tõstmata kasutatakse madalamat temperatuuri vaid piiratud juhtudel. Üheks kasutusala on näiteks põrandaküte, kuid see on ühises süsteemis terve hoone soojussüsteemiga. Eraldi süsteemi väljatöötamine ning juurutamine on äärmiselt ebapraktiline. Reaalsed kasutusvõimalused ilma temperatuuri tõstmata oleks vee- või õhu eelsoojendused katlasüsteemides juhul, kui antud süsteemid paikneksid kompressorjaama vahetus läheduses.

Lisaks on jääksoojus sporaadiline, mis tähendab, et toodetud energia on juhuslik ning seda on ajaliselt võimatu täpselt ette ennustada.

Viimaseks takistavaks teguriks on gaasi jahutamiseks kasutatav õhk-soojusvaheti, mis on mõõtmetelt äärmiselt suur (vt. Joonis 6.1) ning õhku paisatud soojust on praktiliselt võimatu talletada, et seda siis kasulikult ära kasutada. Jääksoojuse talletuse teemal on konsulteeritud ka Eleringi esindajate ja õhk-soojusvaheti tootjaga, kelle sõnul on soojuse talletamine ning edasikandmine pikkade vahemaade taha antud tehnoloogia kasutusel ebapraktiline. Jääksoojust ei plaanita kasutada ka omatarbeks, mis puhul oleks tarbija küll lähedal ning vajalikud investeeringud märgatavalt väiksemad.

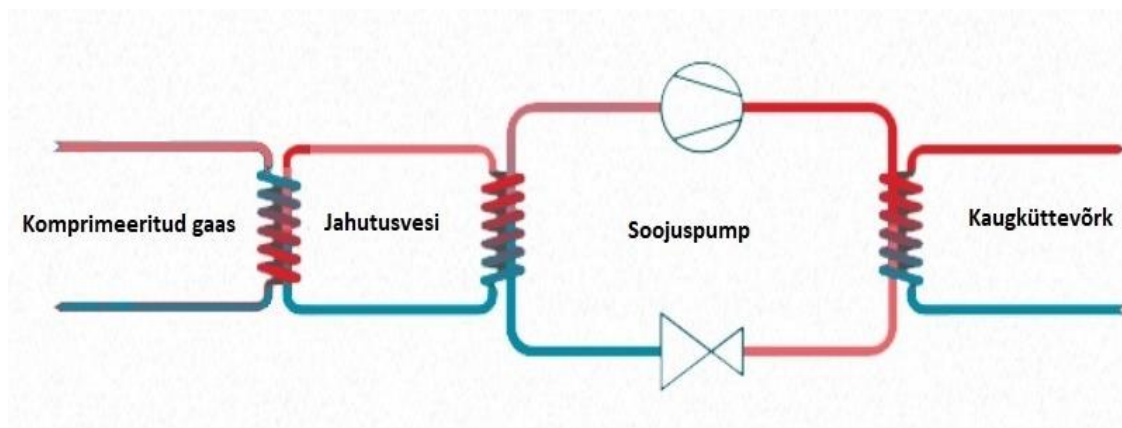
Väljatoodud tehniliste ning praktiliste takistuste tõttu pole reaalse olukorra majanduslikku analüüsi läbi viidud. Selle muutmiseks oleks tarvis muuta olemasolevat tehnoloogiat. Seetõttu on täiendavalt analüüsitud võimalike alternatiivsete lahenduste kasutamist, mis on kajastatud järgnevates peatükkides.

## 7.2. Alternatiiv 1. Õhk-soojusvaheti asendamine vesi-soojusvahetiga ning soojuspumbaga temperatuuri tõstmine

### 7.2.1. Tekkiv soojushulk

Kuna nii Paldiski kui Puiatu kompressorjaamades on nii jääksoojuse kogused summaarselt äärmiselt sarnased, analüüsitakse antud alternatiivi tehnilisi nüansse koos.

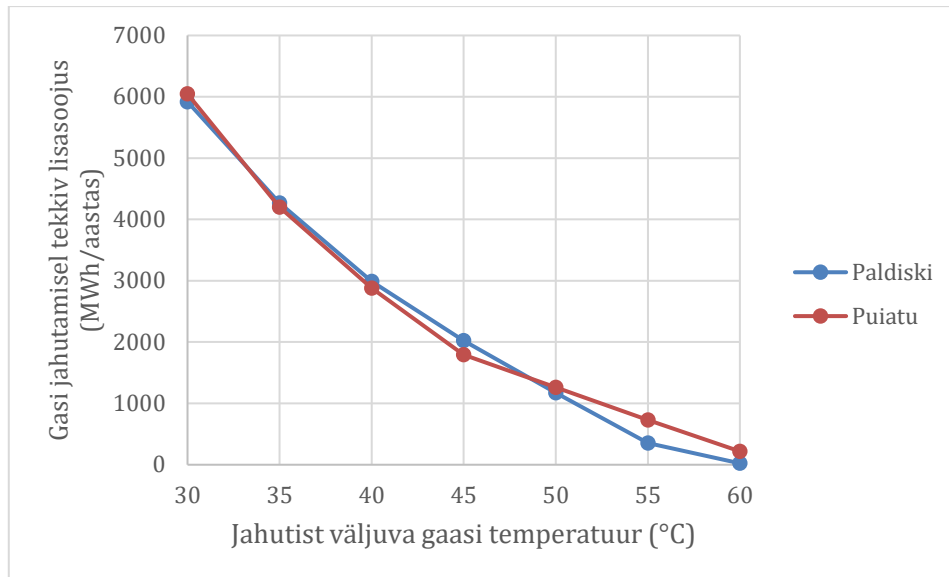
Esimeseks muudatuseks võrreldes reaalse olukorraga, on õhk-soojusvaheti asendamine vesi-soojusvahetiga. Sellel juhul on võimalik kasutada soojusvahetis ringleva jahutusvee kinnist kontuuri, mis võimaldab paremini talletada ning kasutada tekkivat jääksoojust. Edasi liigub vesi soojuspumpa, kus temperatuur tõstetakse vastavalt nõutavale temperatuurile. Kõrgetemperatuuriline soojus antakse soojusvahetiga edasi süsteemile, mille abil suunatakse soojus tarbijani. Tarbijaks võib antud juhul olla nii kaugküttevõrk kui tööstustarbija. Järgneval joonisel on kujutatud ka jääksoojuse ülekandmise skeem kaugküttevõrgule (vt. Joonis 7.1).



Joonis 7.1 - Jääksoojuse ülekandmise skeem kaugküttevõrgule Alternatiiv 1 rakendamisel

Reaalselt ehitatava olukorra puhul jahutatakse kompressorist väljuv gaas õhk-soojusvaheti abil 40°C-ni. Alternatiiv 1 korral leitakse gaasi jahutamisel tekkiv soojushulk ka teiste jahutustemperatuuride juures (vt. Joonis 7.2).





Joonis 7.2 - Gaasi jahutamisest tekkiva jääsoojuse kogus sõltuvalt jahutustemperatuurist

Gaasi jahutatakse, et minimaliseerida kompressorite poolt tehtavat tööd ning tagada vajalik torustiku läbilaskevõime. Antud lõputöö raames tehtava analüüsi tasuvuse huvides on suurimaks faktoriks just jääsoojuse kogus. Selle peamiseks mõjutajaks ongi just jahutist väljuva gaasi temperatuur.

### 7.2.2. Soojusvaheti valik

Õhk-soojusvaheti asendamisel vesi-soojusvahetiga oleks võimalik saavutada jahutustemperatuur ka 30°C, mis omakorda suurendaks gaasi jahutamisest tekkiva jääsoojuse kogust ligi poole võrra (vt. Joonis 7.2).

Alternatiivi 1 tasuvusarvutuste tegemisel on suureks mõjutajaks ka sobiva soojusvaheti tüübi valik. Kõrge rõhu all oleva gaasi jahtutamiseks kasutatakse sageli mantelsoojusvahetit, kus jahutavaks soojuskandjaks on vesi. Antud eelduse tõttu kasutatakse ka antud töös mantelsoojusvaheteid. Lisaks on mantelsoojusvahetil ka väga kõrge soojusvaheti efektiivsus. Edaspidistes arvutustes loetakse soojusvaheti efektiivsuseks  $\eta_{soojusvaheti} = 85\%$  [13].

Peale komprimeeritud gaasi jahutamist vesi-soojusvaheti abil, liigub vesi kinnise kontuuri kaudu edasi tööstulikku soojuspumpa, kus tõstetakse temperatuuri vastavalt vajalikule võrgutemperatuurile. Vastavalt dokumendile „Paldiski linna soojusmajanduse arengukava aastateks 2016-2026“ on Paldiski kaugkütte temperatuurigraafik 100/85°C.

### 7.2.3. Soojuspumba parameetrid ning valiku alused

Soojuspumba efektiivsuse määramiseks tuleb leida pump, mis oleks võimeline soojusvahetist saabuvat 30°C vett tõstma vastavalt nõutavale temperatuurile. Kuna soojuspumbast väljuva kõrgetemperatuurilise veega eelsoojendatakse antud näite puhul kaugküttevõrgu tagastuvat vett, peab pump tõstma soojusvahetist saabuvat vett umbes 40-50°C kraadi võrra. Selliste tööparameetritega pumpasid ei toodeta just massiliselt ning suure vajaliku temperatuurivahe tõttu kannatab paljuski ka soojuspumba efektiivsuse näitaja – COP. COP näitab mitu korda annab seade rohkem soojusenergiat võrreldes kulutatud elektrienergiaga ning selle arvutusvalem on järgmine [14]:

$$COP = \frac{\text{küttevõimsus [kW]}}{\text{kulutatud elektrienergia (sh. pumbad ja juhtautomaatika) [kW]}} \quad (7-1)$$

Soojuspumbad, mille tööparameetrite ligilähedased väärtused saab arvutuste aluseks võtta, on väljatoodud allpool kujutatud tabelis (vt. Tabel 7.1) [15].

Tabel 7.1 - Erinevate tootjate soojuspumpade nimivõimsused, efektiivsusnäitajad, külmutusagensid, soojuskandjad ning väljastatavad temperatuurid

Tootja	Pumba küttevõimsus (kW)	COP	Külmutusagens	Soojuskandja	Väljastatav temperatuur (°C)
Ochsner Heat Pumps	158	2	ÖKO1	Vesi	70 - 120
Ochsner Heat Pumps	420	2,6	R134a + ÖKO1	Vesi	90
Viessmann	194	3,4	R134a	Vesi	> 70°C
Ochsner Heat Pumps	255	5,3	ÖKO1	Vesi	70 - 85

Maksimaalne vajalik väljastatav temperatuur Paldiski kaugküttevõrgu korral on talvise tiputarbimise korral 100°C. Uurides soojuspumpade efektiivsusnäitajaid on kerge näha korrelatsiooni just väljastatava temperatuuri tõusu ning COP-i languse vahel.

### 7.2.4. Soojuspumba käitamisele kuluv elektrienergia ning selle maksumus sõltuvalt tarbijahinnaindeksist

Eelnevas tabelis (vt. Tabel 7.1) väljatoodud andmete põhjal on võimalik arvutada soojuspumba käitamisele kuluv elektrienergia ning selle maksumus eeldatava tehnilise eluea jooksul. Tehniline eluiga on summaarne aeg, mille kestel on seadmestik tehniliselt kujundatud opereerima alates seadme esimesest vastuvõtmisest-üleandmisest tellijale. Vastavalt SusDev Consulting OÜ poolt

koostatud eksperthinnangule „Soojuse tootmise, jaotamise ja müügiga seotud põhivarade kasuliku (tehnilise) eluea määramine (hindamine) on soojuspumpade tehniline eluiga 15 aastat [16].

Lisafaktorina tuleb arvestada ka tarbijahinnaindeksi muutust järgneva 15 aasta jooksul, mis otseselt mõjutab ka elektrienergia hinda. Elektri hind lõpptarbijale koosneb elektrienergia hinnast, võrgutasudest, elektriaktsiisist, taasutvenergia tasust ning käibemaksust, mis on täpsemalt kujutatud ka järgnevas tabelis (vt. Tabel 7.2). Antud tabelis on kõik hinnad väljatoodud ilma käibemaksuta.

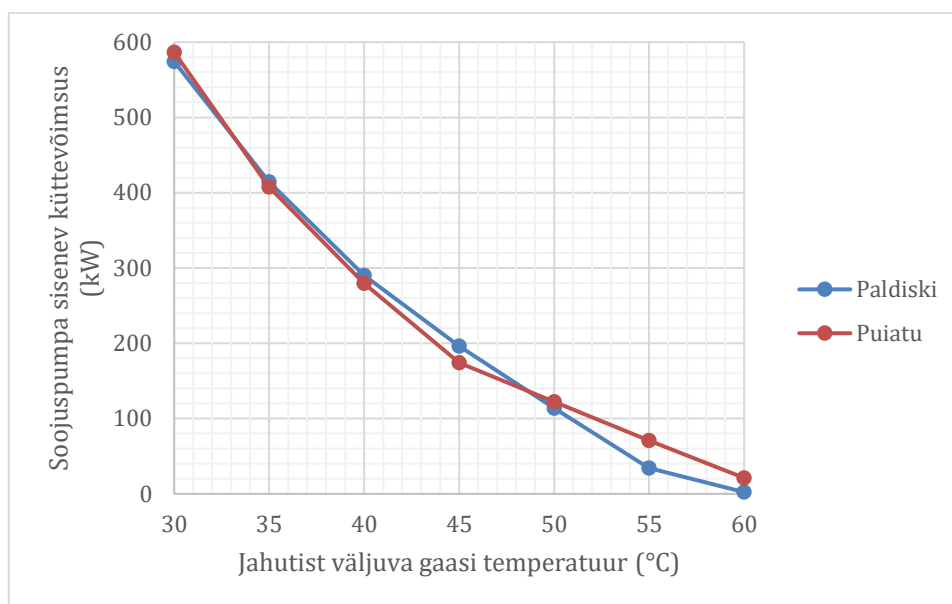
Tabel 7.2 - Elektrienergia mõjutavad komponendid ning nende ühikväärtused

Elektrienergia mõjutav komponent	Ühiku hind (senti/kWh)
Elektrienergia (04.2019)	4,2 [17]
Võrguteenus (01.2019)	4,0 [18]
Taastuenergia tasu (01.2019)	1,04 [18]
Elektriaktsiis (01.2019)	0,447 [18]
<b>Kokku</b>	<b>9,687</b>

2019. aastal on elektrienergia hind lõpptarbijale koos edastustasude ning riiklike maksudega seega 96,9€/MWh. Antud hinna fikseerimisel on tarbijahinnaindeksi prognoosiga võimalik ennustada ka elektrienergia järgneva 15 aastaks. Tuginedes Rahandusministeeriumi poolt koostatud pikaajalisele majandusprognoosile on tarbijahinnaindeksi tõus 2019. aastal 2,1%, 2020. aastal 2,2% ning püsib peale seda iga-aastaselt 2,0% peal [19].

Nendele väärtustele tuginedes on võimalik koostada potentsiaalne elektrienergia hind lõpptarbijale ka soojuspumba tehnilise eluea lõpus. 2034. aastal on elektrienergia väärtuseks seega 130,67 €/MWh, kuid antud lõputöö raames kasutatakse järgneva 15 aasta keskmistatud elektrienergia väärtust, mis on ilma käibemaksuta 113,1 €/MWh.

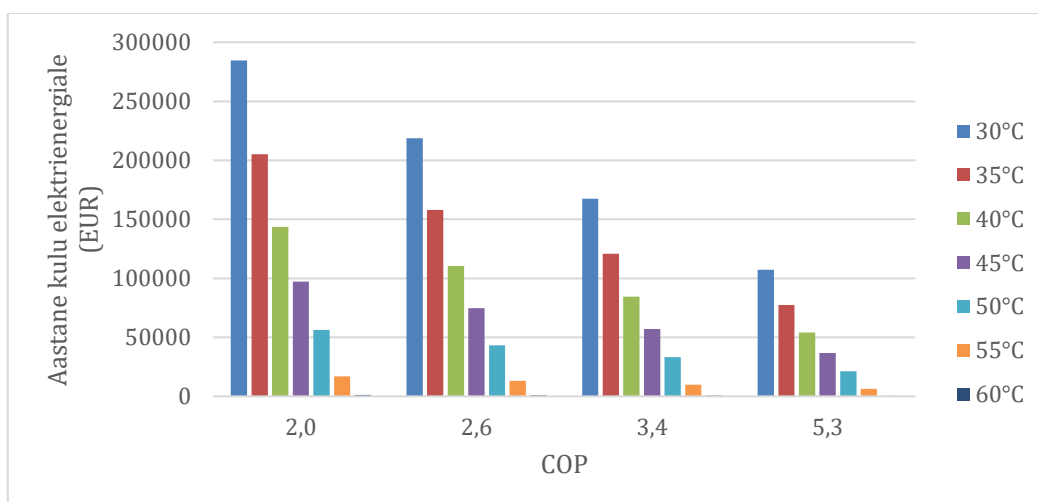
Soojuspumba käitamiseks kuluva elektrienergia kogusumma on võimalik leida soojusvahetist väljuva jääksoojuse võimsusest, elektrienergia ühikhinnast ning soojuspumba efektiivsusest. Soojuspumba sisenev küttevõimsus on arvatud vastavalt jääksoojuse kogusele, soojusvaheti efektiivsusele ning on visuaalselt kujutatud järgneval joonisel (vt. Joonis 7.3).



Joonis 7.3 - Soojuspumba küttevõimsus sõltuvalt gaasi jahutustemperatuurist

Suurim võimalik küttevõimsus saavutatakse vastavalt sellele, mida madalamale temperatuurile gaas jahutatakse. Kui gaasi jahutustemperatuur on 30°C, on soojuspumba keskmine küttevõimsus Paldiski ning Puiatu puhul ligi 600 kW.

Soojuspumba käitamiskulude arvutamiseks kasutatakse erinevaid efektiivsusnäitajaid, kus on tuginetud just Tabel 7.1-s väljatoodud pumpade tööparameetritele. Käitamiskulude sõltuvus gaasi jahutustemperatuurist ning soojuspumba efektiivsusnäitajast – COP-ist, on visuaalselt kujutatud allpool paikneval joonisel (vt. Joonis 7.4).



Joonis 7.4 - Soojuspumba aastane kulu elektrienergiALE sõltuvalt gaasi jahutustemperatuurist ning COP-näitajast Paldiskis

Joonis 7.4 pealt on näha, et kui COP väärtus on ligikaudu 3, kulub aastas soojuspumba käitamisele umbes 185 000 €. Sarnase graafiku võib koostada ka Puiatu kohta, kuid arvestades väljastavate soojusvõimsuste sarnasust vaadeldavate asukohtade vahel, pole seda peetud vajalikuks.

### 7.2.5. Kaugküttevõrgule üle antav koguvõimsus ning energia

Soojuspumbast väljuva kõrgetemperatuurilise veega antakse järgmise soojusvahetiga soojusenergia üle antud näite puhul tagastuvalle Paldiski kaugkütteeveele. Kasulik võimsus on seega võimalik arvutada, kui fikseerida soojuspumbast väljuv küttevõimsus ning korrutada see süsteemi viimase soojusvaheti efektiivsusnäitajaga. Esimesele soojusvahetile sarnaselt on seadme efektiivsus  $\eta_{soojusvaheti} = 85\%$  ning süsteemi kasulik koguvõimsus ning kaugküttevõrgule üle antud energia on kujutatud järgnevas tabelis (vt. Tabel 7.3).

Tabel 7.3 - Kaugküttevõrgule üle antud koguvõimsus ning energia

	Gaasi jahutustemperatuur (°C)	30	35	40	45	50	55	60
Paldiski	Võimsus (kW)	488,2	352,2	246,6	166,7	96,7	29,2	1,9
	Toodetud energia (MWh/aastas)	4 276,6	3 084,9	2 160,0	1 460,2	847,5	255,9	16,7
Puiatu	Võimsus (kW)	498,6	346,4	237,6	148,1	104,1	60,0	18,0
	Toodetud energia (MWh/aastas)	4 368,2	3 034,5	2 081,7	1 297,7	911,6	525,5	157,4

### 7.2.6. Rajatava torustiku potentsiaalne asendiplaan ning paigaldusmeetod Paldiski kaugküttevõrguga ühendamisel

Tuginedes dokumendile „Paldiski linna soojusmajanduse arengukava aastateks 2016-2026“, on Paldiski kaugkütetrassi võrguvaldaja sõnul võimalik jääsoojuse abil soojendada kaugküttesüsteemi tagastuvat vett, kui soojushind tarbijale väheneks [4] [20].

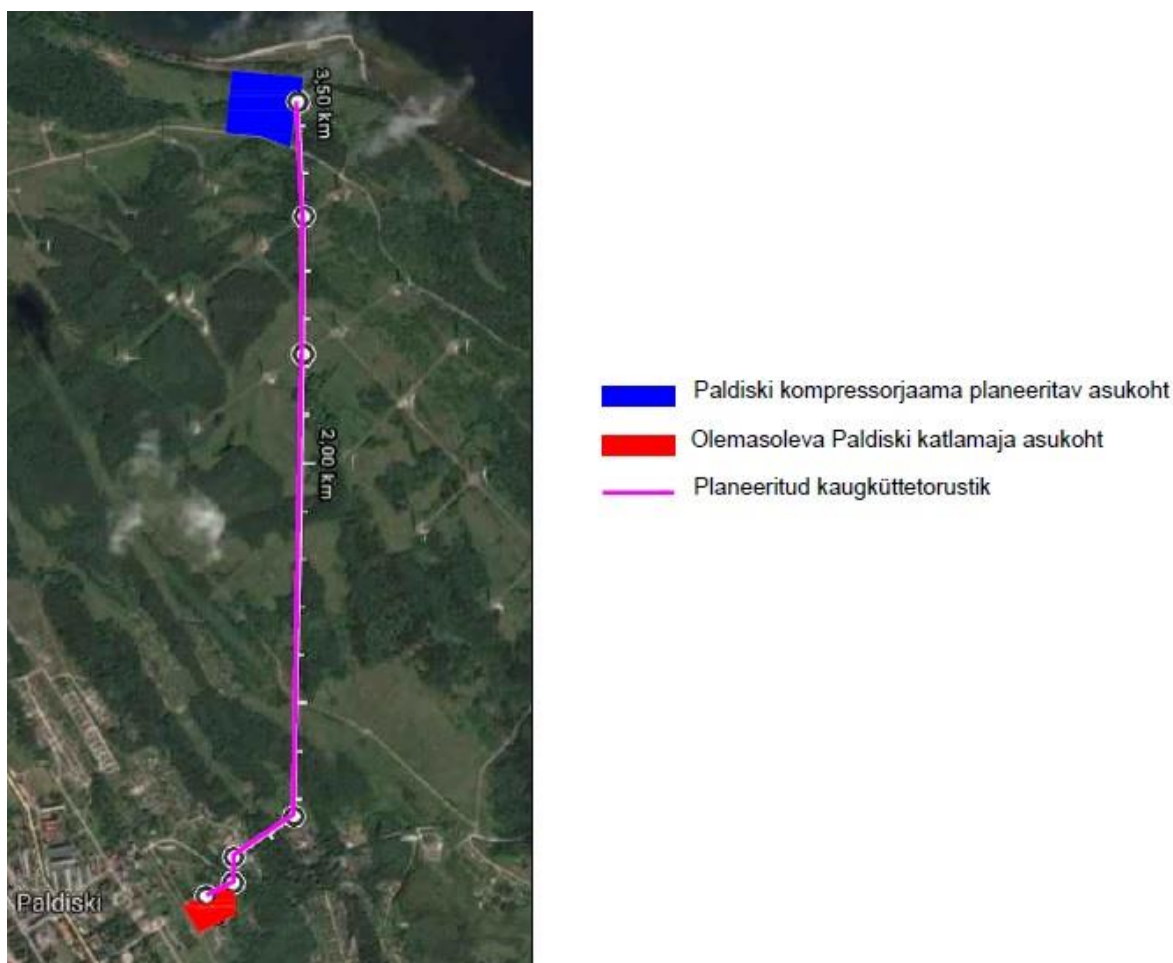
Vastavalt Keskkonnaprojekt OÜ poolt 2018. aastal koostatud dokumendis „Paldiski linna soojustorustike rekonstrueerimine“ on Paldiski linna kaugküttevõrgu temperatuurigraafik dimensioneerimisel 75/55°C. Tegelik temperatuurigraafik just talviselt tiputarbimisel on aga märgatavalt kõrgem [21].

Kuna vastavalt termodünaamika II seadusele ei saa soojus iseeneslikult minna külmemalt kehalt kuumemale, kasutatakse trassi rajamisel antud töös tehnoloogiat ning parameetreid, mis on arvatud Alternatiiv 1 läbitöötamisel [9].

Tasuvusarvutuse aluseks on vaja võimalikult täpselt hinnata rajatava trasseeringu maksumust Pakri rannikule ehitatavast Paldiski kompressorjaamast olemasolevasse Paldiski katlamaja aadressil Sadama 28 [20].

Trasseeringu planeerimisel on arvestatud olemasolevate ehitiste, põllumaade, teedeületuste ning tuulepargis asuvate tuulegeneraatorite ja rajatistega.

Eelpool mainitud kitsendustega arvestades, on kõige lühem pakutud trasseeringulahendusest näidatud allpool oleval joonisel (vt. Joonis 7.5) [22].



Joonis 7.5 - Trasseeringulahendus ühendamiseks olemasolevat Paldiski katlamaja ning rajatavat Paldiski kompressorjaama

Ülal pakutud lahendus on võimalikest kõige sirgjoonelisem, mistõttu on see ka kõige odavam. Väiksem torustiku üldpikkus vähendab materjali-, projekteerimis- ning ehituskulusid. Need omakorda suurendavad võimalust, et antud projekt on üldse kasumlik. Väljapakutud lahenduse puhul on torustiku kogupikkuseks 3 500 meetrit. Arvestades ka torustiku paigaldusmeetodiga, ei piirdu torustiku kogupikkus siiski vaid 3 500 meetriga [23].

Eelisoleeritud torusüsteem koosneb enamjaolt terastorust, mis on seotud ümbristoruga tugevasti nakkunud jäigast polüuretaanvahust soojusisolatsioonimaterjalidega. Väiksematel temperatuurigraafikutel kasutatakse ka PE-torusid, kuid antud projektis neid ei käsitleta. Sõltuvalt küttevee temperatuuri muutumisega kaasnevad torustikusüsteemis nihked pinnases ning aksiaalsuunalised pinged torustikus. Torustiku pikenemise ning pingete kompenseerimiseks tuleb teha arvutused, et kindlaks teha, milline paigaldusmeetod on tehnilis-majanduslikult kõige paremini rakendatav [23].

Võimalikud torustiku paigaldusmeetodid:

- Külmpaigaldus
- Eelsoojendusega paigaldus
- Paigaldamine koos paisumispõlvede või kompensaatoritega
- Spetsiaalne eelsurveastamise meetod

Külmpaigalduse eeliseks on võimalus paigaldada vabalt valitud pikkusega sirgeid eelisoleeritud torustikke. Seejuures võib äsja pinnasesse paigaldatud torustikulõigu vahetult pärast montaažitöid pinnasega katta. Süsteemi esimesel soojendamisel maksimaalse töötemperatuurini toimub torustikus maksimaalne pikenemine ning põlvedes maksimaalne paisumine [24] [25].

Eelsoojendusega paigalduse korral soojendatakse torusid eelsoojenduse temperatuurini, mis on umbes 50% maksimaalsest töötemperatuurist. Eelisoleeritud torustikusüsteemi eelkuumutamise abil piiratakse terastorus töörežiimil esinevaid pikisuunalisi pingeid 75-90%-ni voolavuspiirist. Eelsoojendust kasutatakse ehituses peamiselt projektidel, kus tegemist on suurediameetriliste torude ning kõrgemate temperatuuridega. Eelsoojenduse puuduseks on, et kaevik peab olema avatud kogupikkuses, kuni eelsoojendamine on toimunud. Pikemate torustike puhul ei ole tihti võimalik torukaevikut kogu paigaldustööde aja jooksul lahtisena hoida [24] [25].

Paisumispõlvi (L-, Z- ning U-põlvi) ning kompensaatoreid kasutatakse, et säilitada telgpingeid, mis on väärtuselt madalamad, kui on võimalik saavutada eelsoojendusega või kui eelsoojendamise meetodit pole võimalik kasutada. Põlvede kasutamise puhul pikeneb kogutorustiku pikkus, mis tõstab ehituskulusid, soojuskadusid ning pumpamise kulusid [24] [25].

Spetsiaalsete eelpingestamismeetodite all peetakse silmas ühekordseid ja mittekeevitatavaid kompensatoreid. Lisaks võib siia hulka lugeda ka torude telgsuunalise mehaanilise eelpingestamise, kuid keerulise ekspluatatsiooni tõttu kasutatakse seda harva [24] [25].

Paigaldusmeetodi valikul lähtutakse suuresti tehnilis-majanduslikust analüüsist, mis arvestab torustikule mõjuvaid telgpingeid ning ehitus- ja materjalikuluseid.

Pakutud lahenduse korral on torustikku suures osas võimalik paigaldada suunamuutuseta, mis tehniliselt seab siiski piirangud, sest torustiku sirges osas tekivad telgpinged on liiga suured. Telgpingete vähendamiseks tuleks paigaldada paisumispõlved, sest kogu süsteemi eelsoojendamine ning külmpaigalduse meetodid on ehituslikult või tehniliselt raskesti teostavad. Sarnaste pikkade suunamuutuseta trasside puhul võib paisumispõlvede paigaldusega arvestada ligikaudu 10% trassi kogupikkuse suurenemisega, mille tõttu trassi kogupikkuseks arvutuste teostamisel on 3 800 meetrit.

#### **7.2.7. Rajatava torustiku hüdraulika arvutused**

Hüdraulika arvutuste aluseks on võetud eelmistes peatükkides arvatud jääksoojuse kogused (vt. Tabel 7.3). Potentsiaalse torustiku dimensioneerimiseks on meil tarvis temperatuurigraafikut, töö rõhku, hüdraulilist takistust, torustiku kogupikkust ühendamiseks Paldiski kompressorjaama olemasoleva Paldiski katlamajaga ning jääksoojuse kogust.

Temperatuurigraafik hüdrauliliste arvutuste teostamiseks on võetud 2018. aastal OÜ Keskkonnaprojekti poolt koostatud „Paldiski linna soojustorustike rekonstrueerimise“ tööprojekti seletuskirjast (Töö nr. 1734) [21].

Antud seletuskirjast lähtudes on peale- ning tagasivoolu temperatuurid dimensioneerimiseks vastavalt  $T_{pealevool} = 75^{\circ}\text{C}$  ning  $T_{tagasivool} = 55^{\circ}\text{C}$ .

Torustiku töö rõhk on võetud HeatConsult OÜ poolt 2016. aastal koostatud „Paldiski linna soojusmajanduse arengukava aastateks 2016 – 2026“, kus vastavaks väärtuseks on  $p_{töörõhk} = 2 \text{ bar} = 200 \text{ kPa}$  [20].

Vedeliku tihedus vastavalt tagasivoolu temperatuuril on  $\rho_{55^{\circ}\text{C}} = 985,74 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  ning pealevoolu temperatuuril  $\rho_{75^{\circ}\text{C}} = 974,89 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  [26].



Vee dünaamiline viskoossus vastavalt tagasi- ning pealevoolu temperatuuridel ning töörihul on  $\mu_{55^{\circ}\text{C}, 2 \text{ bar}} = 5,04 \cdot 10^{-4} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$  ning  $\mu_{75^{\circ}\text{C}, 2 \text{ bar}} = 3,78 \cdot 10^{-4} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$  [26].

Vee erisoojus pealevoolu temperatuuril on  $c_{75^{\circ}\text{C}} = 3,90 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$  [27]

Algparameetrid on sellega määratud ning antud andmetega on võimalik arvutada vooluhulk torustikus.

$$Q = \frac{3\,600 * P}{\rho * c * \Delta T} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = \frac{3\,600 * 600 \text{ kW}}{974,89 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 3,90 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * ^{\circ}\text{C}} * (75^{\circ}\text{C} - 55^{\circ}\text{C})} = 28\,405 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \quad (7-2)$$

kus  $Q$  – vooluhulk  $\left( \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right)$

$P$  – jääsoojuse võimsus (W)

$\rho$  – vedeliku tihedus  $\left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$

$c$  – vee erisoojus  $\left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * ^{\circ}\text{C}} \right)$

$\Delta T$  – peale – ning tagasivoolu temperatuuride vahe ( $^{\circ}\text{C}$ )

Voolu kiirus torus arvutatakse järgneva valemiga:

$$v = \frac{4 * Q}{3\,600 * \rho_{75^{\circ}\text{C}} * \pi * d^2} \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) = \frac{4 * 28\,405 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{3\,600 * 974,89 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \pi * 0,0703^2} = 2,09 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (7-3)$$

kus  $d$  – toru sisediaameeter (m)

Toru sisediaameeter on arvestatud seinapaksusega 2,9 mm, mis on DN65 nimiläbimõõduga toru puhul standardne suurus.

Hüdraulilised kaod jagunevad kaheks:

- 1) Hõõrdesurvekaod, mis on tingitud vedeliku hõõrdumisest toruseinaga ja vedelikukihtide omavahelisest hõõrdumisest.
- 2) Kohtsurvekaod, kus rõhulangus on tingitud toru profiili või ristlõike muutumisest. Antud projektis sõltub kohtsurvekadu vaid geomeetriamuutustest tingitud rõhulangust [28].

Hõõrdesurvekadude arvutamiseks on esmalt vaja kindlaks määrata voolamise režiim torustikus. Selleks kasutatakse Reynoldsi arvu, mis arvutatakse järgneva valemiga [29]:

$$Re = \frac{vd\rho}{\mu} = \frac{2,09 \frac{m}{s} * 0,0703 m * 974,89 \frac{kg}{m^3}}{3,78 * 10^{-4} \frac{kg}{m * s}} = 378 936 \quad (7-4)$$

kus  $Re$  – Reynoldsi arv

Kuna Reynoldsi arv on suurem kui 4000, on tegu turbulentsse voolamisega ning hõõrdetegur arvutatakse Swamee-Jain valemiga [28] [30].

$$\lambda = \frac{1,325}{\left[ \ln \left( \frac{\varepsilon}{3,7 * d} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} = \frac{1,325}{\left[ \ln \left( \frac{4 * 10^{-5} m}{3,7 * 0,0703 m} + \frac{5,74}{378 936^{0,9}} \right) \right]^2} = 0,017 \quad (7-5)$$

kus  $\lambda$  – hõõrdetegur

$\varepsilon$  – toru ekvivalentne karedus (m) – 0,04 mm =  $4 * 10^{-5} m$  [31]

Hõõrdesurvekao arvutamiseks torus kasutatakse Darcy valemit [28]:

$$h_l = \lambda \frac{L\rho v^2}{2d} = 0,017 * \frac{3 800 m * 974,89 \frac{kg}{m^3} * 2,09^2 m}{2 * 0,0703 m} = 1 956 570 Pa \quad (7-6)$$

kus  $h_l$  – hõõrdesurvekadu (Pa)

$L$  – toru pikkus (m)

Terve projekteeritud trassi peale leitakse kohtsurvekadu summeeritud Weisbachi valemiga [28]:

$$h_{ksum} = \sum \xi \rho \frac{v^2}{2} = (20 * 0,9 + 2 * 0,19) * 974,89 * \frac{2,09^2}{2} = 39 135 \quad (7-7)$$

kus  $h_{ksum}$  – summaarne trassi kohtsurvekadu (Pa)

$\sum \xi$  – summaarne kohtsurvetakistus

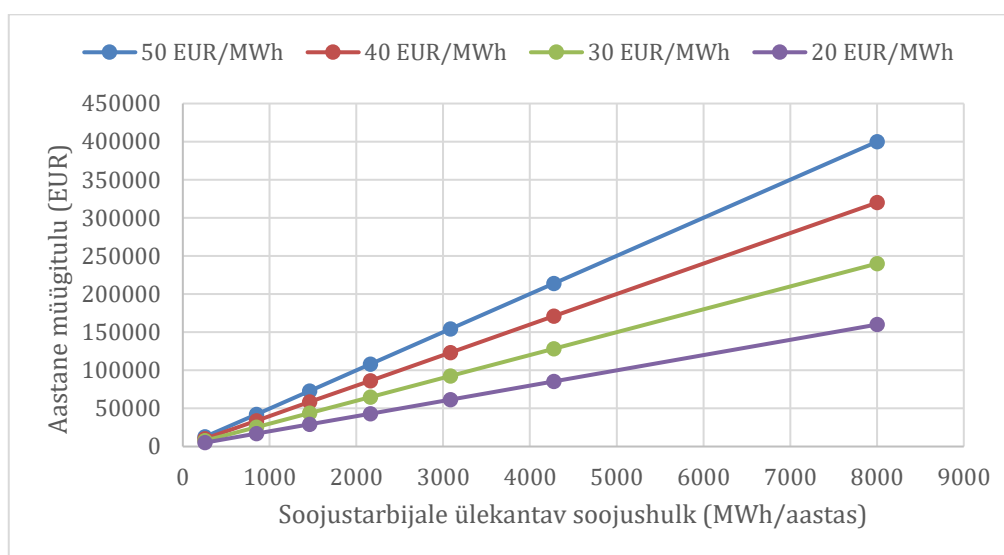
Erinevate kohttakistustüüpide takistustegurid on katseliselt määratud ning nende väärtused on kujutatud allpool olevas tabelis (vt. Tabel 7.4) [32].

Tabel 7.4 - Erinevate kohttakistustüüpide takistustegurid

Kohttakistuse tüüp	90° põlv	Sulgarmatuur
Kohttakistuse takistustegur	0,9	0,19

### 7.2.8. Piirhinna arvutused jääsoojuse müümisel Paldiski kaugküttevõrku

Tasuvusarvutuste läbiviimiseks on jääsoojuse müügist saadud tuluga vaja katta käitamiskulud ning investeringumaksud seadmete tehnilise eluea jooksul. Allpool kujutatud joonisel (vt. Joonis 7.6) on näidatud Paldiski kompressorjaama jääsoojuse aastane müügitulu sõltuvalt müügihinnast ning -kogusest.



Joonis 7.6 - Paldiski kompressorjaama jääsoojuse aastane müügitulu

Eespool kujutatud joonisel on kõrgeim potentsiaalne müügihind 50 €/MWh valitud just Paldiski kaugküttevõrgu soojusenergia müügihinnast lähtudes, mis 01.11.2018 seisuga on ilma käibemaksuta 52,75 €/MWh [33].

Tasuvusanalüüsi läbiviimiseks tuleb leida ka piirhind, millise jääsoojuse müügihinnaga oleks antud projekt üldse kasumlik. Selleks vaadeldakse esialgu jääsoojuse müügist saadud tulude ning soojuspumba käitamiseks vajaliku elektrimaksumuse ja trassile kuluva investeeringute vahet soojuspumba tehnilise eluea jooksul. Soojuspumba tehniline eluiga vastavalt ka eespool viidatud dokumendile on 15 aastat [16].

Esmalt viiakse tasuvusanalüüsi hindamiseks läbi piirhinna arvutus, kus ei arvestata uue jahuti, soojuspumba ega soojusvahetite ostu. Selle põhjal on võimalik hinnata, kas jääsoojuse utiliseerimine Paldiski kaugküttevõrku oleks olnud kasumlik, kui Paldiski ja/või Puiatu kompressorjaama projekteerimisel oleks ettenähtud vastav tehnoloogiline lahendus. Piirhinna arvutusteks kasutatakse maksimaalset kasutatavat jääsoojuse kogust.

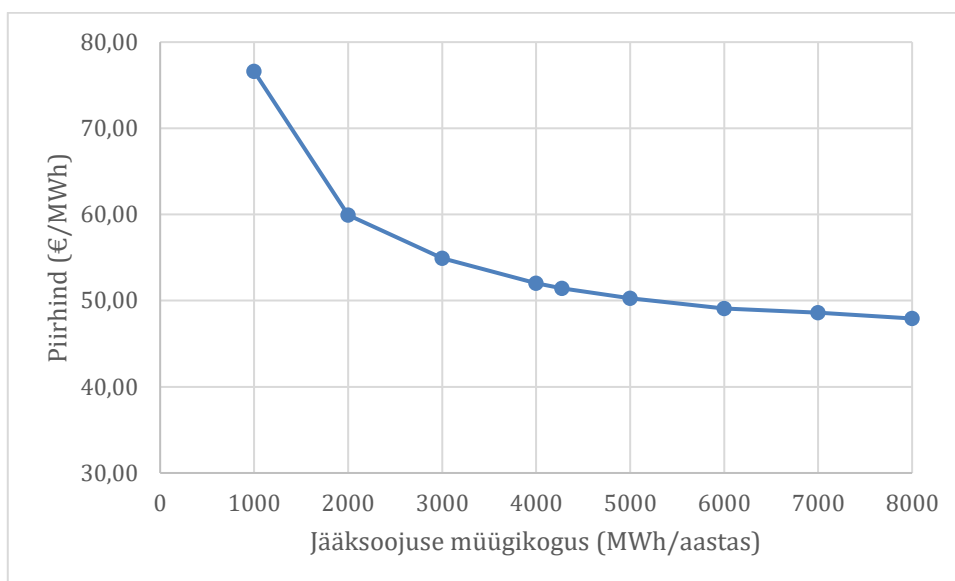
Piirhinna arvutustes on trassi maksumuse aluseks võetud 2017-2018. aastal ehitatud Loksa kaugküttetrassi rekonstrueerimise eelarve, mis on mastaapselt sarnane antud projektiga. Antud projekt on aluseks võetud nii materjali- kui ehituskulude hindamisel. Lisaks on arvestatud projekteerimiskulude ning katete taastamisega. Kõiki tegureid arvesse võttes on trassi maksumuse eelarveks 525 000€.

$$\text{piirhind} \left( \frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right) * \text{jääksoojuse kogus} \left( \frac{\text{MWh}}{\text{aastas}} \right) * \text{tehniline eluiga (aastat)} = \text{investeeringud trassile} + \text{elektrimaksumus} \left( \frac{\text{€}}{\text{aastas}} \right) * \text{tehniline eluiga (aastat)} \quad (7-8)$$

$$\text{piirhind} \left( \frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right) = \frac{\text{investeeringud trassile (€)} + \text{elektrimaksumus} \left( \frac{\text{€}}{\text{aastas}} \right) * \text{tehniline eluiga (aastat)}}{\text{jääksoojuse kogus} \left( \frac{\text{MWh}}{\text{aastas}} \right) * \text{tehniline eluiga (aastat)}}$$

$$\text{piirhind} = \frac{525\,000 \text{ €} + 185\,000 \frac{\text{€}}{\text{aastas}} * 15 \text{ aastat}}{4\,276,6 \frac{\text{MWh}}{\text{aastas}} * 15 \text{ aastat}} = 51,44 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$$

Kuna lõputöö koostaja poolt arvestatud kompressorseadme käitamisgraafikud on antud juhul indikatiivsed, peaks piirhinna kujutama ka sõltuvalt jääksoojuse müügi kogusest. Alternatiiv 1 rakendamisel on jääksoojuse piirhinna sõltuvus müügi kogusest Paldiski kaugküttevõrku kujutatud järgneval joonisel (vt. Joonis 7.7).



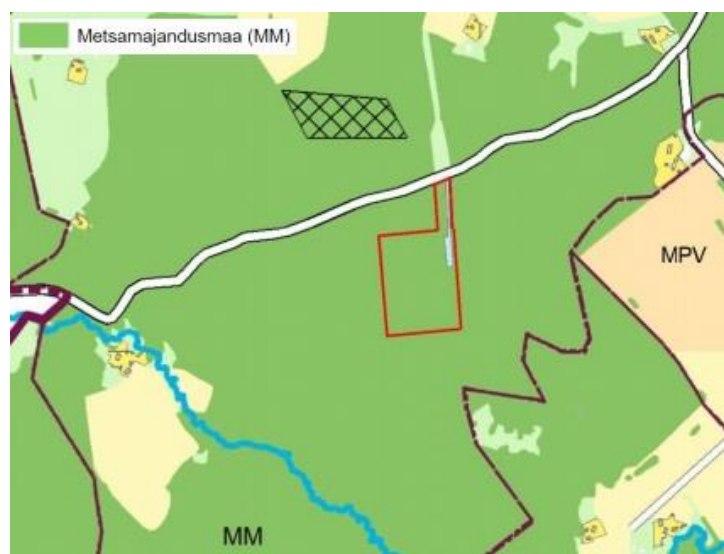
Joonis 7.7 - Jääksoojuse piirhind Paldiski kaugküttevõrku sõltuvalt jääksoojuse kogusest

Väiksema müügi koguse juures on ilmselgelt piirhind kõrgem, et katta ära trasseeringu kulud. Erinevate müügi koguste juures on tehtud ka hüdraulilised arvutused, et leida nominaalne torustiku diameeter ning vastavalt sellele on modifitseeritud ka trasseeringu eelarvet. Antud eelarve muutub nii materjali- kui ehituskulude arvelt.

Piirhinna muutus on jääsoojuse koguse kasvades esmalt märkimisväärne, kuid stabiliseerub umbes 4 000 MWh/aastas müügikoguse juures. Antud graafik annab aimu ka asjaolu kohta, et suuremate müügikoguste juures hind enam märkimisväärselt ei lange. Põhjuseks just materjalikulude märkimisväärne ühikuhinna tõus suuremate diameetrite korral.

### 7.2.9. Alternatiiv 1 rakendamine Puiatu kompressorjaama jääsoojuse utiliseerimisel

Puiatu kompressorjaam rajatakse Viljandi valda, Väike-Kõpu külasse ning selle üldplaneeringuala maakasutuse kaardist on kujutatud ka allpool oleval joonisel (vt. Joonis 7.8) [34].



Joonis 7.8 - Puiatu kompressorjaama üldplaneering

Kuna kompressorjaam rajatakse hõredalt asustatud piirkonda, on ilmselge, et antud piirkonnas on ka väike soojusenergia tarbimistihedus. Erinevalt Paldiskist puudub vahetus läheduses kaugküttevõrk või suurem tööstustarbija, kellele oleks kasumlik jääsoojust müüa. Antud järeltõttu on koostatud ka tabel jääsoojuse piirhinna sõltuvusest tarbija kaugusest (vt. Tabel 7.5). Selle põhjal on võimalik anda ka indikatiivne hinnang jääsoojuse utiliseerimise tasuvusest, kui tulevikus peaks lähipiirkonda tekkima potentsiaalne soojustarbija.

Tabel 7.5 - Jääsoojuse piirhinna sõltuvus tarbija kaugusest (€/MWh)

Jääsoojuse kogus (MWh/aastas)	Tarbija kaugus kompressorjaamast (m)	100	500	1000	1500	2000	2500	3000
1000		45,02	49,86	53,92	58,09	62,26	66,42	70,59
2000		44,15	46,59	48,66	50,78	52,89	55,01	57,13
3000		43,85	45,48	46,86	48,27	49,68	51,09	52,50
4000		43,70	44,93	45,96	47,02	48,08	49,13	50,19
5000		43,62	44,61	45,46	46,33	47,19	48,06	48,93
6000		43,56	44,39	45,09	45,81	46,54	47,26	47,98
7000		43,52	44,24	44,86	45,49	46,13	46,76	47,39
8000		43,49	44,12	44,66	45,21	45,77	46,32	46,88

Üleval kujutatud tabelist (vt. Tabel 7.5) on näha, et piirhind soojuse müügi koguse suurenemisel stabiliseerub. Selle põhjuseks on madalad materjalikulu maksumuse erinevused ning ehituskulude väike diapason väiksematel diameetritel.

#### 7.2.10. Alternatiiv 1 tasuvuse hinnang

Alternatiiv 1 puhul tuleb märkusena lisada, et kõik piirhinna arvutused on tehtud mitteamvestades seadmete (soojusvahetite ning soojuspumba) ostu. Antud kuludega arvestades tõuseksid piirhinna väärtused mitmekordseks, mis muudaksid jääsoojuse utiliseerimise tasuvuse täiesti mõeldamatuks.

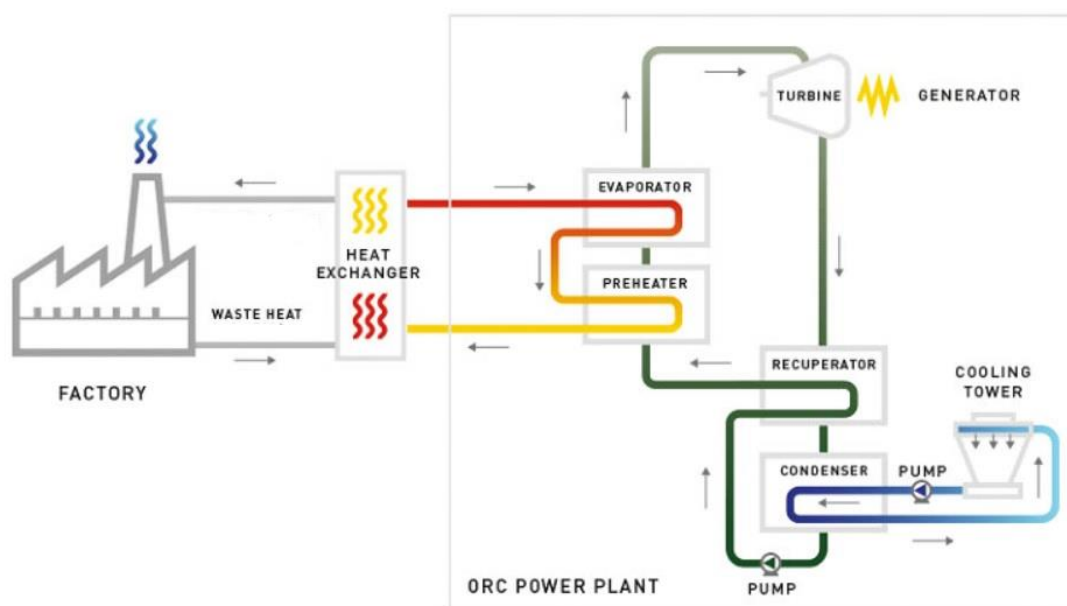
Ideaalse stsenaariumi korral võib Alternatiiv 1 rakendamisel kompressorjaama projekteerimise staadiumis ning jääsoojuse koguse kasvu puhul pidada müüki konkurentsivõimeliseks ka hakkepuidul köetava kaugküttevõrguga.

Arvestades aga reaalse olukorra väikest erinevust praeguse soojuse müügihinnaga Paldiskis, milleks on 52,75 €/MWh (01.11.2018 seisuga) ning jääsoojuse kõrget sporaadilisust, mis nõuab täiendavaid seadmeid soojussalvestuseks võib pidada antud lahendust pidada Paldiski kaugküttevõrgu haldaja jaoks ebaatraktiivseks. Lisafaktorina võib välja tuua, et tasuvushinnangute korral ei ole ka jääsoojuse müüjale atraktiivne investeerida suuri summasid, millel on kõrge risk.

### 7.3. Alternatiiv 2. Jääsoojusest elektri tootmine

Erinevate alternatiivide väljatöötamisel ning analüüsimisel on jääsoojuse üheks utiliseerimise võimaluseks ka elektri tootmine. Elektrit tootes on seda võimalik kasutada ka kompressorjaamas paiknevate seadmete käitamiseks, hoonete valgustamiseks ja soojustamiseks.

Jääsoojuse muundamisel elektrienergiaks kasutatakse tasuvusarvutuste läbiviimisel ORC-tehnoloogia kasutust, mis võimaldab utiliseerida madalatemperatuurilist soojust. Jääsoojusest elektri tootmine toimub vastavalt järgneval joonisel kujutatud viisil (vt. Joonis 7.9) [35].



Joonis 7.9 - Jääsoojusest ORC-tehnoloogiaga elektritootmise töösükkel

Komprimeeritud gaasi jahutamisel ning seadmete käitusest tingitud soojust antakse soojusvaheti abil üle vahepealsele soojuskandjale, mis tavaliselt on õli, vesi või aur. Vahepealse soojuskandja abil antakse soojust omakorda üle orgaanilisele vedelikule ORC-mooduli aurustis, kus toimubki orgaanilise vedeliku aurustumine. Aurustunud vedelik suunatakse turbiini, kus aur paisub ning muutub kineetiliseks energiaks, mis omakorda paneb turbiini pöörlema. Turbiin paneb pöörlema generaatori, mis toodab elektrienergiat. Aurustunud orgaaniline vedelik liigub edasi kondensaatorisse, kus aur veeldatakse ning ringluspumba abil algab kirjeldatud töösükkel uuesti [35].

**Jääsoojusest ORC-tehnoloogiaga elektritootmise eelised:**

- Võrreldes tavalise termodünaamilise tsükliga (nn. Rankine'i tsükkel), on ORC-tehnoloogiaga võimalik saavutada paremat süsteemi efektiivust madalatemperatuurilist soojust kasutades
- Vee eeltöötlemine pole vajalik
- Jääsoojusest elektri tootmine suurendab süsteemi koguefektiivsust
- Vähendatakse elektritarbimist, mida toodetakse fossiilsetest kütustest, sealhulgas mõjub positiivselt ökoloogilisele jalajäljele
- Seadmetel madal amortisatsioon ning lihtne hooldada
- Jaam on väga kiiresti võimeline täielikust seisakust saavutama nimiväärtusel tööparameetrid [35]

**Puudused:**

- Kõrged rajamismaksumused
- ORC-kontuuri soojuskandjad on kergesti süttivad

Elektri tootmist käsitletakse antud töös, et leida võimalikke alternatiive jääsoojuse kasutamisel. ORC-tehnoloogiast elektri tootmine on tööstuses üha laialdasemalt levinud just eelpool mainitud eeliste tõttu.

Gaasi jahutamisel tekkiva jääsoojuse liiga madala temperatuuri tõttu, seab see piirangud antud alternatiivi rakendamisel. Erinevatele andmetele tuginedes saab ORC-tehnoloogiat kasutada, kui minimaalne jääsoojuse temperatuur on 90°C [35]. Antud parameeter lisab aga täiendavad takistused jääsoojusest elektritootmisele. Põhjuseks just lisainvesteering soojuspumba näol ning täiendavad kulud elektrienergiale soojuspumba käitamiseks, mis muudab elektri tootmise tasuvuse hinnangul täiesti tarbetuks võrgutasude, aktsiisi ning taastuenergia tasu tõttu.



## KOKKUVÕTE

Balticconnectori projekti jääsoojuse utiliseerimisvõimaluste hindamine Paldiski ning Puiatu kompressorjaama näidetel on äärmiselt tähtis just antud projekti ainulaadsuse ning mastaapsuse tõttu Eestis.

Töö aluseks on kompressorjaamade käitamisgraafikute määramine, mis praktilisuse huvides taandati suvisele, keskmisele talvisele ning talvisele tiputarbimisele. Perioodide kestvuse aluseks võeti Eesti keskmine välisõhu temperatuur kuude lõikes aastatel 2010-2018. Piirtemperatuuriks valiti 5°C, mis määras suvise perioodi alguseks 1. aprilli ning talvise perioodi alguseks 16. oktoobri. Talvise tiputarbimise perioodi pikkuseks määrati varasemate aastate põhjal 6 päeva.

Tuginedes ka Kristo Lillepõllu poolt koostatud magistritööle „Eesti-Soome gaasiühenduse projektiga kaasnevate Puiatu ja Kersalu kompressormasinat planeerimisfaasi kaalutlused“ ning Balticconnectori hüdraulilistele arvutustele koostati kompressorseadmete käitamisgraafikud eraldi nii Paldiski kui Puiatu kompressorjaamade kohta.

Nende andmete põhjal on võimalik hinnata jääsoojuse kogust nii seadmete käitamisel kui komprimeeritud gaasi jahutamisel. Kuna kompressorseadmeid käitatakse elektrienergiaga uutest alajaamadest, on jääsoojuse kogus vaid 2% kogu tarbimismahust. Paldiski kompressorjaama puhul on jääsoojuse kogus 238,5 MWh/aastas ning Puiatus 372,1 MWh/aastas.

Suuremad jääsoojuse mahud on võimalik saavutada komprimeeritud gaasi jahutamisel. Rajatatava tehnoloogia korral kasutatakse gaasi jahutamiseks õhk-soojusvahetit, mis paiskab soojust lihtsalt õhku. Hüdraulilise raporti järgi jahutatakse komprimeeritud gaasi temperatuurini 40°C. Varasemalt määratud kompressorseadmete käitamisgraafikute põhjal on vastavate parameetrite korral jääsoojuse maht Paldiskis 2 989 MWh/aastas ning Puiatus 2 881 MWh/aastas. Pärssivaks faktoriks antud jääsoojuse kasulikul utiliseerimisel on madal temperatuur. Reaalsed kasutusvõimalused antud juhul oleks vee või õhu eelsoojendamise katlasüsteemides, kui antud süsteemid paikneksid kompressorjaamade vahetus läheduses. Paldiski ning Puiatu kompressorjaamade läheduses eelmainitud süsteemid puuduvad, mistõttu on jääsoojuse utiliseerimine temperatuuri tõstmata raskendatud. Lisaks on takistavaks faktoriks mõõtmelt suur õhk-soojusvaheti, kus õhku paisatud soojust on tehniliselt raske talletada. Kuna projekti tellija sõnul ei hakata jääsoojust kasutama ka

omatarbeks ning ülekanne kaugemale pole praktiline, siis on välja töötatud ka võimalikud alternatiivid.

Alternatiiv 1 korral asendatakse õhk-soojusvaheti vesi-soojusvahetiga ning soojuspumbaga tõstetakse temperatuur vastavalt tarbija soovidele. Kõige potentsiaalsemaks tarbijaks on Paldiski kaugküttevõrk, mis vastavalt 2016. aastal koostatud piirkonna soojusmajanduse arengukavale on nõus jääsoojust kasutama, kui see vähendaks soojusenergia maksumust tarbijale. Väljapakutud alternatiivi korral jahutatakse komprimeeritud gaas 30°C-ni, mis ligikaudu kahekordistab jääsoojuse mahtu nii Paldiskis kui Puiatus. Komprimeeritud gaas jahutatakse vesi-soojusvahetiga, mille efektiivsuseks on arvutuste teostamisel võetud 85%. Soojuspumba abil tõstetakse temperatuur vastvalt kaugkütte temperatuurigraafikule maksimaalselt 100°C-ni. Antud temperatuurini tõstes on erinevate näidete põhjal soojuspumba efektiivsus 3,0. Kõrge temperatuuriga vesi läbib järgmist soojusvahetit, andes soojuse üle tagastuvale kaugkütteeveele. Mitme soojusvahetiga süsteemi tõttu on kaugküttevõrgule üleantav jääsoojuse maht ligikaudu 4 300 MWh/aastas.

Tasuvuse hindamiseks tehakse antud jääsoojuse koguse kohta hüdraulilised arvutused kaugkütetrassi rajamiseks Paldiski katlamajast kompressorjaama. Paigaldusmeetodit, voolu kiirust ning hüdraulikat arvestades on vajalik toru nimiläbimõõt DN65 ning torustiku pikkus 3 800 meetrit. Trasseeringu maksumuse hindamiseks on aluseks võetud Loksa kaugkütetorustiku rekontsrueerimise eelarve, mis on mastaabilt võrreldav antud projektiga. Indikatiivsed väärtused on võimalik määrata nii ehitus- kui materjalikulude kohta ning trasseeringu kogumaksumuseks on 525 000 €. Soojuspumba efektiivsuse näitaja abil on võimalik määrata ka soojuspumba käitamiseks kuluv elektrienergia maksumus sõltuvalt tarbijahinnaindeksist soojuspumba tehnilise eluea jooksul. Antud väärtustele tuginedes on võimalik määrata jääsoojuse piirhind Paldiski kaugküttevõrku müümisel, mis antud jääsoojuse mahu juures on 51,44 €/MWh. Käesolev piirhind ei võta arvesse uute seadmete (soojusvahetite ning soojuspumba) ostu, mis juhul piirhind suureneks märgatavalt. Antud arvutus annab vaid aimu, et ideaalsetel tingimustel oleks antud piirhind konkurentsivõimeline ka kaugküttevõrguga. Arvestades aga piirhinna väikest langust jääsoojuse mahu suurenedes ning tarbija kauguse vähendamises, jääsoojuse sporaadilisuses ning suurtes investeerimisvõimelises on pakutud alternatiivi risk teostamiseks liiga kõrge.

Teise alternatiivi puhul uuriti töös ka jääsoojusest ORC-tehnoloogiaga elektri tootmise võimalust. Antud tehnoloogia on tööstustes üha laialdasemalt kasutusel ning võimaldab kasutada madalatemperatuurilist soojust. Gaasi jahutatakse aga temperatuurini 30-40°C, mis on liialt madal

antud tehnoloogia kasutamiseks. Kuna vajalik temperatuuri tõstmine tähendab lisakulusid nii soojuspumba soetamise kui selle käitamiseks kuluva elektrienergia maksumusele, on elektri tootmine antud tehnoloogiat kasutades täiesti tarbetu.

Väljapakutud alternatiivide ning reaalse olukorra läbitöötamise ning analüüsimise tulemusena võib jääksoojuse utiliseerimist Paldiski ning Puiatu kompressorjaamades pidada mittetasuvaks. Balticconnector'i projekti käivitumisel, reaalsete tarbimisandmete laekumisel ning uute potentsiaalsete tarbijate tekkimisel võib tulevikus teha täiendavad arvutused, et jääksoojuse utiliseerimise tasuvust uuesti hinnata.

## SUMMARY

The assessment of the waste heat utilization potential of the Balticconnector project based on the examples of the Paldiski and Puiatu compressor stations is extremely important because of the project's uniqueness and large scale.

The basis of the work is the determination of the operating parameters and hours for the compressor stations, which for practical reasons were reduced to summer, average winter and winter peak consumption. The duration of these periods is based on the average monthly outside air temperature of Estonia in 2010-2018. The limit temperature was set at 5 °C, which determined the summer period to begin on 1st April and the winter period on 16th October. Based on previous years the winter peak consumption period was set to 6 days.

Based on the master thesis "Planning-phase Considerations for the Puiatu and Kersalu Compressormachines which Result from the Estonian-Finnish Gas Connection Project" by Kristo Lillepõld and the Balticconnector hydraulic calculations, compressor machine's operating schedules were compiled separately for both Paldiski and Puiatu compressor stations.

Based on this data, it is possible to estimate the amount of waste heat generated due to the operation of the compressor machines and the cooling of the compressed gas. As the compressor equipment is operated with electricity from new substations, the amount of waste heat generated due to compressor machine's operation is only 2% of the total energy consumption. For the Paldiski compressor station, the waste heat amount is 238.5 MWh/per year and for Puiatu it is 372.1 MWh/per year.

Greater waste heat volumes can be achieved by cooling the compressed gas. Current plans dictate that the gas will be cooled with a gas-to-air heat exchanger, which simply emits waste heat into the air. According to the hydraulic report, the compressed gas is cooled to 40 °C. Based on previously determined operating schedules for compressor stations, the waste heat amount at said parameters in Paldiski is 2 989 MWh/per year and in Puiatu is 2 881 MWh/per year.

The barrier for the utilization of the generated waste heat is its low temperature. Realistic applications in this case would be to preheat air or water in the boiler systems if these systems were located in the immediate vicinity of the compressor stations. Since the aforementioned

systems are missing near Paldiski and Puiatu compressor stations, the utilization of the waste heat is difficult without increasing the temperature. In addition, the large-scale gas-to-air heat exchanger proposes additional technical difficulties to utilize the waste heat released into the air.

According to the client, the waste heat will not be used for own use and due to the fact, that the transfer is practical, possible alternatives have also been developed.

The 1st alternative suggests that the gas-to-air heat exchanger is replaced with a gas-to-water heat exchanger and the heat pump raises the temperature according to the demand of the consumer. The most likely consumer is the Paldiski district heating network, which, according to the heat management analysis created in 2016, is willing to use waste heat if it would reduce the cost of heat energy for the consumer.

In the proposed alternative, the compressed gas is cooled to 30 °C, which approximately doubles the volume of waste heat in both Paldiski and Puiatu. The compressed gas is cooled by a gas-to-water heat exchanger, which efficiency for calculation purposes is 85%. Using the heat pump, the temperature is raised to approximately 100 °C according to the parameters of the district heating system. Heat pump's efficiency at defined parameters is 3.0 based on various large-scale examples. High-temperature water passes through the next heat exchanger, giving heat to the returning district heating water. Due to the system with several heat exchangers, the volume of waste heat transferred to the district heating network is approximately 4 300 MWh/per year.

For the assessment of profitability, hydraulic calculations are made for previously determined amount of waste heat to construct a district heating line from the Paldiski boiler plant to the compressor station. Depending on the installation method, the flow rate and the hydraulics, the nominal pipe diameter DN65 is required and total pipe length is 3 800 meters. Estimation of the cost of this construction has been based on the budget for reconstructing the Loksa district heating pipeline, which is largely comparable to the current project. Based on the Loksa project, indicative values can be set for both construction and material costs. Total budget for construction, design and additional costs is set at 525 000€.

The COP of the heat pump is used to determine the cost of electricity for operating a heat pump depending on the consumer price index over the technical lifetime of the heat pump. On the basis of these values, it is possible to determine the waste heat underprice to the Paldiski district heating network, which is 51.44 €/MWh at the given volume of the waste heat. This underprice value does

not take into account the purchase of new equipment (gas-to-water heat exchangers and a heat pump), in which case the underprice would increase significantly. This calculation only gives an idea that under ideal conditions this underprice would be competitive with the district heating network. However, given the small drop in underprice value as the volume of waste heat increases and consumer distance reduces, the sporadic nature of waste heat and large capital investments, the proposed alternative's risk is too high to be carried out.

The second alternative investigates the possibility of producing electricity from waste heat with ORC-technology. This technology is becoming more widely used in industries and allows the utilization of low temperature heat. However, the gas is cooled to 30-40 °C, which is too low to use in this technology. Since the necessary temperature increase means additional costs for both the cost of purchasing a heat pump and the cost of electricity used to operate it, the production of electricity using this technology is completely unprofitable.

As a result of the proposed alternatives and the analysis of the real situation, the utilization of waste heat at Paldiski and Puiatu compressor stations can be considered as not profitable. In the future, additional calculations can be made to reassess the profitability of waste heat utilization, when the Balticconnector project is operating, real consumption data is collected, and new potential consumers are created.

## KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] AS Elering, „Eesti gaasiülekandevõrgu arengukava aastatel 2019-2028,“ Tallinn, 2019.
- [2] AS Elering, „Eesti gaasiülekandevõrgu arengukava 2016-2025,“ Tallinn, 2016.
- [3] A. Nasir, „Techno-Economic Study of Gas Turbine in Pipeline Applications,“ 2013.
- [4] Górnice Biuro Projektów Pangaz, Biuro Studiów i Projektów Gazownictwa Gazoprojekt, „Hydraulic Analysis Report. Document No: 12516-PGZ-ALL-RPT-PR-0072-02,“ Krakow, 2017.
- [5] Riigi Ilmateenistus, „Riigi Ilmateenistus,“ [Võrgumaterjal]. <https://www.ilmateenistus.ee/kliima/kliimakaardid/>. [Kasutatud 14 Aprill 2019].
- [6] K. Lillepõld, „Eesti-Soome gaasiühenduse projektiga kaasnevate Puiatu ja Kersalu kompressormasinate planeerimisfaasi kaalutlused,“ Tallinn, 2016.
- [7] Gasum Oy, „Finnish gas transmission system tariffs effective. Consultation document on preliminary tariffs,“ 15 Veebruar 2019. [Võrgumaterjal]. [https://www.gasum.com/globalassets/maakaasumarkkinalaki/consultation-document\\_preliminary-tariffs.pdf](https://www.gasum.com/globalassets/maakaasumarkkinalaki/consultation-document_preliminary-tariffs.pdf). [Kasutatud 14 Aprill 2019].
- [8] Control Process, „Process Gas Cooler GKJ102-AC-01. Assumption Drawing,“ 2019.
- [9] A. Ots, Soojustehnika algkursus, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2011.
- [10] The Engineering Toolbox, „Minor Pressure Head Loss in Pipe and Duct Components,“ [Võrgumaterjal]. [https://www.engineeringtoolbox.com/minor-pressure-loss-ducts-pipes-d\\_624.html](https://www.engineeringtoolbox.com/minor-pressure-loss-ducts-pipes-d_624.html). [Kasutatud 12 Märts 2019].
- [11] Engineering Toolbox, „Specific Heat and Individual Gas Constant of Gases,“ [Võrgumaterjal]. [https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-gases-d\\_159.html](https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-gases-d_159.html). [Kasutatud 25 Aprill 2019].
- [12] K. Wark, Thermodynamics, 4th toim., R. R. Donnelley & Sons Company, 1983.
- [13] Sesino, „Shell and tubes heat exchanger water gas high pressure,“ [Võrgumaterjal]. <https://www.sesino.com/en/products/scambiatori-fascio-tubiero-acqua-gas-alta-pressione/>. [Kasutatud 9 Mai 2019].
- [14] Engineering Toolbox, „Heat Pumps - Performance and Efficiency Ratings,“ [Võrgumaterjal]. [https://www.engineeringtoolbox.com/heat-pump-efficiency-ratings-d\\_1117.html](https://www.engineeringtoolbox.com/heat-pump-efficiency-ratings-d_1117.html). [Kasutatud 11 Mai 2019].

- [15] European Heat Pump Association, „Large scale heat pumps in Europe,“ [Võrgumaterjal]. [https://www.ehpa.org/fileadmin/red/03.\\_Media/03.02\\_Studies\\_and\\_reports/Large\\_heat\\_pumps\\_in\\_Europe\\_MDN\\_II\\_final4\\_small.pdf](https://www.ehpa.org/fileadmin/red/03._Media/03.02_Studies_and_reports/Large_heat_pumps_in_Europe_MDN_II_final4_small.pdf). [Kasutatud 11 Mai 2019].
- [16] SusDev Consulting OÜ, „Soojuse tootmise, jaotamise ja müügiga seotud põhivarade kasuliku (tehnilise) eluea määramine (hindamine),“ EV MKM Konkurentsiamet, 2012.
- [17] AS Elering, „Aprillis liikusid elektri börsihinnad tõusu suunal,“ 8 Mai 2019. [Võrgumaterjal]. <https://elering.ee/aprillis-liikusid-elektri-borsihinnad-tousu-suunal>. [Kasutatud 12 Mai 2019].
- [18] Elektrilevi AS, „Elektrilevi võrguteenuse hinnakiri,“ 1 Oktoober 2018. [Võrgumaterjal]. [https://www.elektrilevi.ee/-/doc/6305157/kliendile/elektrilevi\\_hinnakiri\\_vorguteenuse\\_hinnad\\_alates\\_1\\_jaanuarist\\_2019\\_EST.pdf](https://www.elektrilevi.ee/-/doc/6305157/kliendile/elektrilevi_hinnakiri_vorguteenuse_hinnad_alates_1_jaanuarist_2019_EST.pdf). [Kasutatud 12 Mai 2019].
- [19] Rahandusministeerium, „Majandusprognosid,“ 4 Aprill 2019. [Võrgumaterjal]. <https://www.rahandusministeerium.ee/et/riigieelarve-ja-majandus/majandusprognosid>. [Kasutatud 12 Mai 2019].
- [20] HeatConsult OÜ, „Paldiski linna soojusmajanduse arengukava aastateks 2016-2026,“ 2016. [Võrgumaterjal]. <https://www.riigiteataja.ee/aktiivisa/4211/0201/6053/arengukava.pdf>. [Kasutatud 9 Märts 2019].
- [21] OÜ Keskkonnaprojekt, *Paldiski linna soojustorustike rekonstrueerimine (Töö nr. 1734)*, Tallinn, 2018.
- [22] „Google Maps,“ 2019. [Võrgumaterjal]. <https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=1EOLeOCQWxse-kgnx97Pwmpm7wEk&ll=58.83858094654395%2C24.848254500000053&z=8>. [Kasutatud 2 Märts 2019].
- [23] Eesti Jõujaamade ja Kaugkütte Ühing, *Eelisoleeritud kaugküttetorustike projekteerimine ja paigaldamine. Juhendmaterjalid. Osad 1-8*, Tallinn: OÜ Gutenbergi pojad, 2014.
- [24] Eesti Jõujaamade ja Kaugkütte Ühing, *Eelisoleeritud kaugkütte torustike projekteerimine ja paigaldamine. Juhendmaterjalid. Osad 9. 12.-18.*, Tallinn: OÜ Gutenbergi pojad, 2016.
- [25] I. Klevtsov, *Tööstustorustikud ja kaugküttevõrgud*, Tallinn, 2015.
- [26] Spirax Sarco, „Steam Tables,“ [Võrgumaterjal]. <http://www.spiraxsarco.com/global/us/Resources/Pages/Steam-Tables/sub-saturated-water.aspx>. [Kasutatud 11 Märts 2019].



- [27] Engineering Toolbox, „Water - Heat Capacity (Specific Heat),“ [Võrgumaterjal].  
[https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-water-d\\_660.html](https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-water-d_660.html).  
 [Kasutatud 24 Mai 2019].
- [28] L. Tepaks, „Hüdraulika,“ Tallinn, Valgus, 1967, pp. 89-99, 113-118, 124-127, 130-139.
- [29] G. P. W, „Engineering Fluid Mechanics,“ New York, Tom & Francis Publishers, 2001, pp. 276-277.
- [30] M. C. Potter, D. C. Wiggert, B. h. Ramad ja T. I.-P. Shih, „Mechanics of Fluids, SI Edition,“ Boston, Cengage Learning Solutions, 2015, p. 544.
- [31] Spray, „Roughness of Pipes,“ [Võrgumaterjal].  
[https://www.spray.com/calculators/Pressure\\_Drop\\_Calc/rauh.html](https://www.spray.com/calculators/Pressure_Drop_Calc/rauh.html). [Kasutatud 12 Märts 2019].
- [32] R. Shankar Subramanian, „Minor losses,“ [Võrgumaterjal].  
<https://web2.clarkson.edu/projects/subramanian/ch330/notes/Minor%20Losses.pdf>.  
 [Kasutatud 30 Mai 2019].
- [33] SW Energia OÜ, „Müügihind Paldiski kaugküttevõrgus,“ [Võrgumaterjal].  
<https://swenergia.ee/ala/paldiski-kaugkuttevorgus/>. [Kasutatud 12 Mai 2019].
- [34] OÜ Hendrikson & Ko, „Viljandi vallas Väike-Kõpu külas katastriüksuse 62902:002:0383 ja 62902:001:1050 detailplaneering,“ [Võrgumaterjal].  
[https://www.viljandivald.ee/documents/11546/8790342/RLE08\\_Lisa1\\_DP\\_seletuskiri.pdf/88947078-6b4a-4e1d-8232-7d0347e80158](https://www.viljandivald.ee/documents/11546/8790342/RLE08_Lisa1_DP_seletuskiri.pdf/88947078-6b4a-4e1d-8232-7d0347e80158). [Kasutatud 30 Mai 2019].
- [35] Exergy S.p.A, „Heat Recovery from Industrial Process,“ [Võrgumaterjal]. <http://www.exergy-orc.com/application/heat-recovery-from-industrial-process>. [Kasutatud 14 Mai 2018].

# LISAD

## Lisa 1 – Hüdrauliliste arvutuste simulatsioon (keskmine talvine tarbimine, Soome -> Eesti)

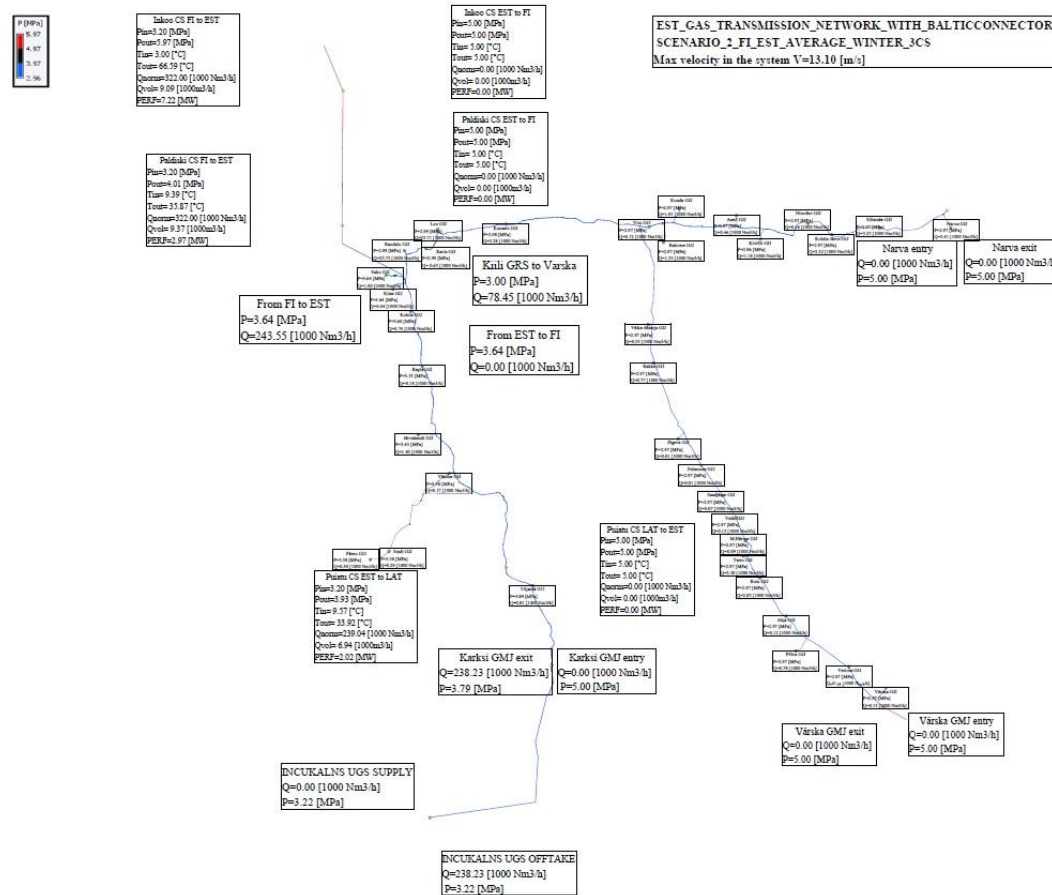


Fig. No 28

## Lisa 2 – Hüdrauliliste arvutuste simulatsioon (suvine tarbimine, Soome -> Eesti)

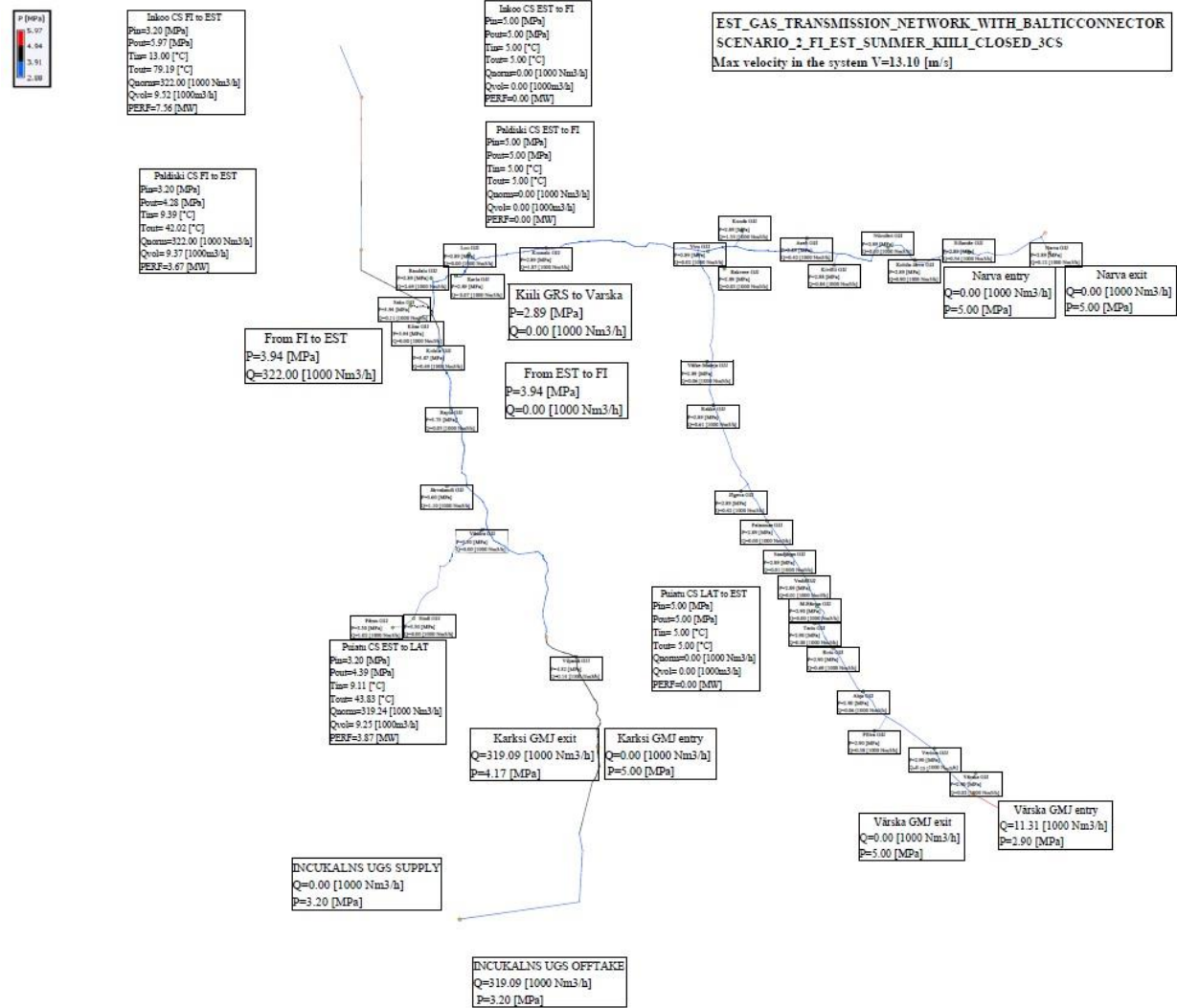


Fig. No 36

### Lisa 3 – Hüdrauliliste arvutuste simulatsioon (keskmise talvine tarbimine, Eesti -> Soome)

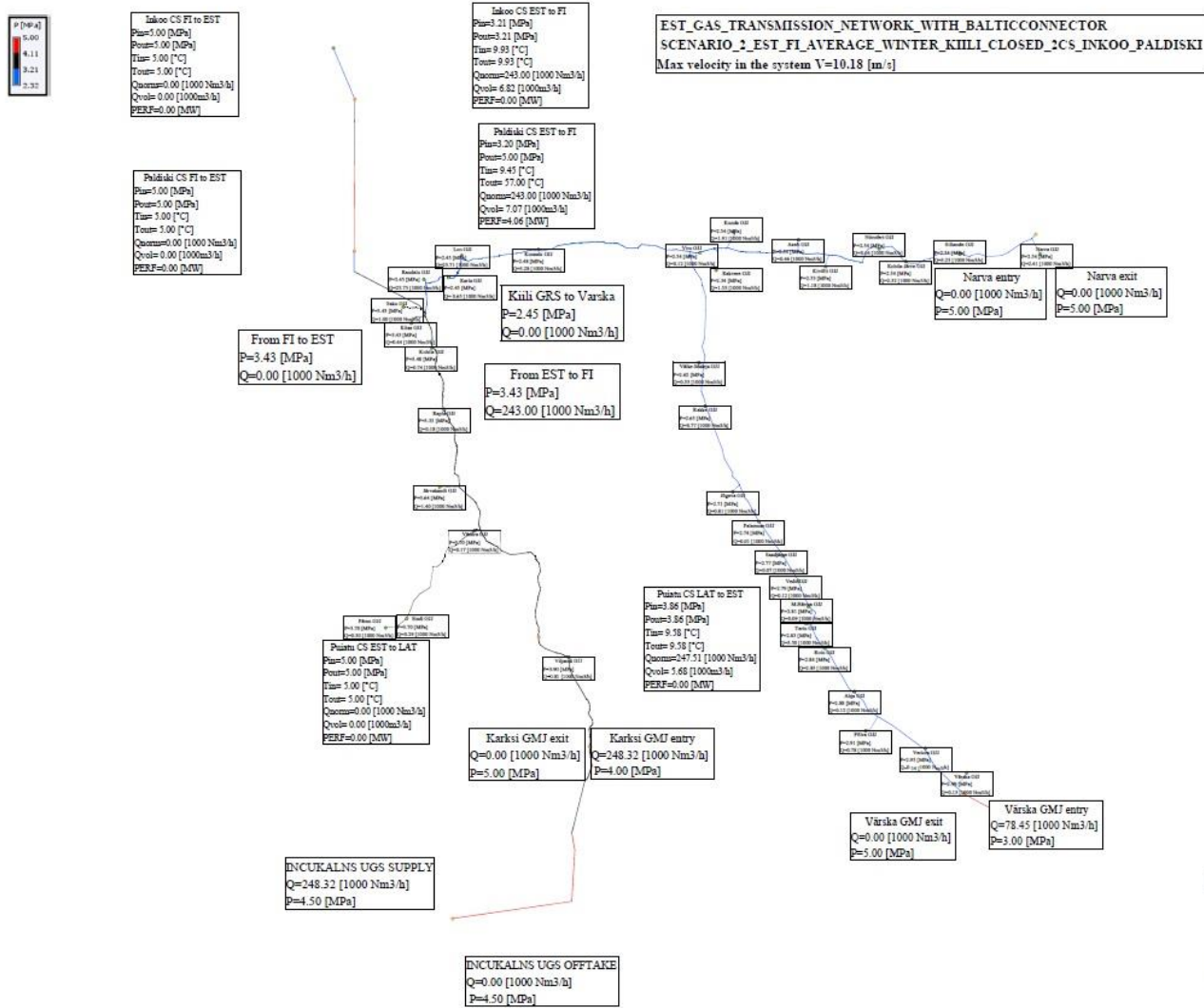


Fig. No 52