

Energiatehnoloogia instituut

**KAUGJAHUTUSVÕRGU MODELLEERIMINE
TALLINNAS**

**MODELING THE DISTRICT COOLING NETWORK IN
TALLINN**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Ergo Pärnits

Üliõpilaskood 221502MASM

Juhendaja: Igor Krupenski, vanemlektor

Tallinn 2024

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.

"....." 2024.

Autor:

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

"....." 2024.

Juhendaja:

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

"....."2024.

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ allkirjastatud digitaalselt /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Ergo Pärnits (*autori nimi*) (sünnikuupäev: 13.10.1980)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Kaugjahutusvõrgu modelleerimine Tallinnas”,

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on Igor Krupenski,

(juhendaja nimi)

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

¹*Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.*

/ allkirjastatud digitaalselt /

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Ergo Pärnits, 221502MASM

Õppekava, peeriala: MASM02/22 – Energiatehnoloogia ja soojusenergeetika

Juhendaja(d): vanemlektor, Igor Krupenski, +372 5800 3989

Konsultant: Aleksandr Ledvanov, juhatuse liige

HEATCONSULT OÜ, +372 554 7884, aleksandr@heatconsult.ee

Lõputöö teema:

(eesti keeles) *Kaugjahutusvõrgu modelleerimine Tallinnas*

(inglise keeles) Modeling the District Cooling Network in Tallinn

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Kaugjahutusvõrk ja selle toimimise printsiibid
2. Modelleerida kaugjahutusvõrgu toimimist tulenevalt jahutusjaama asukohast
3. Hinnata saadud tulemusi

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Leanheat programmi õpe. Andmete sisestamine ja modelleerimine	31.01.2024
2.	Tulemuste hindamine ja analüüs. Põhiosa koostamine.	30.04.2024
3.	Kokkuvõte, lisad, vormistamine.	15.05.2024
4.	Töö esitamine eelkaitsmiseks.	20.05.2024

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** ".....".....2024.a

Üliõpilane: Ergo Pärnits ".....".....2024.a

/ allkirjastatud digitaalselt /

Juhendaja: Igor Krupenski ".....".....2024.a

/ allkirjastatud digitaalselt /

Konsultant: Aleksandr Ledvanov ".....".....2024.a

/ allkirjastatud digitaalselt /

Programmijuht: Alar Konist ".....".....2024.a

/ allkirjastatud digitaalselt /

SISUKORD

JOONISTE LOETELU	6
TABELITE LOETELU	8
EESSÕNA	9
LÜHENDTE JA TÄHISTE LOETELU	10
ÜHIKUTE LOETELU.....	10
SISSEJUHATUS	11
1. KAUGJAHUTUS	13
1.1 Jahutus globaalselt	13
1.2 Jahutussektor Euroopas.....	14
1.3 Kaugjahutuse tehnoloogiad	16
1.4 Põhi- ja jaotusvõrk.....	18
1.5 Jahutusgraafik.....	19
1.6 Jahutuskoad.....	21
1.7 Jahutussõlm.....	21
1.8 Aktuaalsed küsimused ja väljakutsed	22
2. KAUGJAHUTUSVÕRGU MODELLEERIMINE.....	24
2.1 Andmed, andmete kogumine ja analüüs	26
3. MODELLEERIMISE TULEMUSED.....	36
3.1 Kaugjahutusjaamad	36
3.2 Tarbijad.....	37
3.3 Kaugjahutusvõrk	37
3.4 Ülemiste kaugjahutusjaama avariolukord	44
KOKKUVÕTE	51
SUMMARY.....	53
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	55
LISA 1.....	58

JOONISTE LOETELU

Joonis 1.1 Jahutuse ja soojuse lõppkasutuse võrdlus EL-s [6]	15
Joonis 1.2 Elektri tarbimine jahutamiseks riikide võrdluses [6]	16
Joonis 1.3 Kaugjahutuse tehnoloogiad [8]	17
Joonis 1.4 Rõhud jaotustorustikus talve ja suvetingimustes [8]	18
Joonis 1.5 jahutusgraafik sõltuvalt välistemperatuurist [8]	20
Joonis 1.6 Jahutussõlme sõltumatu ühenduse skeem [8]	22
Joonis 2.1 Modelleerimistarkvarast näidis väljatrükk Leanheat tarkvarast [15]	25
Joonis 2.2 Tarbijate arvu suhe jahutusvõimsusele, MW [15]	28
Joonis 2.3 Olemasoleva jahutustorustiku paiknemine, väljatrükk ArcGis tarkvarast [19]	30
Joonis 2.4 Planeeritud kaugjahutustorustik aastaks 2030, väljatrükk ArcGis tarkvarast [19].....	31
Joonis 2.5 Jahutusjaamade ja põhitorustiku paiknemine, väljatrükk ArcGis tarkvarast [19].....	32
Joonis 2.6 Kaugjahutustorustik ja jaamad modelleerimise stsenaarium M1 korral, väljatrükk Leanheat tarkvarast [15]	33
Joonis 2.7 Kaugjahutustorustik ja jaamad modelleerimise stsenaarium M2 korral, väljatrükk Leanheat tarkvarast [15]	34
Joonis 2.8 Jahutustorustik Paljassaare jahutusjaamast kuni Mere pst alguseni, väljatrükk ArcGis tarkvarast [19].....	35
Joonis 2.9 Sadama ja Paljassaare jaamade võimalikud vabajahutuspiirkonnad, väljatrükk ArcGis [19]	35
Joonis 3.1 Jahutusjaamade võimsused modelleerimiste stsenaariumid M1 ja M2 korral [15].....	36
Joonis 3.2 Toru pikkused meetrites ja läbimõõdud [15]	38
Joonis 3.3 Jahutuskadude võrdlus stsenaariumite M1 ja M2 korral [15]	39
Joonis 3.4 Pealevoolu vooluhulgad, t/h ja vee voolamiskiirused, m/s [15].....	41
Joonis 3.5 Pagasivoolu vooluhulgad, t/h ja vee voolamiskiirused, m/s [15]	41
Joonis 3.6 Pealevoolu toru läbimõõt, DN ja rõhukadu modelleerimise stsenaarium M1 korral, Pa/m [15]	42
Joonis 3.7 Pealevoolu toru läbimõõt, DN ja rõhukadu modelleerimise stsenaarium M2 korral, Pa/m [15]	43
Joonis 3.8 Tagasivoolu toru läbimõõt, DN ja rõhukadu modelleerimise stsenaarium M1 korral, Pa/m [15]	43
Joonis 3.9 Tagasivoolu toru läbimõõt, DN ja rõhukadu modelleerimise stsenaarium M2 korral [15].....	44

Joonis 3.10 Kaugjahutustorustik ja jaamad modelleerimise avariistsenaariumi M1-A1 korral, väljatrükk Leanheat tarkvarast [15].....	45
Joonis 3.11 Modelleerimise avariistsenaariumi M1-A1 jahutusjaamade andmed, väljatrükk Leanheat tarkvarast [15].....	46
Joonis 3.12 Modelleerimise stsenaarium M1 jahutusjaamade andmed, väljatrükk Leanheat tarkvarast [15].....	47
Joonis 3.13 Sadama piirkonna pealevoolurõhud, bar ja rõhkudevahed võrdluses stsenaariumide M1 ja avariistsenaariumis M1-A1, bar [15]	48
Joonis 3.14 Ülemiste piirkond, M1 modelleerimise stsenaarium, väljatrükk Leanheat tarkvarast [15].....	49
Joonis 3.15 Ülemiste piirkond, modellerimiste stsenaariumite pealevoolu rõhud, bar ja rõhkudevahed bar M1 ja M1-A1 korral [15].....	50

TABELITE LOETELU

Tabel 2.1 Kaugjahutusjaamade piirväärtused Mudel 1 ja Mudel 2 korral [15]	26
Tabel 2.2 DN tähisele vastavad toru välisläbimõõdud, mm [20]	29
Tabel 3.1 Stsenaariumite M1 ja M2 summeeritud jahutuskaod ΔT 9,5 °C korral [15] .	39
Tabel 3.2 Stsenaariumite M1 ja M2 summeeritud jahutuskaod ΔT 0 °C korral [15]	40
Tabel 3.3 Modelleerimise avariistsenaarium M1-A1 ja stsenaarium M1 andmed võrdluses [15].....	47

EESSÕNA

Käesoleva magistritöö teema sõnastati AS Utilitas Tallinn kaugjahutusosakonna juhataja Tanel Kirs ja töö autori Ergo Pärnits ühisel algatusel. Teema on aktuaalne tulenevalt kliimaeesmärkidest ja edasiste reaalsete ehitustööde teostamisest ning planeerimisest. Töö põhilised algandmed, mida on kasutatud modelleerimistarkvaraga töötamisel, koguti AS Utilitas Tallinn kaugjahutusosakonna andmebaasist ja avalikest registritest, koostöös kaugjahutusosakonna juhatajaga Tanel Kirs.

Soovin tänada innustamise, juhendamise ja toetamise eest Igor Krupenskit, modelleerimistarkvara Leanheat kasutuskoolituse ja konsultatsioonide läbiviijat Aleksandr Ledvanovi, AS Utilitas Tallinn kaugjahutusosakonna juhatajat Tanel Kirsi, Tallinna Linnavalitsust, hindamaks minu magistritöö teemat Raestipendiumi vääriliseks ning AS Utilitas Tallinna, hindamaks minu magistritöö teemat Utilitase puhta energia magistriõppe stipendiumi vääriliseks.

Töö raames on modelleeritud osaliselt ehitatud ja osaliselt planeeritud kaugjahutusvõrku. Tulenevalt planeeringust on vaja rajada täiendav kaugjahutusjaam, kas Sadama piirkonda kesklinnas või Paljassaarde ning seejärel koostada modelleerimise stsenaarium, arvestades olemasolevate jahutusjaamadega Masina tänaval ja Ülemiste piirkonnas.

Võrrelda kahte stsenaariumi, tuues välja põhilised võrgu parameetrid ja nende erinevused eeldusel, et mõlemad võrgu modelleerimise stsenaariumid on realselt teostatavad. Modelleerida avariiolukorda, kui üks jahutusjaamadest seiskub ning tuua välja antud olukorra olulisemad võrgu parameetrid ja hinnata võrgu toimimist. Modelleerimised annavad piisavalt andmeid olemasoleva ja planeeritava võrgu edasiste arengute võimaluste kohta ja modelleerida uusi olukordi uute tarbijatega liitumisel ning ka avariiolukordadest.

Kaugjahutus, kaugjahutusvõrgu modelleerimine, rõhk, vee voolamiskiirus, magistritöö

LÜHENDTE JA TÄHISTE LOETELU

DN – tähtarvuline torustikuelementide suuruse tähis

KJJ - kaugjahutusjaam

M1-A1 – avariolukorra modelleerimise stsenaarium

M1 – modelleerimise stsenaarium üks

M2 – modelleerimise stsenaarium kaks

PV – jahutussüsteemi pealevool

TV – jahutussüsteemi tagasivool

ÜHIKUTE LOETELU

ΔT – temperatuuride erinevus ($^{\circ}\text{C}$)

bar – mittesüsteemne absoluutse rõhu mõõtühik, $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$

barg - ühik rõhu mõõtmiseks, saadakse absoluutse- ja atmosfäärirõhu vahe arvutamisel

K – temperatuuri mõõtühik SI-süsteemis

m – pikkuse mõõtühik SI-süsteemis

m/s – meeter sekundis

Pa – rõhu mõõtühik SI-süsteemis

Pa/m – rõhukadu meetri kohta

W – võimsuse ühik SI-süsteemis

W/m² – soojusjuhtivustegur SI-süsteemis

SISSEJUHATUS

Maailm seisab praegu silmitsi tõsiste keskkonna- ja energiaprobleemidega. Kasvuhoonegaaside heitkogused on suur oht keskkonnale. Praegu mõjutab maakera pidevalt suurenev CO₂ kogus atmosfääris. Kodumajapidamised tarbivad maailmas umbes kolmandiku energia kogu lõpptarbimisest. Parasvöötme kliimaga riikides kasutatakse üle poole sellest energiast tavaliselt kütteks. Kuigi ruumi jahutamine on praegu palju vähem oluline energiakasutus, kasvab see kiiresti nii suure sissetulekuga riikides kui ka areneva majandusega riikides, nagu India ja Hiina. Kütte ja jahutuse energianõudluse suundumused võivad seetõttu olla energiasüsteemi ja sellega seotud heitkoguste arengu seisukohalt väga olulised. Üks seda arengut mõjutavatest teguritest on kliimamuutus. [1]

Seoses kasvava nõudlusega jahutusenergia järele on piirkonna tasandil või tsentraliseeritud jahutussüsteemide kasutuselevõtt jõuliselt kasvanud. See huvi tuleneb mitmest tegurist, sealhulgas võimalusest saavutada märkimisväärne mastaabisääst, see tähendab energiateenuse osutamise keskmiste kulude madalam tase, ja mis on oluline, saavutada materiaalselt keskkonnakasu. On ka muid eeliseid, nagu võimalus vähendada jahutamiseks kuluvat energiat, vähendada külmutusagensi kasutamist ning leevendada soojusaarte mõju ja müra- ning õhusaastet linnapiirkondades. [2]

Pakett „Eesmärk 55“ koosneb ettepanekutest ELi õigusaktide läbivaatamiseks ja ajakohastamiseks ning uute algatuste käivitamiseks, et tagada ELi poliitika kooskõla nõukogu ja Euroopa Parlamendi poolt kokku lepitud kliimaeesmärkidega. „Eesmärk 55“ viitab ELi eesmärgile vähendada 2030. aastaks kasvuhoonegaaside netoheidet vähemalt 55%. Kavandatava paketi eesmärk on viia ELi õigusaktid selle 2030. aastaks seatud eesmärgiga kooskõlla. [3]

Kiire linnastumise ja kliimamuutuste tingimustes on kaasaegsed linnad üha enam keskendunud jätkusuutlikule ja energiatõhusale infrastruktuurile. Kaugjahutus, süsteem, mis tsentraliseerib jahutusenergia tootmise ja jaotamise, pakub olulisi võimalusi linnade jätkusuutlikkuse parandamiseks. Võrreldes tavapäraste kohalike jahutussüsteemidega, võib kaugjahutus vähendada energiatarbimist, vähendada süsinikdioksiidi heitmeid ja parandada linnade õhukvaliteeti ja mürataset.

Tallinn, Eesti pealinn, kogeb oma kasvava ärisektori ja elamusektori tõttu suurenevat jahutusvajadust. Selle vajaduse rahuldamiseks ning samal ajal karmide keskkonnanõuete ja kliimaeesmärkidega kooskõlas olemiseks on oluline arendada tõhusat kaugjahutusvõrku. Käesolev magistritöö uurib sellise võrgu modelleerimist

Tallinnas, kasutades Leanheat tarkvara, mis võimaldab jahutussüsteemide üksikasjalikku analüüsi ja optimeerimist.

Tallinna kaugjahutuse võrgu väljaehitamine ja edaspidine laienemine on samuti üks osa sellest, kuidas aidata suures plaanis täita kliimaeesmärke, säästes seeläbi keskkonda, ressursse ja parandada elukeskkonna kvaliteeti. Kaugjahutusvõrgu modelleerimine Leanheat tarkvaraga aitab saada ülevaadet juba ehitatud ja planeeritava võrgu parameetritest. Modelleerimise moodustavad kolm põhilist osa, kus võetakse arvesse jahutatud vee tootmist, torustikku ja tarbimist. Modelleerimise tarkvara võimaldab sisestada ja arvesse võtta algandmeid, mis tavameetodil valemite kasutades arvesse võtta ei ole võimalik või on äärmiselt keeruline. Kogu võrgu uuesti läbiarvutamine, kuna on näiteks vaja muuta toru läbimõõtu tulenevalt tarbija lisandumisest või jahutuskooormuse muutusest, tavameetodil valemite baasil võtaks väga kaua aega ja oleks ressursi ebaotstarbekas kasutamine. Võrgu modelleerimise peamiseks ülesandeks on, tulenevalt planeeritava kaugjahutusjaama asukohast, võrgu peamiste parameetrite võrdlemine. Modelleeritavas kaugjahutusvõrgus on töös Masina tänava ja Ülemiste piirkonna kaugjahutusjaamad, mis omavahel torustikuga ühendatud. Planeeritud on juurde ehitada täiendav kaugjahutusjaam Sadama piirkonda kesklinnas või Paljassaarde. Mõlemal juhul soovitakse kasutada Merevett jahutusressursina. Modelleerimise stsenaariumid annavad ülevaate võrgu põhilistest andmetest, mida võrreldes saab edasist võrku planeerida võimalikult keskkonnasäästlikult ja majanduslikult otstarbekalt, arvestades tarbija vajadusi. Samuti modelleeritakse tarkvaraga Ülemiste jahutusjaama avariiolekorda, et saada andmeid tagamaks varustuskindlust olulistele objektidele. Siinjuures tuleb ära märkida, et käesolev töö ei hõlma finantsarvutusi.

1. KAUGJAHUTUS

Linnaaladel hoonete jahutamiseks külma tõhus edastamine on kaugjahutussüsteemi peamine eesmärk. Ühendades kliendi saadaoleva külmaallikaga, on ressursikasutus tõhusam võrreldes lokaalsete seadmetega. Külmaallikaks võivad olla kas taastuvad loodusvarad või ressursid, mis lähevad kaduma, kui neid ei kasutata. Kaugjahutusvõrgus on külmakandjaks vesi, mis on rõhu all. Kaugjahutuse peamine eelis võrreldes lokaalsete seadmetega on kõrgem energiatõhusus, madalam primaarenergia vajadus, vähem süsinikdioksiidi heitmeid ja väiksem sõltuvus energia impordist. Kaugjahutust kasutatakse peamiselt ruumide jahutamiseks ja tööstusprotsessides. Selleks et olla konkurentsivõimeline teiste tehnoloogiatega, peaksid jaotustorustikud olema pigem lühikesed. See tingimus on enamasti täidetud tiheasustusega linnaaladel. [4]

Külma võib defineerida kui ümbritseva keskkonna temperatuuri alandamiseks vajaliku soojushulga eemaldamist. Seega tekitatakse ja tarnitakse soojuse eemaldamise teel külma erinevateks otstarveteks, et alandada eseme või objekti temperatuuri ettenähtud väärtuseni. [4]

Kaugjahutust kasutatakse peamiselt hoonete ruumide jahutamiseks soojuse eemaldamise teel, tagamaks mugavat sisetemperatuuri kuuma perioodi ajal. Selle saavutamiseks võib igasse ruumi paigaldada individuaalse jahutusseadme, kasutades tsentraalset jahutussüsteemi hoones või kaugjahutuse abil. Individuaalne jahutus tähendab, et külma toodetakse lokaalselt igas ruumis, samal ajal tsentraalne jahutus tähendab süsteemi, kus külma toodetakse ühes või mitmes kohas hoonepõhiselt. Kui aga kasutatakse kaugjahutust, siis külma toodetakse tsentraalselt mitmele hoonele ja jahutustorustiku kaudu juhitakse jahutatud vesi tarbija jahutusõlmedesse. [4]

1.1 Jahutus globaalselt

Varased kaugjahutussüsteemid loodi 1962. aastal Hartfordis USA-s, 1967 aastal Hamburgis ja Pariisist väljaspool asuvas La Defense linnaosas. Suuremad kaugjahutussüsteemid on linnades nagu Singapur, Tokyo, Stockholm, Pariis, Dubai, Chicago, Toronto, Courbevoie väljaspool Pariisi, Helsingi, Barcelona, Viin, Berliin jne. Kaugjahutussüsteemide koguarv maailmas on teadmata, kuid Euroopas on töös ligikaudu 150 kaugjahutussüsteemi. Rahvusvaheliselt on domineerivaks kasutajakategooriaks teenindussektori hooned, samas kui elamud on levinumad Lähis-

Idas, kus kaugjahutussüsteemid varustavad ligikaudu 7% kogu jahutusvajadusest. Kaugjahutust kasutavate teenindussektori hoonete osakaal on USA-s umbes 4% ja Euroopas 0,7%. Teave tegelike ruumijahutusvajaduste kohta on vähelevinud, kuna neid ei mõõdetata regulaarselt. Küll aga saab neid hinnata elektrikasutuse ja jahutite standardse jõudluskoefitsiendi järgi, kuid harva mõõdetakse ka otsest elektritarbimist jahutitele. Kaugkülmarnete mahud maailmas on praegu palju väiksemad kui kaugkütte tarned. [5]

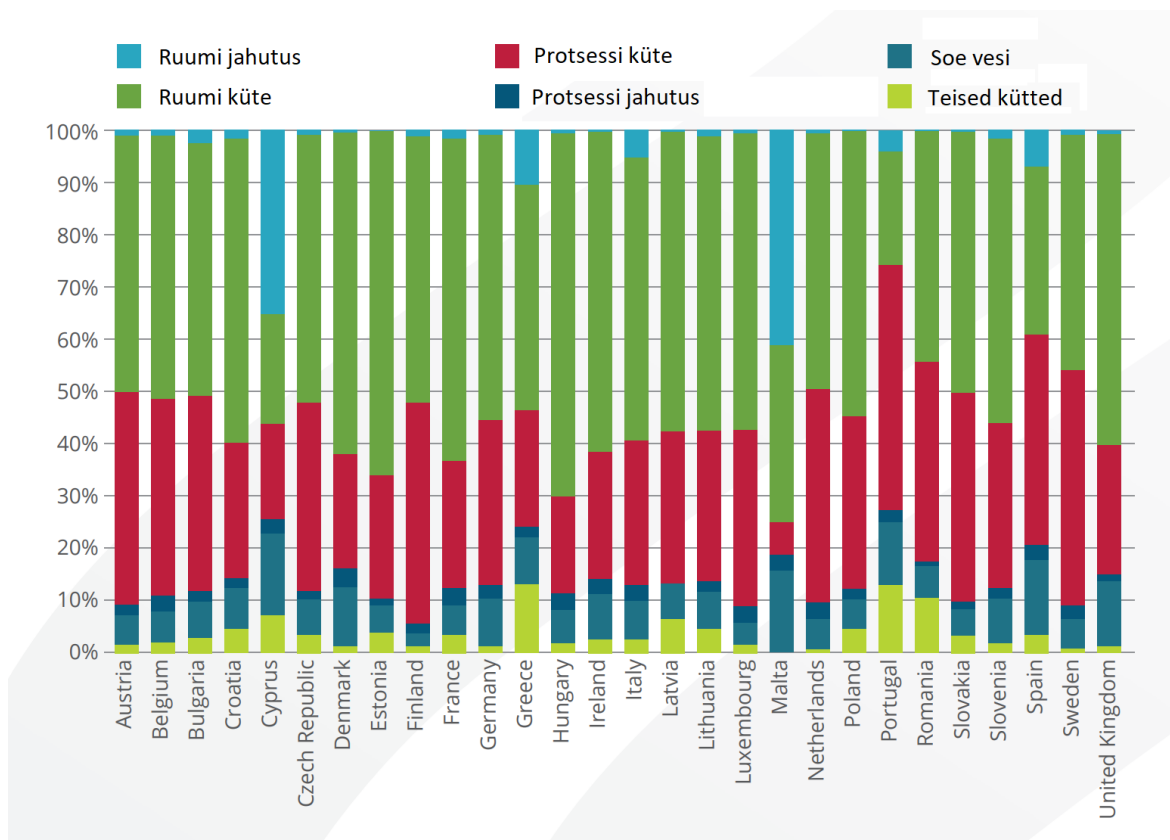
Globaalsed külmaturud koosnevad mitmest erinevast külmavarustust nõudvast piirkonnast:

- Ruumi jahutus, tagamaks inimestele vajalikku sisekliimat hoonetes, autodes, bussides, rongides, lennukites, kaevandustes.
- Toiduvarustus ahel, tagamaks toidu kvaliteedi alates tootmisest kuni tarbimiseni külmladude, külmutusega transpordi, külmikute ja sügavkülmutuse abil.
- Tööstuslik protsess, kindlustamaks toote kvaliteeti pruulikodades, arvutikeskustes, andmehoidlates, piimatööstustes, veinistööstustes.
- Teised erikasutusala, pinnase külmutamine tsiviilehituses, jää valmistamine jääradadel, vedela metaani hankimiseks LNG transpordis, kürogeensed kasutusala alla 120 K. [4]

Hoonete jahutusenergiavajadus varieerub riigiti ja nende välisõhu temperatuuride järgi. Hoonetel on erinevad jahutusvajadused, mis tulenevad ehitusmaterjalide erinevustest, suurusest, kasutajate käitumisest, hoone otstarbest jne. Siiski tuleks rõhutada, et isegi identsetel hoonetel võivad olla erinevad jahutusvajadused sõltuvalt tegevustest, mis hoonetes toimuvad. Hiljutised kliimamuutused ja nende mõjud hoonete energiatõhususele ning siseõhu oludele on suurendanud erinevate ruumijahutustehnoloogiate tähelepanu. On tõenäoline, et Euroopas suureneb jahutusvajadus, arvestades tõusvaid välistemperatuure, kuumalaineid, kuumasaare mõju, kõrgemaid soojusisolatsiooni tasemeid, suurenenud mugavusvajadusi ja nõudeid ning asjaolu, et jahutusnõudluse vajadus on märkimisväärselt madalam kui USA-s ja Aasias. [4]

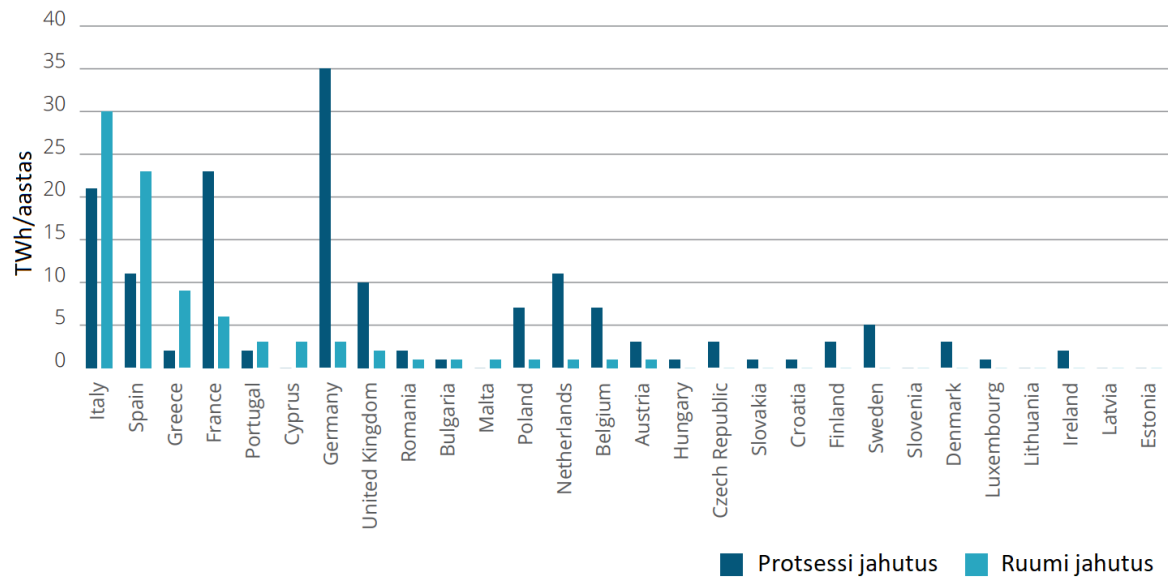
1.2 Jahutussektor Euroopas

Euroopa tarbib poole oma energiast kütmiseks ja jahutamiseks. Kuigi EL-i tasandil on jahutuse osatähtsus oluliselt väiksem võrreldes küttega, on see teatud lõunapoolsetes riikides endiselt väga oluline. Jahutus- ja soojusenergia võrdlus Euroopa riikide kaupa võrdlus Joonis 1.1 [6]



Joonis 1.1 Jahutuse ja soojuse lõppkasutuse võrdlus EL-s [6]

Kütte ja jahutuse tõhusus ning hoonete ja tööstuse süsinikdioksiidiheite vähendamine on võti Euroopa energia üleminekul säästva madala CO₂ heitega tuleviku poole. Ruumide jahutamiseks vajava energiakasutamises domineerivad peamiselt lõunapoolsed riigid, Itaalia ja Hispaania, Joonis 1.2. [6]



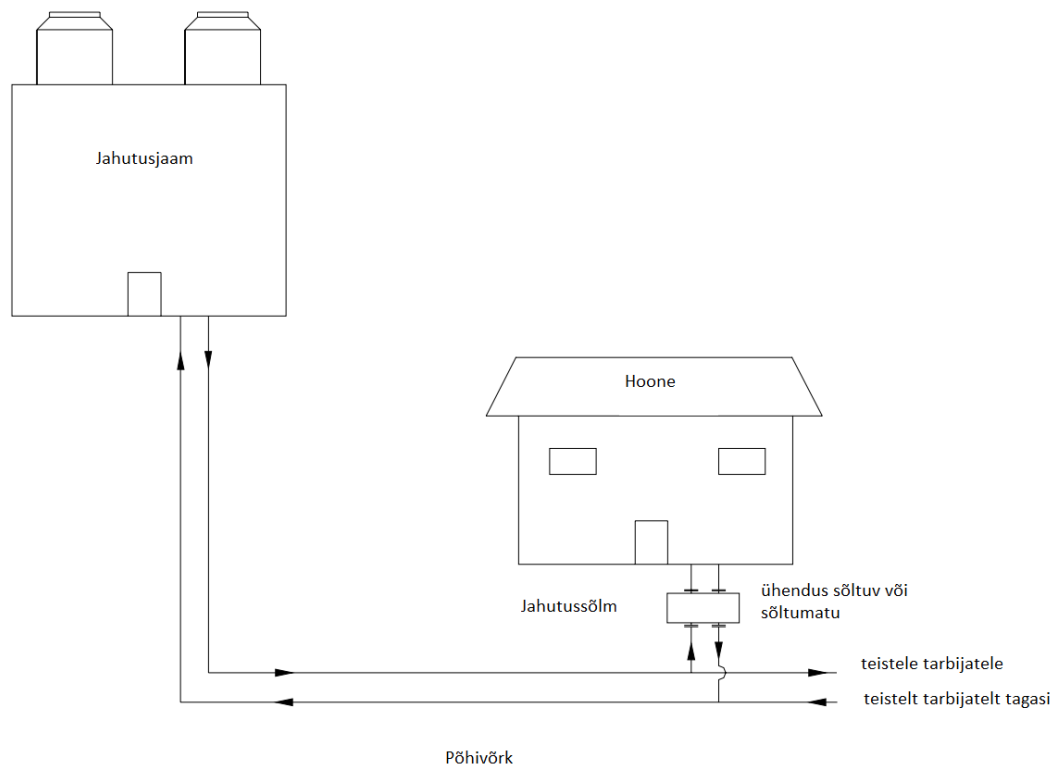
Joonis 1.2 Elektri tarbimine jahutamiseks riikide võrdluses [6]

Jahutatud pörandapindade osakaal on riigiti väga erinev, lõunapoolsetes riikides on see suurem. Teenindussektori hoonetes on suurem jahutatud alade osakaal võrreldes elamutega, eriti Põhja-Euroopa riikides, jahutatud alade osakaal on tühine. Siiski oodatakse märkimisväärseid kasvumäärasid, mis potentsiaalselt suurendavad ruumijahutuse nõudlust ja sellega seotud elektritarbimist. [6]

Lisaks ehitatavale kaugjahutusvõrgule Tallinnas, on varasemalt rajatud kaugjahutusvõrgud Tartu kesklinnas ja Lõunakeskuse piirkonnas ning Pärnu kesklinnas. [7]

1.3 Kaugjahutuse tehnoloogiad

Kaugjahutuse tehnoloogiad on jagatud neljaks peamiseks osaks: tootmine, põhi- ja jaotusvõrgud, tarbija jahutussõlm ja tarbija jahutussüsteem, Joonis 1.3. [8]



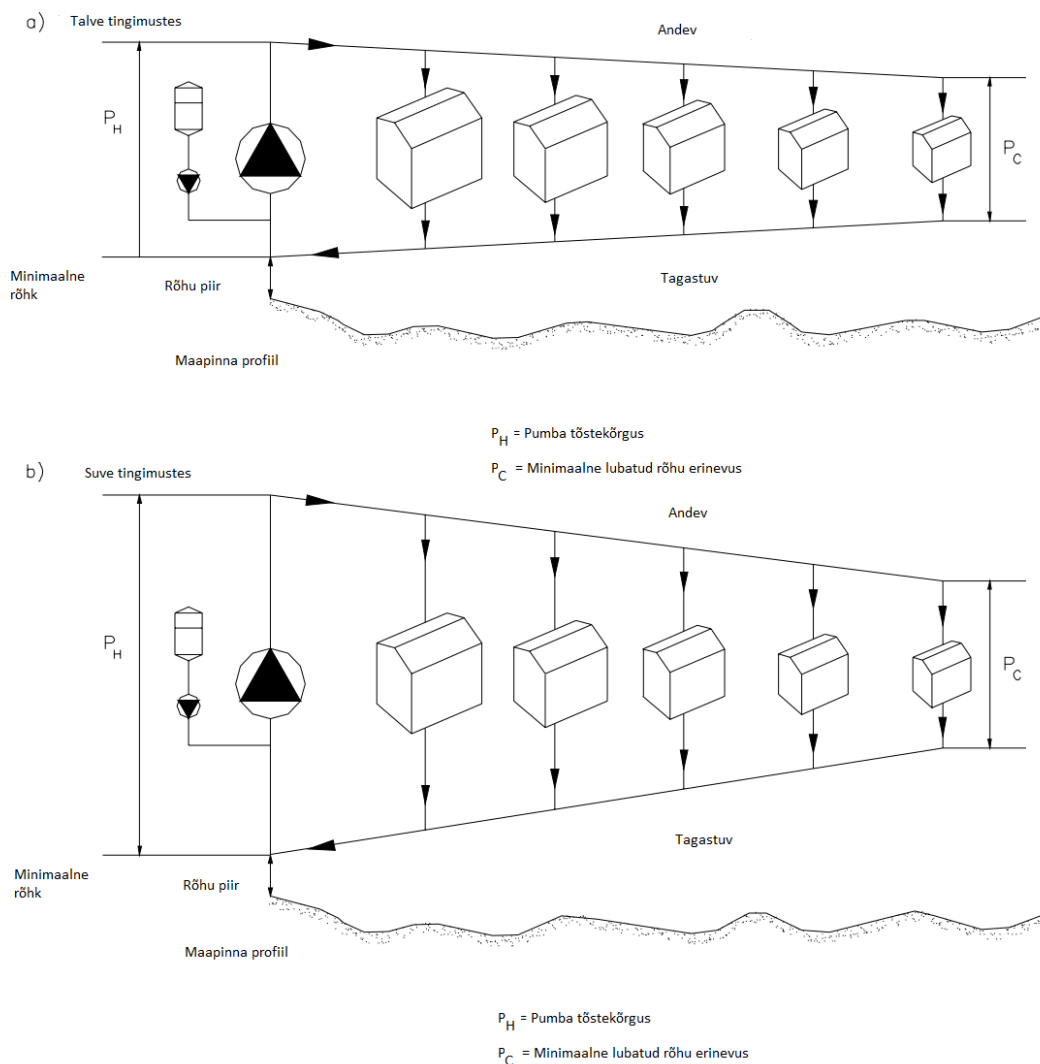
Joonis 1.3 Kaugjahutuse tehnoloogiad [8]

Jahutatud vett toodavad tavaliselt kaugjahutusjaamas kompressoriga töötavad jahutid ehk külmamasinad, absorptsioonjahutid või muud allikad nagu ümbritseva väliskeskkonnaga jahutamine, niinimetatud vabajahutusega jahutamine sügavatest järvedest, jõgedest, põhjaveekihtidest või ookeanitest. [8]

Lisaks külmamasinatega on võimalik jahutust toota kombineeritult külma, soojuse ja elektri režiimil, nimetatakse ka kolme generatsiooni režiimiks. Kombineeritult tootmine on sobiv lahendus paljude tehnoloogiliste protsesside puhul, mis nõuavad erinevaid jahutus- ja jahutusaineid, samuti munitsipaalenergiasüsteemides. Eelkõige toiduainetööstuses võib nõudlus külma järele olla märkimisväärne ja sellel võib olla oluline roll tehase energiahalduses. Külma nõudluse katmiseks saadaolevate tehnoloogiate hulka kuuluvad kompressor-, absorptsiooni- ja adsorptsioonikülmikud. Kompressorsüsteemid nõuavad märkimisväärset elektritarbimist. Absorptsiooni- ja adsorptsioonikülmikuid juhib soojusvoog, mida saab varustada nii taastumatutest kui eelistatavalt taastuvatest allikatest nagu gaasikatel, päikesekollektorid või biomassi põletamisel põhinevast koostootmisest saadav soojus või biogaas. [9], [10], [11]

1.4 Põhi- ja jaotusvõrk

Põhitorustike ja jaotustorustike kaudu juhitakse jahutatud vesi külmaallikast ehk tootmisjaamast kuni tarbijateni mööda pealevoolutoru, seejärel peale soojuse eraldamist hoonest suunatakse tagastuv vesi jahutusjaama, kus vesi jahutatakse uuesti maha vastavalt etteantud temperatuurini ja suunatakse uuesti pealevoolutorusse. Vesi torustikus pannakse liikuma pumpade abil, mis tekitavad rõhu erinevuse pealevoolutorustikus ja tagastuvas torustikus.



Joonis 1.4 Rõhud jaotustorustikus talve ja suvetingimustes [8]

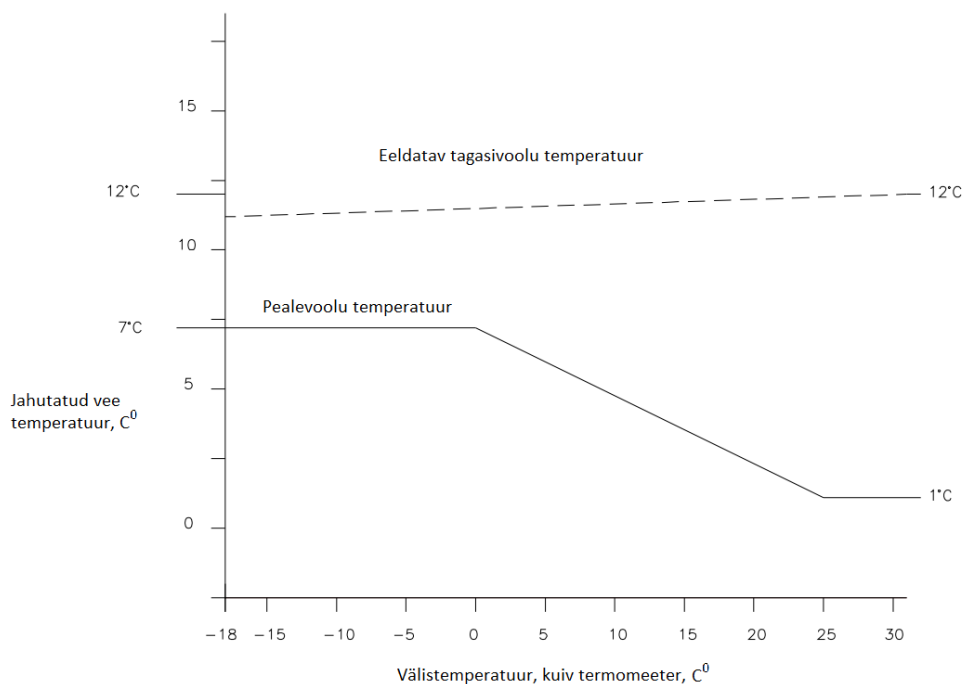
Jahutussüsteemi kus kasutatakse ühte jahutusallikat on kriitiliseks kohaks süsteemi lõpp. Mitme jahutusjaama korral süsteemi kriitiline koht varieerub, olenevalt töörežiimist ja aastaajast. Ühte või mitut vooluhulgaregulaatorit kasutatakse selleks, et tagada vajalik jahutusvõimsus hoone jahutamiseks. Kaugjahutussüsteemid muudavad

tavaliselt jahutatud vee temperatuuri, sõltuvalt väliskeskkonna temperatuuris. Antud temperatuuri lähtestamise strateegia võimaldab tõsta süsteemi mineva jahutatud vee temperatuuri, kui süsteemi jahutusvajadus väheneb ja seejuures tõsta jaama tõhusust ning vähendades jahutusenergia kadusid. Hooajalised jahutuskaod on üldiselt minimaalsed torustiku korral, mis on paigaldatud pinnasesse. Selle põhjuseks on tavaliselt väike temperatuuri erinevus torudes oleva jahutatud vee ja ümbritseva pinnase vahel, eriti levinud põhjapoolsetes kliimavööndites. Järelikult pinnasesse paigaldatud jahutustorustikud on üldiselt ilma isolatsioonita, välja arvatud soojemates kliimavööndites, kus maapinna temperatuur on palju kõrgem. [8]

Samuti tuleb märkida, et pealevoolul välistemperatuurist sõltuvat graafikut kasutades, tuleb olla ettevaatlik kuna jahutuse vajadus sõltub suurel määral suhtelisest õhuniiskusest või märja termomeetri temperatuurist. Seda on vajalik meeles pidada eriti kõrge õhuniiskusega kliimavööndites kus jahutuskooormus on seotud niiskuse eemaldamisega ja sellest tulenevalt suureneva jahutuskooormusega, kui on mõistlikuks peetud. Niisiis, jahutatud pealevoolu temperatuur peab olema piisavalt madal, et saavutada soovitud õhuniiskuse tase sissepuhke õhule, isegi madalama kuiva termomeetri välistemperatuuri tingimustes. Teiseks jahutuspotentsiaali piiravaks teguriks pealevoolul temperatuurist sõltuvat graafikut kasutades on tarbijale tagatud või garanteeritud pealevoolu temperatuuri maksimum, mis on tavaliselt sätestatud kliendi ja teenusepakkuja vahelises lepingus. Erijuhtumite korral, kus leping on kirjutatud selliselt, et kliendi pealevoolutemperatuuri juhtimist sõltuvalt välistemperatuuri graafikust ei tohi kasutada, see tähendab et ei tohi muuta pealvoolu temperatuuri isegi talvel, mis suurel määral kahandab süsteemi potentsiaali madalate koormuste tingimustes, ja seega ka potentsiaali parandada süsteemi energiatõhusust. [8]

1.5 Jahutusgraafik

Pealevoolu temperatuuri juhtimine välistemperatuurist sõltuva graafiku alusel on näidatud Joonis 1.5. [8]



Joonis 1.5 jahutusgraafik sõltuvalt välitemperatuurist [8]

Antud näide kajastab jää-baasil põhinevat süsteemi, projekteeritud välitemperatuuri korral 31 °C. Jahutuskõver näeks välja teistsugune mitte jää-baasil põhinevate süsteemide ja teiste kliimatingimuste korral. Graafiku kõvera järgi vastab pealevoolu temperatuur 1 °C välitemperatuurile 25 °C või kõrgema korral. Välitemperatuuri muutuse korral vahemikus 25 °C kuni 0 °C tõuseb ka pealevoolu temperatuur järkjärgult kuni 7 °C kraadini ja jääb muutumatuks temperatuuril 0 °C madalamal temperatuuril. Mõned kaugjahutussüsteemid lubavad kuni 10 °C pealevoolutemperatuuri madalate koormuste tingimustes. Tavaliselt süsteemides kontrollitakse tarbijalt tagastava jahutusvee temperatuuri, jahutusvaheti primaar- või sekundaarpoolel, et oleks tagatud kaugjahutusettevõttega sõlmitud lepingus sätestatud piirtemperatuur kõikides koormustingimustes. Seda tüüpi lahenduse korral tuleb olla ettevaatlik pika reageerimisaja tõttu, jahutusvesi peab ringlema läbi kogu süsteemi enne kui tagasivooluvee temperatuuriandur registreerib uue tagasivoolutemperatuuri. Kõige stabiilsem juhtimine saavutatakse pealevooluvee temperatuuri muutmisega tagasivooluvee temperatuuri muutuse alusel tagasivoolutemperatuuri piirist. [8]

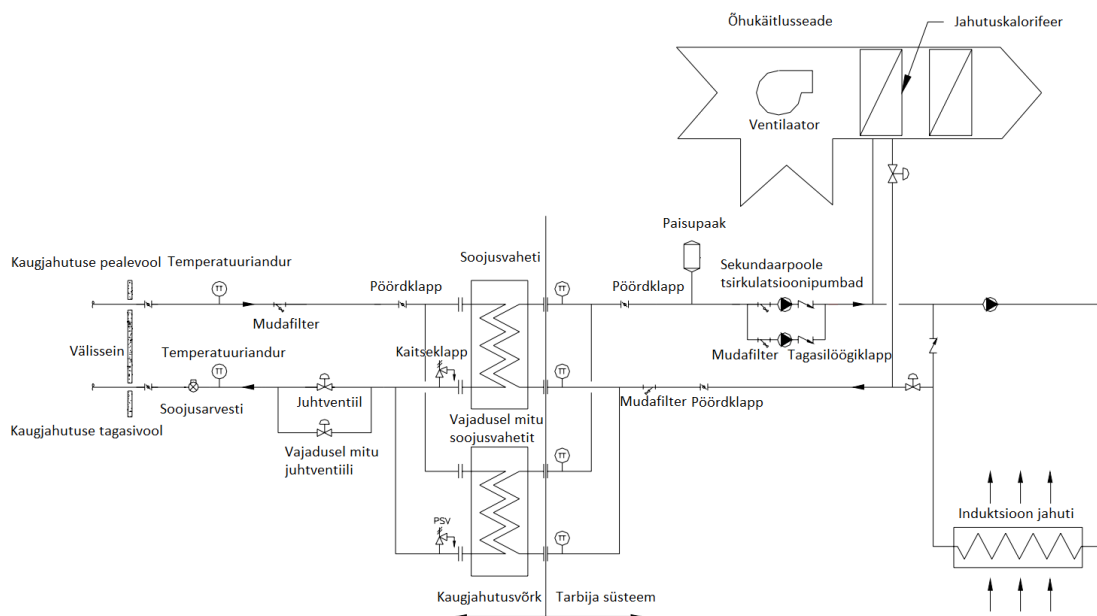
1.6 Jahutuskaod

Kaugjahutuse korral külmakaod, on pinnases oleva soojuse mõjul torude soojenemine, mis põhjustab jahutusvee temperatuuri tõusu, eriti just pealevoolutorus. Seda tuleb arvesse võtta eriti kõrge pinnase temperatuuriga piirkondades, mis tuleneb aasta kõrgest keskmisest välistemperatuurist. Kui võrrelda jahutuskadusid soojuskadudega, siis suurusjärgus on jahutuskaod väiksemad seetõttu, et toodetud jahutatud vee temperatuuri ja välistemperatuuri erinevus on väiksem. Sellel temperatuuride erinevusel on suurem hooajaline kõikumine, kuna toodetud jahutusvee temperatuur on üsna lähedal tegelikule maapinna temperatuurile ja selle hooajalisele kõikumisele. Suurimad jahutuskaod on augusti ja septembri kuus, tulenevalt maapinna temperatuuri ajalisest viivitusest võrreldes ümbritseva õhu temperatuuri muutustega. [4]

Võrreldes kaugkütte torustikuga, kasutatakse kaugjahutuses suurema läbimõõduga torusid. Põhjuseks on väiksem temperatuurierinevus peale- ja tagasivoolu vahel. Suurema läbimõõduga torustiku korral, pealevoolu torul, on soojusvahetuse pind ümbritseva keskkonnaga suurem, mis põhjustab suuremat kadu jahutustorustikus. [4]

1.7 Jahutussõlm

Kaugjahutusvõrgu ja hoone jahutussüsteemi vahelist liidest, energia ülekandmise jaama, nimetatakse jahutussõlmeks. Jahutussõlm koosneb juhtventiilidest, kontrolleritest, mano- ja termomeetritest, energiaarvestist, isolatsioonist, hüdraulilisest eraldajast või soojusvahetist. Jahutussõlm võib olla ühendatud sõltumatult või sõltuvalt kaugjahutusvõrguga. Sõltuva ühenduse korral kaugjahutusvõrgus olev jahutatud vesi ringleb tarbija jahutusseadmetes nagu õhukäitlussüsteemid, laekassetid, jahutuspalgid. Sõltumatu ühenduse korral on kaugjahutusvõrku läbi soojusvahetite eraldatud tarbija jahutussüsteemist, Joonis 1.6. [8]



Joonis 1.6 Jahutussõlme sõltumatu ühenduse skeem [8]

Jahutussõlme juhtimise väljakutseks on madala delta-T nähtus. Selle tagajärjeks on madalad tagasivoolu temperatuurid, mis põhjustavad jätkuvalt süsteemi ebatõhusust ja suurendavad kulusid. [12]

1.8 Aktuaalsed küsimused ja väljakutsed

Kaugjahutussüsteemi eesmärk on säästa primaarenergiat, elektrit, ruumi ja vähendada õhusaastet ja keskkonnale kahjulike külmutusagenside kasutamist. Kaugjahutus võib oluliselt vähendada elektritarbimist ja tippvõimsuse nõudlust, ja seega vähendada energiatarbimist jahutushooajal. Tagada süsteemi efektiivne ja usaldusväärne toimimine erinevates keskkonnatingimustes ning optimeerida jahutussüsteemide disaini ja jõudlust tagamaks parim energiatõhusus, on endiselt tehniliseks väljakutseks. Olenevalt keskjaamadest ei pruugi kaugjahutussüsteemid olla täielikult keskkonnasõbralikud, kuna vabade jahutusallikate, nagu meri või järv, pikaajaline kasutamine võib mõjutada jahutusallikate temperatuuri ja piirata jahutusvõimsust. See võib mõjutada ka jahutusallikate ökosüsteemi. Vabajahutusega süsteemid kasutavad tohutut koguses vett, mis on probleemiks veepuudusega piirkondades. Jaamade soojuskaod, kui ka kaugjahutustorustikes ning soojusvahetites, on vältimatud. Suurt keskkonnakasu näitava süsteemi valik võib tegelikult lõppeda mitte ökonoomselt, kui

käsitleda koos keskkonna- ja majandusaspekte. Kaugenergia ja elektri koostootmise rakendamise eesmärgil, on vajalik suurem kaugkütte- ja jahutusjaam. Kõrged esialgsed investeerimiskulud ning kaubeldavate hindade ja tariifide puudumine kliendi poolel, kuna kaugjahutussüsteemid kuuluvad sageli vähestele kohalikele energiaettevõtetele ja jahutushindade ning tariifide osas on monopoli oht. Väljakutseks on leida optimaalne ärimudel kaugjahutusvõrkude ja -süsteemide arendamiseks, rahastamiseks ning klientide vajadustest lähtudes kujundada välja just see õige hinnastamine, mis oleks mõlemale osapoolle vastuvõetav ja ärihuvisid arvestav. [13]

2. KAUGJAHUTUSVÕRGU MODELLEERIMINE

Kaugjahutust saavad kasutada äri- ja kaubandushooned, aga ka uued kortermajad või hooned, mida renoveeritakse. Kaugjahutusteenust on võimalik kasutada Tallinna kesklinnas ja Ülemiste piirkonnas ning kiirelt arenevasse kaugjahutusvõrku lisandub pidevalt uusi kliente. Kaugjahutust saab kasutada hoone kõikides jahutust vajavates süsteemides nagu ventilatsiooni sissepuhke jahutamiseks ja ruumide jahutamiseks, täppiskonditsioneerides ning ka protsessijahutuses. Protsessijahutuses saab jahutada kõike, mis vajab jahutust alates seitsmest kraadist, milleks võivad olla külmaod, servereid, tööstusprotsessid, kaupluse jahutussüsteemid [14].

Modelleerimise eesmärgiks on olemasoleva kaugjahutusvõrgu ja kavandatud võrgu kahe erineva modelleerimise stsenaariumi võrdlemine. Modelleerimise käigus on arvestatud juba väljaehitatud peatorustikuga ja olemasolevate külmajaamadega Masina tänaval ja Ülemiste keskuses. Jahutusjaamade summaarne arvutuslik jahutusvõimsus on arvestatud 100 MW, mis on olnud aluseks jahutusvõrgu rajamisel ja kavandamisel. Modelleerimise eesmärk on välja selgitada kolmanda kaugjahutusjaama asukohast tingitud võrgu paameetrid, arvestades eelnevalt sisestatud algandmeid, ja toimimine. Planeeritava jaama jahutusvõimsus on 60 MW.

Tallinna linna kaugjahutusvõrgu modelleerimiseks on kasutatud Leanheat® Network, Danfoss, modelleerimise tarkvara. Leanheat® Network on termo-hüdrauliline modelleerimisvahend, mis on välja töötatud spetsiaalselt kasutamiseks kaugenergiast süsteemides, et toetada planeerimist, projekteerimist ja tööprotsesse. Programmi kasutamine aitab planeerimisprotsessis vähendada kapitaliseerimise ja opereerimise kulusid. Leanheat® Network tarkvara võimaldab:

- ehitada ja hooldada tõhusalt kaugkütte- ja jahutusvõrgu mudeleid
- simuleerida hüdraulilisi ja termilisi tingimusi kaugkütte- ja jahutusvõrkudes
- optimeerida võrgu temperatuure ja rõhutingimusi vastavalt tegelikule nõudluse vajadusele
- vähendada võrgukadusid ning tootmis- ja pumpamiskulusid
- Prognoosida ja mõista tulevast tarbimist oma võrgus, põhinedes tiptasemel tehisintellektile, arvestades varasemaid kogutud ajaloolisi andmeid ja ilmaprognoose.

- Planeerida optimaalset tehnilist-majanduslikku tootmise kombinatsiooni, optimeerides tootmiskulusid ja suurendades koostootmisjaamadest saadavat tulu, tagades samas varustuskindluse kvaliteedi. [15]

Leanheat® Network võrgu modelleerimisel kasutatakse andmepõhist lähenemist, kus kogutud andmeid kasutatakse mudeli loomiseks ja optimeerimiseks, Joonis 2.1. Mudel põhineb tõenäosuslikel ennustustel hoone jahutusnõudluse kohta, võttes arvesse erinevaid tegureid nagu välistemperatuurid, hoone tüüp, asukoht jne. Seejärel kasutatakse optimeerimisalgoritme, et leida parimad lahendused süsteemi jahutusenergia jaotamiseks vastavalt prognoositud nõudlusele. [15]

Editor - 24.03.2024 0:00:00

Scenario	Results	Data	Adaption	Prognosis	Measurements	Zones	General	System	Imported Data	All
	Alias	*				Mere nst 3		Mere nst 5		Ka
<input type="radio"/> Node (227)	Pipe type, supply (Res)					1016/1100-0		1016/1100-0		91.
<input checked="" type="radio"/> Pipe (233)	Pipe type, return (Res)					1016/1100-0		1016/1100-0		91.
<input type="radio"/> Plant (3)	Length (Res) [m]						10.0		14.7	
	Flow, supply [t/h]						3875.352		-3875.352	
	Flow, return [t/h]						-3875.352		3875.352	
	Velocity, supply [m/s]						1.38		-1.38	
	Velocity, return [m/s]						-1.38		1.38	
	Temperature, ups, supply [°C]						6.0		6.0	
	Temperature, dws, supply [°C]						6.0		6.0	
	Temperature, ups, return [°C]						15.5		15.5	
	Temperature, dws, return [°C]						15.5		15.5	
	Pressure, ups, supply [barg]						8.54		8.59	
	Pressure, dws, supply [barg]						8.54		8.61	
	Pressure, ups, return [barg]						6.21		6.10	
	Pressure, dws, return [barg]						6.21		6.13	
	Pressure gradient, supply [Pa/m]						13.83		13.83	
	Pressure gradient, return [Pa/m]						13.80		13.80	
	Heat Loss, supply [W/m]						-29.62		-29.62	
	Heat loss, return [W/m]						-14.76		-14.76	

Joonis 2.1 Modelleerimistarkvarast näidis väljatrükk Leanheat tarkvarast [15]

Modelleerimise mudelite M1 ja M2 põhiosadeks on kaugjahutuse jaamad, põhivõrk koos harutorustikega ja tarbijad. Tarkvara kohustab sisestama piir- ja algandmeid, mis modelleerimise stsenaariumite koostamiseks vajalikud. Kui kõik põhiosad ja andmed on sisestatud saab käivitada modelleerimise, mille tulemusena tuuakse välja vead, kui neid esineb ja mis vajavad parandamist või modelleerimise stsenaarium on õnnestunud ja vajadusel saab tööd ning andmete analüüsimist jätkata.

2.1 Andmed, andmete kogumine ja analüüs

Algandmena on äriplaani kohaselt jahutuskoormuseks arvestatud 100 MW. Kaugjahutusjaamadele on määratud jahutusvõimsused, mis vastavad planeeritavale ehitusplaanile. Tabel 2.1, kus on toodud välja modelleerimiseks vajalikud kaugjahutusjaamade kohta sisestatud piirväärtused. Peale- ja tagasivoolu temperatuuride vaheks on määratud 9,5 °C.

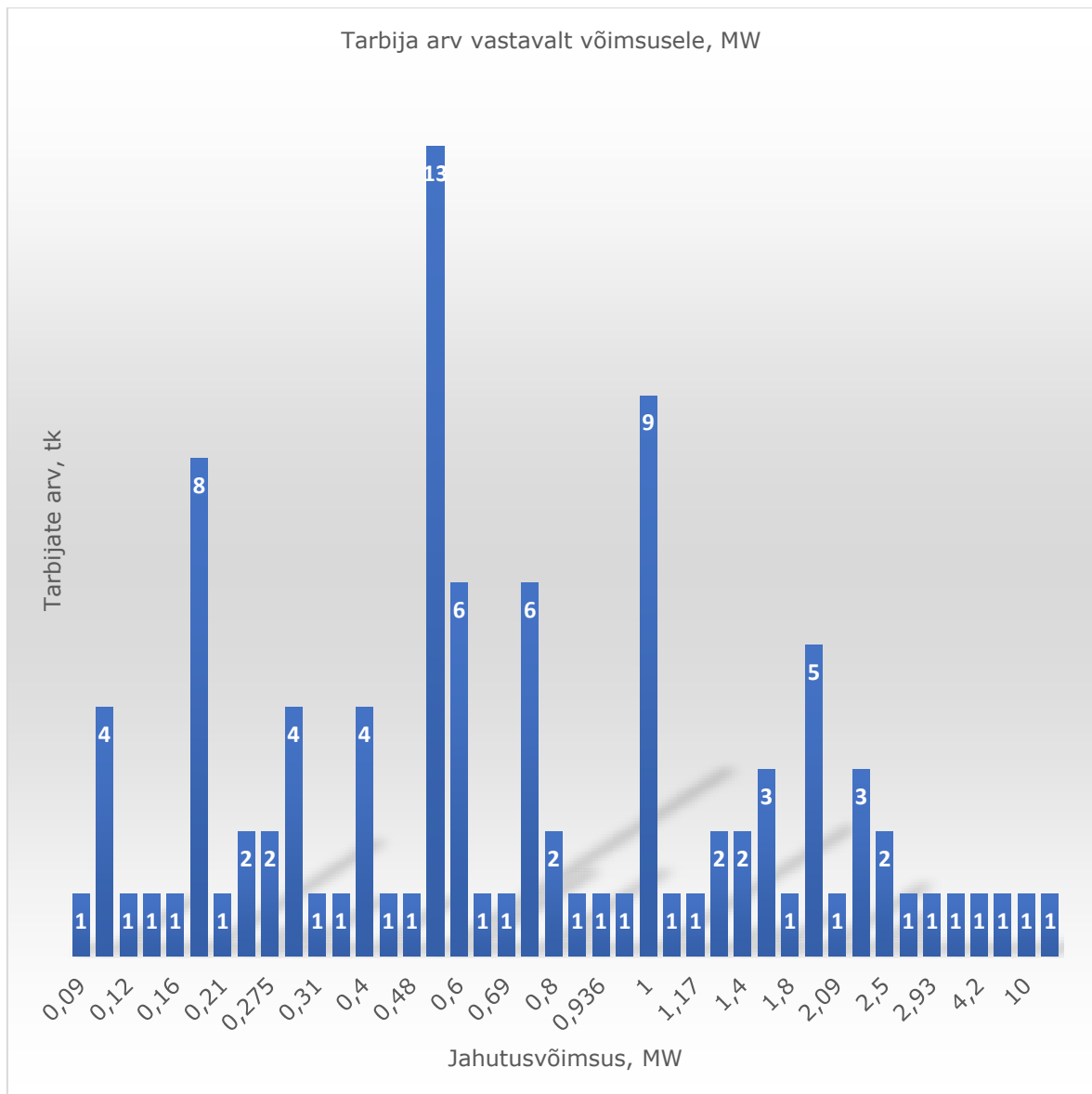
Tabel 2.1 Kaugjahutusjaamade piirväärtused Mudel 1 ja Mudel 2 korral [15]

Kirjeldus	Modelleerimine stsenaarium M1			Modelleerimine stsenaarium M2		
	Masina KJJ	Sadama KJJ	Ülemiste KJJ	Masina KJJ	Paljassaare KJJ	Ülemiste KJJ
Võimsus, MW		60	15		60	15
Vooluhulk, t/h						
Temperatuur, pealevool, °C	6	6	6	6	6	6
T_graafik						
Staatiline rõhk, pealevool						
Staatiline rõhk, tagasivool, piirväärtus, barg		4,8			4,8	
Staatiline rõhk						
Staatilise rõhu osa						
Kontroll punkt		N_248			N_248	
Rõhk pealevool						
Rõhk tagasivool						
Rõhu muutus		1,75			1,75	
Keskkonna temperatuur, °C	25	25	25	25	25	25
Nimetus (Utilitas)	M1 Masina KJJ	M1 Sadama KJJ	M1 Ülemiste KJJ	M2 Masina KJJ	M2 Paljassaare KJJ	M2 Ülemiste KJJ

Modelleerimiseks vajalike tarbijate jahutuskoormuste määramiseks või prognoosimiseks on mitmeid meetodeid. Kaasajal hõlmavad hoonete jahutuskoormuse prognoosimise lähenemisviisid peamiselt kahte kategooriat, nimelt füüsilisel modelleerimisel põhinevaid meetodeid ja andmepõhiseid meetodeid. Füüsilisel modelleerimisel põhinevate meetoditega luuakse peamiselt hoonete soojusülekanne mudel ja arvutatakse jahutuskoormus läbi termodünaamilise printsiibi. Selle meetodi jaoks nõutava üksikasjaliku hoonefüüsilise teabe ja modelleerijatele esitatavate kõrgete professionaalsete nõuete tõttu on selle modelleerimisprotsess keeruline ja aeganõudev, mis toob kaasa ebamugavusi reaajas jahutuskoormuse prognoosimisel ja optimaalsel juhtimisel. Vastavalt sellele vajavad andmepõhised meetodid täpsete ennustustulemuste saamiseks ainult hoone käitamise andmeid ning selle mudeliarendus on tõhusam ja paindlikum. [16], [17], [18]

Modelleerimiseks vajalikud tarbija andmed on saadud arvutuslikul teel, lähtudes hoone tehnilistest parameetritest, reaalselt tarbijatelt kogutud info põhjal, liitumislepingu sõlminud tarbijatelt või tarbijate poolt esitatud kaugjahutusega liitumise tehniliste tingimuste avaldustest. Igale tarbijale väljastatakse kaugjahutuse tehnilised tingimused, mis on modelleerimises arvestatud lähteandmetena. Iga tarbija sisestamisel on määratud tarbijale temperatuurimuutuseks 9,5 °C. See tähendab, et kui jahutusjaamadele on määratud pealevoolu temperatuur 6 °C, siis tagasivoolu temperatuur peab olema 15,5 °C. Tarbijate algandmed on esitatud Lisa 1.

Jahutuskormuse ehk tarbijad moodustavad 102 hoonet. Tarbijate paiknemine on esitatud Joonis 2.6. Kogutud andmed on usaldusväärsed ja sama tüüpi hoonete ning kasutusotstarbe korral lihtsasti kontrollitavad. Andmete töötlemisel ja kontrollimisel hoonete jahutuskormuste määramisel on võrreldud pealmiselt jahutatavate pindade ruutmeetreid, kubatuuri ja hoone kasutusotstarvet. Tarbijate arv vastavalt võimsusele on esitatud Joonis 2.2.



Joonis 2.2 Tarbijate arvu suhe jahutusvõimsusele, MW [15]

Olemasolevasse jahutusvõrku ühendatud hoonete jahutuskoormusi võrreldes pindala ja kubatuuri suhtes võib jahutuskoormuse üldstatult aluseks võtta 40-50 W/m² kohta.

Kaugjahustorustiku modelleerimiseks peab olema eelnevalt programmi kas imporditud või programmi siseselt välja joonistatud torustik. Käesoleva töö mahus on jahustorustik modelleerimiseks imporditud ArcGIS Pro tarkvaraga koostatud geoinfosüsteemide tarkvararakendusest.

ArcGIS Pro on rikkaliku funktsionaalsusega ja universaalse rakendusala maailma levinuim desktop GIS tarkvara, mis võimaldab geoandmete koostamist ja visualiseerimist, ruumianalüüside teostamist, tabelandmete sidumist kaardimaterjaliga, 2D/3D/4D kaardiakende kooskasutust, erinevate avaandmete ja teenuste lihtsat

kaasamist. ArcGIS Pro on tihedalt integreeritud ArcGIS Online-i ja ArcGIS Enterprise-ga, mis lihtsustavad oluliselt GIS-andmete mugavat kättesaadavust erinevatele sihtrühmadele. [19]

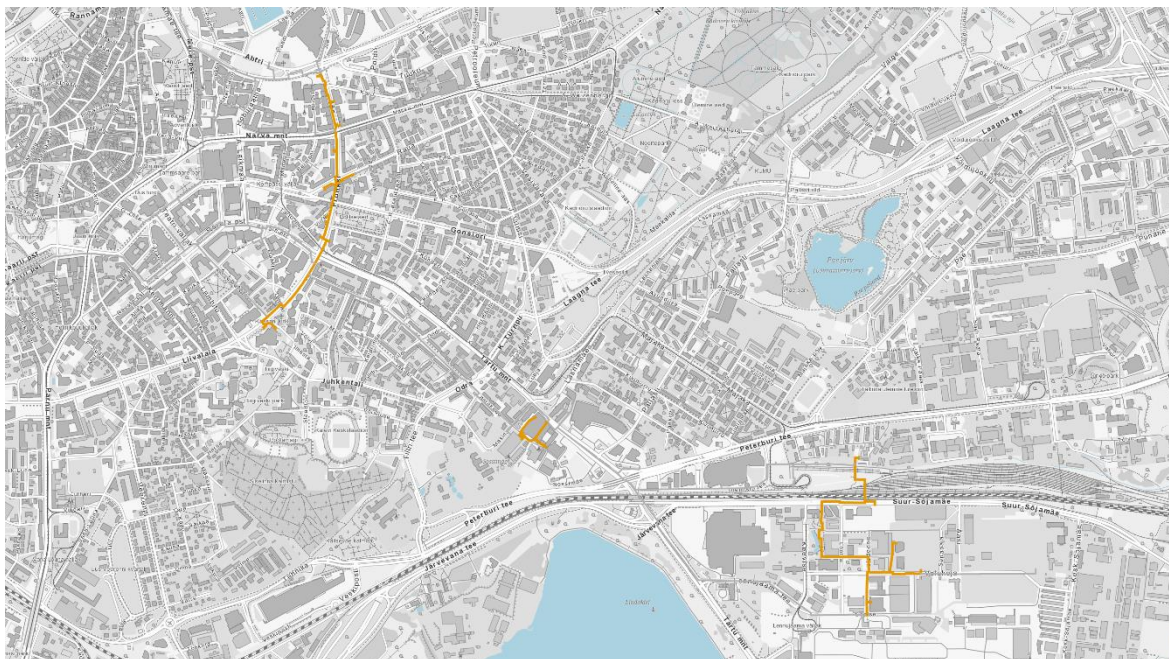
Käesolevas töös olen kasutanud torumõõtude määramisel mõõtühikut DN, mis on tähtarvuline torustikuelementide suuruse tähis. DN tähise kasutamine lihtsustab mõõtude esitamist täisarvude põhjal. DN tähisele järgneb dimensioonita täisarv, mis on kaudses seoses füüsikalise suurusega millimeetrites – ühendusotste ava läbimõõdu või välisläbimõõduga. Töös kasutatavate DN tähistele vastavad toru välisläbimõõtude kohta on andmed esitatud Tabel 2.2. [20]

Tabel 2.2 DN tähisele vastavad toru välisläbimõõdud, mm [20]

Diameeter, DN	Terastoru välisläbimõõt, mm
20	26,9
25	33,7
32	42,4
40	48,3
50	60,3
65	76,1
80	88,9
100	114,3
125	139,7
150	168,3
200	219,1
250	273
300	323,9
350	355,6
400	406,4
450	457
500	508
600	610
700	711,2
800	812,8
900	914,4
1000	1016
1100	1117,6
1200	1219,2

Imporditud jahutustorustikule on lisaks pikkusmõõdule ka eelnevalt määratud toru läbimõõdud, mida modelleerimise käigus vajadusel muudetakse juba modelleerimistarkvaras. Saadud andmed on kopeeritud tabelarvutusprogrammi Excel ja vajadusel töödeldud selliselt, et oleks võimalik tulemusi graafiliselt esitada. Edasise sammuna sisestatakse tarbijad ja ühendatakse torustikuga. Kaugjahutustorustiku modelleerimise algandmed on toodud Lisa 1.

Modelleerimises on arvestatud, et osaliselt on kaugjahutuse torustik välja ehitatud koos töötavate jahutusjaamadega. Olemasolev jahutustorustik läbimõõduga DN800 paikneb Jõe-Pronksi ja Liivalaia tänaval, Fahle kvartalis ja Ülemiste keskuses, Joonis 2.3.



Joonis 2.3 Olemasoleva jahutustorustiku paiknemine, väljatrükk ArcGis tarkvarast [19]

Torustiku ehituse järgmises etapis, aastatel 2024 - 2025, paigaldatakse kaugjahutuse torustik Lastekodu tänavale ja see võimaldab kogu torustiku ühendada Masina tänaval asuva kaugjahutusjaamaga. Järgnevatel aastatel ehitatakse välja torustikud Lauteri ja Rävalla tänaval, Ahtri tänaval ning Mere ja Estonia puiesteel, mis ühendatakse Rävalla tänava torustikuga. Kaugjahutusvõrgu modelleerimises kasutatavad eelisoleeritud terastorud ja toruosad on sisestatud vastavalt standardis toodud andmetele [21]. Planeeritud kaugjahutustorustiku pikkus on ca 20000 m ja ehitustööde ülevaade aastaks 2030 on toodud Joonis 2.4.



Joonis 2.4 Planeeritud kaugjahutustorustik aastaks 2030, väljatrükk ArcGis tarkvarast [19]

Nii realses elus kui ka modelleerimisel on arvestatud, et varustuskindluse ja jõudluse tagamiseks on kõik kolm jahutusjaama omavahel ühendatud, mis tingib vajaduse torustiku ehituseks Masina tänava jahutusjaamast kuni Ülemiste jahutusjaamani piki Tartu maanteed ja Lennujaama teed, ringistada torustikud Ülemiste tee kaudu ning Masina jaamast omakord ehitada torustik välja, kas siis planeeritavasse Sadama jahutusjaama või Paljassaare jahutusjaama, Joonis 2.5.



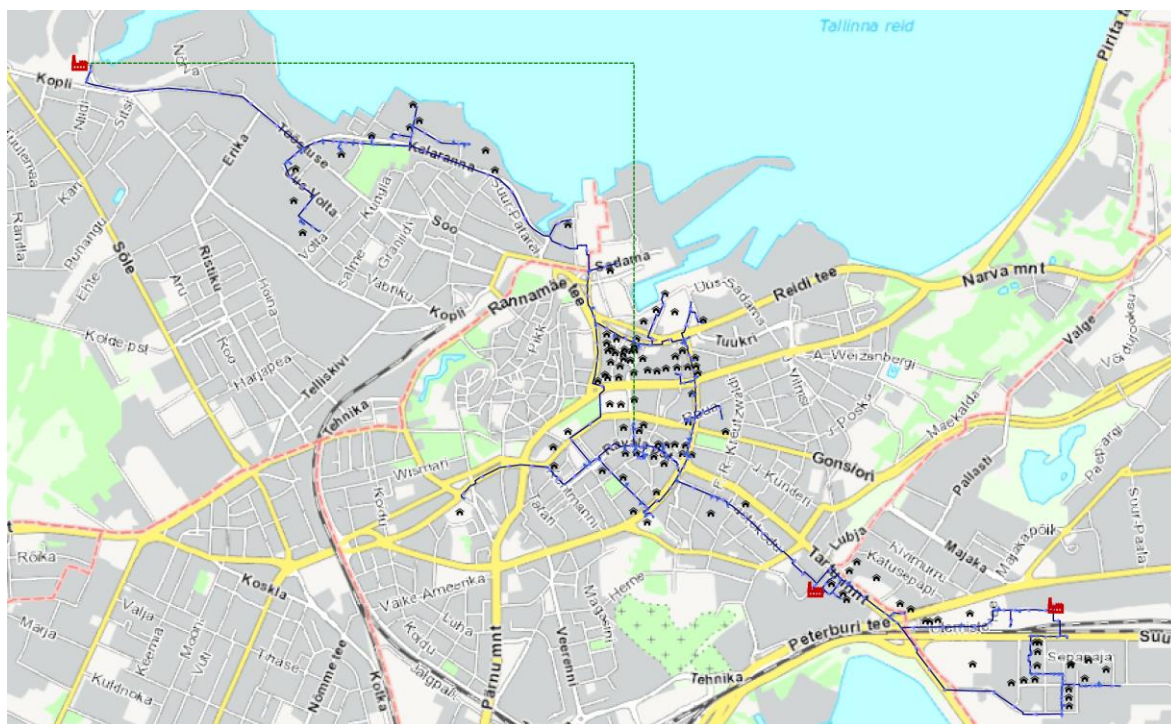
Joonis 2.5 Jahutusjaamade ja põhitorustiku paiknemine, väljatrükk ArcGIS tarkvarast [19]

Modelleerimise stsenaarium M1 korral Paljassaare piirkonnas kaugjahutusjaam puudub, millest tulenevalt tuleb on kogu võrgu torustik lühem. Sadama kaugjahutusjaam paikneb tarbijatele lähemal ja Kalaranna tänavale planeeritud torustiku läbimõõt on DN 900 asemel arvestatud DN 600, Joonis 2.6.



Joonis 2.6 Kaugjahutustorustik ja jaamad modellerimise stsenaarium M1 korral, väljatrükk Leanheat tarkvarast [15]

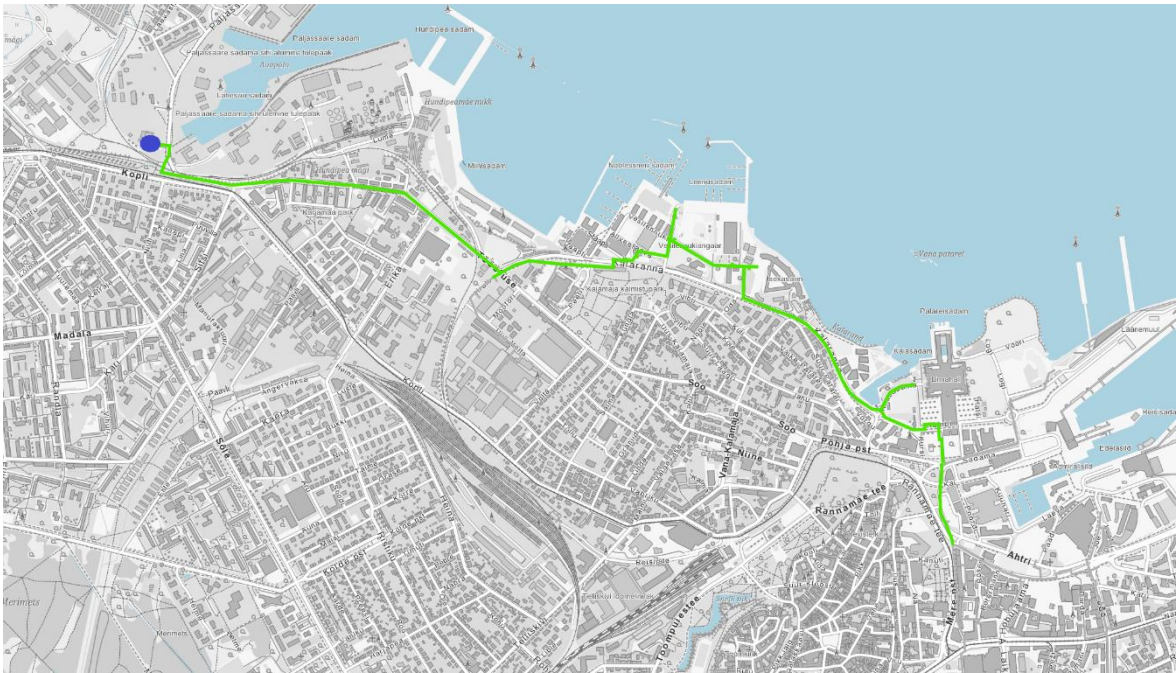
Modellerimise stsenaarium M2 korral Sadama piirkonnas kaugjahutusjaam puudub, millest tulenevalt tuleb ehitada täiendav jahutustorustik Paljassaare suunal, kus paikneb Paljassaare kaugjahutusjaam, Joonis 2.7.



Joonis 2.7 Kaugjahutustorustik ja jaamad modelleerimise stsenaarium M2 korral, väljatrükk Leanheat tarkvarast [15]

Paljassaare Kaugjahutusjaama võimsusest, toru pikkusest ja rõhukadudest torustikus tulenevalt peab torustiku läbimõõt olema vähemalt DN900, Paljassaare jahutusjaamast kuni Mere puiestee alguseni, Joonis 2.8. [22]

Sadama või Paljassaare kaugjahutusjaamade parima kasuteguri saavutamiseks on plaanis ehitada vabajahutuse kasutamiseks torustik merre. Stabiilne, sobiliku temperatuuriga vabajahutuskeskkond tagab külmamasinate stabiilsema ja suurema kasuteguriga töö. Kokkuvõtvalt võib öelda, et töötavad keskkonnasäästlikumalt ja energiatõhusamalt. Merevee kasutamise põhimõtte vabajahutusena on üsna lihtne. Sügavamast mereveekihist ammutatud jahe merevesi juhitakse läbi torustiku ja jahutusenergia kantakse soojusvahetite kaudu kaugjahutussüsteemi. Soojenenud merevesi lastakse tagasi madalasse mereveekihti. Merevesi pannakse liikuma tsirkulatsioonipumpade abil. Võimalikud mereveetorustiku paigaldamise alad on toodud Joonis 2.9. Merevee kasutamine vabajahutusena nõuab põhjalikke keskkonnavalaseid uuringuid ja mõjusid mere elukeskkonnale. [23]



Joonis 2.8 Jahutustorustik Paljassaare jahutusjaamast kuni Mere pst alguseni, väljatrükk ArcGis tarkvarast [19]

Vabajahutuspiirkondade kauguse rannikust määravad ära veekihtide temperatuurid ja merepinna sügavus. Antud töös vabajahutuse kasutamise võimalusi ja sellega seotuid uuringuid ei käsitleta.



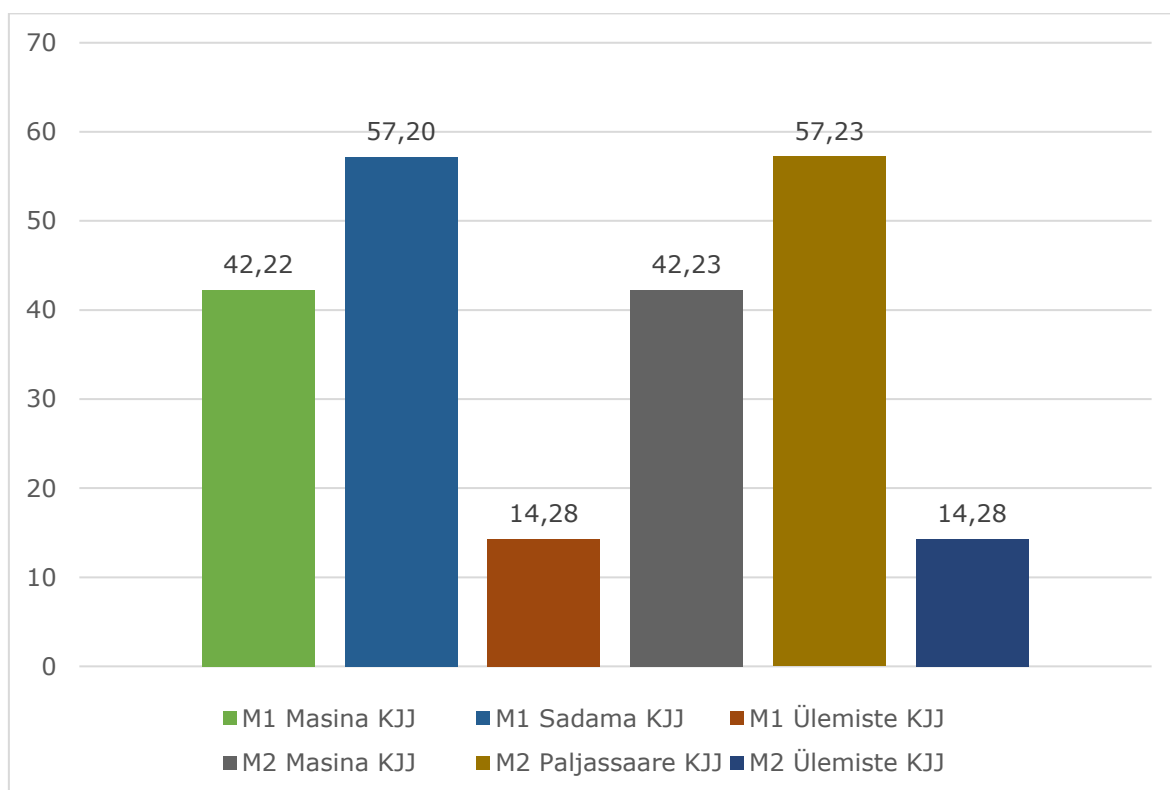
Joonis 2.9 Sadama ja Paljassaare jaamade võimalikud vabajahutuspiirkonnad, väljatrükk ArcGis [19]

3. MODELLEERIMISE TULEMUSED

3.1 Kaugjahutusjaamad

Tuginedes reaalsele olukorrale, on modelleerimise aluseks võetud kolm kaugjahutusjaama ja selle baasil koostatud kaks mudelit, mida omavahel võrreldakse. Modelleerimiste erinevus seisneb planeeritava 60 MW kaugjahutusjaama asukohas. Modelleerimise stsenaarium M1 korral paikneb jaam kesklinnas, täpsemalt Sadama piirkonnas, Joonis 2.6 ja modelleerimise stsenaarium M2 korral paikneb jahutusjaam Paljassaares, Joonis 2.7. Ülemiste ja Masina tänava kaugjahutusjaamad on mõlema mudeli korral töös. Vastavalt asukohale on määratud kaugjahutusjaamade nimetused, Paljassaare kaugjahutusjaam, Masina kaugjahutusjaam, Sadama kaugjahutusjaam ja Ülemiste kaugjahutusjaam.

Modelleerimise stsenaarium M1 korral on saadud jahutusjaamade summaarseks jahutusvõimsuseks 113,7 MW, millest Ülemiste kaugjahutusjaama võimsus on 14,28 MW ja Sadama jahutusjaama võimsus on 57,2 MW. Kaugjahutusjaamade modelleerimise võimsused on toodud välja Joonis 3.1



Joonis 3.1 Jahutusjaamade võimsused modelleerimiste stsenaariumid M1 ja M2 korral [15]

Masina tänava jahutusjaama võimsus on modelleerimise ajal jäetud vabaks ja selle määrab programm vastavalt sisestatud parameetritele, arvestades kogu võrgu parameetreid, piirväärtusi ja teiste jahutusjaamade tööd. Masina tänava jaam sai valitud selleks reaalsel olukorda arvestades kuna antud jaama on ehituslikult võimalik lisada täiendavat jahutusvõimsust seadmete baasil ja ehitada välja jaamast kaks väljundit DN600, millest osa võimsusest saab suunata Ülemiste tarbijatele ja teise osa kesklinna tarbijatele. Modelleerimise käigus Masina tänava arvutuslik jahutusvõimsus 42,22 MW.

Modelleerimise stsenaarium M2 korral on saadud jahutusjaamade summaarseks jahutusvõimsuseks 113,73 MW, millest Ülemiste kaugjahutusjaama võimsus on 14,28 MW ja Paljassaare jahutusjaama võimsus on 57,23 MW. Modelleerimise käigus Masina tänava arvutuslik jahutusvõimsus 42,23 MW.

Modelleerimise M1 ja M2 jahutusjaamade võrdluses tuleb esile võimsuste erinevus 0,03 MW, mille põhjustavad jahutuskadod torustikus. Jahutuskadude erinevuse põhjustavad torustiku erinevad pikkused modelleerimise stsenaariumites. Modelleerimise stsenaariumi M2 korral on vaja ehitada täiendav torustik Kalaranna tänavalt Paljassaare jaamani pikkusega ca 1116 m.

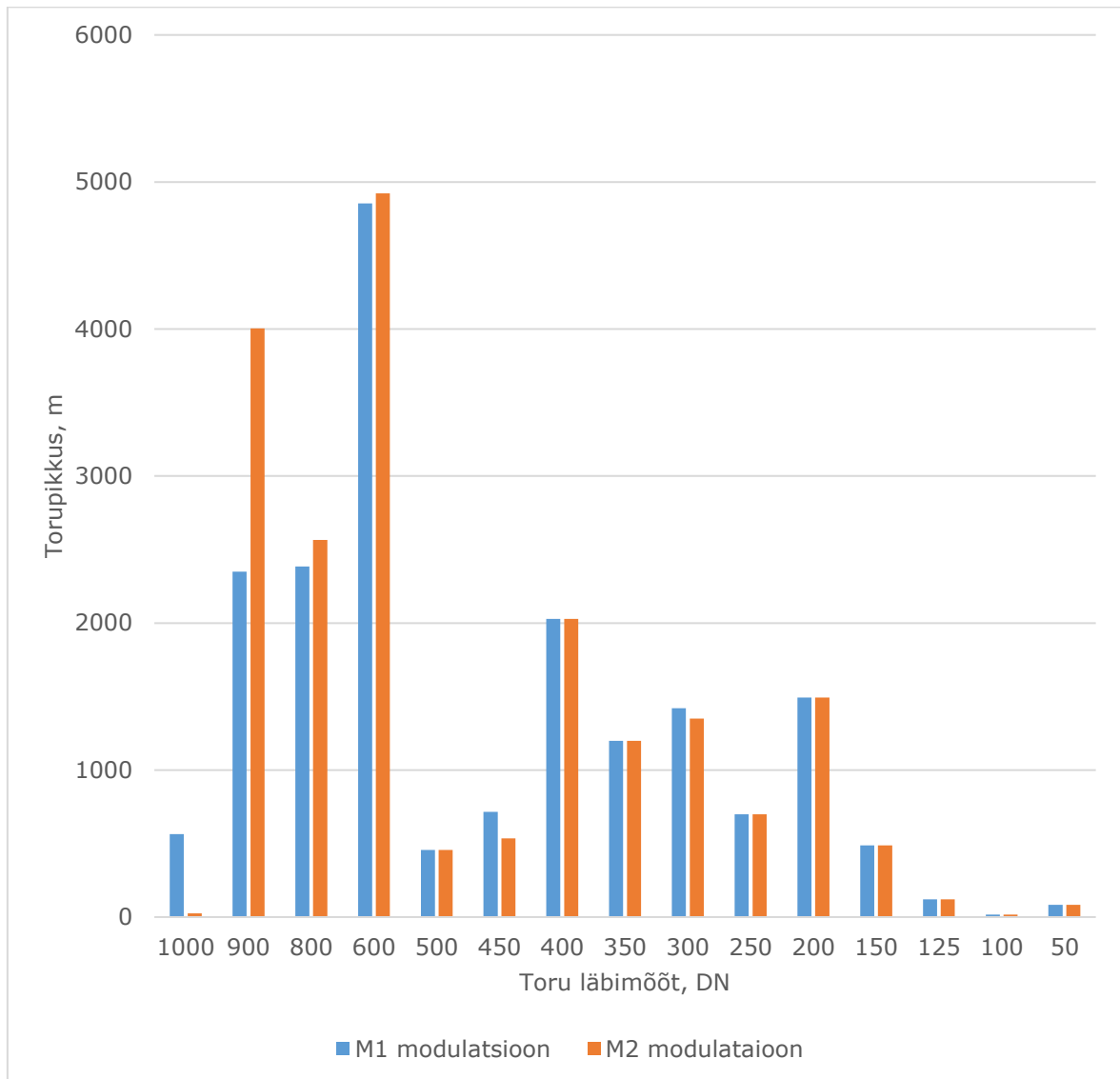
3.2 Tarbijad

Jahutuskooormuse ehk tarbijad moodustavad 102 hoonet, summeeritud arvutusliku jahutuskooormusega 113,38 MW, mis peamiselt asuvad kesklinnas ja Ülemiste piirkonnas, Joonis 2.7. Tarbijaid arvestatakse hoone põhiselt ja kui hoones on mitu erinevat jahutussõlme ja nende taga erinevad tarbijad, siis vaatamata sellele on hoone põhiselt jahutuskooormus summeeritud ja arvestatud kui üks tarbija. Tarbijad on mõlemas modelleerimise stsenaariumis M1 ja M2 võetud samad, mis on vastavuses hetkelise planeeritava reaalse olukorraga ja ei sõltu kaugjahutusjaamade asukohast. Keskmiseks jahutuskooormuseks on 1,11 MW, maksimaalne jahutuskooormus 11 MW ja minimaalne 0,09 MW.

3.3 Kaugjahutusvõrk

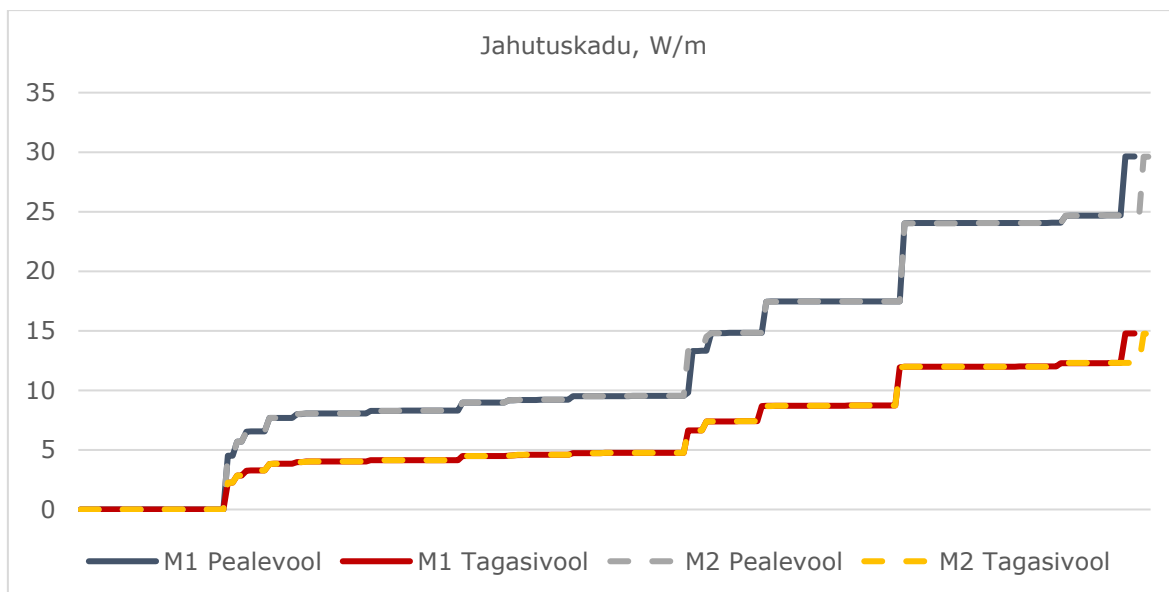
Kaugjahutusvõrgu modelleerimisel arvestatakse lisaks vertikaalsele torustikule samuti horisontaalseid torustikke, mille tulemusena on võimalik saada täpsemad andmed torulõikude pikkustest, jahutuskadudest, vee voolamiskiirusest, rõhukadudest,

vajalikust pumba võimsusest konkreetses jaamas ja mis läbimõõduga torustikku kasutada. Toru läbimõõtude suhe pikkusesse on toodud välja Joonis 3.2



Joonis 3.2 Toru pikkused meetrites ja läbimõõdud [15]

Andmete võrdlemisel tulemusena selgus, et stsenaarium M2 korral on torustiku kogupikkus 1116 m pikem ja keskmine läbimõõt M2 korral 1,74% võrra suurem. Pikema torustiku korral ja suurema keskmise läbimõõdu tõttu tuleb arvestada suuremate jahutuskadudega. Jahutuskadude võrdlus stsenaariumite M1 ja M2 korral on toodud Joonis 3.3.



Joonis 3.3 Jahutuskadude võrdlus stsenaariumite M1 ja M2 korral [15]

Peale- ja tagasivoolusid võrreldes on näha erinevused, mis on summeritult välja toodud Tabel 3.1. Modelleerimise stsenaariumis M1 on pealevoolukaod tagasivoolust ca 99,5 % suuremad ja M2 stsenaariumi korral ca 99,9 % suuremad. Selline olukord on tingitud asjaolust, et tagasivoolu temperatuur on pinnase ehk ümbritseva keskkonna temperatuurist oluliselt kõrgem ja toimub soojusülekanne pinnasesse, mis antud juhul on positiivne nähtus kuna tagastuvavee temperatuuri on vaja jahutusjaamas jahutada 6 °C-ni, enne pealevoolu suunamist. Võrreldes stsenaariumite M1 ja M2 jahutuskadusid, siis need on marginaalsed ja jäävad alla 0,5 %.

Tabel 3.1 Stsenaariumite M1 ja M2 summeeritud jahutuskaod ΔT 9,5 °C korral [15]

Jk n	Stsenaarium M1 pealevool, W	Stsenaarium M1 tagasivool, W	Stsenaarium M2 pealevool, W	Stsenaarium M2 tagasivool, W
1	2867	1437	2941	1471

Jahutatud vee liikumine jahutusjaamast kuni tarbijani võib võtta aega mõnedest minutitest kuni tundideni ja tulenevalt ümbritseva keskkonna kõrgemast temperatuurist saame jahutuskadusid arvestada soojusülekanne teooria alusel. [24]

Jahutuskadusid on võimalik vähendada kasutades eelisoleeritud torusid. Modelleerimisel algandmena toru läbimõõdu korral kuni DN300 kasutatakse isolatsiooniseeriat I, DN350 ja suuremate mõõtude korral on kasutusel 0 isolatsiooniseeria. [21]

Lisaks jahutuskadudele vee liikumisel jaamast tarbijani, peab arvestama ka olukordadega kus tarbimine puudub või on minimaalne, samas tsirkulatsioon toimub.

Selline olukord võib juhtuda hilissügisel, talvel või varakevadel kus tarbimist üldiselt ei toimu või vähesel määral, näiteks serveriruumide jahutamiseks. Sellises olukorras peaveoolu ja tagasivoolu temperatuurid ühtlustuvad ja võime võtta summeeritud jahutuskao väärtused samaks, Tabel 3.2.

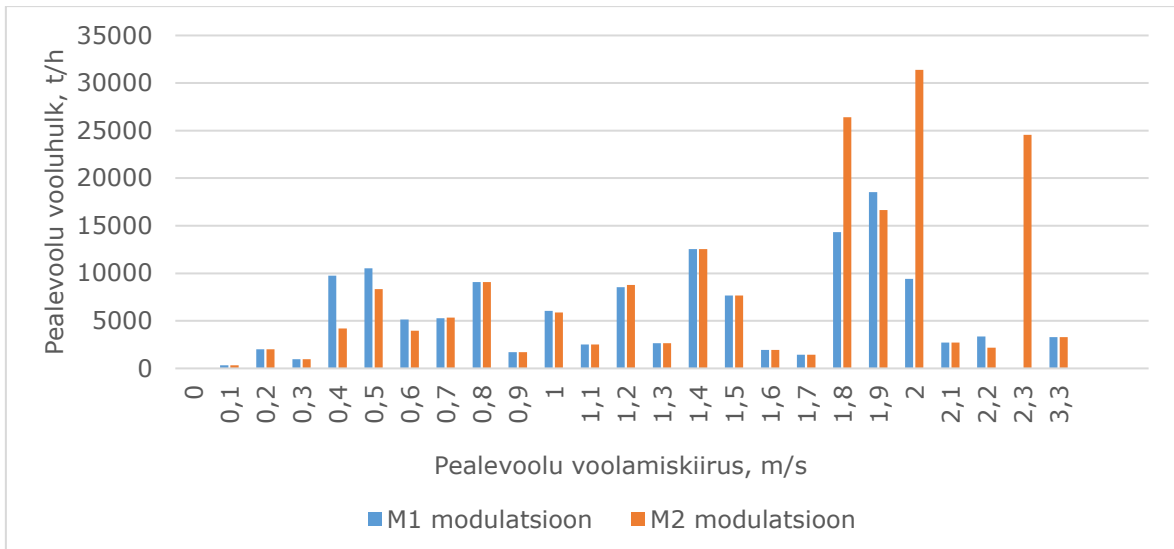
Tabel 3.2 Stsenaariumite M1 ja M2 summeeritud jahutuskadod $\Delta T 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ korral [15]

Jk n	Stsenaarium M1 peaveool, W	Stsenaarium M1 tagasivool, W	Stsenaarium M2 peaveool, W	Stsenaarium M2 tagasivool, W
1	2867	2867	2941	2941

Võrreldes jahutuskadusid normaaltöö olukorraga selgub, et sel juhul on kaod ca 33% suuremad mõlema stsenaariumi korral.

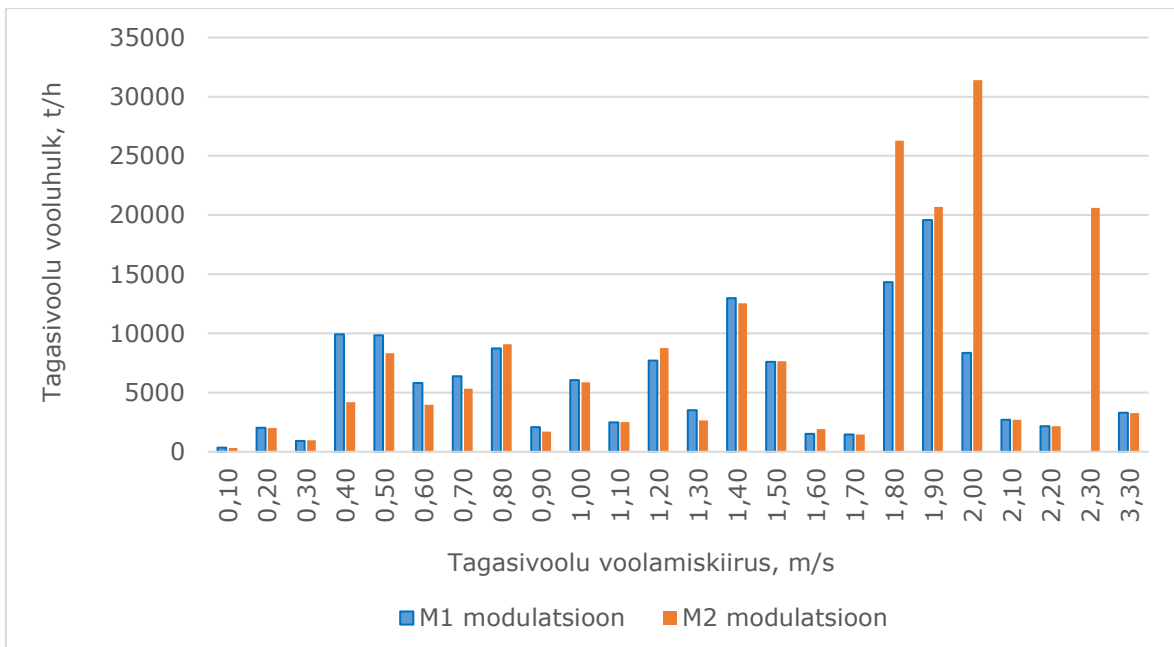
Lisaks jahutuskadudele on kaugjahutusvõrgu modelleerimisel olulise tähtsusega veevooluhulk ja vee voolamiskiirus. Võrreldes kaugküttega on peale- ja tagasivoolutemperatuuride erinevus väiksem, mistõttu on sama koguse soojusvõimsuse ülekandmiseks vaja suuremaid massivoolukiirusi. Sellest lähtuvalt on vaja kasutada suurema läbimõõduga torusid, mille tõttu omakorda suurenevad pumba kulud ja sellest tulenevalt kogu elutsükli kogukulud suurenevad. [25], [26]

Tulenevalt torustiku erinevustest modelleerimise stsenaariumites M1 ja M2, on toodud välja erinevused peaveoolu summeritud vooluhulkade ja voolamiskiiruste vahel, Joonis 3.4. Lõikudes voolukiirusega üle 3 m/s on tegemist harutorustikega hoonetesse ja tihtipeale on suurema läbimõõduga torustike kasutamine piiratud teiste kommunikatsioonide tõttu pinnases või maa-alustes parklates kõrgusepiirangute tõttu. Suurema läbimõõduga toru kasutamine võimaldab alla tuua vee voolamise kiirust ja rõhukadu jooksva meetri kohta.



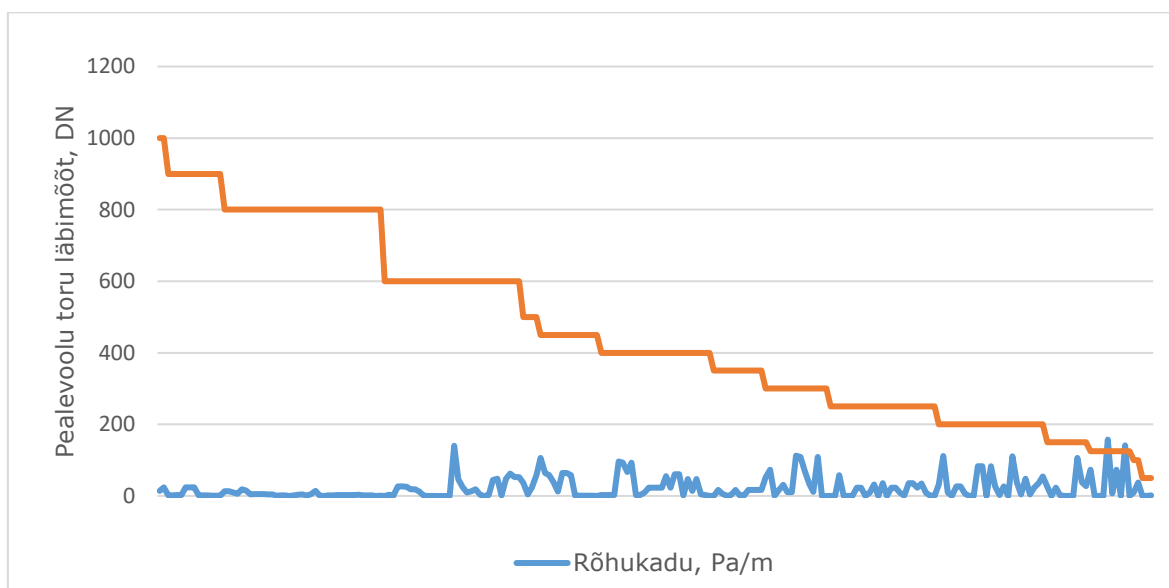
Joonis 3.4 Pealevoolu vooluhulgad, t/h ja vee voolamiskiirused, m/s [15]

Summeeritud vooluhulgad ja kiirused tagasivoolus on esitatud Joonis 3.5. Suurim voolukiirus on 4,56 m/s stsenaariumi M1 korral ja 4,6 m/s stsenaariumi M2 korral. Soovituslikud voolukiirused põhitorustikus mida ei tohiks ületada 2,5 m/s, jaotustorustikes 3,5 m/s ja ühendustorus 1 m/s. Piirväärtuste ületamised võivad põhjustada müra torustikus ja jaotustorustikus erosiooni. [27]



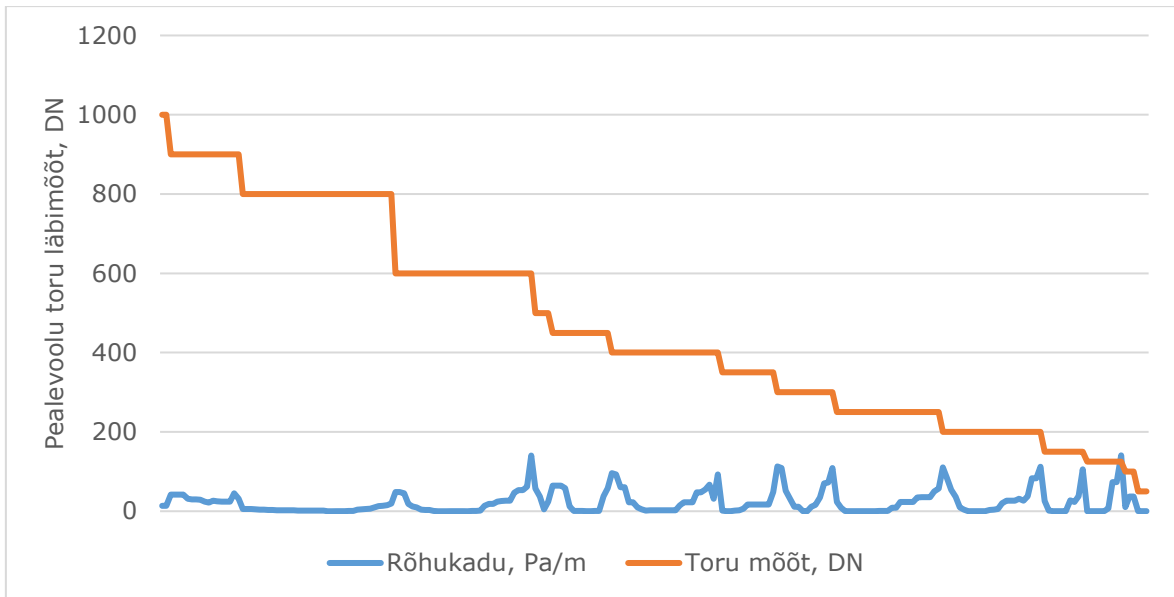
Joonis 3.5 Pagasivoolu vooluhulgad, t/h ja vee voolamiskiirused, m/s [15]

Modelleerimise käigus tuli ette olukord kus jaotustorustikus toruühendus hoonega oli ekslikult sisestatud väiksem kui vaja ja seetõttu oli rõhukadu ja vee voolamiskiiruse arvuline näit väga suur ning graafilisel esitlemisel tuli see kohe välja. Toru läbimõõt sai korrigeeritud ja andmed uuesti modelleeritud ja sisestatud. Stsenaariumi M1 rõhukaod ja toru läbimõõdud on hea tulemusega ja suuremad rõhukaod esinevad hoonete ühendustorustikes, Joonis 3.6. Keskmine rõhukadu on 21,9 Pa/m kohta ja üle 100 Pa/m kohta on hoonete ühendustorustikud. Tsirkulatsioonipumpade energiatarbimise vähendamiseks on võimalik toru läbimõõtu suurendada, siinjuures peab aga arvestama kas see on majandusliku otstarbekas ja tehniliselt võimalik. Käesolev töö ei arvesta majanduslikku tasuvust ja sellega seotud arvutusi. [25], [26]



Joonis 3.6 Pealevoolu toru läbimõõt, DN ja rõhukadu modelleerimise stsenaarium M1 korral, Pa/m [15]

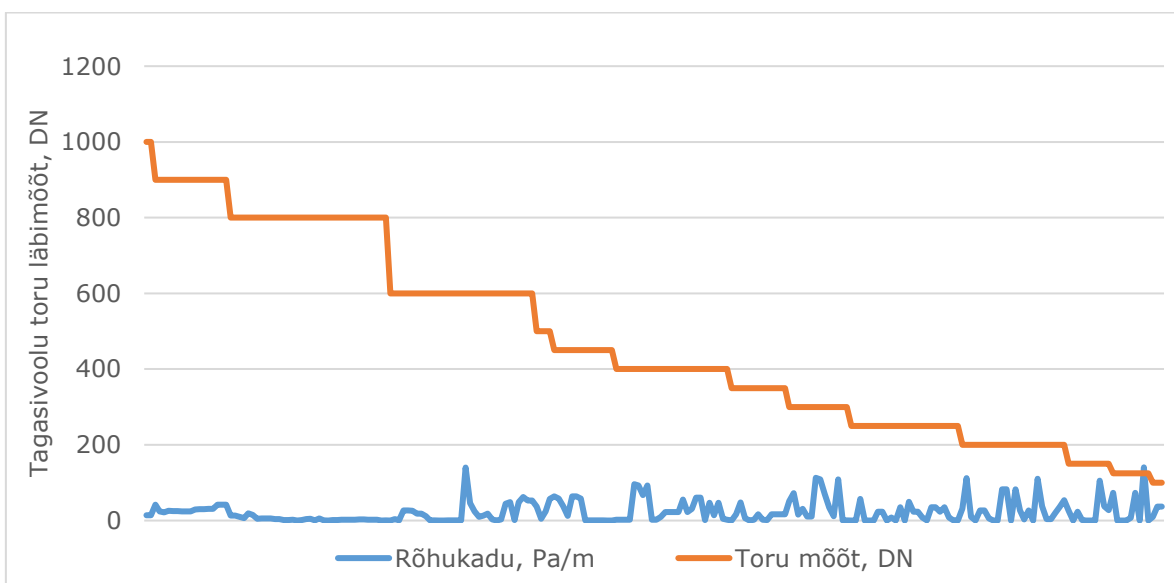
Modelleerimise stsenaarium M2 rõhukaod meetri kohta jäävad alla 200 Pa, keskmine rõhukadu on 22,7 Pa/m kohta mis on väga hea tulemus ja võimaldab vajadusel kasutada väiksema läbimõõduga torustikku, kui see osutub majanduslikult ja ehituslikult otstarbekaks. Kokku on 8 ühendustorustikku hoonega, mille rõhukadu on üle 100 Pa/m kohta, maksimaalne näit 140 Pa/m kohta, Joonis 3.7.



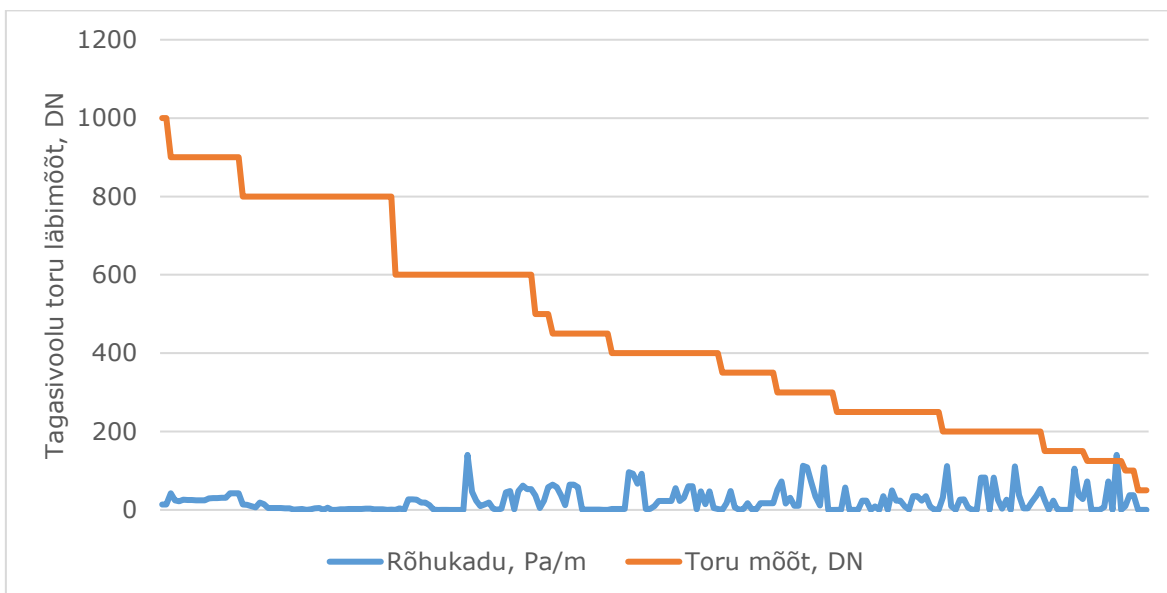
Joonis 3.7 Pealevoolu toru läbimõõt, DN ja rõhukadu modelleerimise stsenaarium M2 korral, Pa/m [15]

Pikkade põhitorustike korral soovitatakse piirduda rõhukaoga 100 Pa/m kohta, väiksema diameetriga ja lühema hoonete vahelise jaotusvõrgu korral lubatakse tavaliselt rõhukadu 200 - 250 Pa/m kohta. [22]

Modelleerimise stsenaarium M1 ja M2 tagasivoolu rõhukaod toru läbimõõtude suhtes pealevoolu rõhukadudega on erinevad ja tulenevad rõhulangusest tarbija jahutussõlmedes, Joonis 3.8 ja Joonis 3.9.



Joonis 3.8 Tagasivoolu toru läbimõõt, DN ja rõhukadu modelleerimise stsenaarium M1 korral, Pa/m [15]



Joonis 3.9 Tagasivoolu toru läbimõõt, DN ja rõhukadu modellemise stsenaarium M2 korral [15]

3.4 Ülemiste kaugjahutusjaama avariolukord

Modelleerimise stsenaarium M1 korral, kui Ülemiste kaugjahutusjaam avariikorras välja lülitub. Edaspidi nimetame antud modelleerimise stsenaariumi M1-A1. Modelleerimise läbiviimiseks eemaldasime stsenaariumist Ülemiste jaama, kõik teised algandmed ja parameetrid jäid samaks, Joonis 3.10.



Joonis 3.10 Kaugjahutustorustik ja jaamad modelleerimise avariistsenaariumi M1-A1 korral, väljatrükk Leanheat tarkvarast [15]

Kuna tarbijate jahutuskoormus jäi samaks, samuti torustik, siis jahutusjaama koormus ja vooluhulk Masina tänava jaamas tõusis, sest Masina tänava koormus on jäetud modelleerimisel muudetavaks väärtuseks. Sadama jaama võimsus endiselt 57,27 MW ja Masina jaamas 56,54 MW, Joonis 3.11.

Editor - 24.03.2024 0:00:00

Layer: Scenario

- Node (224)
- Pipe (229)
- Plant (2)

Results	Boundary Conditions	Measurements	Data	Limits	Adaption	Prognosis	Zones	Gener
Alias	*	Masina K.I.I	Sadama SP.I					
Power [MW]		-56.54	-57.27					
Flow [t/h]		5096.264	5152.672					
Temperature, supply [°C]		6.0	6.0					
Temperature, return [°C]		15.5	15.5					
Temperature Change [°C]		-9.53	-9.55					
Pressure, supply [barg]		4.86	7.63					
Pressure, return [barg]		1.90	4.80					
Pressure change [bar]		2.96	2.83					
Control node			N_248					
Head, supply [m]		80.96	79.70					
Head, return [m]		50.82	50.87					
Pumping power [MW]		0.42	0.41					
▶ Power, real [MW]		56.54	57.27					

Joonis 3.11 Modelleerimise avariistsenaariumi M1-A1 jahutusjaamade andmed, väljatrükk Leanheat tarkvarast [15]

Avariiolukorras on tõusnud pealevoolu rõhk ja langenud tagasivoolu rõhk ning rõhkude vahe on natuke suurenenud peale- ja tagasivoolu vahel, võrreldes tavalise tööolukorraga, mida kirjeldab modelleerimise stsenaarium M1, Joonis 3.12.

Editor - 24.03.2024 0:00:00

Scenario

- Node (224)
- Pipe (230)
- Plant (3)

Results	Boundary Conditions	Measurements	Data	Limits	Adaption	Prognosis	Zones	Gener
Alias	*	Masina K.I.I	Sadama SP.I	Ülemiste K.I.I				
Power [MW]		-42.25	-57.27	-14.29				
Flow [t/h]		3808.096	5152.672	1288.168				
Temperature, supply [°C]		6.0	6.0	6.0				
Temperature, return [°C]		15.5	15.5	15.5				
Temperature Change [°C]		-9.53	-9.55	-9.52				
Pressure, supply [barg]		4.80	7.63	3.31				
Pressure, return [barg]		1.96	4.80	1.07				
Pressure change [bar]		2.84	2.83	2.24				
Control node			N_248					
Head, supply [m]		80.37	79.70	77.55				
Head, return [m]		51.39	50.87	54.74				
Pumping power [MW]		0.30	0.41	0.08				
Power, real [MW]		42.25	57.27	14.29				

Joonis 3.12 Modelleerimise stsenaarium M1 jahutusjaamade andmed, väljatrükk Leanheat tarkvarast [15]

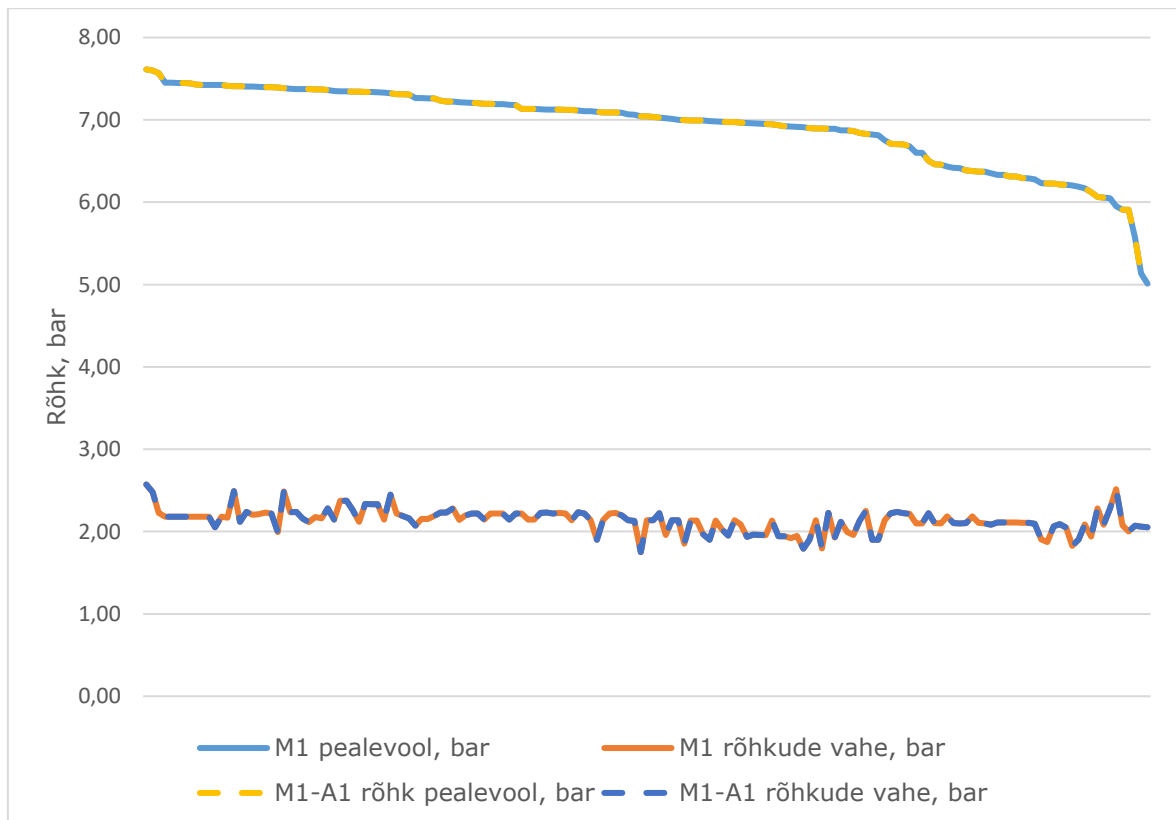
Modelleerimise avariistsenaariumi M1-A1 ja stsenaariumi M1 täiendavad andmed on esitatud võrdluseks Tabel 3.3. Pumba töstekõrguses nii peale- kui tagasivoolul ei esine samuti suurt muutust.

Tabel 3.3 Modelleerimise avariistsenaarium M1-A1 ja stsenaarium M1 andmed võrdluses [15]

Ühik	Modelleerimise stsenaarium M1			Modelleerimise avariistsenaarium M1-A1	
	Masina KJJ	Sadama KJJ	Ülemiste KJJ	Masina	Sadama
Võimsus, MW	42,3	57,3	14,3	56,5	57,3
Vooluhulk, t/h	3808,1	5152,7	1288,2	5096,3	5152,7
Temperatuur, pealevool, °C	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Temperatuur, tagasivool, °C	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5
Temperatuur, muutus, °C	9,5	9,6	9,5	9,5	9,6
Rõhk, pealevool, barg	4,8	7,6	3,3	4,9	7,6
Rõhk, tagasivool, barg	2,0	4,8	1,1	1,9	4,8
Rõhk, muutus, barg	2,8	2,8	2,2	3,0	2,8
Kontroll punkt		N_248			N_248
Tõstekõrgus, pealevool, m	80,4	79,7	77,6	81,0	79,7

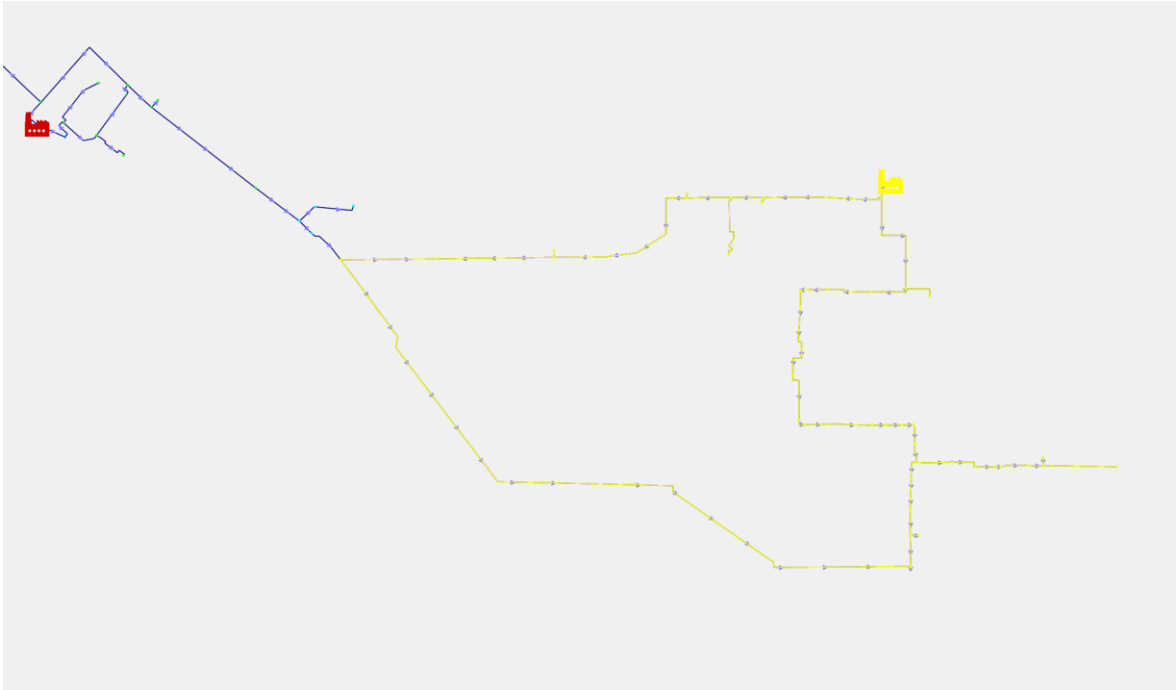
Ühik	Modelleerimise stsenaarium M1			Modelleerimise avariistsenaarium M1-A1	
	Tõstekõrgus, tagasivool, m	51,4	50,9	54,7	50,8
Pumba võimsus, MW	0,3	0,4	0,1	0,4	0,4
Võimsus, tegelik, MW	42,3	57,3	14,3	56,5	57,3

Stsenaariumis rõhu hoidmise punkt N_248 asub südalinna A. Laikmaa tänaval, siis sellest lähtuvalt Sadama jaam püüab tagada rõhku antud punkti järgi, esitatud roheline punktiirjoonena Joonis 3.10. Võrreldes pealevoolu rõhku ja rõhkude vahet kesklinna tsooni kontrollpunktides, siis mõlema modelleerimise korral on andmed samad, Joonis 3.13. Sellest saab järeldada, et Ülemiste jaama avariiolukord ei mõjuta Sadama piirkonda planeeritava jaama töö ega võrgu parameetreid.



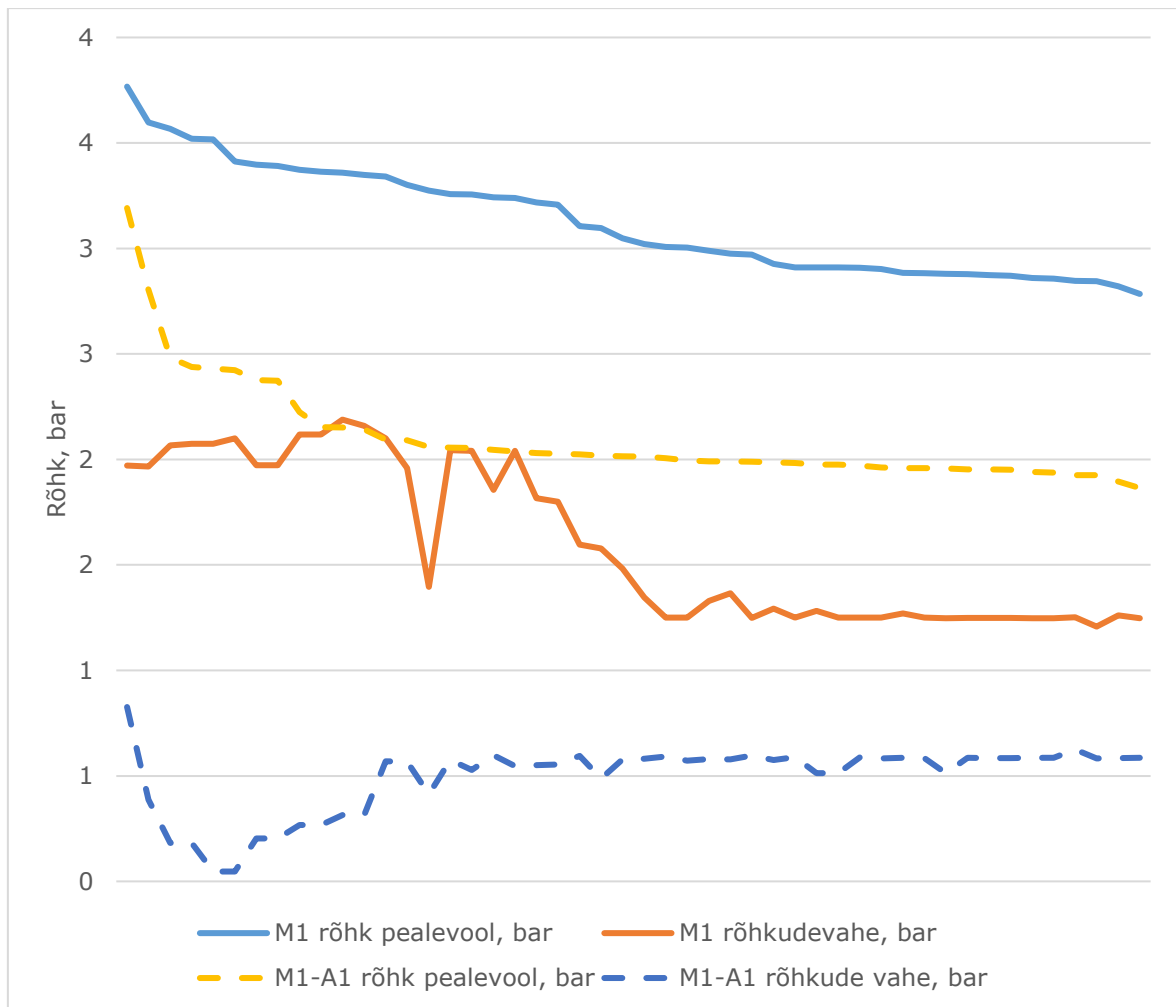
Joonis 3.13 Sadama piirkonna pealevoolurõhud, bar ja rõhkudevahed võrdluses stsenaariumide M1 ja avariistsenaariumis M1-A1, bar [15]

Kaugjahutusvõrgu tehnilistest tingimuste järgi peab olema tagatud nii soojus- kui jahutussõlme primaarpoolel minimaalne rõhkudevahe 100 kPa [28]. Ülemiste piirkond ja kontrollpunktid rõhkude kohta on näidatud Joonis 3.14.



Joonis 3.14 Ülemiste piirkond, M1 modelleerimise stsenaarium, väljatrükk Leanheat tarkvarast [15]

Tulemusi võrreldes selgub, et avariolukorras Ülemiste jaama seiskumise korral toimub rõhkude osas oluline langus. Kui võrrelda omavahel rõhkude keskmisi pealevoolu väärtusi, siis modelleerimise M1 korral on keskmine rõhk 3,12 bar. Avariolukorras on pealevoolu keskmiseks rõhuks 2,1 bar. Rõhkude muutudes modelleerimise stsenaariumis on esitatud Joonis 3.15.



Joonis 3.15 Ülemiste piirkond, modellerimiste stsenaariumite pealevoolu rõhud, bar ja rõhkude vahed bar M1 ja M1-A1 korral [15]

Modelleerimise stsenaariumi M1-A1 olukorras kus on tagatud pealevoolu rõhk 2 bar ja 0,5 bar rõhuvahet, võimaldab enamus tarbijaid varustada kaugjahutusega, eeldusel et Masina tn kaugjahutusjaamas on olemas vajalik vaba- või reservvõimsus. Torulõigud kus tarbijad tänase seisuga puuduvad või on loobunud kaugjahutusest, aga torulõigud on sisestatud modelleerimise stsenaariumi perspektiivsetena, siis nendes osades on rõhkudevahet <0,5 bar.

KOKKUVÕTE

Käesolev magistritöö keskendub Tallinna kaugjahutusvõrgu modelleerimisele, kasutades selleks Leanheat tarkvara. Töö eesmärgiks on luua tõhus ja keskkonnasäästlik kaugjahutussüsteem, mis vastab kasvavale jahutusenergia nõudlusele ja aitab kaasa kliimaeesmärkide saavutamisele.

Töös tutvustatakse kaugjahutuse põhialuseid, globaalseid ja Euroopa jahutustrende ning kaugjahutuse eeliseid võrreldes lokaalsete jahutussüsteemidega. Rõhk on energiatõhususel, primaarenergia vajaduse vähendamisel, süsinikdioksiidi heitmete vähendamisel ja energia impordi sõltuvuse vähendamisel.

Töö teises osas keskendutakse Tallinna kaugjahutusvõrgu modelleerimisele, kasutades reaalseid andmeid AS Utilitas Tallinn kaugjahutusosakonna andmebaasist ja avalikest registritest. Modelleerimise eesmärk on võrrelda erinevaid kaugjahutusjaamade asukohti, Sadama piirkond ja Paljassaare, ning analüüsida nende mõju kogu võrgu toimimisele. Modelleerimise tulemustena selgub, et olenemata jaama asukohast, toimib jahutusvõrk mõlema modelleerimise stsenaariumi korral. Jahutusjaama asukoha valikul tuleb lisaks tehnilistele näitajatele arvesse võtta jahutusjaama ja jahutusvõrgu ehituse maksumust, torustiku ehituse võimalust merevee kasutamiseks, jahutustorustiku paigaldust linnakeskkonda, ümbritsevat elukeskkonda, tarbijate tihedust ja vajadust liituda kaugjahutusega. Leanheat tarkvara võimaldab arvesse võtta algandmeid, mis tavameetodil on keerulised või võimatud. Tarbijate jahutuskoormuste andmeid ei tohiks siinkohal alahinnata kuna mõjutavad oluliselt kogu võrgu modelleerimise tulemust.

Lisaks võrreldakse kaugjahutusjaamade toimimist avariolukorras, et tagada varustuskindlus olulistele objektidele ja hinnata võrgu töökindlust eriolukordades. Näiteks uuritakse Ülemiste kaugjahutusjaama avariolukorda. Tulemustest selgub, et Ülemiste jahutusvõrgu piirkonnas toimub sel juhul rõhulangus, kuid tarbijate varustuskindlus on endiselt tagatud rõhkudevahe tõttu. Masina jaamas peab olema selleks olukorraks paigaldatud piisvalt jahutusvõimsuse reservi.

Töö koosneb mitmest etapist, sealhulgas andmete kogumine ja analüüs, võrgu modelleerimine ja tulemuste hindamine. Modelleerimise tulemused näitavad, et kaugjahutusvõrk on oluliselt energiatõhusam ja keskkonnasõbralikum võrreldes lokaalsete jahutusseadmetega. See aitab vähendada primaarenergia vajadust ja süsinikdioksiidi heitmeid.

Uuringust selgus, et jahutusjaama asukoht mõjutab märkimisväärselt võrgu toimivust ja kulutõhusust. Sadama piirkond ja Paljassaare on mõlemad potentsiaalsed asukohad uutele jahutusjaamadele, kusjuures mõlemal on omad eelised ja puudused. Avariilukorra simulatsioonid aitavad paremini mõista võrgu vastupidavust ja vajalikke meetmeid kriisilukordade ennetamiseks ja lahendamiseks.

Käesolev töö aitab välja töötada ja optimeerida kaugjahutusvõrgu lahendusi Tallinnas, mis on kooskõlas Euroopa Liidu kliimaeesmärkidega. Töö tulemused pakuvad väärtuslikku teavet kaugjahutusvõrgu edasiseks arenguks, uute tarbijate liitmiseks ning võrgu töökindluse ja vastupidavuse parandamiseks.

Salvestustehnoloogiaga arvestamine Masina tänava kaugjahutusjaamas võiks olla edasiste uurimustööde teemaks magistri ja doktoritöodes. Salvestus võimaldab katta jahutuskooormuste tipuaega ja aega kui primaarenergiaks olev elektrienergia hind on keskmisest hinnast oluliselt kõrgem. Teatud jahutuskooormuse juures on võimalik salvestuse abil saavutada efekt, kus kuumadel suvepäevadel jahutusseadmed töötavad öösel jahutades jahutusvõrgus ja salvestis olevat vett ning päevasel ajal töötavad pigem osakooormusel. Öisel ajal töötavad jahutusseadmed vabajahutuse korral efektiivsemalt, tulenevalt madalamast keskkonna temperatuurist ja elektri hinnast.

Lisaks eelnevale tuleb märkida, et Leanheat tarkvara võimaldab luua modelleerimise stsenaariume kus igale tarbijale on sisestatud tema täpne jahutuse tarbimise graafik. Mõte seisneb selle, et kõik tarbijad ei kasuta jahutust samaaegselt ja kui on teada tarbija jahutusvajadused, saame luua väga täpse mudeli, mis võimaldab vabanenud jahutusreservi arvelt liita rohkem tarbijaid. Antud modelleerimist ei ole veel võimalik luua kuna puuduvad täpsed tarbijate põhised andmed.

SUMMARY

Current Master's thesis focuses on the modeling of the district cooling network in Tallinn using Leanheat software. The aim of the study is to create an efficient and environmentally friendly district cooling system that meets the growing demand for cooling energy and contributes to achieving climate goals.

The first part of the thesis introduces the basic principles of district cooling, its advantages over local cooling systems, and the potential applications of district cooling. It emphasizes energy efficiency, reduction of primary energy demand, reduction of carbon dioxide emissions, and reduction of dependence on energy imports.

The second part of the thesis focuses on modeling the district cooling network in Tallinn, using real data from AS Utilitas Tallinn's district cooling department and public registers. The objective of the modeling is to compare different potential locations for district cooling plants (the Port area and Paljassaare) and analyze their impact on the overall network performance. In selecting the location for the cooling station, in addition to technical indicators, one must consider the construction cost of the cooling station and the cooling network, the feasibility of constructing pipelines for using seawater, the installation of cooling pipelines in an urban environment, the surrounding living environment, the density of consumers, and the need to connect to district cooling. Leanheat software is utilized to incorporate complex initial data that are difficult or impossible to consider using conventional methods. The cooling load data of consumers should not be underestimated here, as they significantly affect the results of the entire network modeling.

In addition, the thesis compares the performance of district cooling plants in emergency situations to ensure the reliability of supply to critical facilities and assess the network's robustness in various scenarios. For example, the emergency situation at the Ülemiste district cooling plant is examined. The results show that there will be a pressure drop in the Ülemiste cooling network area in this case, but the reliability of supply to consumers is still ensured due to the pressure differential. Sufficient reserve cooling capacity must be installed at the cooling station for this situation.

The thesis consists of several phases, including data collection and analysis, network modeling, and evaluation of results. The modeling results indicate that the district cooling network is significantly more energy-efficient and environmentally friendly

compared to local cooling systems. It helps reduce primary energy demand and carbon dioxide emissions.

The study revealed that the location of the cooling plant significantly affects the network's performance and cost-effectiveness. Both the Port area and Paljassaare are viable locations for new cooling plants, each with its own advantages and disadvantages.

Emergency scenario simulations provide insights into the network's resilience and necessary measures to prevent and address crisis situations. For instance, the modeling of the Ülemiste cooling plant's emergency situation helps plan for the reliability of supply to critical consumers.

In conclusion, the thesis helps develop and optimize district cooling network solutions in Tallinn, aligning with the European Union's climate goals. The results provide valuable information for the further development of the district cooling network, connecting new consumers, and improving the network's reliability and resilience.

The consideration of the planned storage technology for the Masina Street station could not be included in the thesis. Storage allows covering peak cooling loads and times when the price of electricity, which is the primary energy source, is significantly higher than the average price. At a certain cooling load, it is possible to achieve an effect with storage where, on hot summer days, the cooling equipment operates at night, cooling the water in the cooling network and storage, and during the day, operates at partial load. At night, cooling equipment works more efficiently with free cooling due to lower ambient temperatures and electricity prices.

In addition to the above, it should be noted that Leanheat software allows the creation of simulations where the exact cooling consumption schedule of each consumer is entered. The idea is that not all consumers use cooling simultaneously, and if the cooling needs of the consumers are known, we can create a very accurate model that allows us to add more consumers using the freed-up cooling reserve. These simulations cannot yet be created accurately due to the lack of precise consumer-specific data.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] M. Isaac ja D. P. v. Vuuren, „Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change,” Energy Policy, Bilthoven, 2009.
- [2] D. C. Broadstock ja X. Wang, „District cooling services: A bibliometric review and topic classification of existing research,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, Singapore, 2024.
- [3] Euroopa Liit, 2023., „Pakett „Eesmärk 55”,“ Euroopa Liit, 2024.
- [4] S. Frederiksen ja S. Werner, District Heating and Cooling, Lund: Studentlitteratur AB, 2013, p. 586.
- [5] S. Werner, „International review of district heating and cooling,” Energy, Halmstad, 2017.
- [6] Heat Roadmap Europe, „HEATING AND COOLING,” Sustainable Energy Planning Research Group, Kopenhaagen, 2017.
- [7] Gren Holding Company B.V, „Kaugjahutus,” 2024. [Võrgumaterjal]. Available: <https://gren.com/ee/kaugjahutusteenus-ariklientidele/>. [Kasutatud 20 Mai 2024].
- [8] B. Skagestad ja P. Mildenstein, District Heating and Cooling Connection Handbook, IEA DISTRICT HEATING AND COOLING, 1999, p. 86.
- [9] J.-J. Wang, Y.-Y. Jing, C.-F. Zhang ja Z. (. Zhai, „Performance comparison of combined cooling heating and power system in different operation modes,” Applied Energy, Colorado, Baoding, 2011.
- [10] W. Stanek ja W. Gazda, „Exergo-ecological evaluation of adsorption chiller system,” Energy, Gliwice, 2014.
- [11] W. Gazda ja W. Stanek, „Influence of power source type on energy effectiveness and environmental impact of cooling system with adsorption refrigerator,” Energy Conversion and Management, Gliwice, 2014.
- [12] M. Jangsten, T. Lindholm ja J.-O. Dalenbäck, „District cooling substation design and control to achieve high return temperatures,” Energy, Gothenburg, 2021.
- [13] S. Sayadi, J. Akander, A. Hayati ja M. Cehlin, „Review on District Cooling and Its Application in Energy Systems,” IntechOpen, Gälve, 2021.
- [14] Energiakontsern Utilitas, „Kaugjahutus,” OÜ Utilitas, 2024. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.utilitas.ee/kaugkute-ja->

- kaugjahutus/kaugjahutus/#kaugjahutuse-teekond-hoonesse. [Kasutatud 14 05 2024].
- [15] Danfoss, „Plan, visualize and optimize District Energy systems with Leanheat®Network,” Danfoss A/S, Nordborg, 2021.
- [16] A. Kadir ja E.-G. N. M., „A review of data-driven building energy consumption prediction studies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Urbana, 2018.
- [17] W. Yixuan, Z. Xingxing, S. Yong, X. Liang, P. Song, W. Jinshun, H. Mengjie ja Z. Xiaoyun, „A review of data-driven approaches for prediction and classification of building energy consumption,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Ningbo, Falun, Baijing, Hebei, 2018.
- [18] M. Bourdeau, X. q. Zhai, E. Nefzaoui, X. Guo ja P. Chatellier, „Modeling and forecasting building energy consumption: A review of data-driven techniques,” *Sustainable Cities and Society*, Shanghai; Marne-la-Vallée, 2019.
- [19] AlphaGIS, „ArcGIS Pro,” AlphaGIS OÜ, 2024. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.gisbaltic.eu/et-ee/product/arcgis-pro/overview>. [Kasutatud 14 Mai 2024].
- [20] Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ, „Torustikuelemendid. DN (nihiläbimõõdu) määratlus ja valik,” Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ, Tallinn, 1997.
- [21] Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ, „EVS-EN 17415-1:2020,” Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ, Tallinn, 2020.
- [22] Eesti Arengufond, „KAUGKÜTTE ENERGIASÄÄST,” Eesti Arengufond, 01 September 2013. [Võrgumaterjal]. Available: https://energiatalgud.ee/sites/default/files/images_sala/4/46/Eesti_Arengufond._Kaugk%C3%BCtte_energias%C3%A4%C3%A4st.pdf. [Kasutatud 17 Mai 2024].
- [23] K. Sanjivy, M. Hopuare, A. Jamelot, F. Ferrucci, O. Marc ja F. Lucas, „Exploring global accessibility of deep ocean water for sea water air conditioning (SWAC) process: Identifying feasibility areas depending on temperature source,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Angers, 2024.
- [24] W. Dai, W. Xia, B. Li, H. Goh, Z. Zhang, F. Wen ja C. Ding, „Increase the integration of renewable energy using flexibility of source-network-load-storage in district cooling system,” *Journal of Cleaner Production*, Nanning, 2024.

- [25] M. Jangsten, T. Lindholm ja J.-O. Dalenbäck, „Analysis of operational data from a district cooling system and its connected buildings,” *Energy*, Gothenburg, 2020.
- [26] T. D. Čož, A. Kitanovski ja A. Poredoš, „Exergoeconomic optimization of a district cooling network,” *Energy*, Ljubljana, 2017.
- [27] LOGSTOR Denmark Holding ApS, „kingspan-logstor-design-manual-single-pipes-specifications-en-eur.pdf,” LOGSTOR Denmark Holding ApS, 1 April 2024. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.logstor.com/media/7216/kingspan-logstor-design-manual-single-pipes-specifications-en-eur.pdf>. [Kasutatud 16 May 2024].
- [28] AS Utilitas Tallinn/AS Utilitas Eesti, „Soojussõlme projekteerimise üldised tehnilised tingimused,” 01 01 2023. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.utilitas.ee/wp-content/uploads/2023/04/KOMM_P1_V4_v5_Soojussolme_projekteerimise_uldised_tehnilised_tingimused_Kehtib_alates_01_01_2023_Tehnoholduse_osakond.pdf. [Kasutatud 19 Mai 19.05.2024].
- [29] A. Inayat ja M. Raza, „District cooling system via renewable energy sources: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Sharjah, 2019.

LISA 1

Lisa_1_andmed.xlsx