



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

SOOJUSPUMPADE KONKURENTSIVÕIME UURIMINE KAUGKÜTTESÜSTEEMIS EESTI TINGIMUSTES

COMPETITIVENESS OF HEAT PUMPS IN ESTONIAN DISTRICT HEATING
SYSTEMS

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Armin Ilisson

Üliõpilaskood: 176821AAVM

Juhendaja: Hardi Koduvere, nooremteadur

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.

“.....” 201.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Armin Ilisson

Lõputöö liik: Magistritöö

Töö pealkiri: Soojuspumpade konkurentsivõime uurimine kaugküttesüsteemis Eesti tingimustes

Kuupäev: 24.05.2019

85 lk

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehatroonika instituut

Töö juhendaja(d): Hardi Koduvere

Töö konsultant (konsultandid): -

Sisu kirjeldus:

Käesolevas töös on uurimise all soojuspumpade konkurentsivõime kaugküttesüsteemis Eesti tingimustes võrreldes koostootmisjaamaga. Sellest tulenevalt on eesmärgiks välja selgitada majanduslikult mõistlikum soojusallikas ja stsenaarium, millisel juhul on otstarbekas soojuspumba abil kaugküttevõrku soojust toota ning soojussalvestite majanduslik kasumlikkus. Esimeses peatükis käsitletakse soojuspumba tehnilist kirjeldust, soojusteguri mõistet, soojuspumpade rakendamist ja soojussalvesteid. Teises osas kirjeldatakse Eestiga seonduvaid spetsiifilisi olusid - kasutatavaid tehnoloogiaid, kütuseid, tarbimiskoguseid ja tarbimisprofiili. Kirjeldatakse välistemperatuuri, soojusmajanduse regulatsiooni ja hinnakujundust, võimalikke soojusallikaid ning erinevaid finantsmeetodeid hindamaks konkurentsivõimet. Kolmas peatükk keskendub arvutustele, kus arvutatakse soojuspumbast toodetava soojuse omahind sõltuvalt soojusallikast, tootmisprofiilist, kirjeldatakse soojussalvesti opereerimise loogikat ning analüüsitakse soojussalvesti majanduslikku otstarbekust ja soojuse hinda koostootmisjaamas. Tuuakse välja tulemused, võrdlused ning tehakse järeldused soojuspumba konkurentsivõime kohta kaugküttesüsteemis Eesti tingimustes. Tulemused näitavad, et kõige realistlikum on soojusallikana kasutada välisõhku, kuid soojuspumpadega soojuse tootmine on ligikaudu 10-15% kallim, kui koostootmisjaamadega. Mida protsentuaalselt suurem osakaal tarbimisest kaetakse, seda soodsamaks muutub soojuspumbast toodetava soojuse omahind võrreldes koostootmisjaama omahinnaga, mis on leitud alternatiivkatlamaja meetodil. Selgub, et soojussalvesti ehitamine on majanduslikult ebaotstarbekas. Järeldub, et suure osa kulutustest soojuspumbast soojuse tootmisel moodustab elektrienergia, siis elektrienergia odavnedes oleks soojuspump võrreldes koostootmisjaamaga konkurentsivõimelisem.

Märksõnad: soojuspump, kaugküttesüsteem, koostootmisjaam, soojuse omahind, soojusallikas.

ABSTRACT

<i>Author:</i> Armin Ilisson	<i>Type of the work:</i> Master Thesis
<i>Title:</i> Competitiveness of heat pumps in Estonian district heating systems	
<i>Date:</i> 24.05.2019	85 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor(s) of the thesis:</i> Hardi Koduvere	
<i>Consultant(s):</i> -	
<i>Abstract:</i> <p>The aim of this master thesis is to analyze the competitiveness of heat pumps in the conditions of Estonian district heating systems compared to the combined heat and power plant (CHP). The purpose is to find out the most reasonable heat source and scenario economically, in which case it is reasonable to generate heat with heat pumps and to analyze the economic profitability of seasonal heat storage. The first chapter describes the technical description of the heat pump, coefficient of performance, the application of heat pumps and heat storage. The second part deals with the specific circumstances of Estonia – the technologies in use, the fuels in use, heat demand quantities and profile. Outside temperature, heat economy regulation and pricing, possible heat sources are described and different financial methods to assess competitiveness. The third chapter focuses on calculating the price of the heat produced from the heat pump, depending on the heat source and production profile. The logic of operation and economic expediency of heat storage are described. Also the price of the heat from the CHP plant. Results, analyses and the conclusions of the competitiveness of the heat pump are provided. The results indicate that ambient air is the most realistic to use as a heat source, but heat production with heat pumps is about 10-15% more expensive than with CHP plants. The higher the percentage of consumption covered, the more favorable the heat from heat pump is compared to CHP. It turns out that the construction of heat storage is economically inefficient. It concludes that in terms of generating heat from heat pumps most of the expenses are made for electricity, but as the electricity price goes down, the heat pump would be more competitive compared to the CHP plant.</p>	
<i>Keywords:</i> heat pump, district heating system, combined heat and power, the cost of heat, heat source.	

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	Soojuspumpade konkurentsivõime uurimine kaugküttesüsteemis Eesti tingimustes
Lõputöö teema inglise keeles:	Competitiveness of heat pumps in Estonian district heating systems
Üliõpilane:	Armin Ilisson, 176821AAVM
Eriala:	Elektroenergeetika
Lõputöö liik:	magistritöö
Lõputöö juhendaja:	Hardi Koduvere
Lõputöö esitamise tähtaeg:	24.05.2019

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

Antud teema on aktuaalne, kuna kaugküttesüsteem on eelistatavam kütteviis ning seoses Euroopa Liidu eesmärgiga vähendada süsinikdioksiidi emissioone ja taastumatute energiaallikate kasutamist on oluline leida võimalusi tootmaks soojust nii, et see oleks kooskõlas Euroopa Liidu kliimapoliitika eesmärkidega. Antud töö raames uuritakse kas selliseid eesmärke oleks võimalik Eestis saavutada kasutades selleks soojuspumpasid kaugküttesüsteemi osana ning kas sellisel projektil oleks ka majanduslik konkurentsivõime võrreldes olemasolevate tehnoloogiatega.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on uurida kas soojuspumpade abil soojuse tootmine kaugküttesüsteemi on majanduslikult konkurentsivõimeline olemasolevate tehnoloogiatega võrreldes.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

1. Kas Eestis on majanduslikult mõistlik kaugküttesoojuse tootmiseks kasutada soojuspumpasid?
2. Milliseid soojusallikaid on soojuspumpadel võimalik ja mõistlik kasutada?
3. Milline on keskmine soojuse hind erinevate soojuspumpade võimsuste korral (baaskoormus, pooltipukoormus) Tallinna näitel.

4. Lähteandmed

Lähteandmeteks on Eestis tegutseva soojusettevõtte andmed, riigi ilmateenistuse andmed, soojuspumpade kataloogid, Eestis olevad seadused, regulatsioonid, hinnakirjad jms.

5. Uurimismeetodid

Töö tulemusteni plaanitakse jõuda analüüsi ja arvutuste teel. Analüüsitakse vastavat kirjandust, ettevõtete poolt antavaid andmeid ning nende põhjal tehakse arvutusi. Arvutused tehakse Excelis.

6. Graafiline osa

Soojuspumba soojusteguri sõltuvus temperatuurist

Soojuse tootmise profiil, soojuse tootmise sõltuvus temperatuurist aasta lõikes

Soojuspumpadest toodetava soojuse (erinevate soojusallikate puhul) hinna võrdlus seniste tehnoloogiate abil (koostootmise) toodetava soojuse hinnaga.

Graafiline osa on peamiselt töö põhiosas.

7. Töö struktuur

1. Teroreetiline osa

1.1 Soojuspumba tehniline kirjeldus

1.1.1 Soojuspumba mõiste ja tööpõhimõte

1.1.2 Soojustegur ja selle arvutamine

1.2 Soojuspumpade rakendamine

1.2.1 Kaugküttesüsteemi tähtsus ja soojuspumpade kasutamine kaugküttesüsteemi osana

1.2.2 Soojuspumba investeeringu kasumlikkus

1.2.3 Edukalt valminud projektid välisriikides

1.2.4 Soojusallikad ja võrdlus koostootmisjaamaga

1.3 Eesti Spetsiifiliste olude kirjeldus

1.3.1 Kasutatavad tehnoloogiad, tarbimise kogused ja profiil

1.3.2 Kaugküttevõrk ja välistemperatuur

1.3.3 Regulatsioon ja hinnakujundus

2. Analüütiline osa/Praktiline osa

2.1 Soojuspumbast toodetava soojuse tootmishind aasta jooksul

3. Järeldused

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Allikateks on teadusartiklid, raamatud, aruanded, seadusandlikud aktid, kataloogid.

Paist, A. Poobus, „Soojusgeneraatorid," 2009.

Danish Energy Agency, „Technology Data for Energy Plants. Updated chapters, August 2016 ," 2016.

H. Averbalk, P. Ingvarsson, U. Persson, M. Gong, S. Werner, „Large heat pumps in Swedish district heating systems” [Võrgumaterjal]

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117307839>

Statistikaameti andmebaas [Võrgumaterjal] <https://www.stat.ee/andmebaas>

9. Lõputöö konsultandid

Hardi Koduvere

10. Töö etapid ja ajakava

Kirjanduse läbitöötamine, Lähteandmete kogumine (29.01.2019)

Teoreetilise osa kirjutamine (28.02.2018)

Arvutused ja analüüs (05.04.2019)

Järeldused (15.04.2019)

Kokkuvõte (19.04.2019)

Esimene versioon juhendajale saatmiseks (21.04.2019)

Parandused ja juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine (05.05.2019)

Lõplik versioon (15.05.2019)

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE.....	3
ABSTRACT	4
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	5
EESSÕNA.....	9
SISSEJUHATUS	10
1. Soojuspumpade kasutamine kaugküttevõrkudes	12
1.1 Soojuspumba tehniline kirjeldus.....	12
1.2 Soojuspumpade rakendamine	19
1.3 Soojussalvestid.....	28
2. Soojuspumba konkurentsivõime hindamine Eesti kontekstis	30
2.1 Eesti spetsiifiliste olude kirjeldus	30
2.2 Soojusallikate konkurentsivõime hindamise finantsmeetodid.....	42
3. Soojuspumpade konkurentsivõime.....	47
3.1 Soojuse hind sõltuvalt soojusallikast	47
3.2 Soojuse hind sõltuvalt tootmisprofiilist	62
3.3 Soojuse hind sõltuvalt tootmisprofiilist koos soojussalvestiga.....	65
3.4 Soojuse hind koostootmisjaamas	71
3.5 Tulemused.....	72
3.6 Järeldused	77
KOKKUVÕTE	78
SUMMARY	80
KASUTATUD KIRJANDUS	82

EESSÕNA

Käesoleva lõputöö teema sõnastati Hardi Koduvere algatusel. Algandmed töö jaoks on kogutud AS Utilitas Tallinnalt, Keskkonnaagentuurilt ja AS Tallinna Veelt. Konsultatsioonidega antud töö puhul abistas Hardi Koduvere.

Avaldan tänu Hardi Koduverele, kelle kaasabil on antud lõputöö valminud.

Autori alaliseks elukohaks on Tallinn.

Küsimused ja kommentaarid antud lõputöö kohta edastada e-kirjaga armin.ilisson@gmail.com.

SISSEJUHATUS

Euroopa Liidu kliimapolitika suunaks on taastumatute primaarenergia allikate kasutamise, kulude ja süsinikdioksiidi emissioonide vähendamine tulevikus. Kuna kaugküttesüsteemi kasutamisel on võimalik elektri ja soojuse koostootmine, ning seeläbi võimalik primaarenergia mõistlikum kasutamine on eelduste kohaselt kaugküttesüsteemidel oluline roll tuleviku taastuvenergiasüsteemides. Soojuspumpade kasutamise eeliseks kaugküttesüsteemi osana on kaugküttesüsteemi elektrifitseerimine, mille abil on võimalik kokku hoida biomassi ning muid taastuvaid kütuseid, mida saab selle asemel kasutada muudes sektorites. Lisaks on elektrifitseerimise boonus elektrisüsteemi paindlikkuse suurendamine – tulevikus on tuuleparkide suure toodangu korral võimalik energia salvestada soojussalvestitesse või tarbida otse soojuse tootmiseks. Euroopas on mitmeid riike, nagu näiteks Soome, Rootsi, Norra ja Taani, kus on edukalt valminud ning töötavad projektid just suurte soojuspumpade kasutamisel kaugküttesüsteemis.

Käesolevas töös uuritakse erinevad soojusallikad, mida ja kui suures mahus on Eesti (täpsemalt Tallinna) tingimustes võimalik kasutada soojuspumba soojusallikatena. Vaatluse all on Tallinna soojustarbimine ning uuritakse soojuspumbast toodetava soojusenergia omahinda sõltuvalt soojusallikast, tarbimisprofiilist ning salvesti olemasolust.

Antud töö eesmärgiks on uurida, kas soojuspumpade abil soojuse tootmine kaugküttesüsteemi jaoks Eesti (Tallinna) tingimustes on majanduslikult konkurentsivõimeline, võrreldes olemasolevate tehnoloogiatega ning kas soojussalvestite ehitamine on majanduslikult otstarbekas. Mistõttu on oluline kõrvutada soojuspumbast toodetava soojusenergia omahinda koostootmisjaamas toodetud soojusenergia omahinnaga. Uurimise eesmärgiks on lahendada järgnevad probleemid:

- Kas Eestis on majanduslikult otstarbekas kasutada kaugküttesoojuse tootmiseks soojuspumpasid?
- Milliseid soojusallikaid ja millises mahus on neid võimalik ja mõistlik soojuspumpade jaoks kasutada?
- Missuguseks kujuneb soojusenergia keskmine omahind erinevate tarbimisprofiilide korral Tallinna näitel?
- Kas soojussalvesti ehitamine koos soojuspumba paigaldamisega kaugküttesüsteemi juurde on majanduslikult tasuv ning kuidas see mõjutab soojusenergia omahinda?

Töös kasutatakse erinevate ettevõtete poolt väljastatud andmeid, mis viiakse programmi MS Excel, kus andmeid töödeldakse. Antud andmete põhjal tehtavate arvutuste tulemusena leitakse

erinevate stsenaariumite korral soojusenergia omahinnad ning selgitatakse välja soojuspumpade konkurentsivõime Eesti tingimustes kõrvutades seda olemasoleva tehnoloogiaga.

Esimeses peatükis vaadeldakse soojuspumba tehnilist poolt ning selle tööpõhimõtet. Kirjeldatakse erinevaid soojuspumpade liike, nende kasutamise eeliseid, kasutusalasid ning tööprotsessi. Seletatakse lahti soojusteguri mõiste ning arvutusvalem ning tuuakse välja tegurid, mis soojustegurit mõjutavad. Lisaks tutvustatakse soojuspumpade rakendamist ja Põhjamaades edukalt valminud projekte. Vaadeldakse ka majanduslikku poolt, millistel asjaoludel oleks selline projekt kasumlik. Tutvustatakse neljanda generatsiooni kaugkütet ning võrreldakse koostootmisjaamade ja soojuspumpade abil soojuse tootmist. Käsitletakse soojussalvesteid, nende tehnoloogiat ja investeringut.

Teises peatükis kirjeldatakse Eestiga seonduvaid spetsiifilisi olusid, mis mõjutavad soojuspumpadest soojuse tootmist. Selle alla kuuluvad näiteks kasutatavad tehnoloogiad, tarbimisprofiil, tarbimiskogused ning kasutusel olevad kütused. Lisaks on välja toodud seos Eesti välisõhu temperatuuri ja soojusenergia tarbimise sõltuvusest. Veel kirjeldatakse erinevaid seaduseid ja määruseid, mille abil on Eestis kaugküte reguleeritud. Vaatluse all on erinevad soojusallikad, mida on soojuspumpade soojusallikatena võimalik Eesti (Tallinna) tingimustes kasutada. Antakse lühiülevaade erinevatele finantsmeetoditele, millega on võimalik soojusallika konkurentsivõimet hinnata.

Kolmandas peatükis käsitletakse soojuspumbast toodetava soojusenergia omahinna sõltuvust soojusallikatest, mille kasutamine Tallinna tingimustes on võimalik. Leitakse soojuse hind erinevate soojusallikate puhul nagu välisõhk, merevesi, Tallinna reovesi ning serveripargi soojuse ülejääk ja analüüsitakse milliseid neist on otstarbekas kasutada ning milline neist on majanduslikult kõige konkurentsivõimelisem. Analüüsitakse kuidas sõltub soojuse hind sõltuvalt tootmisprofiilist. Antakse ülevaade soojussalvesti opereerimise loogikast ning selgitatakse välja, kas soojuspump on majanduslikult konkurentsivõimelisem, kui projekt sisaldab lisaks veel soojussalvestit. Seejärel leitakse ka võrdlusmomendi tekitamiseks koostootmisjaamas toodetava soojuse omahind. Esitletakse erinevate stsenaariumite tulemusi ja koondjooniseid, tehakse järeldused ning analüüsitakse soojuspumpade konkurentsivõimet.

1. Soojuspumpade kasutamine kaugküttevõrkudes

Käesolevas peatükis on vaatluse all soojuspumpade tehniline pool, erinevate soojuspumpade liigid, välja toodud soojuspumpade kasutamise eelised, kirjeldatud tööprotsessi ning kasutusalasid. Lisaks on pööratud tähelepanu soojusteguri mõistele ning selle arvutamisele ja seda mõjutavatele teguritele.

Kirjeldatud on soojuspumpade rakendamist, välja toodud näiteid lähiriikides edukalt valminud ja töösolevatest projektidest, võimalikud soojusallikad ning ka tegurid, mis peavad olema täidetud, et projekt oleks kasumlik. Võrreldakse ka soojuspumpade ja koostoomisjaamade abil soojuse tootmist. Tutvustatakse neljanda generatsiooni kaugkütet.

Pööratakse tähelepanu ka soojussalvestitele, kirjeldatakse nende tehnoloogiat ning investeringut.

1.1 Soojuspumba tehniline kirjeldus

Antud peatükis kirjeldatakse soojuspumba mõistet, vaadeldakse soojuspumpade komponente ja tööprintsipi ning kirjeldatakse soojuspumpade erinevaid liike. Samuti on välja toodud soojuspumpade eelised ja kasutusala. Käsitletakse ka soojustegurit ning seda mõjutavaid tegureid ja soojusteguri arvutamist.

1.1.1 Soojuspumba mõiste ja tööpõhimõte

Soojuspump on seade mille eesmärk on soojuse ülekande madalama temperatuuriga keskkonnalt kõrgema temperatuuriga keskkonnale. Soojus levib üldiselt kõrgema temperatuuriga kehalt madalama temperatuuriga kehadele, kuid soojuspumbad võimaldavad soojuse liikumissuuna muuta vastupidiseks, kasutades seejuures küllaltki väikest energiakogust. Soojuspumpasid kasutatakse küttesüsteemides ja ka konditsioneerisüsteemides, lisaks veel tehnoloogilistes protsessides. Soojuspumba jaoks on madalama temperatuuriga keskkonnaks näiteks maapind, veekogu või välisõhk.

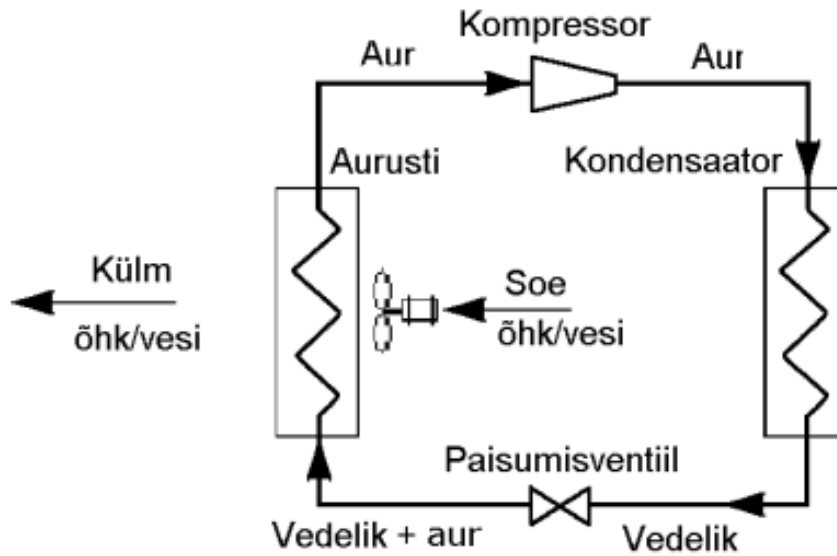
Soojuspumpade eeliseks on nüanss, et soojuspumbad tarbivad muudest kütteviisidest vähem energiat, seega on soojuspump tähtis vähendamaks kahjulike gaaside, näiteks süsinikdioksiidi (CO₂), lämmastikoksiidide (NO_x) ja vääveldioksiidi (SO₂) eraldumist ümbritsevasse keskkonda. Keskkonna saastamise määrab aga ära viis, kuidas elekter, mis on tarvis soojuspumba käitamiseks, on toodetud. Põlevkivist ja kivisöest toodetud elektri korral on saastemäär suurem, kui taastuvenergiaabil elektrit tootes. Enim kasutatavateks soojuspumpade tehnoloogiateks on aurukompressorsoojuspumbad ja absorptsioonsoojuspumbad. Soojuspumbad saab jagada viide

erinevasse klassi: õhk-vesi soojuspump, õhk-õhk soojuspump, maasoojuspump, ventilatsioonisojuspump, kombineeritud ventilatsiooni-maasoojuspump. [1]

Soojuspumbad võtavad sisendsoojuse madalama temperatuuriga keskkonnast ja konverteerivad selle kõrgema temperatuuriga soojuseks (väljundsoojus) läbi suletud protsessi. Aurukompressorsoojuspumbad kasutavad selliseks konverteerimisprotsessiks elektrit ja absorptsioonsoojuspumbad kasutavad soojust, näiteks kuum aur, kuum vesi või õli. [2]

Soojuspumbad on kasutusel tööstuslikes protsessides, individuaalsete ruumide kütteks ja kaugkütte soojuse tootmiseks. [2] Antud töös on rõhuasetus küttesmärgiga soojuspumpadel, mida kasutada kaugküttesüsteemis soojuse tootmiseks.

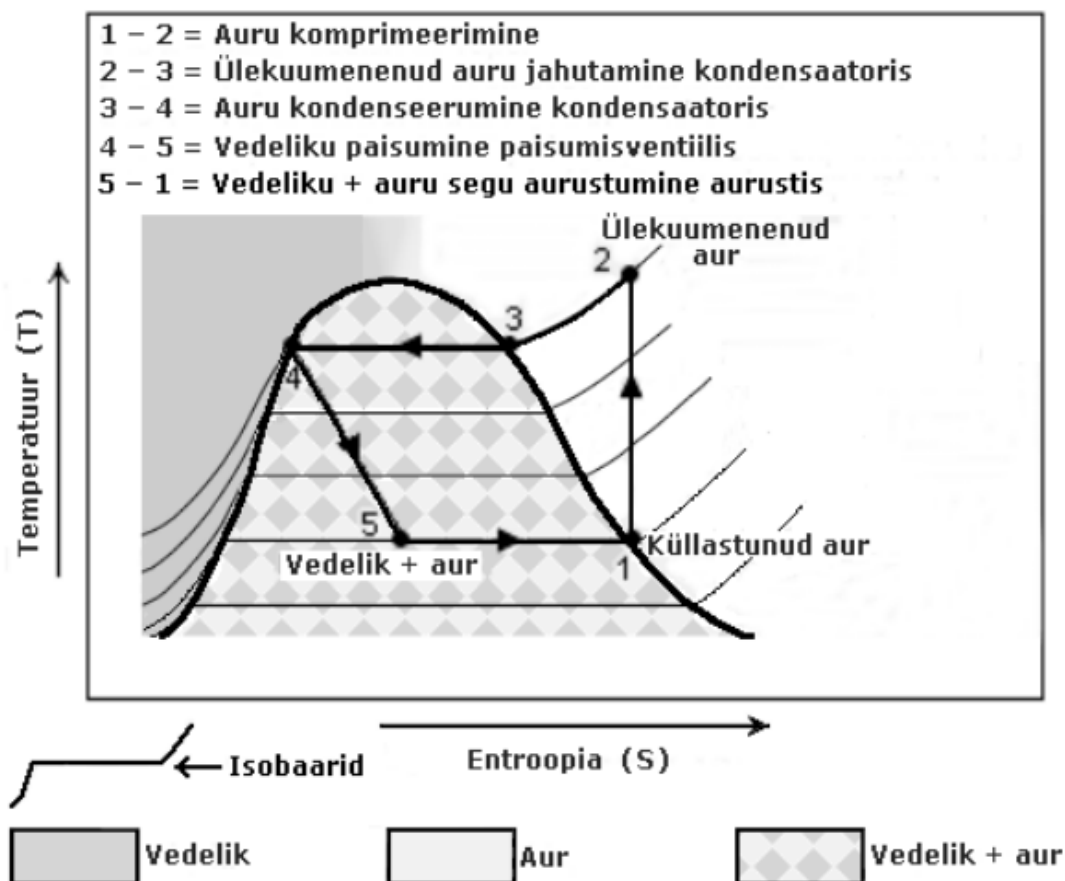
Aurukompressor-soojuspumpadel on neli peamist komponenti, mis on ühendatud omavahel ühendatud torustikuga. Selles suletud torustikus ringleb madala keemispunktiga külmaaine, mis läbib nelja kompressorsoojuspumba põhiosa. Nendeks komponentideks on kompressor, kondensaator, paisventiil ja aurusti. Suletud kontuuris ringleva külmaaine keemistemperatuur on madalam, kui väliskeskkonna temperatuur. Joonise 1.1 ülaosas on kujutatud kompressor, mille abil surutakse aurustunud olekus külmaaine kokku. Selle tulemusena külmaaine veeldub ning temperatuur tõuseb mitmekümne kraadi võrra. Seejärel suunatakse see edasi kondensaatorisse, mis asub joonise paremas servas, kus antud aine loovutab oma soojuse väliskeskkonnale, mida on tarvis soojendada. Antud töös on soojendatavaks keskkonnast kaugküttesüsteemis asuv vesi. Seejärel läbib soojuskandja joonise allosas olevat paisventiili, mille tagajärjel soojuskandja rõhk langeb, ning mis omakorda toob kaasa ka temperatuuri languse. Joonise vasakus servas on aurusti, mille abil kandub soojus üle külmaainele, mille tulemusena soojuskandja aurustub. Kuna külmaaine temperatuur on madalam temperatuurist, mis on ümbritsevas keskkonnas, siis seetõttu on soojuskandja suuteline võtma väliskeskkonnast soojust. Kirjeldatud protsessi abil toimub soojuse ülekande madalama temperatuuriga keskkonnast kõrgema temperatuuriga keskkonnale. Soojuskandja temperatuur ja rõhk võivad olla varieeruvad erinevate kompressorite tüüpide puhul, sõltuvad võimsusest ja küttevajadusest. Kõrge temperatuuri ja rõhu saavutamine kahandab soojuspumba tõhusust. Seepärast on väljaarendatud invertertehnoloogia, mille abil vähendatakse kompressori võimsust, kui küttevajadus on väiksem. Selle abil saab suurendada soojuspumba kasutegurit. [3] Joonisel 1.1 on välja toodud aurukompressor-soojuspumba põhimõtteskeem.



Joonis 1.1. Põhimõtteskeem aurukompressor-soojuspumbale [1]

Kompressori käitamiseks kasutatakse soojuspumbas üldiselt elektrimootorit, vahel ka sise põlemismootorit. [1]

Aurukompressor-soojuspumba teoreetilist ringrotsessi kirjeldav TS-diagramm on toodud joonisel 1.2, kus punkti 1 ja 2 vahel toimub temperatuuri tõstmine, küllastunud aur muutub ülekuumenenud auruks. Punkti 2 ja 3 vahel jahutatakse ülekuumenenud aur kondensaatoris, temperatuur väheneb ja entroopia väheneb. Seejärel kondenseerub aur kondensaatoris, temperatuur jääb samaks, aga entroopia väheneb. Punkti 4 ja 5 vahel vedelik paisub paisumisventiilis, temperatuur väheneb ja entroopia suureneb. Punkti 5 ja 1 vahel toimub aurustis vedeliku ja auru segu aurustumine, mille korral entroopia kasvab.

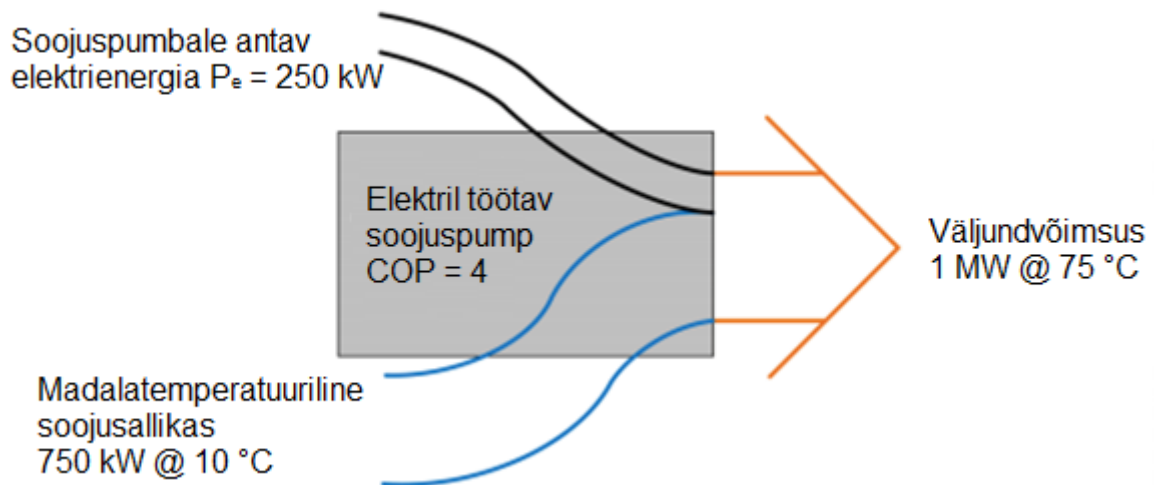


Joonis 1.2. Teoreetiline ringprotsess aurukompressor-soojuspumbale TS-diagrammil [1]

1.1.2 Soojustegur ja selle arvutamine

Soojustegur on mõiste, mis on kasutusele võetud iseloomustamiseks soojuspumba efektiivsust (ingl. k. COP – *coefficient of performance*). Antud tegur näitab suhet soojuspumba poolt toodetud energia ning selle energia tootmiseks kulutatud energia vahel. Kui COP=3, siis sellisel juhul soojuspump tarbib võimsust 3 kW ning toodab võimsust 9 kW. [3]

Kompressorsoojuspumpade puhul on praktiline soojustegur 3 kuni 5. Soojusteguri väärtus oleneb mitmest faktorist nagu näiteks spetsiifilisest soojuspumbast, sisendtemperatuurist, väljundtemperatuurist ning ka sisend- ja väljundtemperatuuri erinevuse suurusest. Soojuspump, mille soojustegur on 4, kasutab 250 kW elektrilist võimsust ning võimaldab madalatemperatuurilisest soojusallikast, mis on 10 °C juures, toota 1 MW soojusenergiat temperatuuril 75° C. Soojuspumba energiavoogu iseloomustab joonis 1.3. [2]



Joonis 1.3. Soojuspumba energiavoog [2]

Carnot' teoreemi järgi avaldub soojuspumba soojustegur ehk COP järgmiselt:

$$COP = \frac{T_H}{T_H - T_C} \quad (1.1)$$

kus T_C on madalatemperatuurilise keskkonna temperatuur ja T_H on kõrgema temperatuuriga keskkonna temperatuur, mis on soojuspumba nõutavaks väljundtemperatuuriks. [4]

Antud valemi järgi on tegemist soojuspumba teoreetilise maksimaalse soojusteguriga. Praktikas on soojustegur siiski mõnevõrra madalam, mis on tingitud mehaanilistest ja soojuslikest kadudest. Reaalsuses on soojustegur 40-60 % teoreetilisest maksimaalsest soojustegurist. Suhe teoreetilise maksimaalse ja reaalse soojusteguri vahe sõltub soojuspumba komponentide efektiivsusest, soojusvahetitest jne.

Lisaks on võimalik arvutada veel soojustegurit (Lorenz COP) välja järgneva valemi abil:

$$COP = \frac{T_{1m,s}}{T_{1m,s} - T_{1m,a}}, \quad \text{kus} \quad T_{1m} = \frac{T_i - T_o}{\ln\left(\frac{T_i}{T_o}\right)}, \quad (1.2)$$

kus $T_{1m,s}$ on temperatuur soojuspumba kondensaatori poolses osas

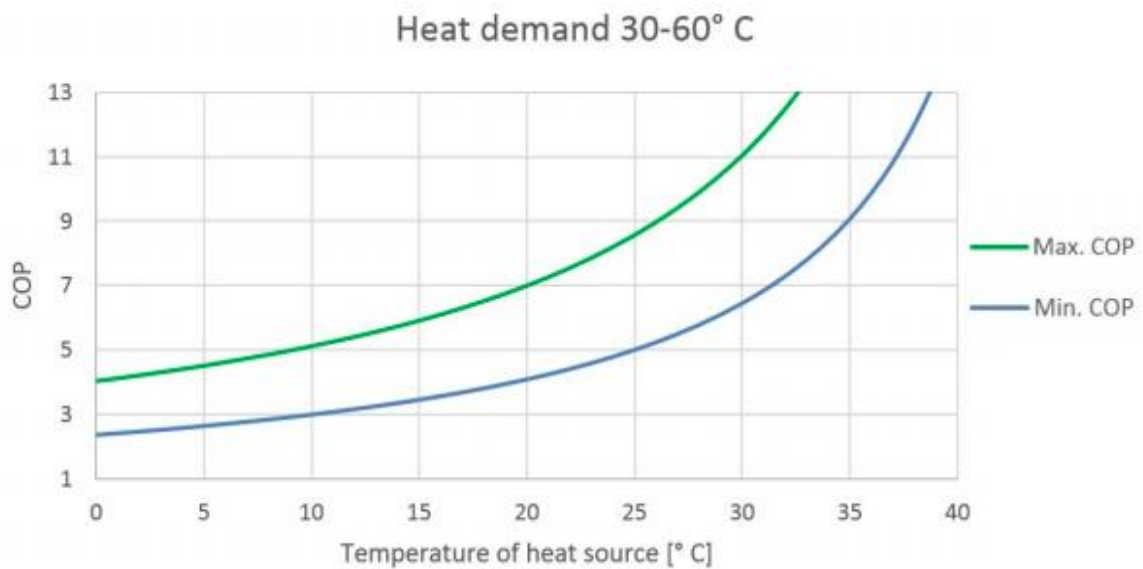
$T_{1m,a}$ soojusallika temperatuur

T_i on algse vee temperatuur kaugküttetorustikus või soojusallika algtemperatuur enne aurustisse minekut

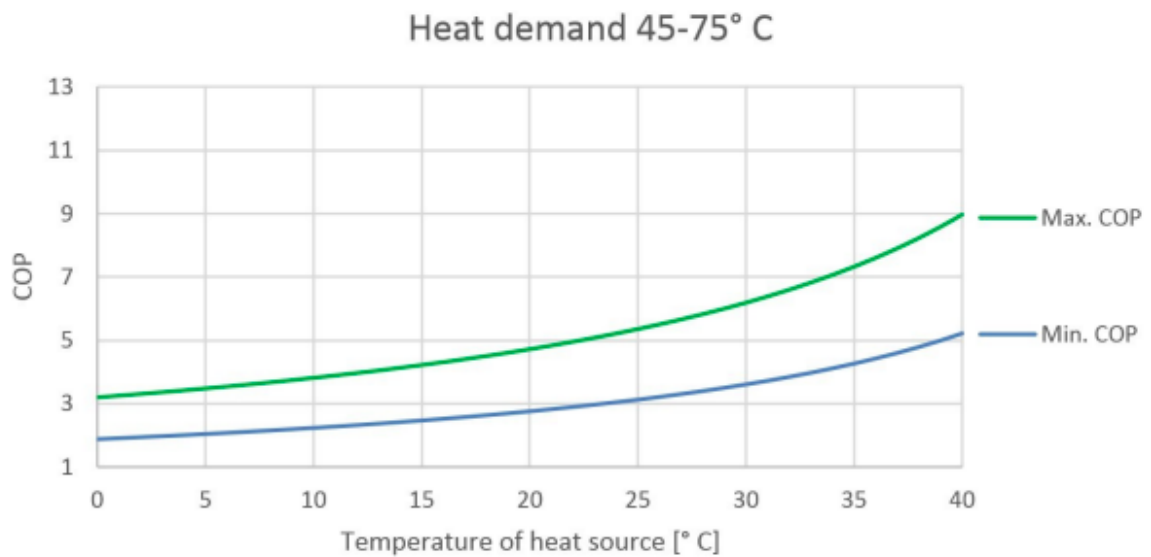
T_o on temperatuur, milleni on vaja tõsta kaugküttetorustikus olev vesi või keskkonnale tagasiantava soojusallika temperatuur

Lorenzi valemi järgi leitud soojustegur on samuti teoreetiline maksimaalne soojustegur. [2]

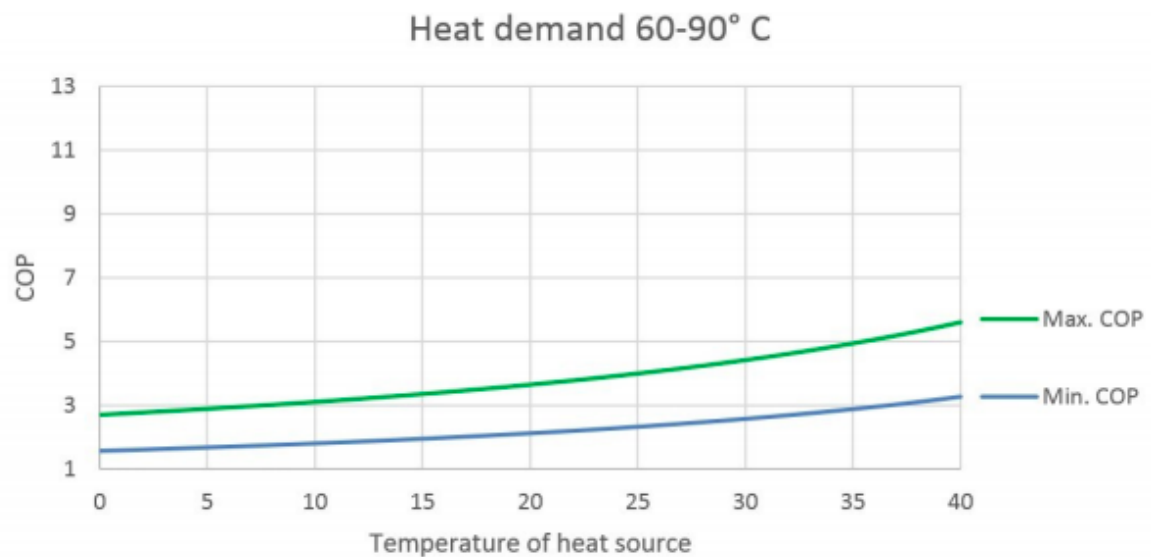
Võimalikud reaalsed soojustegurid on välja toodud joonistel 1.4, 1.5 ja 1.6, mis kirjeldavad võimalikke soojustegureid (maksimaalseid ja minimaalseid ehk 40% ja 60% kadude juures), sõltuvalt sellest, mis on nõutavaks väljundtemperatuuriks. Graafikutel on väljatoodud soojusteguri sõltuvus kindla väljundtemperatuuri juures ning muutuva soojusallika temperatuuri korral.



Joonis 1.4. Kompessorsoojuspumba soojusteguri sõltuvus soojusallika temperatuurist, kui nõutav väljundtemperatuur on 30-60° C, kus joonise verikaalteljel on soojustegur ning horisontaalteljel soojusallika temperatuur, °C [2]



Joonis 1.5. Kompessorsoojuspumba soojusteguri sõltuvus soojusallika temperatuurist, kui nõutav väljundtemperatuur on 45-75° C, kus joonise verikaalteljel on soojustegur ning horisontaalteljel soojusallika temperatuur, °C [2]



Joonis 1.6. Kompessorsoojuspumba soojusteguri sõltuvus soojusallika temperatuurist, kui nõutav väljundtemperatuur on 60-90° C, kus joonise verikaalteljel on soojustegur ning horisontaalteljel soojusallika temperatuur, °C [2]

Graafikute võrdlusest selgub, et väike temperatuuride väärtuste vahe soojusallika temperatuuri ja nõutava väljundtemperatuuri vahel on oluline, et saavutada kõrge soojusteguri väärtus. Seega enamasti ei ole soojuspumpade kasutamine efektiivne, kui on soov saada kõrge

väljundtemperatuur, kuid sisendina kasutatakse soojusallikaid, mis on madala temperatuuriga. Mida suurem on soojusallika ja kaugkütteevee temperatuur, seda suurem on elektrienergia kulu, et soojuspumba väljaantav soojus oleks sama suur. Seega soojusallikate madalate temperatuuride korral on soojuspumpade konkurentsivõime väiksem. [2] [8]

Soojuspumba puhul, mis kasutab soojusallikana vett, saab allikatena kasutada naturaalselt või kunstlikku veekogu, nagu näiteks põhjaveekiht, jõed, järved, meri jms. Kompressorite ja soojusvahetite abil võetakse veest energia ja külmutustsükli abil paisatakse soojus kaugküttevõrku. [5]

Soojuspumpasid võib paigaldada nii paralleelselt kui ka liitahelasse. Paralleelselt paigutatud soojuspumpasid on lihtsam paigaldada, aga sellise paigutuse puhul ei pruugi efektiivsus olla kõige kõrgem. Kõrgema efektiivsuse saavutamiseks võib paigaldada soojuspumbad liitahelasse. Näiteks kui pärast esimest tsüklit on temperatuur viidud soojusallika temperatuurilt 60 kraadini, siis järgneb sellele veel mitu tsüklit, mille käigus tõstetakse temperatuur vajaliku väljundtemperatuurini. Seda tehakse näiteks läbi kolme kompressorsoojuspumba süsteemi. Esimene soojuspump tõstab temperatuuri 60-70 °C, järgmine soojuspump 70-80 °C ja viimane 80-90 °C. Sellisel juhul on teoreetilisel juhul saavutatav COP parim võimalik. [5]

1.2 Soojuspumpade rakendamine

Käesolevas peatükis kirjeldatakse kaugküttesüsteemi kui eelistatuimat kütteviisi ning olulisust ja soojuspumpade kasutamist selle osana. Kirjeldatakse soojuspumpade kasutamise majanduslikku ja keskkonnaga seotud mõistlikkust.

Lisaks käsitletakse soojuspumba investeeringute kasumlikkust, edukalt valminud ja töösolevaid välisriikide projekte, tuuakse välja ja kirjeldatakse erinevaid võimalikke soojusallikaid soojuspumpadele ning võrreldakse ka koostootmisjaamade ja soojuspumpade majanduslikku poolt.

1.2.1 Kaugküttesüsteemi tähtsus ja soojuspumpade kasutamine kaugküttesüsteemi osana

Kaugküttesüsteemid mängivad tulevikus eeldatavasti väga olulist rolli taastuvenergiastüsteemides, kuna Euroopa Liidu eesmärgiks on kaugküttesüsteemides tulevikus vähendada taastumatute primaarenergia allikate kasutamist, süsinikdioksiidi emissioone ja kulusid. [8]

Kaugküttesüsteem on üldiselt eelistatuim kütteviis, kuna sellisel juhul saab toimuda elektri ja soojuse koostootmine ning heitsoojuse ära kasutamine, seetõttu toimub primaarenergia mõistlikum kasutamine. Samuti on võrdluses lokaalküttega tagatud soojuse soodsam hind. Lisaks on kaugkütte eelis lokaalkütte ees see, et on võimalik kasutada madalama kvaliteediga ja odavamaid kütuseid kui lokaalsetes küttesüsteemides. Samuti on võimalik investeringute mõistlikum kasutamine, mis tähendab et tipukoormus kaetakse kallimate kütuste abil, kuid odavamate seadmete abil, mida kasutatakse lühiajalisel perioodil. Baaskoormus kaetakse kallimate seadmete abil, kuid jällegi kütuste hind on odavam, mida kallites seadmetes kasutatakse. Eriinvesteeringud, mida tehakse kaugküttesüsteemi soojusallikatesse on väiksemad, kui lokaalküttes. Kuna kaugküttes on võimalik enamik juhtudel kasutada erinevaid kütuseid, siis on kaugkütte paindlikum kütusehindade muutumise suhtes. Kaugküte võimaldab madalamaid heitmete tasemeid. Tihtipeale kõrvaldatakse vead kaugküttesüsteemis kiiremini, kuna toimub pidev kontroll ning hooldus. [10]

Kaugküttesüsteeme seostatakse üldiselt soojuse ja elektri koostootmisega ehk koostootmisjaamadega. Selle eesmärgi täitmisele aitab kaasa soojuspumpade kasutamine kaugküttesüsteemi osana, et katta soojuse nõudlust. Süsteemi perspektiivist vaadatuna on võimalik soojuspumpasid kasutada kahel erineval viisil. Esiteks kasutada suuremõõtmelisi soojuspumpasid, mis kaugküttesüsteemi vee temperatuuri hoiaksid etteantud tasemel. Teiseks on võimalus kasutada väiksema mõõtmetega soojuspumpasid ehk individuaalseid küttesüsteeme lõpptarbijate juures. Antud tööd on fookus suuremõõtmeliste soojuspumpade kasutamisel kaugküttesüsteemis. [8]

Soojuspumpade kasutamise majanduslik mõistlikkus sõltub oluliselt elektrienergia hinnast ja kuna elektrienergia hind sõltub nõudlusest ja pakkumisest siis olukorras, kus tekib elektrienergia ülejääk, on soojuspumpade kasutamine majanduslikult kasulik, kuna sellises olukorras on elektrienergia hind madalam. Seega on peamiselt kõige mõistlikum kasutada soojuspumpasid sellisel juhul, kus süsteemis on pidevalt elektrienergia ülejääk, olgu see siis lühiajaline ülejääk nagu näiteks tuule- või päikeseenergia puhul või pikaajaline ülejääk nagu näiteks hüdro- või tuumaenergia puhul. [8]

Soojuspumpasid rakendatakse mõningates riikides kaugküttesüsteemides ning on juba edukalt valminud projekte. Peamisteks kasutamise põhjusteks majanduslik kokkuhoid ning ka õhkupaisatava saaste vähendamine.

Põhjused, miks soojuspumpade kasutamine kaugküttesüsteemis on hakanud aina rohkem levima on määramatus elektrienergia hinna tulevase arengu suhtes, keskmine elektrienergia langus,

suurenenud regulatiivsed nõuded taastuenergia osakaalu suhtes, määramatus kütuste hinna tulevase arengu suhtes, soojuspumpade tehnoloogiline areng, vajadus energiatõhusust suurendada (soojuse ülejäägi kasutamine), määramatus kogu soojustarbimise koormuse edasise arengu suhtes, eelnevate investeeringute ja projektide edukus. [6]

Soojuspumpade kasutamine kaugküttesüsteemi osana on kasulik mitme nurga alt vaadatuna. Esiteks on selle abil võimalik tõsta kaugkütte süsteemi paindlikkust, sest: soojustootmise portfelli laieneb, võimaldab paremat reageerimist ehk kiireid käivitusi ja madalaid käivituskulusid, optimeeritakse baaskoormusjaamade tööaega, minimiseerides nende käivituste arvu ja mitteoptimaalsete tootmistundide arvu, paraneb kogu kaugküttesüsteemi kasumlikkus, termiliste patareide abil on võimalik ära kasutada elektrituru volatiilsust. [6]

Võimaldab paremini ära kasutada soojuse tootmisest tekkinud ülejääki ehk võimaldab ära kasutada madalatemperatuurilisi soojusallikaid ja muul viisil ülejäävaid soojusallikaid. [6]

Teiseks kasumlikuks teguriks võib soojuspumpade puhul lugeda seda, et need pakuvad kaitset (turu-) riskide eest. Näiteks võimaldab soojuspumpade kasutamine maandada riske elektri ja kütuste hindade kõikumise suhtes, kaitseb soojustootmisüksuste rikete eest ning võimaldab kaugkütte ja kaugjahutuse kombineeritud tootmist. Siiski on antud töös traditsiooniline lähenemine, mille korral kaugjahutus puudub, kuna Eesti oludes ei ole sellel praegusel hetkel turuosa piisavalt suur. [6]

Soojuspumpade kasutamine kaugküttesüsteemis pakub ka teatavaid keskkonnaga seotud hüvesid. Soojuspumpade üldine kasumlikkus keskkonnale sõltub sellest, kuidas soojuspumba tarvitav elektrienergia on toodetud ning kust võetakse soojusallikas. Lisaks suureneb soojuspumpade kasutamisega kaugküttesüsteemis taastuenergia proportsionaalne osakaal soojustootmise struktuuris, ei põhjustata lokaalseid emissioone ja loob üldiselt positiivsema ja loodussõbralikuma kuvandi kaugküttest. Kõige kasumlikum on soojuspumpade kasutamine kaugküttesüsteemis olukorras, kui mingil perioodil toodetakse elektrienergiat taastuenergiaallikatest näiteks tuulikutest, tekib elektrienergia ülejääk ning elektrienergia hind on madal. [6] [8]

1.2.2 Soojuspumba investeeringu kasumlikkus

Kaugküttesüsteemid on väga kapitalimahukad. Soojuspumba investeeringu kasumlikkuse võtmeteguriks on soojuspumpade mõju kaugkütte süsteemi kogukasumlikkusele. Kui soojuspumpadesse tehtavad investeeringud viivad kaugküttesüsteemide kasutusmäära ja/või tootmistõhususe suhte (sisend-väljundsuhe) parandamiseni, siis sellisel juhul võivad investeeringud olla äärmiselt tulusad. Soojuspumpade kasutamine on kõige kasulikum

süsteemides, kus soojuspumpa saab kasutada olemasolevate soojustootmisüksuste väljundi ja soojuse kogutarbimise vahelise vastavuse tagamiseks. Kuna soojuspumba märkimisväärselt suurte esialgsete investeeringute tõttu on soojuspumpade kasumlikkuse aken kitsas ja investeering on majanduslikult mõislik ja kasumlik vaid juhul, kui tegvuskulud ei ole suured. [6]

Lisaks tuleb silmas pidada mõningaid tegureid, mis on olulised, et investeering soojuspumpadesse oleks kasumlik. Peab olema juurdepääs soojusallikale, mis on lähedal kaugkütte tarbimiskoormusele näiteks reovesi, veekogud, suitsugaasid või lähedalasuvate üksuste soojuse ülejääk. Soojusallikas peab olema oma olemuselt püsiv ning sobima temperatuuri ja stabiilsuse poolest. Soojuspumba poolt toodetud soojust ei ole vaja ette valmistada või saab kergesti ette valmistada saadaolevate jaamade/tootmisüksuste abil. Soojusallikas on tasuta või saadaval väga madala hinnaga. Investeering on mõistlik ka ainult sel juhul, kui soojuspumba paigaldamisega ei kaasne olulisi investeeringuid elektrivõrgu tugevdamisse. Veel tõstab investeeringu kasumlikust asjaolu, kui termiline aku on kergesti kättesaadav või selle ehitamine ei nõua olulisi lisainvesteeringuid ja kui soojuspumpa oleks võimalik lisaks kaugküttele kasutada ka kaugjahutuse seisukohalt. [6]

Suured soojuspumbad kaugküttesüsteemide integreeritud osana omavad eesmärki soodustada majanduslikult ja keskkonnasäästlikult soojust tootvaid lahendusi. Seadusandlus ei tohiks seaduste abil sundida kinnisvaraarendajaid investeerima kinnisvarapõhisesse energiatootmisrajatistesse, sest võrreldes suurte tsentraliseeritud soojuspumbajaamadega, toovad kooskõlastamata paigaldatud väikesed soojuspumbad kaasa mittetäieliku optimeerimise, halva funktsionaalsuse ja süsteemide hoolduse ning samuti kasvuhoonegaaside emissioonide kasvu. [6]

Kuna soojuse ülejäägi viimine keskkonda tunduvalt kõrgemal (või madalamal) temperatuuril ei ole keskkonnasõbralik, siis seetõttu tuleks soojuse ülejäägi kasutamist soojuspumpade poolt käsitleda kui keskkonnasõbralikku ettevõtmist ning seetõttu võiks olla soojuse ülejääk tasuta soojusallikas soojuspumbale. [6]

1.2.3 Neljanda generatsiooni kaugküte

Eestis on kasutusel II põlvkonna kaugküte, ning antud juhul on soojuskandja temperatuur väga kõrge ning kohati ka üle 100 kraadi. Neljanda generatsiooni kaugkütte korral oleks soojuskandjaks madalatemperatuuriline vesi vahemikus 30-70 °C. Neljanda põlvkonna kaugküttevõrgus oleks kasutusel soojuskadude vähendamise eesmärgil kasutusel kaks toru ühes torus. II generatsiooni kaugküttes on kasutusel kaks eraldiseisvat toru pealevoolu ja tagasivoolu jaoks. Eelmainitud nüansid tõstaksid kogu süsteemi efektiivsust. Lisaks oleks antud kaugkütte korral võime

taaskasutada soojust madalatemperatuuriga soojusallikatest nagu näiteks soojuspumpade abil välisõhust ning integreerida taastuvaid soojusallikaid, nagu päikese- ja geotermaalsoojust. [36] [37]

Siiski on Eestis olulisi probleeme mis takistavad kasutusele võtmast neljanda generatsiooni kaugkütet. Paljudes olemasolevates majades toimub kütmine radiaatorite abil, mille tõttu on nende majade suhteline tarbimiskoormus kõrge. Kuna hetkel radiaatoritesse minev temperatuur on kõrgem, kui see oleks neljanda generatsiooni kaugküttevõrgus, siis ei ole antud juhul selline lahendus sobilik. Neljanda generatsiooni kaugkütet oleks võimalik kasutada juhul, kui kõikide majade puhul ei oleks kütmiseks oluline kõrge temperatuur, vaid saaks kasutada kütmiseks madalama temperatuuriga vett, näiteks juhul kui radiaatorite asemel kasutada pörandakütet. [36]

Tulevikus, kui minnakse üle neljanda generatsiooni kaugküttele, siis oleks sellisel juhul ka soojuspumpade konkurentsivõime kõrgem, sest kaugküttesüsteemis olev vee temperatuur on madalam, mille tõttu oleks soojuspumba soojustegur (COP) sellest tulenevalt kõrgem ning soojuspumba kasutamine kaugküttesüsteemis majanduslikult kasumlikum.

1.2.4 Edukalt valminud projektid välisriikides

Euroopas, sealhulgas ka põhjamaades, on praeguseks juba edukalt valminud ja töötavaid projekte, kus kaugküttevõrgus kasutatakse soojuspumpasid. Üheks selliseks projektiks on 2010 aastal valminud Norras kasutatav 13,2MW soojuspump, mis kasutab soojusallikana jahedat vett, ning selle abil varustatakse Drammeni tööstust ning kohalikku linna, kus elab 63 000 elanikku, soojust ja sooja veega. Soojuspump saab soojust kohaliku fjordi veest, mille temperatuur on ligikaudu 8° C ning mille soojuspump tagastab temperatuuril 4 °C. Väljundpoolel viiakse esialgu vesi kaugküttesüsteemis 60 kraadini. Pärast 60 kraadini vee viimist järgneb peatükis 1.1 kirjeldatud kolmeastmeline tsükkel, mille abil viiakse vesi kaugküttesüsteemis 90 kraadini. Sellise 13MW soojuspumba, soojusteguriga 3,05 ja alginvesteeringuga 5,8 miljonit eurot, tasuvusaeg on 4 aastat. Antud projekti muudab kasumlikumaks asjaolu, et kasutatakse ära Norra madalat elektrienergia hinda. Soojuspumbas kasutatavaks soojuskandjaks on ammoniaak, mis omab paremat efektiivsust kui teised sünteetilised soojuskandjad ning ei kujuta endas kliimasoojenemisele. Antud projektis suudab soojuspump varustada 85% ulatuses kaugküttevõrgu soojusnõudlust, ülejäänud 15% on kaetud kütteõlil töötavate kateldegaga tipukoormuste ajal. Sellise lahenduse kasutamisega vähendatakse CO₂ emissioone ligikaudu 15 000 t/a, arvestades, et elekter tuleb taastuvenergiaallikast ning hoitakse kokku kuni 6,7 miljonit liitrit kütust aastas. [5] [7]

Soomes, Helsingis, paigaldati aastal 2006 soojuspumpasid kogu soojusvõimsusega 90 MW. Selles projektis on ka kombineeritud kaugjahutus. Soojusallikadena kasutatakse suvel kaugküttesüsteemi tagastusvett ning talvel on soojusallikaks ümbritsev vesi. [8]

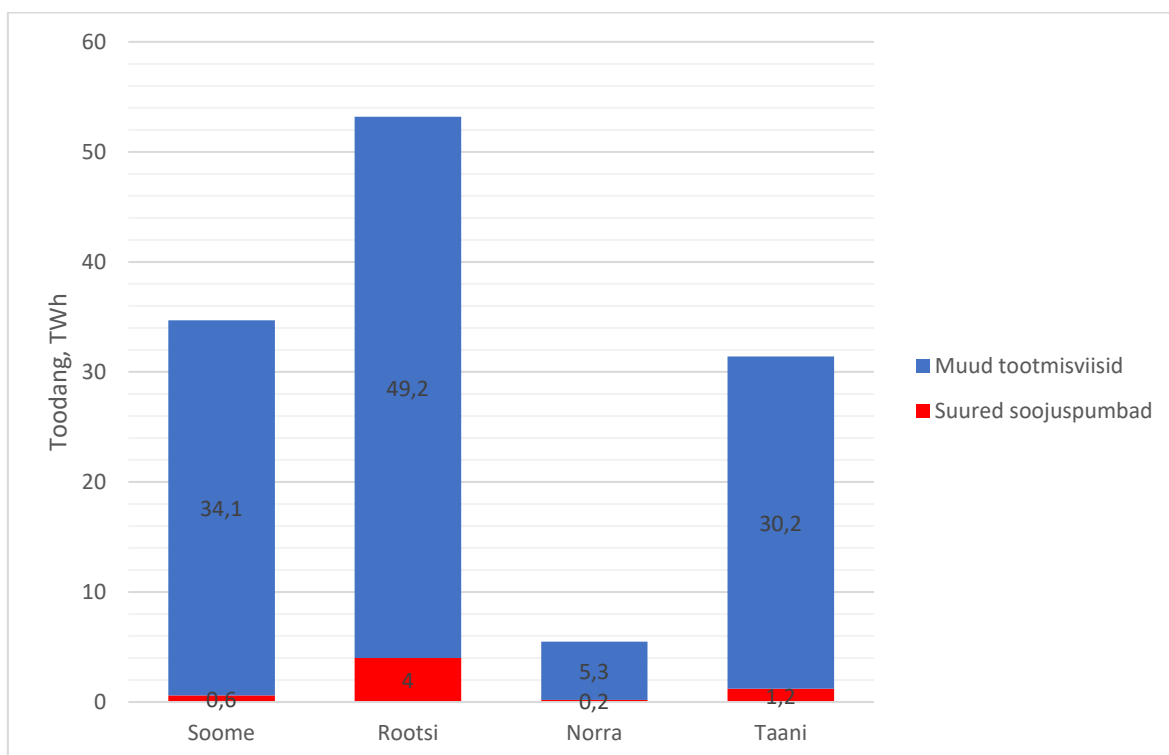
Rootsi puhul on levinud, et prükipõletusjaamade juures on kasutusel soojuspumbad. Kasutusel on nii mehaanilised kui ka absorptsioonsoojuspumbad. Üheks selliseks näiteks on Stockholmis asuv Brista 2 jaam, kus on kaks soojuspumpa järjestikku ühendatud. Aurusti poolset soojusallikad soojuspumpadel on soojus, mis on vabanenud jaama protsessidest näiteks suitsugaasi kondensaat, soojus turbiinidest, trafodest, kompressoritest, ventilatsioonist jms. Need kaks soojuspumpa tarbivad 1,1 MW elektrienergiat ja genereerivad sellest 6,8 MW soojusenergiat ja 5,8 MW jahutust. [8]

Lisaks on veel mitmeid projekte, mis on põhjamaades juba ellu viidud ning töös. Neid kirjeldab tabel 1.1.

Tabel 1.1. Põhjamaades ellu viidud projektid [6]

Linn	Ettevõtte	Soojuspumpade soojuslik väljundvõimsus (jahutusvõimsus)	Soojusallikas
Akaa	Elenia Lämpö	0,6 MW (0,5 MW)	Suitsugaasid
Espoo	Fortum	2x20 MW (2x,7,5 MW)	Reovesi
Helsingi	Helen	5x18 MW (5x12 MW)	Reovesi, jahutusvesi
Riihimäki	Ekokem/HLV	2x4,5 MW (2x2 MW)	Suitsugaasid, kaugküttesüsteemi tagastusvesi
Mäntsälä	Mätsälän Söhhö (Nivos)	3 MW	Andmekeskus
Turu	TSE	2x20 MW (2x14 MW)	Reovesi
Göteborg	Göteborg Energi (Rya verket)	2x50 MW + 2x30 MW	Reovesi
Lund	Lunds Energi	3,6 MW	Osakeste kiirendi, geotermaal
Stockholm	Fortum Sverige	4x27 MW + 2x24 MW + 4x25 MW	Merevesi
Drammen	Drammen Fjernvarme	3x4,5 MW	Merevesi
Oslo	Oslofjord Värme (Sandvika)	2x6,5 MW (2x4,5 MW)	Reovesi
Trondheim	NTNU	1,1 MW	Andmekeskus
Dronninglund	Dronninglund Fjernvarme	3 MW	Hoiustatud päikeseenergia

Kogu kaugküttesoojuse tootmine ja suurte soojuspumpade ning muude tootmisviiside osakaalud on välja toodud graafikul, mida kirjeldab joonis 1.7. Vaadeldes protsentuaalset osakaalu, kui suure osa moodustab suurte soojuspumpade poolt toodetud kaugküttesoojus kogu toodetud kaugküttesoojusest põhjamaades, siis kõige suurem osakaal selles valdkonnas on Rootsis 7,4%, kus on ka kõige suurem summaarne soojuse tootmise tase. Seejärel Taanis 3,9%, Norras 3,8% ja Soomes 1,7%. [6]

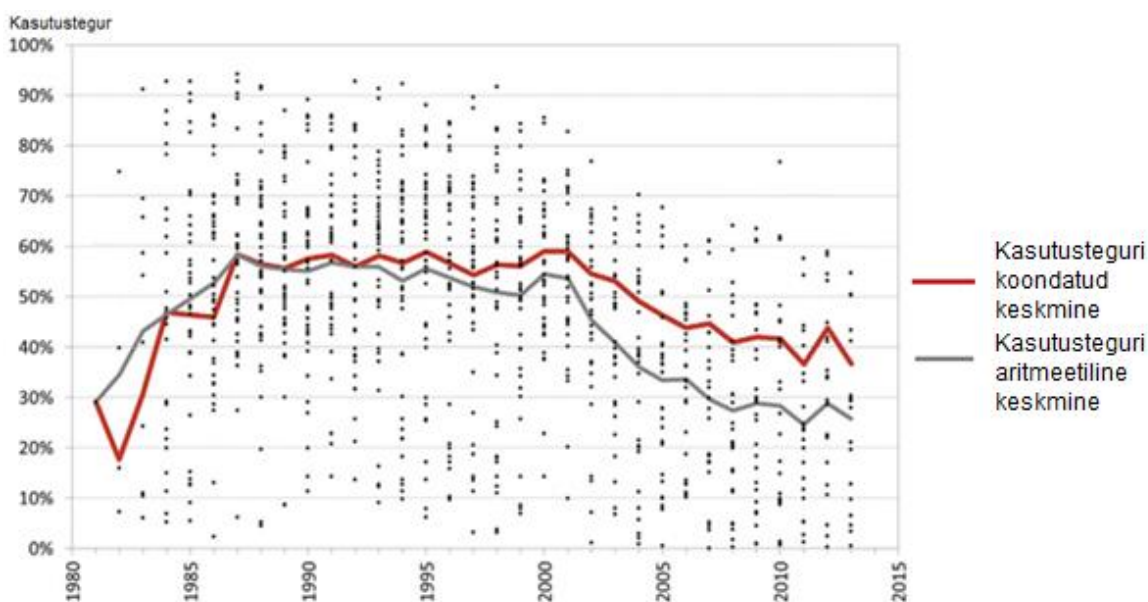


Joonis 1.7. Soojuspumpade osakaal kaugküttesoojuse tootmises Põhjamaades

Energiatootmiseseadmete kasutamise seisukohast on oluline vaadelda ka kasutustegurit ingl.k. (Capacity Factor). See avaldub kui tegeliku toodangu suhe teoreetilise maksimumtoodangusse aastas. [9]

Rootsi näite puhul on joonisel 1.8 välja toodud kõikide paigaldatud soojuspumpade (võimsusega alates 1 MW kuni 50 MW) aastased nii koondatud kui ka aritmeetilised keskmised kasutustegurid. Kuna viimastel aastatel on aritmeetilised keskmised madalamad kui koondatud keskmised, siis saab sellest järeldada asjaolu, et suurema võimsusega soojuspumpadel on kõrgem kasutustegur kui väiksema võimsusega soojuspumpadel. Antud graafiku alusel saab välja tuua kolm peamist trendi. Kui algusaastatel (1981-1985) paigaldati uusi tootmisüksusi, siis kasutustegur oli madal, kuna selline lähenemine oli uudne ning toimus kohanemine. Vahemikus 1986-2001 oli koondatud

keskmised kasutustegurid ligikaudu muutumatud, püsid keskmiselt ligikaudu 56% juures. See võrdub 4950 täiskoormusel kasutustunniga aastas, mis näitab seda, et soojuspumbad olid töös baaskoormuse katmiseks. Alates aastast 2002 on kasutustegurid iga-aastaselt olnud langustrendis. Alates 2002 ja hilisemal perioodil võib sellise languse põhjuseks olla elektriga seotud maksude ja hindade suurenemine ning uute konkureerivate poliitikavahendite kasutuselevõtt. Eelpool mainitud muutuste tagajärjel muutus majanduslikult kasumlikumaks toota ja müüa elektrienergiat, mis on koostootmisjaamades toodetud, kui kasutada seda soojuspumpades. Näiteks 2013. aastal oli kasutustegur vaid 37%. Soojusteguriks on antud analüüsis saadud 3.3, arvestades, et Carnot' tsükli järgi on efektiivsus 60-65%. [8]

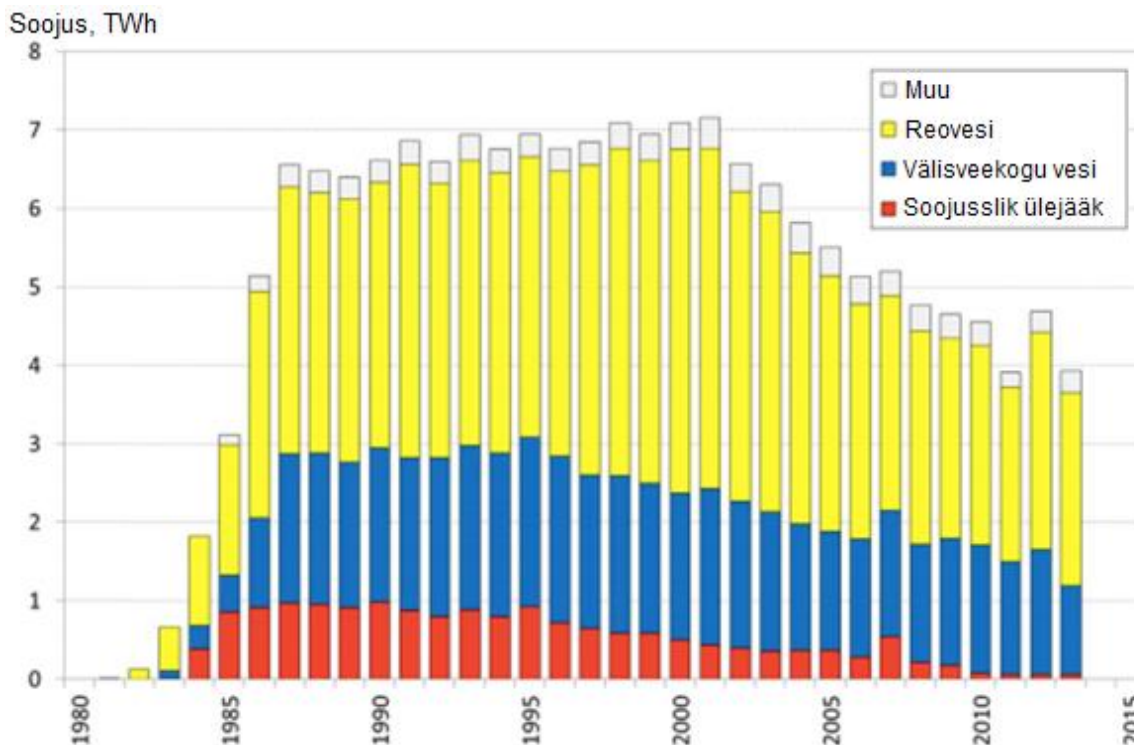


Joonis 1.8. Soojuspumpade kasutustegur Rootsis aastatel 1981-2013 [8]

1.2.5 Soojusallikad ja võrdlus koostootmisjaamaga

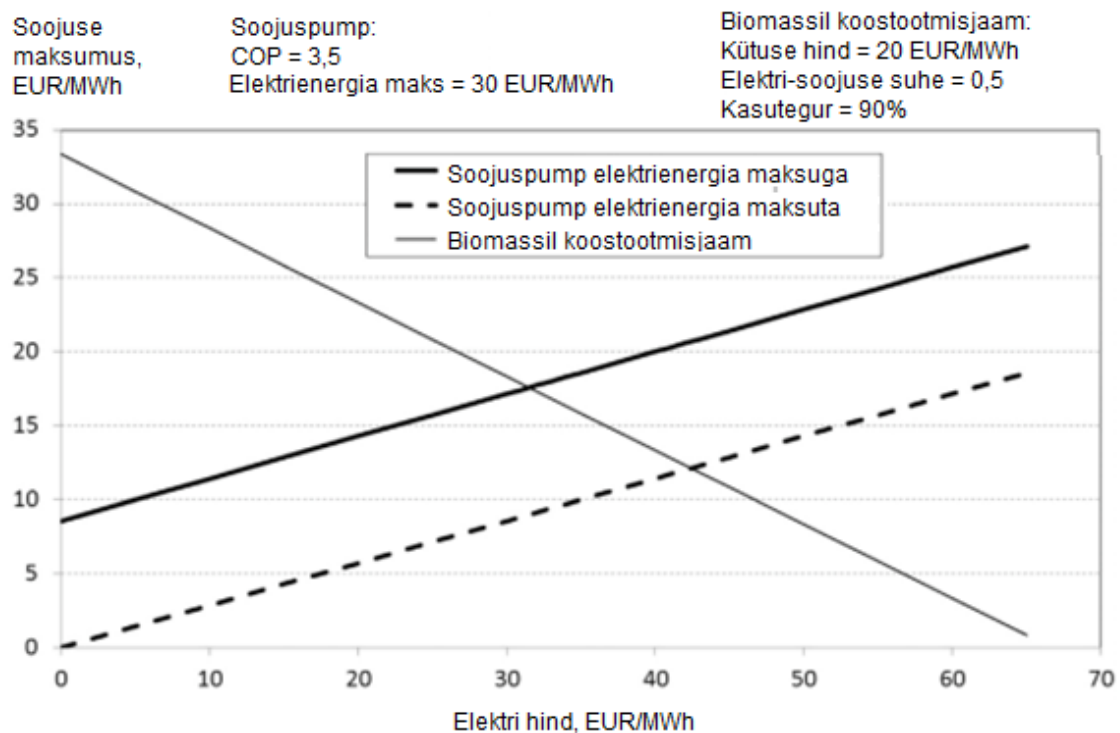
Peamised soojusallikad võib Rootsi näitel jagada neljaks. Kasutatakse peamiselt ümbritsevat (välis-)vett, reovett, tööstusest tekkinud lisasoojust ja muid allikaid. Ümbritseva vee all on mõeldud peamiselt soolast merevett, jõgede, järvede vett või põhjavett. Veetemperatuurid erinevatel aastaegadel varieeruvad vahemikus 2 kuni 14 kraadi vahel. Industrialse soojusülejäagi all mõeldakse madalatemperatuurilist soojuse taaskasutamist, mis on tekkinud tööstuslike protsesside tagajärjel ning temperatuurivahemikuks on 15-40 kraadi. Reovee alla loetakse heitvett mis on tekkinud inimtegevuse tagajärjel, temperatuuriga vahemikus 12-20 kraadi. Muude allikate alla loetakse suitsugaase ja geotermaalvett. Nagu selgub jooniselt 1.9, siis kõige kasutatavam soojusallikas on reovesi ja seejärel välisveekogu vesi. Kõige suuremal määral on vähenenud

industriaalse soojusülejäägi kasutamine soojusallikana, millest saab järeldada, et reovett ja naturaalse veekogude vett saab pikemas perspektiivis võtta kui stabiilset soojusallikat soojuspumpade jaoks. Joonisel 1.9 on välja toodud graafik, mis kirjeldab aastast soojuse tootmist vahemikus 1981-2013, soojuspumpade poolt, sõltuvalt soojusallikast, mida on kasutatud. [8]



Joonis 1.9. Soojuse tootmine soojuspumpade poolt Rootsis, sõltuvalt soojusallikast, vahemikus 1981-2013 [8]

Soojuspumba ja biomassil töötava koostootmisjaama võrdlus kaugküttesüsteemis Rootsi turutingimustel on toodud välja joonisel 1.10. Antud jooniselt selgub see, et soojuspump on konkurentsivõimelisem just madalate elektrienergia hindade korral ning kasulikum soojuse tootmiseks kui koostootmisjaam. Kõrge elektrienergia hinna puhul on kasulikum jällegi soojust toota koostootmisjaamas. Soojuspumba kohta on välja toodud kaks erinevat funktsiooni. Ühes funktsioonis on sissearvestatud elektrienergia maksud, teises on need arvestamata jäetud, kuna need erinevad riigiti, seetõttu erineb ka iga riigi graafik vastavalt maksude suurusele. Seega, mida madalamad on elektrienergia maksud, seda suurema elektrienergia hinna juures muutub tasuvamaks kasutada soojuse tootmiseks koostootmisjaama. Kui aga näiteks esinevad suured elektrienergia hinnakõikumised, on mõistlik kasutada soojuse tootmiseks mõlemaid tootmisüksusi. [8]



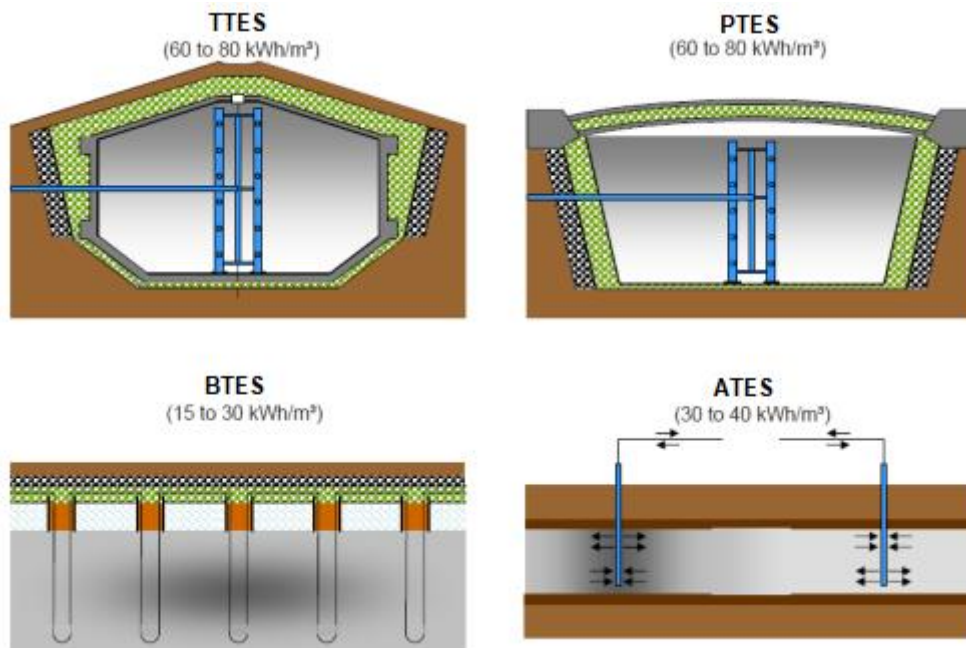
Joonis 1.10. Soojuse tootmise kulukus Rootsis soojuspumpade ja biomassil töötavate koostootmisjaamade jaoks sõltuvalt elektrienergia hinnast [8]

1.3 Soojussalvestid

Soojuse sesoonseks salvestamiseks kasutatakse suuri kuumaveepaake. Selline tehnoloogia on kujutatud joonisel 1.11 vasakul üleval nurgas (TTES), ning antud tehnoloogia soojussalvestusmaht on 60-80 kWh/m³. Lisaks võib kasutada energia salvestamiseks veel veeauku, mis on sisuliselt maa sees olev auk, mis on vooderdatud veekindla membraaniga, täidetud veega ja kaetud ujuva ja isoleeriva kaanega. Antud tehnoloogia on kujutatud joonisel 1.11 paremal üleval nurgas (PTES). Sellise tehnoloogia soojussalvestusmahuks on samuti 60-80 kWh/m³. [31]

Kui kuuma vett hoiustada looduslikes maa-alustes põhjaveekihtides, siis toimub otsene soojusvahetus vertikaalsete aukude kaudu, tüüpiliselt ühe keskmise ja mitmete äärmiste aukude kaudu. Veekihi keemiline koostis ja looduslik põhjavee vool võivad antud tehnoloogia puhul selle võimekusele mõjuda negatiivselt, kuid voolu saab juhtida lisaaukude abil, mis asuvad väljaspool vee hoiustamise ala. Selline tehnoloogia on joonisel 1.11 kujutatud all paremal nurgas (ATES), ning selle tehnoloogia soojussalvestusmaht on 30-40 kWh/m³. Lisaks eelnevalt välja toodud tehnoloogiatele kasutatakse veel torusid puuraukudes ehk kanalisalvestust, mis on kasutusel koos soojuspumpadega. Tavaliselt on antud tehnoloogia puhul hoiustatud vee temperatuur madal

vahemikus 0-30 °C ning kasutegur vahemikus 90-100% kui ei ole suuremahulist põhjavee voolu. Selline tehnoloogia on kirjeldatud joonisel 1.11 vasakul all nurgas (BTES) ning antud tehnoloogia soojussalvestusmaht on 15-30 kWh/m³. [31]



Joonis 1.11. Sesoonsed soojussalvestite tehnoloogiad. [31]

Soojussalvestitele antakse energiat mingisugusest soojusallikast, näiteks antud juhul soojuspumbast ning hiljem saab soojussalvestisse salvestatud energiat kasutada kaugküttesüsteemi soojuse andmiseks, kui soojuspumba kasutatava naturaalse soojusallika temperatuur ei ole soojuse tootmiseks majanduslikult soodne.

Keskmesed soojuskaod sõltuvad soojussalvestite puhul mitmetest asjaoludest. Näiteks suhe soojuskadude ja salvestatava energia koguse vahel on pinna ja salvesti ruumala suhe. Näiteks väikse salvesti puhul ruumalaga 20 m³ on pinna ja rumala suhe 8 korda suurem kui 10 000 m³ ruumalaga salvesti puhul, seega on väikese salvesti puhul ka kaod 8 korda suuremad kui suuremõõtmelise salvesti puhul. Seega mida suurem on salvesti seda väiksemad on kaod. Veeaugu tehnoloogia puhul on esimese nelja aasta jooksul kaod suuremad, sest soojendatakse ümbritsevat pinnast. [31]

Soojussalvestite puhul on maksimaalseks ruumalaks 60 000 m³ ning parimate tehnoloogiate puhul on soojussalvestusmahuks 60-80 kWh/m³. Kasutegur on vahemikus 80-95% ning eluiga ligikaudu 20 aastat. Investeeringukulud on soojussalvesti puhul 35 €/m³. [31]

2. Soojuspumba konkurentsivõime hindamine Eesti kontekstis

Käesolevas töös on uurimise all soojuspumpade konkurentsivõime Eesti tingimustes, seetõttu on oluline kirjeldada spetsiifilisi olusid, mis on Eestis esinevad, nagu kaustatavad tehnoloogiad, tarbimise kogused, tarbimisprofiil ja kasutatavad kütused. Vaadeldakse ka Eesti välisõhu temperatuuri ning kuidas see mõjub soojuse tarbimisele/tootmisele. Samuti on oluline konkurentsivõime uurimiseks välja tuua hinnakujundus ja regulatsioon – seadused ja määrused, mis kaugkütet reguleerivad ning võimalikud soojusallikad soojuspumba jaoks.

Lisaks on antud peatükis käsitletud erinevaid finantsmeetodeid, millega on võimalik hinnata soojusallika konkurentsivõimet/tasuvust.

2.1 Eesti spetsiifiliste olude kirjeldus

Käsitletavas peatükis on kirjeldatud Eesti spetsiifilisi olusid, mille all on välja toodud kasutatavad tehnoloogiad, seadmed ja kütused. Näidatakse Tallinna soojustoodangut, tuuakse välja tarbimise kogused, tarbimisprofiil ja soojustootmisüksused. Kirjeldatakse Eesti kaugküttevõrku ja välistemperatuuri.

Lisaks on kirja pandud Eesti soojusmajanduse regulatiivne pool, kus on välja toodud seadused ja määrused, mis kaugkütet reguleerivad ja kirjeldatud ka kaugküttesoojuse hindade kujunemist.

2.1.1 Kasutatavad tehnoloogiad, tarbimise kogused ja profiil

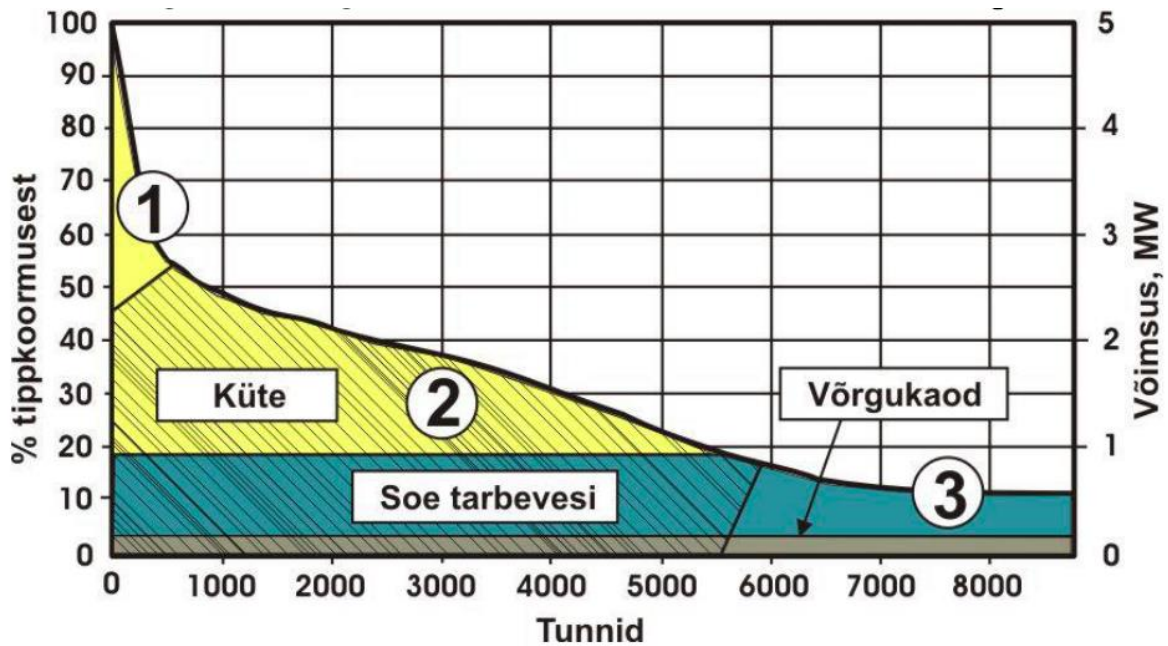
Kasvuhoonegaaside emiteerimise vähendamine, taastuvenergia osakaalu suurendamine ning energiakasutuse efektiivsuse tõstmine on Euroopa Liidu energiapoliitika eesmärkideks. Kuna meie kliimavõõtnes on varustatakse soojusega tarbijaid põhiliselt kaugküttega, on eelnevalt loetletud eesmärkide täitmisel suur osakaal ka kaugküttele. Soojuse tootmisel on suurenenud päikeseenergia ja tuuleenergia osakaal. Seoses tehnoloogia kiire arenguga on väljaarendatud soojussalvestid, tänu millele on lihtsam kasutusele võtta tuule- ja päikeseenergiat. [10]

Kaugküttesüsteemi võib kirjeldada kui süsteemi, mille abil jaotatakse tsentraalselt toodetud soojus tarbijateni. Kaugküttestorustikes ringleb soojuskandjana kuum vesi ning toodetud soojus jõuab tarbijateni kaugküttesüsteemiga ühendatud hoonete soojussõlmede ja soojusvahetite abil. Soojusvahetite abil kandub keskküttesüsteemis olev soojus üle hoone küttesüsteemis olevale tarbe- ning kütteveele. [13]

Soojust toodetakse peamiselt koostootmisjaamades ning kaugküttekatalamajades ning toodetud soojust kasutatakse enamasti hoonete kütmiseks, sellepärast mängib olulist rolli tootmisvõimsuse

suurusel välistemperatuur. Soojuskoormuse kestusgraafik, mida on kujutatud joonisel 2.1, kirjeldab kaugkütte toimimist. [11]

Graafikul olev piirkond 1 on tipukoormus, number 2 piirkond tähistab baaskoormust, ning kolmandal piirkonnal on märgitus soe tarbevesi, mida loetakse suviseks soojuskoormuseks. Kolmas piirkond on eelistatavalt kaetud baaskoormustootmisüksustega, kuid esineb olukordi, kui madalast soojuskoormusest tingituna kasutatakse sooja tarbevee jaoks tipukoormustootmisüksusi. Antud teguviis muudab suvise soojaveearustuse kulutused suuremaks. [10]



Joonis 2.1. Koormuskestusgraafik kaugküttevõrgule [10]

Tipukoormust kaetakse eelistatult gaasivarustuse olemasolul gaasikateldega või vedelkütust kasutavate kateldega. Baaskoormust kaetakse enamasti koostootmisjaamadest saadava soojusega, turbakateldega, biokütusekateldega või muude kütteseadmetega, milles saab kasutada odavat kütust. [10]

Statistikaameti andmetel toodeti oli Eestis 2016. aastal koostootmisjaamades toodetud soojus 4041 GWh. [12]

Tabelis 2.1 on välja toodud Eesti kaugküttevõrkudes asuvad koostootmisjaamad ning näidatud ka kütused, millel vastav üksus töötab ning elektrilised ja soojuslikud võimsused.

Tabel 2.1. Koostootmisüksused Eestis [12]

Linn	Seade	Kütus	Elektriline võimsus, MW	Soojuslik võimsus, MW
Tallinn	Tallinna SEJ	hakkepuit, turvas	24	68
	Iru SEJ	maagaas	190	398
	Iru SEJ (jäätmeenergiaplokk)	olmejäätmed	17	50
Tartu	Tartu SEJ	hakkepuit, turvas	25	60
Pärnu	Pärnu SEJ	hakkepuit, turvas	24	46
Narva	Balti SEJ 11. blokk	põlevkivi	215	160
Kohtla-Järve; Jõhvi	VKG Põhja SEJ; VKG Lõuna SEJ	põlevkivi, generaatorigaas	27	70
Kiviõli	Kiviõli Keemiatööstuse SEJ	põlevkivi, generaatorigaas	4	20
Sillamäe	Sillamäe SEJ	põlevkivi, maagaas	18	94
Kuressaare	Kuressaare SEJ	hakkepuit	2,4	9,6
Paide	Pogi SEJ	hakkepuit	2	8
Põlva	Põlva gaasimootor	maagaas	0,9	1,25
Viljandi	Viljandi gaasimootor	maagaas	2	2
Võhma	Võhma gaasimootor	puugaas	0,2	0,46

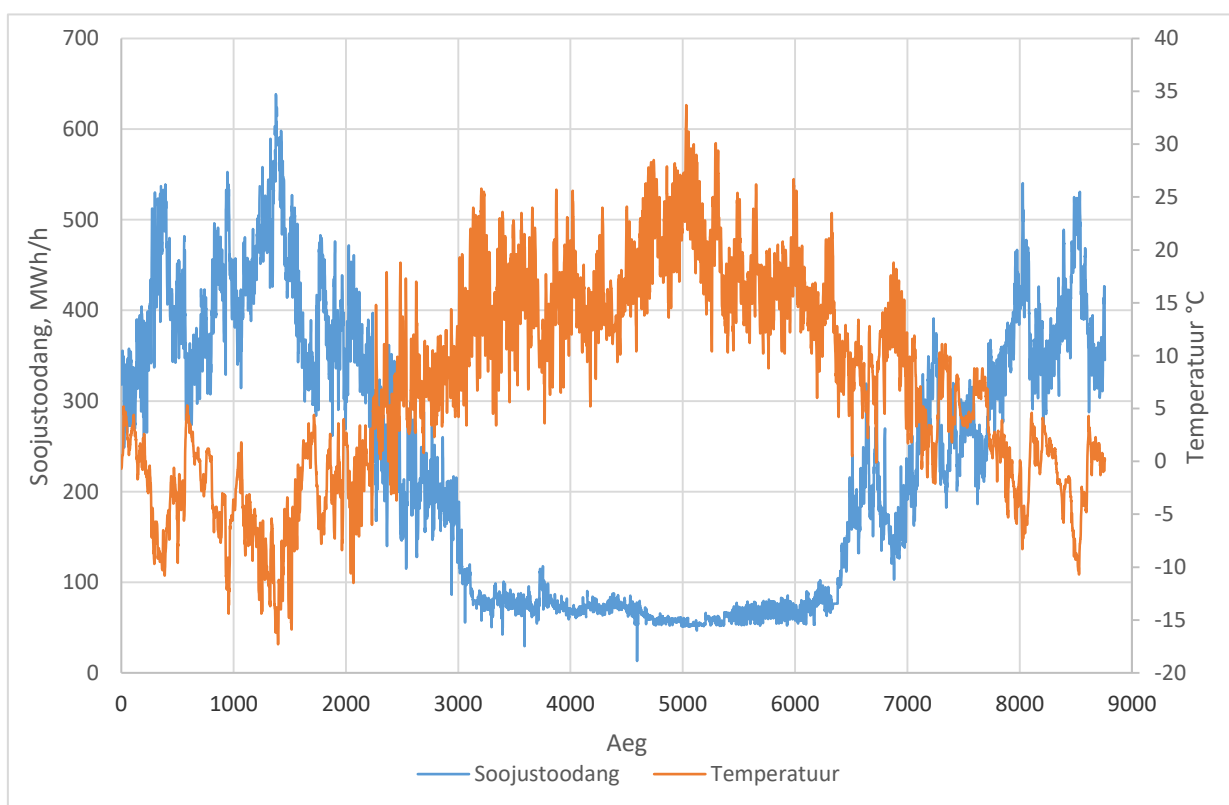
Tabelis 2.2 väljatoodud andmetest selgub, et kõige rohkem kasutatakse koostootmisjaamades kütusena puiduhaket, seejärel põlevkivi, jäätmekütust ja biogaasi. Vähemal määral on kasutatud ka põlevkivigaasi ja maagaasi ning freesturvast.

Tabel 2.2. Eestis koostootmisjaamades toodetud soojus sõltuvalt kütuseliigist [12]

Kütuse liik	Soojuse hulk, TJ
Kasutatud põlevkivigaas	930
Kasutatud biogaas ja must leelis	1557
Kasutatud jäätmekütus	1595
Kasutatud kivisüsi	0
Kasutatud põlevkivi	4034
Kasutatud freesturvas	684
Kasutatud puiduhake	10 235
Kasutatud põlevkiviõli	38
Kasutatud maagaas	831

Kui võrrelda sama aasta andmeid, selgub, et soojuse toodang katlamajades oli 2016. aastal 5318 GWh, mida on 1277 GWh võrra rohkem, kui koostootmisjaamades. [12] Katlamajades kasutatakse kõige rohkem maagaasil töötavaid katelseadmeid, seejärel tahketel biokütustel töötavaid katelseadmeid. Vähemal määral toodetakse soojust veel turbal ja vedelkütustel töötavatel katelseadmetes. [11]

Eesti kaugkütte soojustarbimine statistikaameti andmetel aastal 2016 oli 6650 GWh. [12] Antud suurus näitab tarbijatele müüdud soojust. Nagu eelnevalt mainitud, siis kaugküttevõrkude abil köetakse enamasti hooneid ning seetõttu sõltub tarbimise suurus välistemperatuurist. Kuna välistemperatuur aasta lõikes muutub, siis varieerub ka soojustarbimine ja soojustootmine. Soojustootmist aasta lõikes kirjeldab soojustootmisprofiil, mis on kujutatud joonisel 2.2.



Joonis 2.2. Soojustoodang sõltuvalt välistemperatuurist Tallinnas aastal 2018 [27] [28]

Graafik 2.2 põhineb Utilitas AS ja Keskkonnaagentuuri andmetel ning iseloomustab 2018. aastal Tallinna kaugküttevõrku toodetud soojust sõltuvalt välistemperatuurist. [27] [28]

Antud reaalne tootmisprofiil näitab, et suvekuudel on soojustoodang väga madal, ning talvekuudel, kui välistemperatuur on madal, on soojuse tootmine suurem. See omakorda kinnitab väidet, et soojustoodang on sõltuv välistemperatuurist ning varieerub aasta lõikes olulisel määral.

2.1.2 Kaugküttevõrk ja välistemperatuur

Nagu eelnevalt mainitud siis soojus jõuab tarbijateni keskküttesüsteemi torustiku abil. Kaugküttevõrkudes oleva kuuma vee temperatuur on erinev, sõltuvalt keskküttevõrgust ning välistemperatuurist. Keskküttesüsteemis oleva võrguvee temperatuuri väärtus, mis soojusallikast välja antakse, on etteantud soojusvõrgu operaatori poolt. See antakse ette keskmise arvutusliku välisõhu temperatuurist sõltuvalt muutustest, mis toimuvad keskkonnatingimustes, inertsist kindlal ajahetkel ning ka kaugküttesüsteemi pikkusest. Näiteks Aseri vallas oli 2013/2014. aastal kütteperioodil kaugkütteevee temperatuur, mis on operaatori poolt etteantud vahemikus 60-80 °C.

Võrguvesi, mis kaugküttesüsteemi tarbija tagastab sõltub samuti mitmest erinevast aspektist. Esiteks võrguvee temperatuurist, mis soojussüsteemi antakse. Lisaks veel automatiseerimise tasemest, mis konkreetsel soojussõlmel on, seadmete seisukorrast, mida tarbija kasutab ning tarbija soojuskoormuste suhtest ja energia tarbimise graafikust. Kütteperioodil on näiteks Aseri vallas tarbijatelt tagastatava võrguvee temperatuur 46-59 °C. AS Utilitas Tallinn andmetel võib Tallinnas kaugkütteevee temperatuur madala välisõhu temperatuuri korral olla ka kuni 125 °C. [14] [15]

Enamik kaugküttevõrgud, mis tänapäeval kasutuses on, on ehitatud Nõukogude Liidu ajal. Kuna ehitusperioodil ennustati suurt soojustarbimise kasvu, siis on tänapäeval olevad soojusvõrgud liigselt üledimensioneeritud. [10] Kuna AS Utilitas Tallinna poolt Tallinna Tehnikaülikoolilt tellitud uurimustööst, hindamaks soojusvõrgu olukorda, selgus, et vajalik on kaugküttevõrgu torustiku uuendamine, on renoveeritud Tallinnas 175 kilomeetrit soojusvõrku ehk 41% kogu soojustorustikust. Uuendamise eesmärgiks on töökindluse suurendamine ja soojuskadude vähendamine. Tallinnas on võrgus kadude protsentuaalseks suuruseks 16%, üle Eesti aga on kadude suurus ligikaudu 21%. Enamasti on kadude põhjuseks Nõukogude Liidus kasutatav isolatsioonimaterjal, mis on kehvamate omadustega, ning õhem isolatsioon. Siiski on keskküttetorustikus olev vesi oluliselt kõrgem, kui välistemperatuur, ning suure temperatuuri erinevuse tõttu on alati olemas sellises süsteemis kaod, isegi väga heade isolatsioonimaterjalide puhul, kuid torustiku optimeerimisega ning renoveerimisega ja isolatsiooni parandamisega on võimalik kadusid siiski mõningal määral vähendada. [15]

Võrreldes Põhjamaadega on Eestis olukord halvem, kuna nendes riikides on toimunud stabiilne kaugkütte areng aastakümneid ning seetõttu on neil ka soojuskadud väiksemad. Näiteks Soomes on kaod kõigest 6-8%. [15]

Eestis on kokku 239 kaugküttevõrku ning torustike pikkus 1430 km. Kaugkütte jätkusuutlikust hinnatakse tarbimistiheduse kaudu, mis on tarbitud soojuse suhe (MWh) soojustrassi pikkusesse. Kui antud suhe jääb alla 1, siis ei ole võrk jätkusuutlik. Eesti Arengufondi poolt läbiviidud uuringust selgub, et selliseid kaugküttevõrke on Eestis 65. Võrkude puhul, mis ei ole jätkusuutlikud, tuleks minna üle kohtküttele või lokaalküttele. Sellist üleminekut on mõistlik teha nii, et kaugkütte asemel võetakse kasutusele puidukatlad või soojuspumbad. Siiski kaugküttevõrgud, mis on jätkusuutlikud kaugkütteseisukohalt, võiks toimuda üleminek turbale või biokütusele ning suuremates võrkudes on mõistlikum viis katta baaskoormust jäätmete põletamise ja biokütuse kasutamise teel. Eelistatum tipukormuse katmine võiks toimuda tehnoloogiate abil, mille püsikulud on väiksed. [15]

Lisaks selgub uuringust prognoos pikemaajalise soojustarbimise kohta, ning võttes arvesse seda, et liigutakse energiasäästlikumate lahenduste poole siis eeldatavasti tarbimine on langustendentsis. Seda prognoosi kirjeldab tabel 2.3.

Tabel 2.3. Soojustarbimisprognoos aastani 2050 [10]

Aasta	Tarbimine, GWh
2020	4186
2030	4025
2050	3703

Võttes arvesse tarbijahinna kaheprotsendilist tõusu aastas ning seda, et gaasikatelde tootmismahht on suur, millega kaetakse ka tipukoormust, avaldub soojuse hind tabelis 2.4.

Tabel 2.4. Soojuse prognoositav hind [10]

Aasta	Hakkepuidust EUR/MWh	Gaasist EUR/MWh
2020	69	95
2030	83	98
2050	123	146

Tabelis 2.5 on välja toodud Keskkonnaagentuuri poolt mõõdetud temperatuurid Harku mõõtepunktis aastal 2018. Selgub, et kõige madalamad keskmised temperatuurid on jaanuaris, veebruaris, märtsis, novembris ja detsembris. Need on ka põhilised kuud, kus kaugkütte soojuse tarbimine on suurem. Andmete põhjal võib veel järeldada, et esinevad üsna suured temperatuurimuutused ka kuulõikes, kuna ühes kuus mõõdetud maksimaalsed ja minimaalsed temperatuurid erinevad teineteisest märgatavalt. Temperatuure võrreldes järeldub, et juunis,

juulis, augustis on kaugkütte tarbimine märgatavalt väiksem kui teistel kuudel. Antud järeldust kinnitab ka Joonis 2.2, kus on näha Tallinna soojustoodang 2018. aasta lõikes. [28]

Tabel 2.5. Harjus mõõdetud temperatuurid aastal 2018 [28]

	Keskmine temperatuur	Madalaim temperatuur	Kõrgeim temperatuur
Jaanuar	-1,7	-10,8	5,3
Veebruar	-6,4	-17,3	1,8
Märts	-3,1	-15,9	4,4
Aprill	5,7	-6	18,8
Mai	14,4	3,4	25,8
Juuni	14,9	3,6	25,7
Juuli	20,2	9,4	33,7
August	18,2	8,8	30,1
September	13,9	0,5	26,7
Oktoober	7,5	-2,1	18,8
November	3,5	-5,9	11,1
Detsember	-1,5	-10,7	4,6

2.1.3 Regulatsioon ja hinnakujundus

Eestis reguleerib kaugkütet kaugkütteseadus, konkurentsiseadus ning hädaolukorraseadus. Kaugkütteseadus on üheks olulisemaks soojusmajanduse regulatsioonidokumendiks, lisaks sellele seadusele on veel olulised Tööstusheite seadus ning Välisõhu kaitse seadus. Kaugkütteseadusega reguleeritakse soojuse tootmise, jaotamise ja müügiga seonduvaid tegevusi kaugküttevõrgus ning sellega liitumist. Sellised tegevused peavad olema koordineeritud, ning olema oma põhimõtelt objektiivsed, võrdse kohtlemisega ning läbipaistvad, tagamaks efektiivne, kindel, põhjendatud hinnaga, usaldusväärne ning tarbija vajadustele ja keskkonnanõuetele vastav soojusvarustus. Antud seaduse kohaselt on võrguettevõtjal kohustus korraldada konkurss lepingu sõlmimiseks, kui tekib nõudlus suuremate tootmisvõimsuste järele või on soojuse ostu lepingute sõlmimiseks avaldatud soovi ettevõtjate poolt. Selle regulatsiooni abil on tekkinud konkurents soojusenergia tootmisel ning sealhulgas anda garantiid tootjatele, et rajada tootmisseedmeid. Perspektiivne regulatsiooni edasiareng võiks toimuda sellises suunas, et uued turule sisenejad saavad turule siseneda ka siis, kui kehtivad veel sõlmitud lepingud, aga juhul kui seni lepingut omanud tootja eeldatud tulukus ja juba tehtud investeeringud hüvitatakse. [11] [17]

Kui kaugküttevõrguga liituvad uued soojustootjad, siis tekib rohkem konkurentsi ning tekib võimalus, et tarbijateni jõuab soodsam kaugküttesoojus. Siiski on oluline, et muudatused, mida

tehakse võrgu tehnilises ülesehituses ning regulatsioonides oleksid toetavad erinevate tootjate liitmise suhtes, sest vastupidisel juhul ei ole tegemist jätkusuutliku lähenemisega. [11]

Väiketootjate puhul esineb peamiselt probleem selles, et ei suudeta täita võrgueeskirju, mis on vajalikud võrgu häireta toimimiseks. Selle täitmisel võiks olla ka väiketootjatel võimalus müüa nende poolt toodetud soojust kaugküttevõrku samadel tingimustel teiste tootjatega ehk madalaima hinna alusel. [11]

Lisaks sätestab kaugkütteseadus ka veel hinna kujundamise reeglistiku. Soojust müüvatel ettevõtjatel on kohustus müügihind kooskõlastada Konkurentsiametiga. Konkurentsiametiga kooskõlastatud hinnast kõrgema hinnaga soojuste müük soojust tootva ettevõtja poolt on keelatud.

Eelnevalt mainitud seadustele veel lisaks on soojusmajanduses regulatiivseteks seadusteks tööstusheite seadus, mille kohaselt on seatud piirväärtused heitegaasides sisalduvatele saasteainetele, mis põletusseadmetest väljuvad. Piiratakse näiteks lämmastikoksiidide, vääveloksiidide, raskemetallide ja teiste saasteainete kontsentratsioone heitgaasides. Välisõhu kaitse seaduses on kirjeldatud kasvuhoonegaaside heitkvootide kauplemise süsteemi, mis kehtib põletusseadmetele, millega toodetakse soojust. [16]

Keskonnatasud paiksetest saasteallikatest eritatavatele saasteainetele, kuhu kuuluvad soojakatlad ning koostootmisjaamad on paika pandud keskkonnatasude seaduses. Kütuste kasutamisest tulenevad aktsiisimaksud on sätestatud Alkoholi-, tubaka-, kütuse- ja elektriaktsiisi seaduses, mille järgi on maksude suuruseks näiteks 0,3 eurot põlevkivi ülemise kütteväärtuse GJ kohta, 24,35 eurot tuhande kuupmeetri maagaasi kohta ning 15,01 eurot 1 tonni põlevkivi kütteõli kohta. [16]

Lisaks on soojusmajandus reguleeritud veel mitmete määruste poolt. Nendeks on:

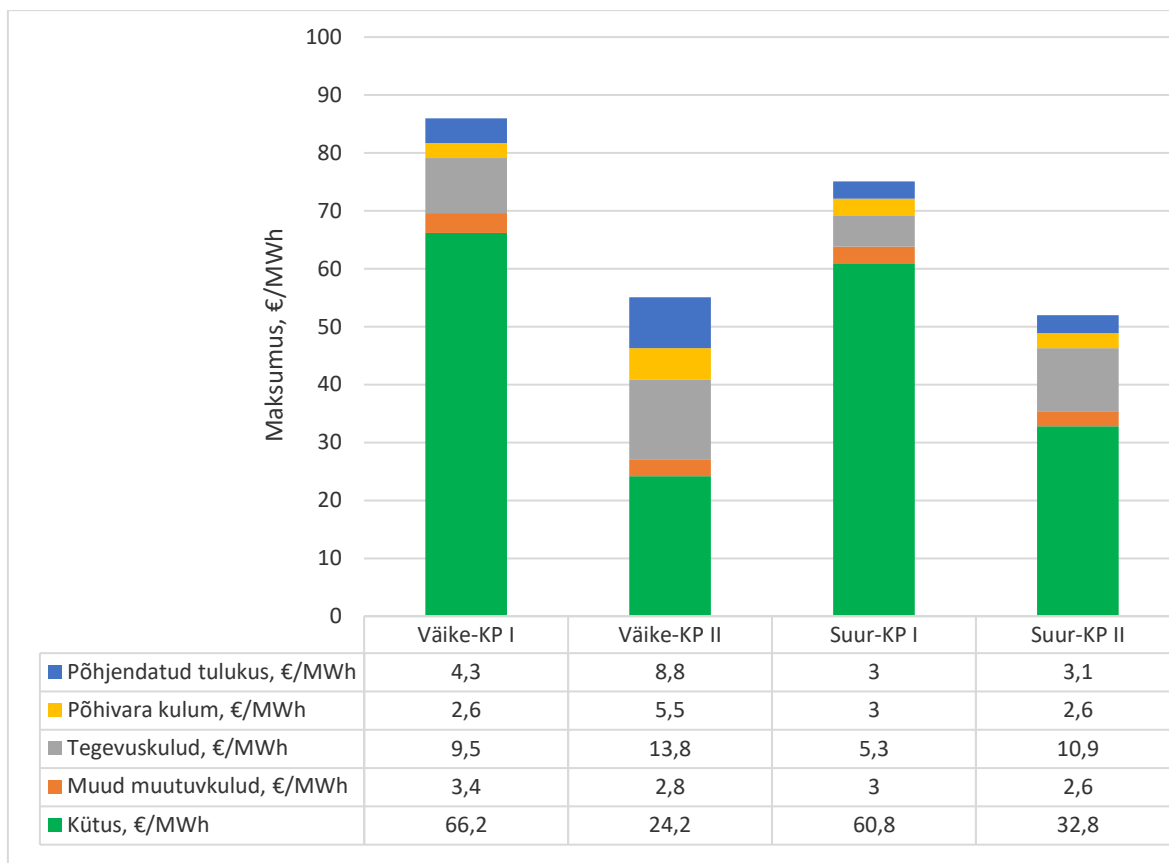
1. Suurte põletusseadmete saasteainete heite piirväärtused, nende kohaldamine mitme kütuse põletusseadme korral ja väävläärastuse astme nõuded;
2. Tõhusa koostoomise nõuded;
3. Lubatud heitkoguse ühikute enampakkumise kord;
4. Kasvuhoonegaaside lubatud heitkoguse ühikutega kauplemise perioodi 2013-2020 enampakkumisel saadud tulu ja kasutamise aruandluse üldtingimused;
5. Kasvuhoonegaaside heitkoguste ühikutega kauplemise kord;
6. Kasvuhoonegaaside lubatud heitkoguse ühikutega kauplemise süsteemi kuuluvate käitajate tegevusalade loetelu;

7. Paiksetest ja liikuvatest saasteallikatest eralduvate vääveldioksiidi, lämmastikdioksiidide, lenduvate orgaaniliste ühendite ja ammoniaagi heidete summaarsed piirkogused ja nende saavutamise tähtajad. [16]

Kaugküttesoojuse müügihind kujuneb vastavalt muutuvkulude, püsikulude ja põhjendatud tulunormi koosmõjul. Muutuvkulu koosneb kasutatavate kütuste, elektri, kemikaalide ja toorvee maksumusest ning on sõltuvuses soojuse tarbimismahtudest. Püsikulude alla liigituvad tegevuskulud, investeeringud, seadmete amortisatsioon, palgad ning riigile makstavad maksud.

Kaugkütteseadus sätestab ka ära hinna kooskõlastamise põhimõtted, millest lähtuvalt peab olema kehtestatud soojuse piirhinna korral tagatud keskkonnanõuete täitmine, investeeringud tegevus- ja arenduskohustuse täitmiseks, kvaliteedi- ja ohutusnõuete täitmine, põhjendatud tulukus ning vajalike tegevuskulude jaoks tehtavate kulutuste katmine. Hinna kooskõlastamise põhimõtted on väljaarendatud nii, et tagatakse ettevõttele majandusjõulisus ning et ettevõtte oleks motiveeritud oma tegevuse efektiivsemast korraldamisest. Hinnaregulatsiooni puudusel peavad kehtestatud hinnad ettevõtete poolt olema õiglased. [18]

Soojusmajanduses on kehtestatud ka soojuse piirhind. Piirhind on suurim lubatud hind, mis on konkurentsiametiga kooskõlastatud, millega soojust tooteval ettevõttel on lubatud tarbijatele soojust müüa. Joonisel 2.3 on graafiliselt näidatud erinevate suurustega kaugküttepiirkondades piirhinna kujunemist. [18]



Joonis 2.3. Kaugküttesoojuse hinna kujunemine erinevate suurustega kaugkütte võrgupiirkondades [18]

Jooniselt 2.3 selgub, et väiksemates võrgupiirkondades ei ole kaugkütte jätkusuutlik, kuna kulutused kütustele on ligi 70 protsenti ja rohkem. Sellistes piirkondades on mõistlikum tarbijate seisukohast kaaluda teisi kütmissiise.

Kaugküttesaadaja kulutustest moodustavad enamiku osa kütus, ning kogu süsteemi tõrkevaba töö tagamine, mille alla kuulub näiteks seadmete väljavahetamine ja hooldus. Kulutused kütusele sõltuvad enamjaolt sellest, kui suur on tarbimine. Osa tehtavatest kulutustest on sõltuvuses sellest, et kui suur tarbimine on konkreetse kaugküttesüsteemi tarbimine kõige külmemal päeval aastas, sest seda võetakse arvesse soojussõlme projekteerimisel ja selle alusel on liitumislepingus paika pandud ka hoone liitumisvõimsus. [18]

Konkurentsiameti andmetel on seisuga 18.03.2019 Tallinna võrgupiirkonna kehtivaks kooskõlastatud soojuse piirhinnaks (AS Utilitas jaoks) 55,10 €/MWh +km. Seisuga 18.03.2019 on Konkurentsiametiga kooskõlastatud soojuse tootmise piirhind Utilitas Tallinna Elektri jaam OÜ jaoks vastavalt: Väo 1 koostootmisjaam 27,74 €/MWh +km ja Väo 2 koostootmisjaam 33,63 €/MWh +km. Hind millega müüakse tarbijatele ja soojuse tootmise hind erinevad. Vahe tuleneb mitmetest erinevatest teguritest, nagu näiteks kaod ja võrguhooldustasud. [19]

2.1.4 Võimalikud soojusallikad Tallinna tingimustes

Leidmaks kõige kasumlikumat stsenaariumit antud projekti kohta on oluline võrrelda mitmeid erinevaid juhtumeid, ning vaadelda milliste soojusallikate kasutamise puhul on soojuspumpadest soojuse tootmine majanduslikult kõige kasumlikum.

Üheks võimalikuks soojusallikaks on välisõhk. Välisõhk sobib soojusallikana, kuna see on kättesaadav tasuta ning sõltumata soojuspumba asukohast. Siiski võib olla Eesti kontekstis välisõhu kasutamine soojusallikana mõningal määral majanduslikult mitte väga kasulik, sest talveperioodil võib välisõhu temperatuur langeda küllaltki madalale, mis omakorda mõjutab soojuspumba soojustegurit ning madalama soojusteguri puhul muutub soojuspumbast soojuse tootmine kulukamaks. Välisõhu temperatuurid Tallinna lähedal Harku mõõtejaamas on toodud alapunktis 2.1.3 tabelis 2.5 ning joonisel 2.4, millest selgub, et talvekuudel on temperatuur küllaltki madal ning antud perioodil ei pruugi soojuspumbast soojuse tootmine olla majanduslikult mõistlik.

Lisaks välisõhule on võimalik soojuspumpade soojusallikana kasutada ka merevett. Merevee temperatuur Läänemere põhjakihtides (allpool halokliini) on aastaringselt ühtlane ning ligikaudu 5 °C. Riigi Ilmateenistuse andmetel stabiliseerub Läänemere temperatuur 75 meetri sügavusel ning on sellisel sügavusel aastaringselt 3,4 – 5,5 °C. Keskkonnaministeeriumi andmete järgi asub halokliin umbes 60 – 80 meetri sügavusel. Sellise stsenaariumi puhul oleks tagatud aastaringselt ühtlane soojusallika temperatuur, kuid võrreldes välisõhuga on antud soojusallika puhul suhteliselt madal temperatuur ka suvel ning seatakse piirangud ka soojuspumba asukohaga seoses, mis peaks sellisel juhul olema merele lähedal. 60 meetrine sügavus on maismaale kõige lähemal Viimsi poolsaare kirdeosas, selles kohas on 60 meetrine meresügavus rannikust ligi 950 meetri kaugusel. Muuga on sama sügavus rannikust 3600 meetri kaugusel ning Paljassaarest ligi 3800 meetri kaugusel. [22] [23] [23] [30]

Lisaks on veel võimalik soojusallikana kasutada reovett, mis on näiteks Rootsis kõige kasutatavamaks soojusallikaks soojuspumpade puhul joonise 1.9 järgi. AS Tallinna Vee andmetel on kõiguvad reovee temperatuurid kevadisel ajal 7 – 10 °C vahel, suvel võivad tõusta isegi kuni 23 °C ning sügiskuudel vahemikus 10 – 15 °C. Eelduse kohaselt on selliste soojusallika temperatuuride korral saavutatav aastaringselt suhteliselt kõrge soojustegur. Heitvee kogus on aastate vältel olnud vahemikus 41 – 57 miljonit m³ aastas. Tallinna Vee mõõtetulemusi Tallinna reovee temperatuuri kohta kirjeldab joonis 2.4. [26] [29]

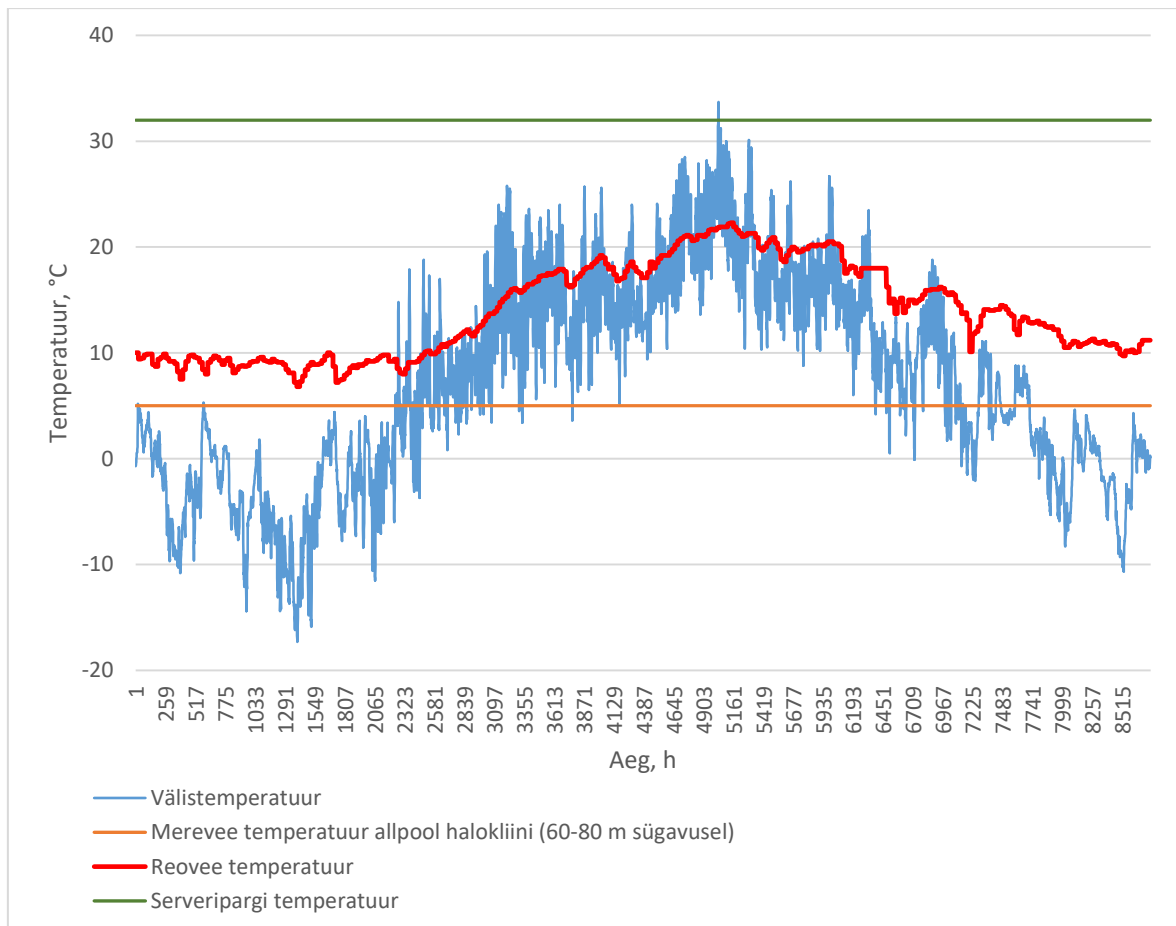
Oluline on ära märkida nüanss, et tegemist on juba puhastatud reovee temperatuuriga. Algselt siseneva reovee temperatuur on küll mõne kraadi võrra kõrgem, kuid soojuspumba soojusallikana on kasutatav puhastatud reovesi. Reovee eeliseks soojusallikana on suhteliselt kõrge aastaringne temperatuur võrreldes välisõhu ja merevee kasutamisega, kuid jällegi on reovee kasutamisega seotud piirang soojuspumba asukohaga.

Eelnevalt väljatoodud soojusallikatele lisaks on võimalik kasutada soojuspumba soojusallikana ka serveripargi sooja õhku. Sellist lahendust kasutatakse näiteks Soomes, Mäntsäläs, kus elab üle 20 000 elaniku, ning vald ostab kohalikust serveripargist jääsoojust ning kasutab seda soojuspumba soojusallikana kaugküttesüsteemi soojuste tootmiseks. [7]

Sarnast stsenaariumit oleks võimalik rakendada ka Tallinnas. Tallinnas asub näiteks BeeHosting serveripark, mis on majutatud LinxTelecomi majutuskeskuses. Antud majutuskeskuse kogupind on 600 m². Serverikeskuses on tagatud stabiilne temperatuur. Temperatuuriks on külmakoridoris ligikaudu 22 °C ning kuumakoridoris ligikaudu 32 °C. [25] Seega oleks teoreetiliselt serveripargist ülejääva sooja õhu kasutamine kõige kõrgema soojusteguriga, kuid piirangud oleksid seatud seoses soojuspumba asukohaga ning on tõenäoline, et antud soojusallikas võib olla erinevalt teistest eelmainitud soojusallikatest tasuline.

Teoreetiliselt on Tallinna tingimustes üheks võimalikuks soojuse allikaks ka Ülemiste järv. Siiski ei ole käesolevas töös uuritud antud soojusallikat lähemalt, kuna järvel on oluline roll Tallinna veevarustuses ning soojused ammutamine sealt oleks ebatõenäoline.

Kõik eelnevalt väljatoodud tõenäoliselt võimalike soojusallikate temperatuurid on kokkuvõtvalt kirjeldatud joonisel 2.4.



Joonis 2.4. Võimalike soojusallikate aastaringsed temperatuurid Tallinnas aastal 2018. [23] [25] [28] [29]

2.2 Soojusallikate konkurentsivõime hindamise finantsmeetodid

Meetodeid, mille abil investeeringuid võib hinnata on mitmeid. Hindamiseks investeeringuid on oluline teada majanduslikke näitajaid, ning konkreetselt projektist saadavaid tulusid võrreldakse antud projekti maksumusega. [33]

Hindamiseks kasutatavad finantsmeetodid saab liigitada: diskonteerimata rahakäibest lähtuvad meetodid ning diskonteeritud rahakäibest lähtuvad meetodid. Nende kahe meetodi vahe seisneb selles, et esimene ajafaktorit ei arvesta, kuid teine arvestab. Kolmas liik oleks stohhastilised meetodid, mis võtavad arvesse ka tõenäosust. [33]

Diskonteerimata rahakäibest lähtuvatest meetoditest on kõige laiemalt kasutatav tasuvusaja meetod. Lihtsa tasuvusaja meetodi puhul ei arvestata maksete väärtuse muutumist ajas. Antud meetod on lihtne ning ei nõua ajaldusarvutusi, kuid selle meetodi puhul ei ole võimalik arvestada kapitali väärtuse ajalisi muutusi ning kulude ja tulude muutumist projekti eluea jooksul. Tasuvusaja

meetodi puhul leitakse tasuvusaeg, mille jooksul alginvesteering teenitakse tuludest tagasi. Lihtsa tasuvusaja meetodi puhul avaldub T valemi 2.1 kaudu, juhul kui maksed F_t on võrdsed [33]:

$$T = \frac{P}{F_t} \quad (2.1)$$

kus F_t – maksed, €

P – alginvesteering, €

T – tasuvusaeg, a

Kuna energeetikas on projektide eluiga tavaliselt väga pikk (üle 20 aasta), siis ei ole antud meetod selliste projektide hindamiseks mõistlik, sest ajafaktor on jäetud arvestamata. [33]

Lisaks lihtsale tasuvusaja meetodile on kasutusel ka diskonteeritud tasuvusaja meetod, mille puhul on kõik tulevased rahavood diskonteeritud. [33]

Puhta nüüdisväärtuse (*NPV*) meetodi puhul diskonteeritakse kõik kulud-tulud, mis projekti eluea jooksul on, praegusele hetkele. Puhta nüüdisväärtuse meetod avaldub valemi 2.2 kaudu [33]:

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1 + i)^t} \quad (2.2)$$

kus n – projekti eluga, a

i – diskontomäär, %

B_t – kogutulud aastal t , €

C_t – kogukulud aastal t , €

Projekti loetakse majanduslikult tasuvaks kui puhas nüüdisväärtus on nullist suurem ning esialgne maksumus on diskonteeritud tulevaste tulude poolt suurem. Suuremat puhas nüüdisväärtust on võimalik saavutada väiksema diskontomäära korral, suuremate jooksvate rahavoogude puhul, väiksema alginvesteeringuga ning pikema hindamisperioodi abil. [33]

Antud meetod on soovituslik kasutamiseks ka energeetikaprojektide puhul, sest vaadeldakse kogu projekti eluiga ning arvestatakse ka ajafaktorit. Tegemist on laialdaselt kasutusel oleva meetodiga ning aktsepteeritav. [33]

Elektrit edastatavate ettevõtete projektide hindamisel on kasutusel ka vähimkulutuste meetod, kus üldjuhul võrreldakse erinevate stsenaariumite kulutusi. Sellise hindamisviisi juhul määratakse PVC (ingl. k *present value of cost*). Selline meetod on eelnevalt kirjeldatud puhta nüüdisväärtuse

meetodi erijuhtum. Sellisel juhul ei vaadelda tulusid. Kulutuste nüüdisväärtus avaldub valemi 2.3 abil [33]:

$$PVC = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+i)^t} \quad (2.3)$$

Erinevate stsenaariumite võrdlemise puhul on majanduslikult kõige kasumlikum valida variant, mille korral kulutuste nüüdisväärtus on kõige madalam. [33]

Sisemise tasuvusläve meetod ehk IRR (ingl. k. *internal rate of return*) meetod põhineb diskontomäära leidmises, mille korral puhas nüüdisväärtus on null. Selle meetodi eeliseks on nüanss, et diskontomäär võib olla tundmatu. Sisemine tasuvuslävi i leitakse valemist 2.2, avaldades diskontomäära. Erinevate projektide võrdlemisel on majanduslikult kõige kasulikum variant selline, mille puhul on sisemine tasuvuslävi suurim. [33]

Aastamaksete meetodi korral leitakse erinevate projektide ühtlustatud aastased maksed (AW). See on hea meetod võrdlemaks projekte, millel on erinev eluiga. Antud meetodil on samad eelised nagu puhta nüüdisväärtuse meetodil. Aastased maksed avalduvad võrrandist 2.4, puhta nüüdisväärtuse ja aastamakseteguri, mis jaotab kulutused ühtlaselt hindamisperioodile, korrutise abil. [33]

$$AW = NPV \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (2.4)$$

Sellise meetodi abil on võimalik välja selgitada näiteks edastatava elektri erikulutusi, samuti ka võrrelda erinevate suurusega, tehnoloogiaga või kütustega elektrijaamade toodangu erikulutusi. [33]

Majanduslikult kõige kasumlikum stsenaarium on selline, millel on aastamaksete väärtus kõige suurem. [33]

Tasuvusnäitaja meetodi puhul leitakse kasu-kulu suhtarv, mis on tuleviku maksete nüüdisväärtuse ja investeringu nüüdisväärtuse jagatis ning avaldub valemi 2.5 järgi [33]:

$$PI = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+i)^t}}{P} \quad (2.5)$$

kus PI – tasuvusnäitaja ehk kasu-kulu suhtarv

Projekt on majanduslikult tasuv, kui tasuvusnäitaja on suurem kui 1. Erinevate stsenaariumite võrdlusel on majanduslikult kõige kasulikum valida selline variant, mille korral on tasuvusnäitaja kõige suurem. [33]

Vaadeldav meetod võtab arvesse ajafaktorit ning kogu perioodi makseid. Siiski on antud meetodi puuduseks see, et on tarvis teada prognoose kaugeleulatuvate maksete kohta. See meetod annab sama tulemuse projekti majandusliku tasuvuse kohta nagu puhta nüüdisväärtuse meetod, aga stsenaariumite järjestus võib erineda. [33]

Käesolevas töös on tarvis leida soojuspumbast toodetava soojuse omahind erinevate stsenaariumite korral, võrrelda neid, ning leida majanduslikult kõige kasulikum juhtum. Soojuspumbast toodetava soojuse omahind on väljaarvutatud energia omahinna väärtuse valemiga LCOE (ingl. k. *levelized cost of electricity*). LCOE avaldub vastavalt valemi 2.6 järgi [20]:

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{A_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{M_{el}}{(1+i)^t}} \quad (2.6)$$

kus I_0 – investeering, €

A_t – aastased kogukulud, €

M_{el} – aastane soojusenergia kogutoodang, MWh

i – diskontomäär

n - majanduslik eluiga aastates

t – soojuspumba töötamise perioodi pikkus aastates

LCOE kontseptsioon seisneb selles, et mõõdetakse eluea või hindamisperioodi kulutusi, mis on jagatud kogu energiatoodanguga. Arvutab energiatootmisüksuse ehitamise ja käitamise kogukulu nüüdisväärtuse eeldatava eluea või hindamisperioodi jooksul. Selline meetod on kohaldatud puhta nüüdisväärtuse meetod, leidmaks energia omahinda. Antud meetodi eeliseks on see, et saab võrrelda ainult kulusid ning võimaldab ka erinevate tehnoloogiate võrdlust, ebavõrdsete eluigade, projekti suuruste, mahtude ja erinevate kapitalikulude korral. [34]

LCOE väärtuste arvutamine ning nende võrdlemine võib mõõta väärtust pikemas perspektiivis, näidates eeldatavaid kulusid elutsükli jooksul ja hinnangut anda projektide elluviimise kohta majanduslikul alusel, võrreldes kasumimääradega. [34]

Vastavalt Konkurentsiameti koostootmisjaama kulude jagamise põhimõtetele soojuse ja elektri koostoomisel kasutatakse soojuse piirhinna kehtestamisel alternatiivkatlamaja meetodit ehk eraldiseisvate kulude jagamise meetodit. Selle meetodi järgi eeldatakse, et soojus, mis tarbijale müüakse on toodetud soojuse tootmiseks ettenähtud katlamajas. Antud põhimõtte järgi ei pea

tarbija maksma soojuse eest rohkem, kui see toodetaks vaid soojusenergia tootmiseks mõeldud katlaseadmetega. [35]

Alternatiivkatlamaja meetodit kasutatakse eelnevalt mainitud Metoodika kohaselt juhul, kui soojusettevõtjale on elektri ja soojuse koostootmisjaam ehitamiseks eraldatud tagastamatu abi raames investeeringutoetust. Vaid soojuse tootmiseks ei ole tarvis osta seadmeid, millega on tagatud ainult elektrienergia tootmine, seetõttu kasutatakse alternatiivkatlamaja meetodit juhul, kui kasutatava kütuse põletamiseks on olemas ka ainult soojuse tootmiseks mõeldud tehnoloogia. Sellise meetodiga välditakse elektrienergia ristsubsideerimist soojuse tootmise arvelt. Seetõttu kasutatakse piirhinna kehtestamisel investeeringu maksumust, mis on vajalik vaid alternatiivkatlamaja jaoks, et soojust toota. Soojuse piirhind sisaldab alternatiivkatlamaja tegevuskulusid, kapitalikulu ning põhjendatud tulukust. [35]

LCOE väärtus on eelduste kohaselt ligilähedane arvuga, mille konkurentsiamet kehtestab piirhinnaks soojuse tootjatele.

3. Soojuspumpade konkurentsivõime

Antud punktis uuritakse kuidas muutub soojusenergia hind sõltuvalt soojusallikatest, mida on võimalik Tallinna tingimustes kasutada. Soojuse hinda on analüüsitakse välisõhu, merevee, Tallinna reovee ja serveripargi soojuse ülejäägi kasutamisel soojusallikana. Uurimise all on ka soojuse hind sõltuvalt tootmisprofiilist. Kirjeldatakse soojussalvesti opereerimise loogikat ning vaadeldakse, kas soojuspump on konkurentsivõimelisem, kui selle juurde ehitada lisaks soojussalvesti. Leitakse soojusenergia omahind koostootmisjaamas ning tuuakse välja tulemused, analüüsitakse neid ning tehakse järeldused.

3.1 Soojuse hind sõltuvalt soojusallikast

Käesolevas punktis analüüsitakse erinevaid soojusallikaid, mida on Tallinna tingimustes võimalik kasutada, milleks on välisõhk, merevesi, reovesi ning serveripargi soojuslik ülejääk. Leitakse erinevate soojusallikate puhul nendest toodetava soojuse omahind, võrreldakse neid ning analüüsitakse ka positiivseid ja negatiivseid külgi ning kitsendusi, mis kaasnevad mingi konkreetse soojusallikaga ja kas on võimalik kasutada mingit soojusallikat. Käsitletakse stsenaariumeid, mille korral toodetakse soojust sellises mahus, et katta baaskoormust, ehk soojuspumpade abil toodetakse konstantselt 60 MWh soojusenergiat.

3.1.1 Soojuse hind välisõhu kasutamisel soojusallikana

Uurimaks soojuspumpade majanduslikku konkurentsivõimet Eesti tingimustes on tarvis leida soojuse maksumus, mis soojuspumpade abil toodetakse. Antud väärtus koosneb mitmetest erinevatest komponentidest. Nendeks komponentideks on: investeering, muutuvkulud, hooldustasud ja ka võrgutasud. Investeeringu puhul on oluline arvestada perioodi, kui pika aja peale tehtud investeering jaotatakse. Antud analüüsi jaoks on arvestatud, et soojuspumba elueaks on 25 aastat, seetõttu on võetud ka sama ajaperiood investeeringu jaotamise ajaliseks pikkuseks. [2]

Joonise 2.2, mis kirjeldab AS Utilitas Tallinn andmetel Tallinna soojustootmist aastal 2018, põhjal võib järeldada, et juhul kui katta baaskoormust soojuspumpade abil oleks vaja soojuspumpade abil katta 60 MW soojusvõimsust.

Soojuspumpade nominaalseks investeeringuks on antud töös võetud 0,66 (miljonit eurot ühe MW soojusvõimsuse kohta), millest 50% on tehnika maksumus ja 50% ehitus/paigaldus. [2] Seega kujuneb soojuspumba investeeringu maksumus välja vastavalt valemile 3.1:

$$I = c * P_{Soojus} \quad (3.1)$$

kus c – nominaalinvesteering (0,66)

P_{Soojus} – soojuse baaskoormus, MW

Valemi 3.1 järgi on vajalik investeering soojuspumpadesse Tallinna baaskoormuse katmiseks 39,6 miljonit eurot.

Fikseeritud käitamis- ja hoolduskuludeks on võetud käesolevas projektis 2000 eurot aastas ühe MW soojusvõimuse jaoks. Seega on fikseeritud hooldustasud 0,23 €/MWh_{Soojus}. [2]

Lisaks tuleb arvesse võtta muutuvkulusid. Muutuvkulude puhul on oluline arvestada elektrienergia, soojusallika kasutamise maksumust ning ka hooldus- ja käitamiskulusid, mis kuuluvad muutuvkulude alla. Peatükis 1.2.2 on välja toodud, et soojuspumpade puhul on investeering kasumlikul vaid juhul, kui soojusallikas on saadaval tasuta või väga väikse hinna eest. Seetõttu on käesolevas töös eelduseks võetud, et soojusallikas (kas siis välisõhk, vesi, reovesi vms) on saadaval tasuta. Muutuvkulude alla minevad hooldus- ja käitamiskulud on soojuspumbal määratud teguriga 1,8 eurot MWh toodetud soojuse kohta. [2]

Kõige suurema osa moodustab muutuvkuludest elektrienergia hind. Elektrienergia maksumus ja kulu sõltub vastavalt elektrienergia börsihinnast ning soojuspumba soojustegurist, mis omakorda sõltub aastaajast ja soojusallika temperatuuridest. Seetõttu on kulutused elektrienergiale arvatud iga tunni kohta aastas eraldi Elspot turuhindade järgi aastal 2018. Keskmiseks väärtuseks on saadud 14,54 €/MWh_{Soojus}. [38]

Liitumise ja võrgutasudega seotud kulud võib jagada kaheks. Vaadeldakse eraldi kahte olukorda, kui liituda Eleringi ülekandevõrguga või liitumine Elektrilevi 110 kV alajaama alampinge poolel. Kui liituda Eleringi 330 kV pingestmega, siis on võrgutasuks 4,81 €/MWh_{Elekter}. Arvestades soojuspumba aastast keskmist soojustegurit, siis keskmiselt kulub 1 MWh soojuse tootmiseks 0,31 MWh elektrienergiat, seega on 330 kV pingestme korral keskmiseks võrgutasuks 1,50 €/MWh_{Soojus}. Kui arvestada võrgutasu aasta madalaima soojusteguri järgi, mille korral kulub 1 MWh soojuse tootmiseks ligikaudu 0,5 MWh elektrienergiat, on võrgutasuks 2,16 €/MWh_{Soojus}. [19]

Eleringi 110 kV pingestmele liitudes tuleb arvestada tipuaja tariife ja tipuvälise aja tariife. Tipuaja tariifiks on 14,04 €/MWh_{Elekter} ja tipuvälise aja tariifiks on 7,02 €/MWh_{Elekter}. Arvestades seda, et Eleringi andmetel on tipuajaks periood 1. oktoober kuni 31. märts kellaegadel 7.00-23.00 on saadud arvutuste tulemusena keskmiseks võrgutasuks 3,04 €/MWh_{Soojus}. [19] [39]

Kui liituda Elektrileviga keskpingel 110 kV alajaama alampinge poolel, siis tuleb arvestada järgnevaid komponente: võrguühenduse kasutusvõimsuse tasu 2,68 eurot/kW_{Elekter} kuus, võrguühenduse läbilaskevõime tasu 0,17 eurot/kW_{Elekter} kuus ja edastamistasu põhihind 0,45 senti/kWh_{Elekter}. 2018 aasta andmete põhjal tehtud arvutuste kohaselt oleks sellise liitumise korral võrguteenuse hinnaks 1,92 €/MWh_{Soojus}. [19]

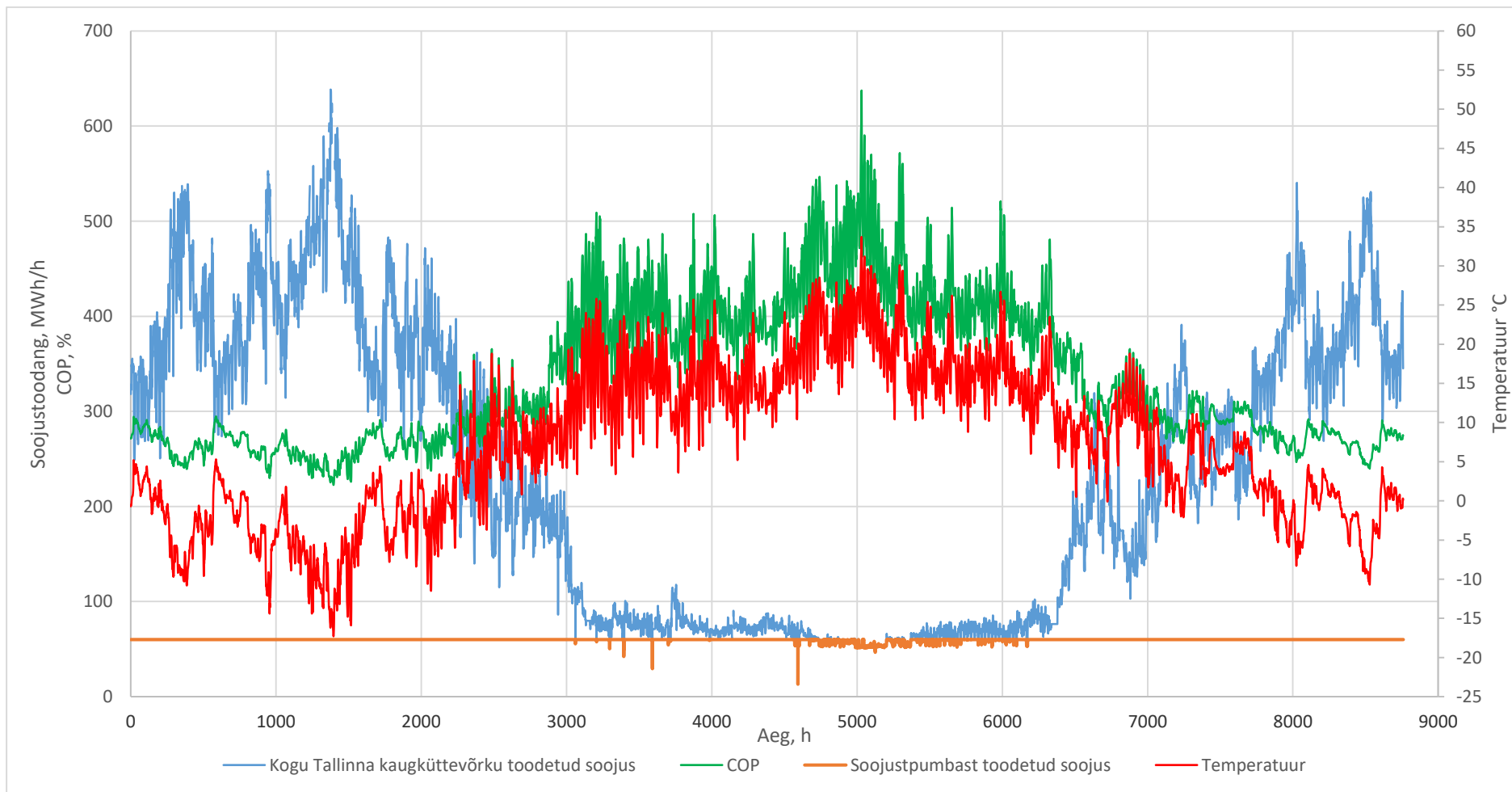
Soodsaima võrgutasuga liitumise valimiseks on tehtud arvutused kõikide erinevate soojusallikate puhul kõikidele võimalikele erinevatele liitumisjuhtudele. Vastavad tulemused on välja toodud tabelis 3.1.

Tabel 3.1. Võrguteenuse hind erinevate stsenaariumite korral

	Liitumine Elektrileviga, €/MWh_{Soojus}	Liitumine Eleringi 110 kV pingeastmele, €/MWh_{Soojus}	Liitumine Eleringi 330 kV pingeastmele, €/MWh_{Soojus}
Välisõhk	1,92	3,04	1,50
Merevesi	1,50	3,07	1,56
Reovesi	1,46	2,69	1,35
Serveripark	0,98	1,83	0,91

Tulemusena saadud tehtavad kulutused muutuvkuludele on stsenaariumi korral, kui soojusallikaks on välisõhk. Kuna muutuvkulud on omavahel seoses soojuspumba soojusteguriga, mis omakorda sõltub soojusallika temperatuurist, mis omakorda sõltub kasutatavast soojusallikast, siis on oluline teistsuguse soojusallika korral leida ka vastavad muutvkulud. Joonisel 3.1 on näidatud ära soojusteguri aastaringne muutus, kui soojusallikaks on välisõhk. Seejuures kaugküttesüsteemis oleva vee temperatuuriks on võetud talveperioodil 75 °C ja suveperioodil 65 °C. [14] [32]

Joonisel 3.1 on välja toodud Utilitas AS andmete põhjal Tallinna aastane tunnipõhine soojustoodang 2018. aastal, Riigi Ilmateenistuse andmete põhjal Harku mõõtejaamas mõõdetud tunnipõhised temperatuurid 2018. aastal ning viimasest sõltuv soojuspumba soojustegur ja soojuspumba abil kaetav tarbimine. Selgub, et välisõhu kasutamisel soojusallikana soojustegur on talvekuudel külma õhutemperatuuri korral suhteliselt madal, kuid suvel jällegi suhteliselt kõrge.



Joonis 3.1. 2018. aasta tunnipõhine soojusprofiil Tallinnas AS Utilitas Tallinn andmetel, tunnipõhine õhutemperatuur Harku mõõtejaamas, soojuspumba soojustegur ning toodang. [27] [28]

Võttes arvesse kõiki eelnevalt loetletud andmeid ning kuluartikleid on väljaarvutatud soojuspumbast toodetava soojuse omahind. Antud väärtus on väljaarvutatud energia omahinna väärtuse valemiga LCOE (ingl. k. *levelized cost of electricity*). LCOE avaldub vastavalt valemi 2.6 järgi. LCOE arvutamiseks on oluline tuleviku rahavoogusid ka diskonteerida. Vastavalt Fraunhofer ISI kokkuvõtvale dokumendile on tavapäraselt energeetika uuringutes tööstusvaldkonna investeerimisotsuste analüüsimises kasutatud diskontomäär 6% - 15% [21]. Antud projektis on diskontomääraks valitud projekti jaoks kõige soodsam diskontomäär ehk 6%.

Tabelis 3.2 on välja toodud soojuspumbast toodetava soojuse omahinna leidmiseks vajalikud väärtused ehk kulutused muutuvkuludele ja püsikuludele, aastased kogukulud, aastane soojusenergia toodang ning valemi 2.6 abil leitud soojuspumbast toodetava soojuse omahind. Arvestatud on stsenaariumit, et katta baaskoormust ehk juhtumit kus soojuspump toodab aastaringselt 60 MWh soojusenergiat.

Tabel 3.2. Soojuspumbast toodetava soojuse omahind ning selle leidmiseks vajalikud parameetrid välisõhu kasutamisel soojusallikana

Investeering, miljonit €	39,60
Fikseeritud hoolduskulud aastas, miljonit €	0,12
Kulutused elektrienergiale, miljonit €	7,64
Võrgutasu, miljonit €	1,66
Muutuvad hoolduskulud aastas, miljonit €	0,95
Aastased kogukulud, miljonit €	10,37
Diskontomäär, %	6
Soojuspumba tööperioodi pikkus, a	25
Aastane soojusenergia kogutoodang, GWh	525,60
Toodetava soojuse omahind (LCOE), €/MWh	25,62

Arvutuste põhjal selgub, et soojuspumba abil soojuse tootmine kaugküttevõrku, kui kaetakse baaskoormust 60 MW on maksumusega 25,62 €/MWh_{soojus}, kui soojusallikana kasutatakse välisõhku.

3.1.2 Soojuse hind merevee kasutamisel soojusallikana

Juhul, kui soojusallikaks valida merevesi, mis Läänemere põhjakihtides (allpool halokliini) on aastaringselt ühtlane ning ligikaudu 5 °C on soojustegur aastaringselt ühtlane. Erinevus on vaid suveperioodi ja talveperioodi vahel, kui kaugküttevõrgus on vee temperatuurid erinevad. Merevett kasutades on talveperioodil soojusteguriks 2,93 ja suveperioodil 3,33.

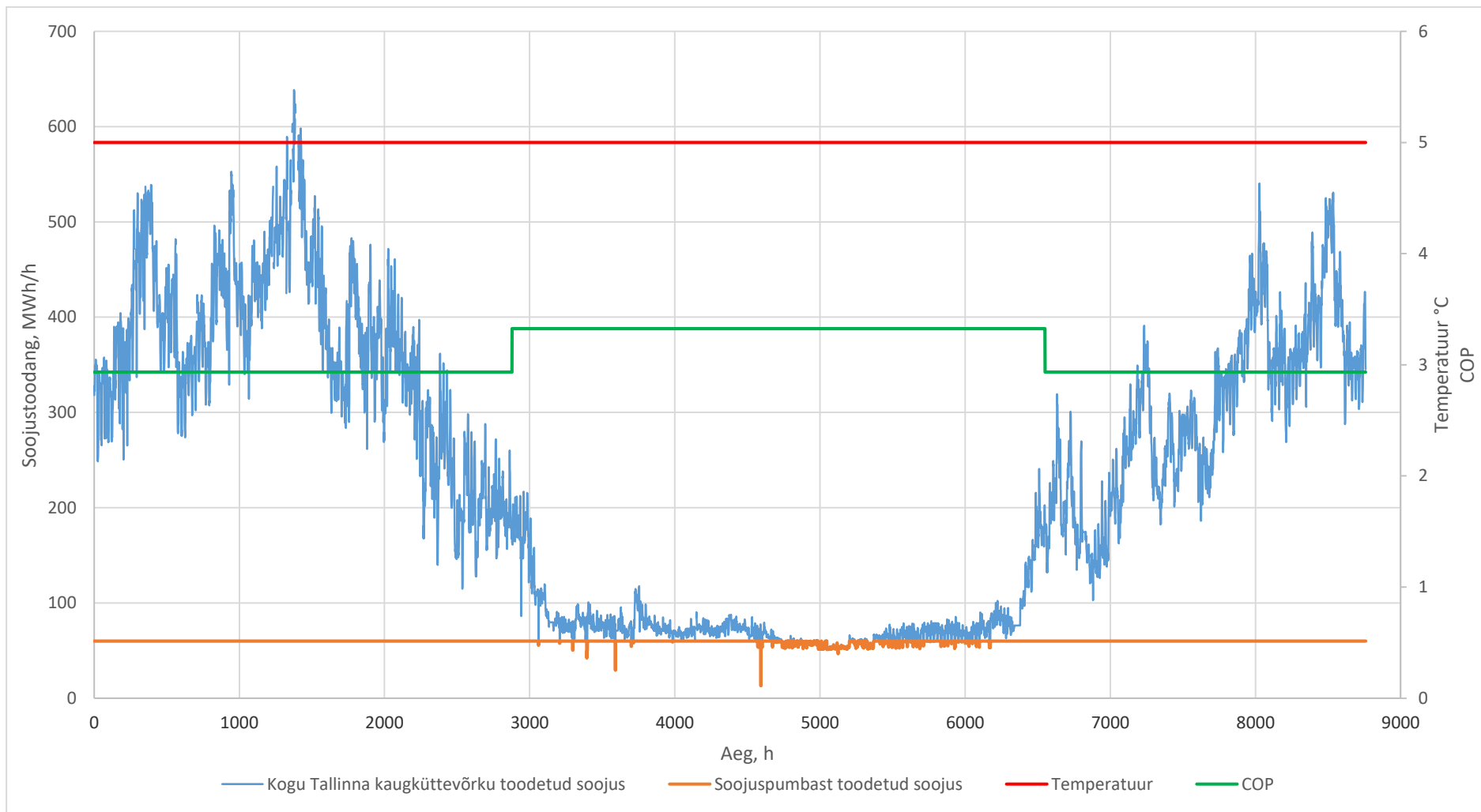
Tabelis 3.3 kirjeldatakse kulutusi mida tehakse muutuvkuludele ja püsikuludele, kui soojusallikaks on merevesi. Lisaks on välja toodud aastased kogukulud, aastane soojusenergia toodang ja valemi 2.6 abil leitud soojuspumbast toodetava soojuse omahind, stsenaariumi korral kus kaetakse baaskoormust ehk soojuspump toodab aastaringselt 60 MWh soojusenergiat.

Tabel 3.3. Soojuspumbast toodetava soojuse omahind ning selle leidmiseks vajalikud parameetrid merevee kasutamisel soojusallikana

Investeering, miljonit €	39,60
Fikseeritud hoolduskulud aastas, miljonit €	0,12
Kulutused elektrienergiale, miljonit €	7,99
Võrgutasu, miljonit €	1,47
Muutuvad hoolduskulud aastas, miljonit €	0,95
Aastased kogukulud , miljonit €	10,53
Diskontomäär, %	6
Soojuspumba tööperioodi pikkus, a	25
Aastane soojusenergia kogutoodang, GWh	525,60
Toodetava soojuse omahind (LCOE), €/MWh	25,92

Arvutuste põhjal selgub, et soojuspumba abil soojuse tootmine kaugküttevõrku, kui kaetakse baaskoormust 60 MW on maksumusega 25,92 €/MWh_{soojus}, kui soojusallikana kasutatakse Läänemere põhjakihis olevat merevett.

Joonisel 3.2 on näidatud ära soojusteguri aastaringne muutus, kui soojusallikaks on merevesi ning on kirjeldatud Utilitas AS andmete põhjal Tallinna aastast tunnipõhist soojustoodangut 2018. aastal, merevee temperatuuri Läänemere põhjakihtides ning sellest sõltuvat soojuspumba soojustegurit. Lisaks on välja toodud graafikul soojuspumbast toodetav soojusprofiil, et katta soojuse baaskoormust.



Joonis 3.2. 2018. aasta tunnipõhine soojusprofiil Tallinnas AS Utilitas Tallinn andmetel, merevee temperatuur, soojuspumba soojustegur ning toodang. [23] [27]

3.1.3 Soojuse hind heitvee kasutamisel soojusallikana

Stsenaariumi korral, kui soojusallikaks on Tallinna reovesi, on aluseks võetud AS Tallinna Vee poolt mõõdetud puhastatud reovee temperatuurid aastal 2018, mida kirjeldab joonis 3.3. Reovee temperatuur on aastaringselt suhteliselt kõrge ning oluline on see, et see ei lange ka talvel kuigi madalale, vastupidiselt välisõhule. Sellest tulenevalt on võimalik saavutada kõrgem soojustegur.

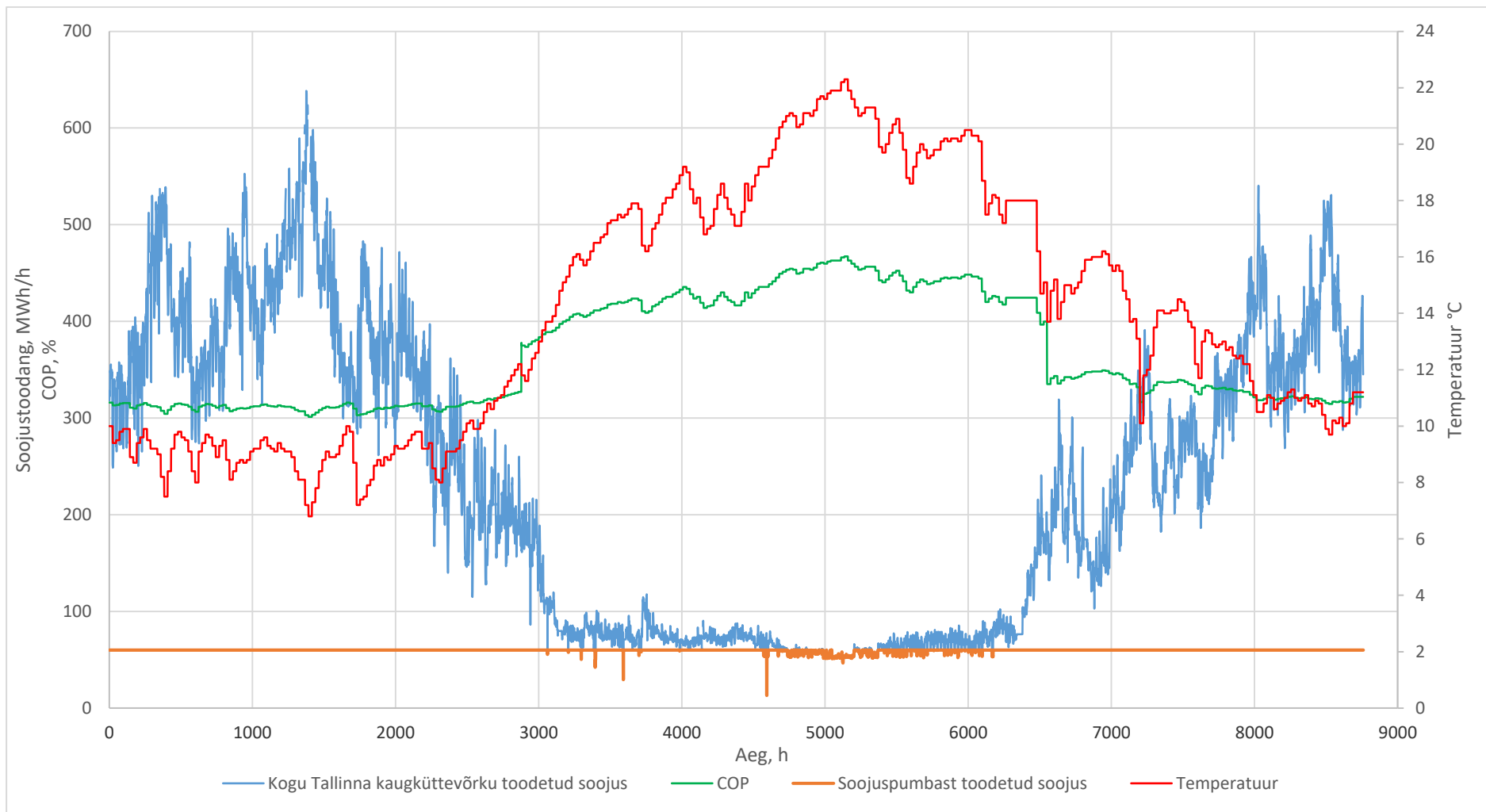
Tabelis 3.4 kirjeldatakse kulutusi mida tehakse muutuvkuludele ja püsikuludele, kui soojusallikaks on reovesi. Lisaks on välja toodud aastased kogukulud, aastane soojusenergia toodang ja valemi 2.6 abil leitud soojuspumbast toodetava soojuse omahind, stsenaariumi korral kus kaetakse baaskoormust ehk soojuspump toodab aastaringselt 60 MWh soojusenergiat.

Tabel 3.4. Soojuspumbast toodetava soojuse omahind ning selle leidmiseks vajalikud parameetrid reovee kasutamisel soojusallikana

Investeering, miljonit €	39,60
Fikseeritud hoolduskulud aastas, miljonit €	0,12
Kulutused elektrienergiale, miljonit €	6,85
Võrgutasu, miljonit €	1,34
Muutuvad hoolduskulud aastas, miljonit €	0,95
Aastased kogukulud, miljonit €	9,26
Diskontomäär, %	6
Soojuspumba tööperioodi pikkus, a	25
Aastane soojusenergia kogutoodang, GWh	525,60
Toodetava soojuse omahind (LCOE), €/MWh	23,51

Arvutuste põhjal selgub, et soojuspumba abil soojuse tootmine kaugküttevõrku, kui kaetakse baaskoormust 60 MW on maksumusega 23,51 €/MWh_{soojus}, kui soojusallikana kasutatakse puhastatud Tallinna reovett.

Joonisel 3.3 on näidatud ära soojusteguri aastaringne muutus, kui soojusallikaks on Tallinna puhastatud reovesi. Sellise stsenaariumi korral on ka talvel kõige külmemate ilmade korral soojustegur üle 3 ning suvel võib soojustegur tõusta isegi kuni 4,7-ni. Lisaks on kirjeldatud Utilitas AS andmete põhjal Tallinna aastast tunnipõhist soojustoodangut 2018. aastal, puhastatud reovee temperatuuri Tallinnas ning sellest sõltuvat soojuspumba soojustegurit.



Joonis 3.3. 2018. aasta tunnipõhine soojusprofiil Tallinnas AS Utilitas Tallinn andmetel, puhastatud reovee temperatuur Tallinnas, soojuspumba soojustegur ning toodang.

[27] [29]

Eelnevalt tehtud arvutuste puhul ei ole arvestatud nüansiga, et reovee hulk on piiratud, vaid on tehtud lihtsustus, et reovee hulk on väga suur või piiramatu. Reaalsuses tuleb arvestada sellega, et reovee hulk on aastate vältel olnud vahemikus 41 – 57 miljonit m³ aastas. [26] Seetõttu on oluline arvestada seda, kui palju muutub reovee temperatuur sellise mahu korral, kui sellest eraldada soojuspumbaga mingi hulk soojust. Temperatuuri muutuse leidmiseks on võimalik kasutada valemit 3.2:

$$\Delta t = \frac{Q}{m * \rho} \quad (3.2)$$

kus Δt on temperatuuri muutus, °C

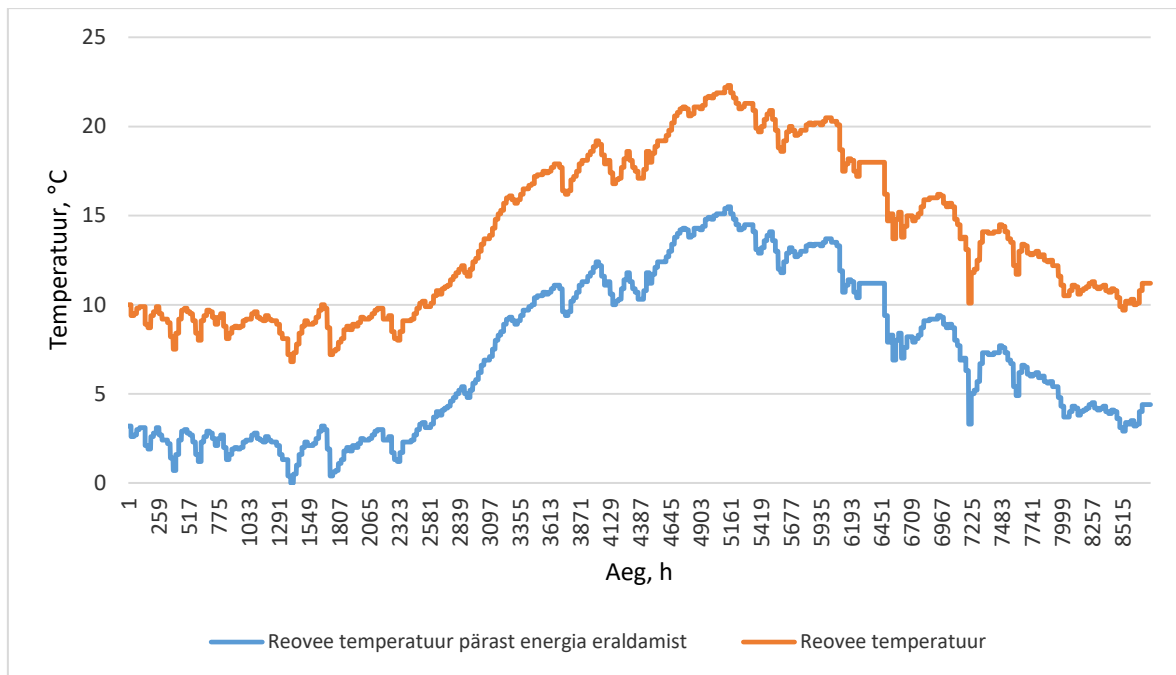
Q on energia kogus, J

ρ on vee erisoojus, 4200 J/kg*°C

m on vee mass, kg

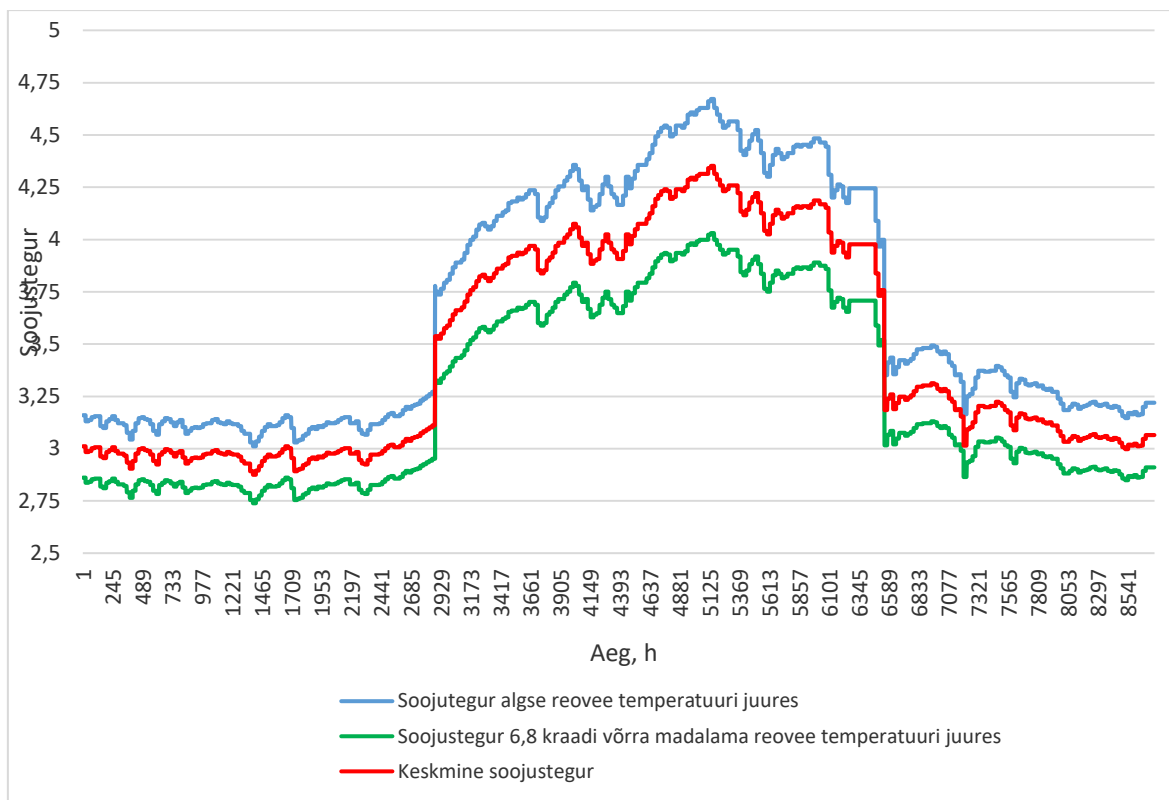
Arvestades seda, et reovee hulk on keskmiselt 49 miljonit m³ aastas, siis ühes tunnis on reovee hulk 5,59*10⁶ kg ning ühes MWh on 3,6*10⁹ J, siis näiteks 100 MWh energia eraldamisel reoveest on reovee temperatuuri muutus 15,3 °C. Kuna nii suurel määral temperatuuri langus reovees mõjutab otseselt soojuspumba soojustegurit, ning see omakorda kogu projekti majanduslikku kasumlikkust, siis tähendab see seda, et Tallinna puhul reovee maht liiga väike, et saavutada käesoleva töö eesmärkideks seatud soojuse koguse tootmist.

Kuna Tallinna minimaalne reovee temperatuur on 6,8 kraadi, siis on maksimaalselt võimalik heitveest antud hulga juures eraldada 45 MWh/h soojusenergiat, sest sellise energia koguse eraldamise korral langeb heitvee temperatuur 6,8 kraadi võrra ehk sulamistemperatuurini. Joonisel 3.4 on visuaalselt näidatud reovee temperatuur algselt, ning välja toodud reovee temperatuur pärast seda, kui heitveest on energia eraldatud.



Joonis 3.4. Reovee temperatuuri muutus 45 MWh/h energia eemaldamisel. [29]

Kuna temperatuuri muutus põhjustab ka soojusteguri ehk COP-i muutust, siis on välja leitud uued soojustegurite väärtused madalama temperatuuri korral, mis on joonisel 3.5 kirjeldatud kui soojustegur 6,8 kraadi võrra madalama reovee temperatuuri juures. Soojuspumbast toodetava soojuse omahinna arvutamiseks on kasutatud esialgse soojusteguri ja madalamal temperatuuril leitud soojustegurite keskmist väärtust, mis on joonisel 3.5 kirjeldatud kui keskmine soojustegur.



Joonis 3.5. Soojusteguri muutus 45 MWh/h energia eemaldamisel heitveest.

Tulenevalt sellest, et soojuse omahinna arutamisel arvesse võetav soojustegur on sellises olukorras vähenenud on soojuse omahind suurenenud.

Tabelis 3.5 on näidatud püsikulud, muutuvkulud, investeering ning soojuse omahind (LCOE), kui toodetakse 45 MWh/h soojusenergiat, ning võetakse arvesse heitvee temperatuuri langust.

Tabel 3.5. Soojuspumbast toodetava soojuse omahind ning selle leidmiseks vajalikud parameetrid reovee kasutamisel soojusallikana

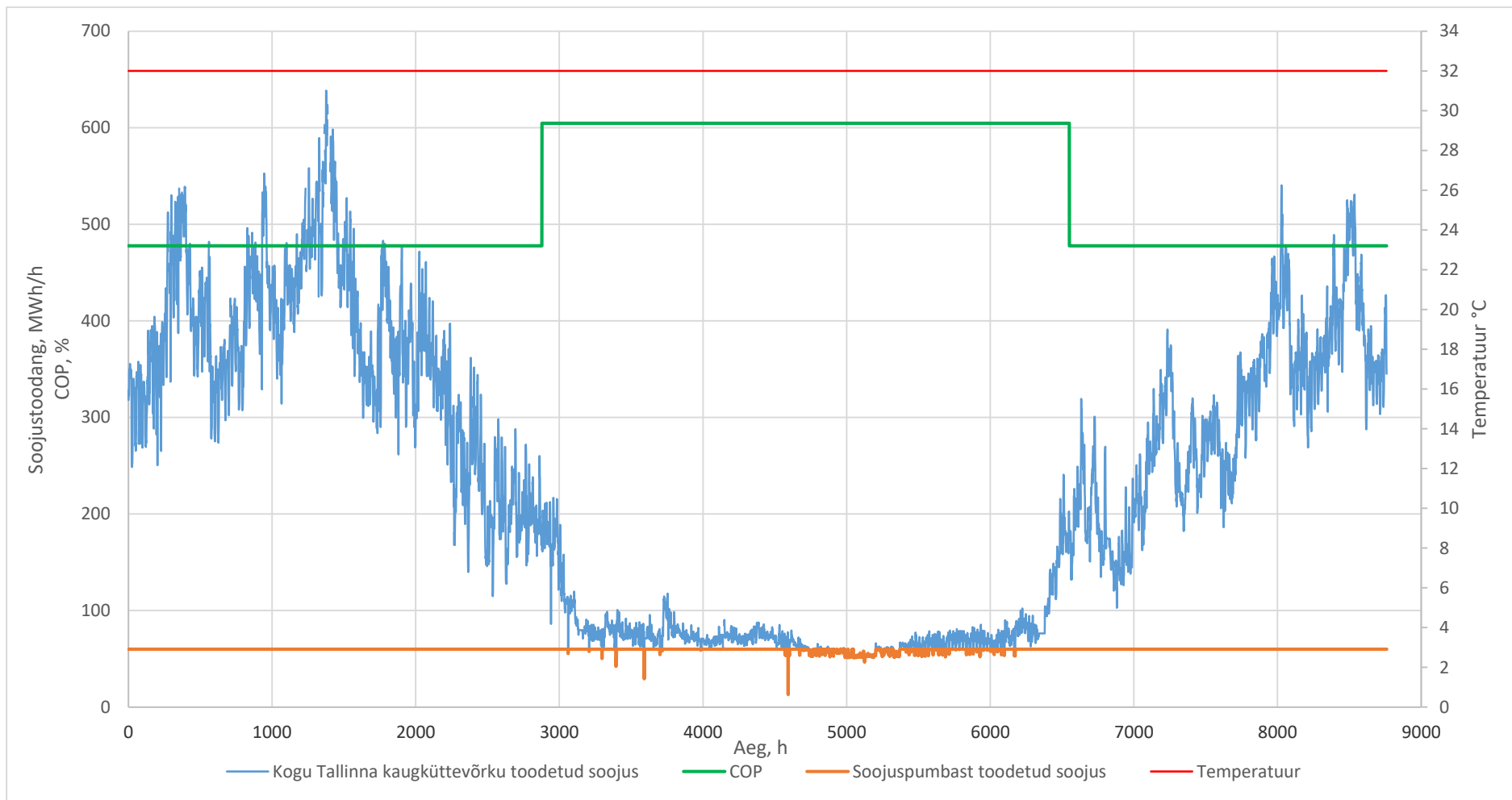
Investeering, miljonit €	29,70
Fikseeritud hoolduskulud aastas, miljonit €	0,09
Kulutused elektrienergiale, miljonit €	5,14
Võrgutasu, miljonit €	1,06
Muutuvad hoolduskulud aastas, miljonit €	0,71
Aastased kogukulud, miljonit €	7,00
Diskontomäär, %	6
Soojuspumba tööperioodi pikkus, a	25
Aastane soojusenergia kogutoodang, GWh	394,20
Toodetava soojuse omahind (LCOE), €/MWh	23,64

Arvutustest järeldub, et soojuspumba abil soojuse tootmisel kaugküttevõrku, kui toodetakse 45 MWh/h soojusenergiat heitveest ning arvestatakse seejuures heitvee temperatuurimuutusega on soojuse omahinnaks 23,64 €/MWh_{soojus}.

3.1.4 Soojuse hind serveripargi soojuse ülejäägi kasutamisel soojusallikana

Üheks võimalikuks juhuks on ka serveripargi soojuse ülejäägi kasutamine soojusallikana. Tallinnas asub näiteks BeeHosting serveripark, mis on majutatud LinxTelecomi majutuskeskuses, kogupindalaga 600 m² ning temperatuuriga 32 °C. Siiski on see stsenaarium vaid ligikaudne ning oletuslik, sest antuid hoone mahust ei pruugi piisata soojuspumba tarbimise jaoks ning lisaks ei ole teada asjaolu, kas soojusallika eest tuleb lisaks tasuda ning kui suur on selle tasu suurus.

Juhul, kui soojusallikaks valida serveripargi soojuse ülejääk, mis on aastaringselt temperatuuriga 32 °C on soojustegur aastaringselt ühtlane. Erinevus on vaid suveperioodi ja talveperioodi vahel, kui kaugküttevõrgus on vee temperatuurid erinevad. Serveripargi soojuse ülejääki kasutades on talveperioodil soojusteguriks 4,78 ja suveperioodil 6,05. Joonisel 3.6 on näidatud ära soojusteguri aastaringne muutus, kui soojusallikaks on serveripargi soojuse ülejääk. Lisaks on kirjeldatud Utilitas AS andmete põhjal Tallinna aastast tunnipõhist soojustoodangut 2018. aastal, serveripargi soojuse ülejäägi temperatuuri ning sellest sõltuvat soojuspumba soojustegurit. Antud juhtumil on soojusallika temperatuur kõrge ning seetõttu on ka soojuspumba soojustegur aastaringselt kõrge.



Joonis 3.6. 2018. aasta tunnipõhine soojusprofiil Tallinnas AS Utilitas Tallinn andmetel, serveripargi soojuse ülejäägi temperatuur, soojuspumba soojustegur ning toodang. [25] [27]

Tabelis 3.6 kirjeldatakse kulutusi mida tehakse muutuvkuludele ja püsikuludele, kui soojusallikaks on serveripargi soojuse ülejääk. Lisaks on välja toodud aastased kogukulud, aastane soojusenergia toodang ja valemi 2.6 abil leitud soojuspumbast toodetava soojuse omahind, stsenaariumi korral kus kaetakse baaskoormust ehk soojuspump toodab aastaringselt 60 MWh soojusenergiat.

Tabel 3.6. Soojuspumbast toodetava soojuse omahind ning selle leidmiseks vajalikud parameetrid serveripargi soojuse ülejäägi kasutamisel soojusallikana

Investeering, miljonit €	39,60
Fikseeritud hoolduskulud aastas, miljonit €	0,12
Kulutused elektrienergiale, miljonit €	4,70
Võrgutasu, miljonit €	0,88
Muutuvad hoolduskulud aastas, miljonit €	0,95
Aastased kogukulud, miljonit €	6,65
Diskontomäär, %	6
Soojuspumba tööperioodi pikkus, a	25
Aastane soojusenergia kogutoodang, GWh	525,60
Toodetava soojuse omahind (LCOE), €/MWh	18,54

Arvutuste põhjal selgub, et soojuspumba abil soojuse tootmine kaugküttevõrku, kui kaetakse baaskoormust 60 MW on maksumusega 18,54 €/MWh_{soojus}, kui soojusallikana kasutatakse serveripargi soojuse ülejääki.

Stsenaariumite võrdlusel selgub, et kõige odavam soojuse omahind on juhul, kui kasutada soojusallikana serveripargi soojuse ülejääki. Siiski tuleb seda stsenaariumit vaadelda reservatsiooniga, sest antud juhtumil ei ole kõik kulutused selged ning pole teada kui suures mahus on võimalik antud serveripargist sooja õhku saada. Soojuse omahind on antud stsenaariumi puhul 18,54 €/MWh_{soojus}.

Teiseks majanduslikult kõige kasumlikumaks stsenaariumiks on kasutada soojusallikana Tallinna reovett. Siiski on selle stsenaariumi puhul takistus see, et reoveehulk on piiratud ning seetõttu võimalik antud soojusallikast toota vaid 45 MWh/h. Soojuse omahinnaks tuleb selle stsenaariumi puhul 23,64 €/MWh_{soojus}.

Ülejäänud kahe stsenaariumi võrdlemisel on majanduslikult kasumlikum kasutada soojusallikana välisõhku, kus soojuse omahinnaks on arvutuste kohaselt saadud 25,62 €/MWh_{soojus}. Kõige kulukamaks, analüüsitud soojusallikatest, on soojuse tootmine mereveest, kus on soojuse omahinnaks saadud 25,92 €/MWh_{soojus}.

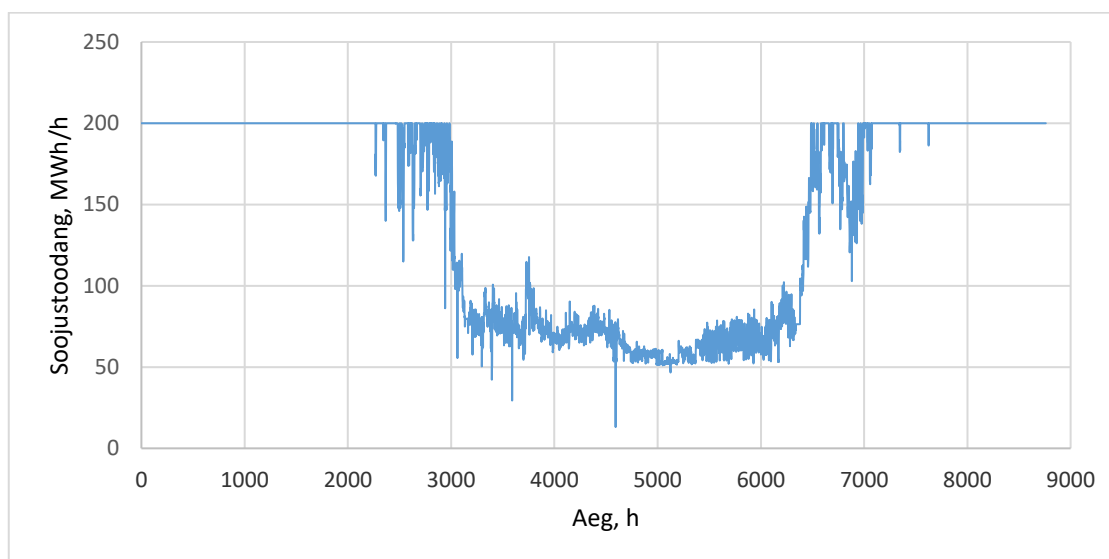
Siiski on kõigi analüüsitud stsenaariumite puhul soojuspumbaga Tallinna soojuse baaskoormuse katmine odavam, kui koostootmisjaamadega sest koostootmisjaamade puhul on Tallinnas hinnad Konkurentsiameti andmetel vastavalt: Väo 1 koostootmisjaam 27,74 €/MWh +km ja Väo 2 koostootmisjaam 33,63 €/MWh +km. [19]

3.2 Soojuse hind sõltuvalt tootmisprofiilist

Antud punktis uuritakse kuidas mõjutab soojuspumbast toodetava soojuse omahinda stsenaarium, kui soojust toodetakse rohkem kui baaskoormuse katmiseks. Eesmärgiks on välja selgitada, kas suurema tarbimise korral on majanduslikult mõistlik toota soojuspumpade abil 200 või 400 MWh/h soojusenergiat ühest kindlast soojusallikast, mis on punktis 3.1 väljaselgitatud majanduslikult kõige kasumlikum soojusallikaks, milleks on välisõhk. Lisaks uuritakse ka soojussalvestite majanduslikku kasumlikkust.

3.2.1 Soojuse hind kui maksimaalseks energiatoodanguks on 200 MWh/h

Punktist 3.1 selgus kokkuvõtvalt, et Tallinna tingimustes on majanduslikult kõige kasumlikum toota soojuspumpadega soojusenergiat kaugküttesüsteemi, kasutades soojusallikana välisõhku. Kuna eelnevalt on analüüsitud, kuidas kujuneb soojuse hind, kui katta soojuspumpade abil vaid baaskoormus ehk 60 MWh/h, siis antud punktis on uuritud, milliseks kujuneb soojuse hind, kui katta soojuspumpadega rohkem kui baaskoormus. Esimesena on käsitletud juhtu, kui maksimaalselt toodetakse soojuspumpadega nii palju kui võimalik ehk tarbimisprofiili järgi, kuid maksimaalselt 200 MWh/h. Sellisel juhul on tootmisprofiil näidatud joonisel 3.7.



Joonis 3.7. Tootmisprofiil, kui soojustootmine on maksimaalselt 200 MWh/h

Soojuse omahind arvutatakse välja valemi 2.6 abil ehk leitakse LCOE (ingl. k. *levelized cost of electricity*).

Tabelis 3.7 kirjeldatakse kulutusi mida tehakse muutuvkuludele ja püsikuludele, kui soojusallikaks on välisõhk. Lisaks on välja toodud aastased kogukulud, aastane soojusenergia toodang ja valemi 2.6 abil leitud soojuspumbast toodetava soojuse omahind, stsenaariumi korral kus toodetakse soojuspumba abil kaugküttesüsteemi vastavalt Tallinna aastasele tarbimisele, kuid mitte rohkem, kui 200 MWh/h.

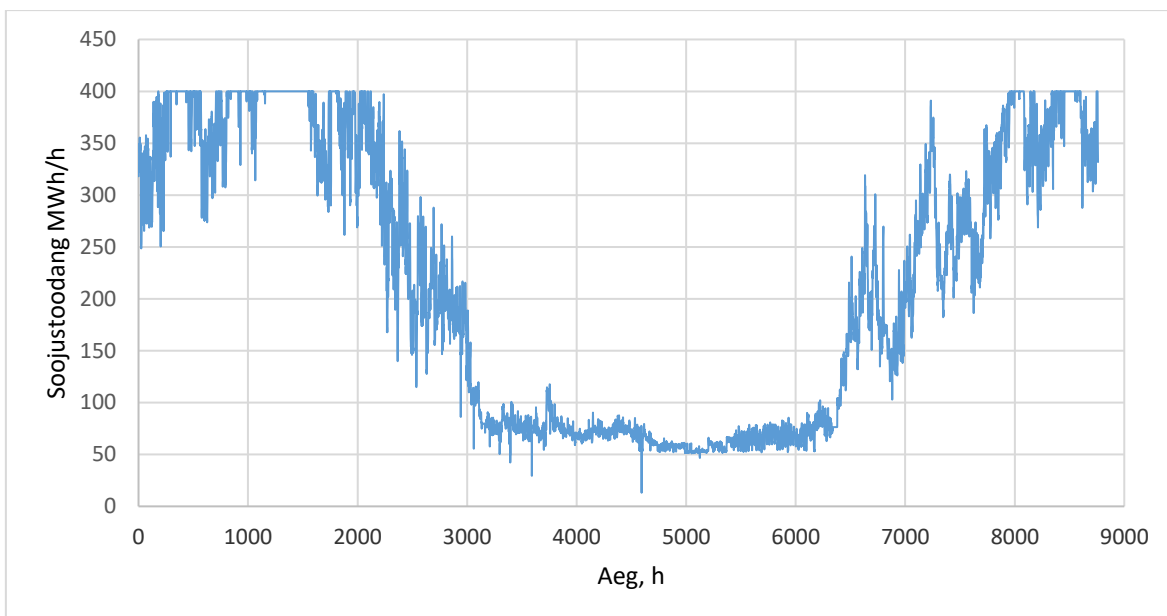
Tabel 3.7. Soojuspumbast toodetava soojuse omahind ning selle leidmiseks vajalikud parameetrid välisõhu kasutamisel soojusallikana maksimaalse toodangu 200 MWh/h korral

Investeering, miljonit €	132,00
Fikseeritud hoolduskulud aastas, miljonit €	0,4
Kulutused elektrienergiale, miljonit €	19,87
Võrgutasu, miljonit €	1,93
Muutuvad hoolduskulud aastas, miljonit €	2,31
Aastased kogukulud, miljonit €	24,5
Diskontomäär, %	6
Soojuspumba tööperioodi pikkus, a	25
Aastane soojusenergia kogutoodang, GWh	1284,72
Toodetava soojuse omahind (LCOE), €/MWh	27,12

Arvutuste põhjal selgub, et soojuspumba abil soojuse tootmine kaugküttevõrku, kui kaetakse Tallinna soojustarbimist ja toodetakse kuni 200 MWh/h on maksumusega 27,12 €/MWh_{soojus}.

3.2.2 Soojuse hind kui maksimaalseks energiatoodanguks on 400 MWh/h

Sellise stsenaariumi korral toodetakse vastavalt Tallinna soojustarbimisprofiilile, kuid mitte rohkem, kui 400 MWh/h ning leitakse soojuse omahind sellise tootmisprofiili korral. Antud stsenaariumi korral kirjeldab tootmisprofiili joonis 3.8.



Joonis 3.8. Tootmisprofiil, kui soojustootmine on maksimaalselt 400 MWh/h

Tabelis 3.8 on kirjeldatud kulutusi, mida tehakse muutuvkuludele ja püsikuludele, kui soojusallikaks on välisõhk. Lisaks on välja toodud aastased kogukulud, aastane soojusenergia toodang ja valemi 2.6 abil leitud soojuspumbast toodetava soojuse omahind, stsenaariumi korral kus toodetakse soojuspumba abil kaugküttesüsteemi vastavalt Tallinna aastasele tarbimisele, kuid mitte rohkem, kui 400 MWh/h.

Tabel 3.8. Soojuspumbast toodetava soojuse omahind ning selle leidmiseks vajalikud parameetrid välisõhu kasutamisel soojusallikana maksimaalse toodangu 400 MWh/h korral

Investeering, miljonit €	264,00
Fikseeritud hoolduskulud aastas, miljonit €	0,8
Kulutused elektrienergiale, miljonit €	30,95
Võrgutasu, miljonit €	2,88
Muutuvad hoolduskulud aastas, miljonit €	3,45
Aastased kogukulud, miljonit €	38,08
Diskontomäär, %	6
Soojuspumba tööperioodi pikkus, a	25
Aastane soojusenergia kogutoodang, GWh	1916,16
Toodetava soojuse omahind (LCOE), €/MWh	30,65

Arvutustest järeldub, et soojuspumba abil soojuse tootmine kaugküttevõrku, kui kaetakse Tallinna soojustarbimist ja toodetakse kuni 400 MWh/h on maksumusega 30,65 €/MWh_{soojus}.

Tulenevalt arvutustest selgus asjaolu, et majanduslikult kõige kasumlikum on soojuspumpadega katta tarbimise baaskoormus, sest sellise stsenaariumi puhul tuleb soojuspumbast toodetava soojuse omahinna maksumuseks 25,62 €/MWh. Mida rohkem soojustarbimisest soojuspumpe abil katta, seda kallimaks muutub soojuse omahind. 200 MWh/h korral on soojuse omahind 27,12 €/MWh_{soojus}, 400 MWh/h korral 30,65 €/MWh_{soojus} ning 600 MWh/h stsenaariumi puhul juba 35,72 €/MWh_{soojus}.

3.3 Soojuse hind sõltuvalt tootmisprofiilist koos soojussalvestiga

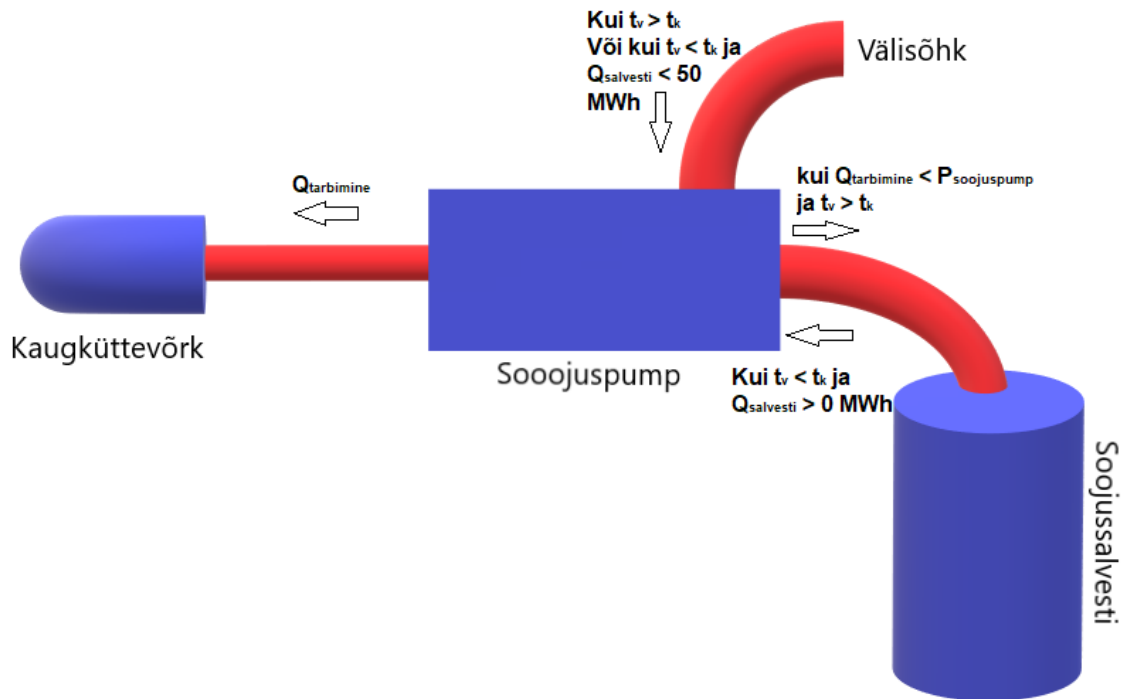
Käesolevas punktis on uuritavateks stsenaariumiteks olukorrad, kui lisaks soojuspumbale on ehitatud ka sesoonne soojussalvesti. Soojussalvesti võimsuseks on valitud 50 MW, kuna arvutuste kohaselt on antud soojussalvesti võimsus majanduslikult kõige mõistlikum.

3.3.1 Soojussalvesti opereerimise loogika

Soojussalvesti opereerimise loogika seisneb lihtsustatult selles, et madala tarbimise ja soojade ilmade korral (enamasti suvel), toodetakse soojuspumba abil soojussalvestisse soojust, sest kõrgema temperatuuri korral on soojuspumba soojustegur suurem ning soojuse tootmine majanduslikult kasumlikum. Selline temperatuur, millest alates on majanduslikult mõttekas soojussalvestisse soojust toota on antud töös tähistatud kui kriitiline temperatuur ehk t_k . Kui soojustarbimine on kõrge ning välistemperatuur madal (enamasti talvel), siis on majanduslikult mõistlik hakata kasutama soojusenergiat, mis on soojussalvestisse salvestatud. kuna soojussalvestis oleva vee temperatuur on oluliselt kõrgem, kui välistemperatuur (antud töös 64 °C), siis tulenevalt sellest saab soojussalvestist soojust toota oluliselt kõrgema soojusteguri juures, mis on majanduslikult kasumlikum.

Joonis 3.9 kirjeldab soojussalvesti opereerimise loogikat. Soojussalvestit laetakse juhul, kui soojustarbimine on madalam, kui soojuspumba võimsus ja kui välisõhu temperatuur on antud hetkel selline, mille korral on soojustegur piisavalt kõrge ning on majanduslikult mõistlik soojussalvestit laadida ehk kõrgem kui kriitiline temperatuur t_k . Kui soojussalvestis on energiat, mida on võimalik kasutada soojuse tootmiseks, ning juhul kui välistemperatuur langeb alla kriitilise temperatuuri t_k , kui välisõhust soojusenergia tootmine on majanduslikult kulukas, madala soojusteguri korral, siis kasutatakse kaugküttesüsteemi soojuse tootmiseks soojussalvestisse salvestatud energiat. Välisõhust toodetakse soojusenergiat siis kui välistemperatuur on kõrgem kui kriitiline temperatuur t_k või kui välistemperatuur on madalam kui kriitiline temperatuur t_k , aga soojussalvestis pole piisavalt soojusenergiat, et toota kogu kaugküttevõrgu poolt tarbitav soojusenergia soojussalvestis olevast soojusest. Kui välisõhk on kriitilisest temperatuurist t_k

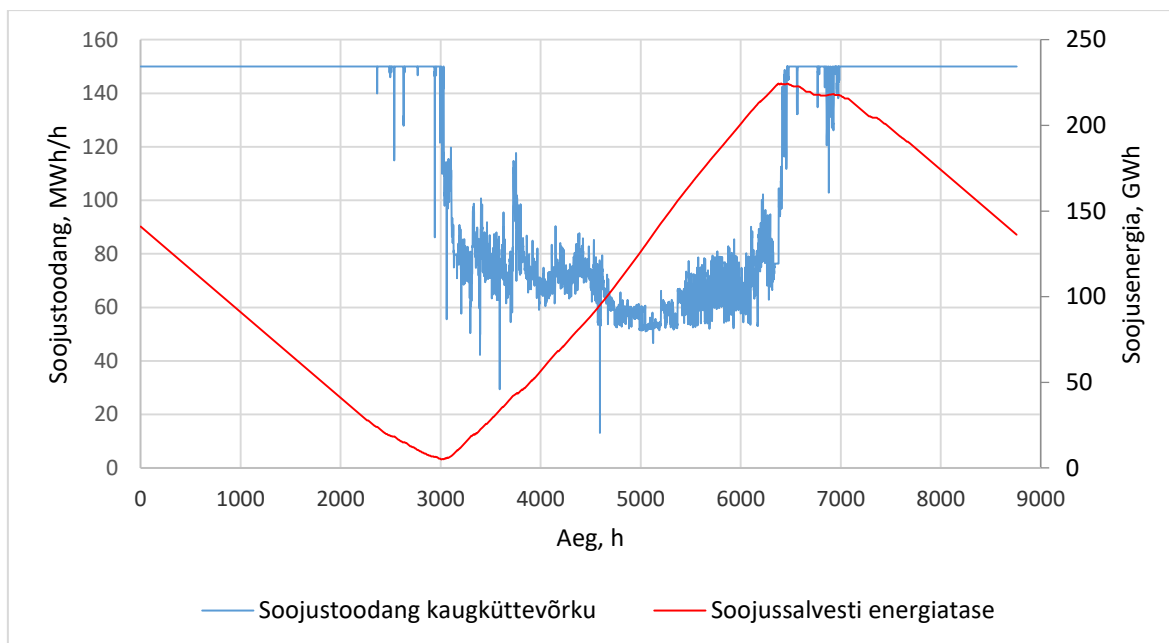
madalam ja sojussalvestis on energiat alla 50 MWh, siis toodetakse sojuspumba abil kaugküttevõrku sojussalvestist sojust nii palju kui võimalik, ning ülejäänud toodetakse välisõhust. Samal juhtumil, kui välisõhk on kriitilisest temperatuurist t_k madalam ja sojussalvesti on täielikult tühjenenud, siis toodetakse kogu tarbimise ulatuses sojusenergia välisõhust.



Joonis 3.9. Sojussalvesti opereerimise skeem

3.3.2 Sojuse hind kui maksimaalseks energiatoodanguks on 150 MWh/h + 50 MWh/h sojussalvesti

Antud stsenaariumi korral toodetakse sojuspumbaga sojusenergiat vastavalt Tallinna tarbimisprofiilile, kuid maksimaalselt 150 MWh/h. Lisaks on paigaldatud 50 MW võimsusega sojussalvesti. Sojussalvestit laetakse juhul, kui sojustarbimine on madalam, kui 150 MWh/h ja kui välisõhu temperatuur on üle 8 °C. Juhul kui välistemperatuur langeb alla 8 °C ja sojussalvestis on sojusenergiat üle 50 MWh, siis toodetakse sojuspumbaga 100 MWh_{soojus} välisõhust ja 50 MWh_{soojus} sojussalvestist, mis annab parema sojusteguri. Juhul kui salvestis on alla 50 MWh sojusenergiat, siis toodetakse salvestist nii palju kui võimalik ning ülejäänud vajatav sojusenergia toodetakse välisõhust. Joonisel 3.10 on kirjeldatud antud stsenaariumi kohta aastane tootmisprofiil ning näidatud ka sojussalvestis sisalduva sojusenergia taseme muutust aastaringelt.



Joonis 3.10. Tootmisprofiil, kui soojustootmine on maksimaalselt 150 MWh/h ja soojussalvestis oleva soojusenergia taseme muutus

Jooniselt 3.10 selgub, et suvisel perioodil, kui välisõhu temperatuur on soojem ja soojustarbimine madalam, siis toodetakse soojuspumba abil soojusenergiat sojussalvestisse ning suvise perioodi lõpuks on soojusenergia kogus soojussalvestis ligikaudu 219 GWh. Edaspidi, kui soojustarbimine suureneb, ning välistemperatuur langeb, siis kasutatakse soojussalvestis sisalduvat soojusenergiat ära, et toota soojust kaugküttesüsteemi ning talvise perioodi lõpuks on soojussalvesti tühjenenud.

Arvestades, et sesoone soojussalvesti soojussalvestusmaht on keskmiselt 70 kWh/m³ ja soojussalvesti investeering on 35 €/m³ ning kasutegur 85% on välja arvutatud investeering soojussalvestisse võttes arvesse maksimaalset soojusenergia kogust aasta vältel soojussalvestis.

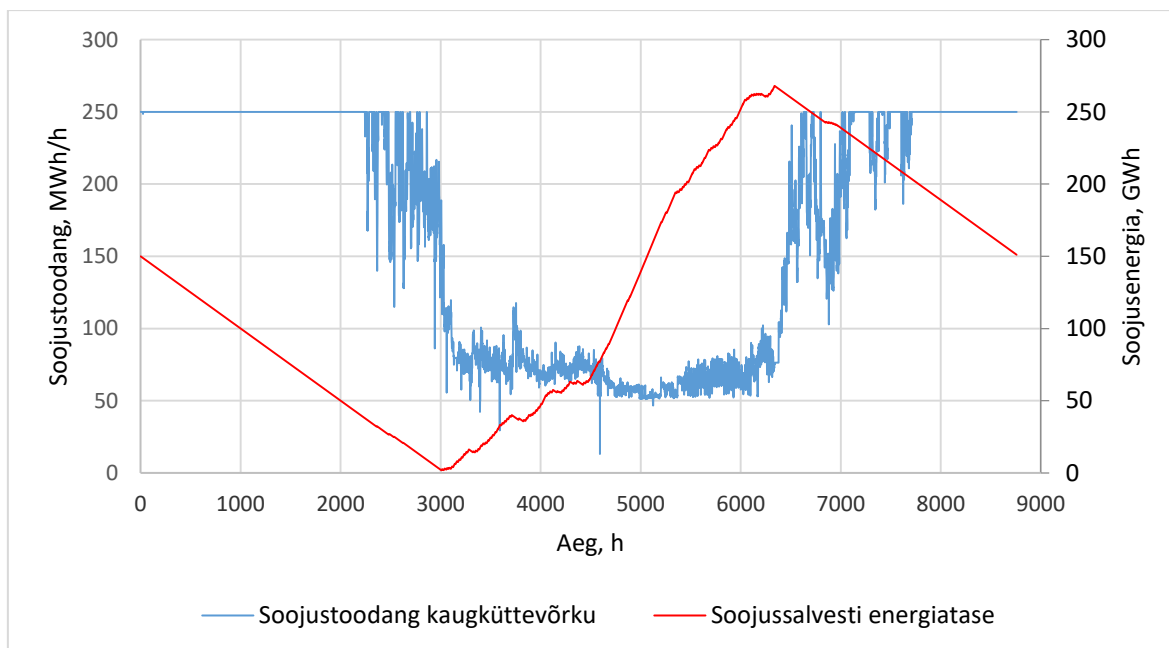
Tabel 3.9 on kirjeldab kulutusi, mida tehakse muutuvkuludele ja püsikuludele, kui soojusallikaks on välisõhk ning lisaks on paigaldatud soojussalvesti. Lisaks on välja toodud aastased kogukulud, aastane soojusenergia toodang ja valemi 2.6 abil leitud soojuspumbast toodetava soojuse omahind. Eraldi vaadeldakse investeeringut soojuspumpa ja investeeringut soojussalvestisse. Arvutuste tulemusena selgub, et sellise stsenaariumi korral on toodetava soojuse omahinnaks 34,87 €/MWh_{soojus}.

Tabel 3.9. Soojuspumbast toodetava soojuse omahind ning selle leidmiseks vajalikud parameetrid välisõhu kasutamisel soojusallikana maksimaalse toodangu 150 MWh/h korral, millele on lisatud 50 MW soojussalvesti

Soojuspumba investeering, miljonit €	99,00
Soojussalvesti investeering, miljonit €	109,72
Koguinvesteering, miljonit €	208,72
Fikseeritud hoolduskulud aastas, miljonit €	0,30
Kulutused elektrienergiale, miljonit €	15,83
Võrgutasu, miljonit €	1,57
Muutuvad hoolduskulud aastas, miljonit €	2,36
Aastased kogukulud, miljonit €	20,00
Diskontomäär, %	6
Soojuspumba tööperioodi pikkus, a	25
Aastane soojusenergia kogutoodang, GWh	1041,71
Toodetava soojuse omahind (LCOE), €/MWh	34,87

3.3.3 Soojuse hind kui maksimaalseks energiatoodanguks on 250 MWh/h + 50 MWh/h soojussalvesti

Käesoleva stsenaariumi korral toimub soojusenergia tootmine soojuspumpade abil vastavalt Tallinna soojustarbimisprofiilile, kuid maksimaalselt toodetakse 250 MWh/h. 50 MW võimsusega soojussalvestit laetakse juhul, kui soojustarbimine on madalam, kui 250 MWh/h ja kui välisõhu temperatuur on üle 15,1 °C. Juhul kui välistemperatuur langeb alla 15,1 °C ja soojussalvestis on soojusenergiat üle 50 MWh, siis toodetakse 50 MWh_{soojus} soojussalvestist ja ülejäänud soojus soojuspumpade abil (kuid mitte rohkem, kui 200 MWh), mis annab parema soojusteguri. Juhul kui salvestis on alla 50 MWh soojusenergiat, siis toodetakse salvestist nii palju kui võimalik ning ülejäänud vajatav soojusenergia toodetakse välisõhust (kuid mitte rohkem, kui 250 MWh). Joonisel 3.11 on välja toodud käesoleva stsenaariumi kohta aastane tootmisprofiil ning nähtav ka soojussalvestis sisalduva soojusenergia taseme muutust aastaringselt.



Joonis 3.11. Tootmisprofiil, kui soojustootmine on maksimaalselt 250 MWh/h ja soojussalvestis oleva soojusenergia taseme muutus

Joonis 3.11 on sarnane joonisega 3.10, millelt võib samuti järeldada, et suvisel perioodil kõrgema välistemperatuuri ja madalama soojustarbimise korral toodetakse soojust soojussalvestisse ning suveperioodi lõpuks on soojussalvesti laetud ning selles sisalduv soojusenergia hulk on ligikaudu 266 GWh. Välistemperatuuri langedes ja soojustarbimise suurenedes hakatakse soojust kaugküttesüsteemi tootma osaliselt soojussalvestis sisalduvast energiast ning soojussalvesti tühjeneb talvise perioodi lõpuks.

Arvestades, et punktis 3.3.2 välja toodud soojussalvesti andmeid, on selle stsenaariumi puhul samade põhimõtete järgi leitud kulutused, mis on tehtud muutuvkuludele ja muutuvkuludele. Lisaks aastased kogukulud, investeeringud soojuspumpa, soojussalvestisse, koguinvesteering, kogukulud ning aastane soojusenergia toodang. Leitud parameetrite põhjal on välja arvatatud valemi 2.6 abil soojuspumbast toodetava soojuste omahind ehk LCOE. Tulemused on kirjeldatud tabelis 3.10.

Tabel 3.10. Soojuspumbast toodetava soojuste omahind ning selle leidmiseks vajalikud parameetrid välisõhu kasutamisel soojusallikana maksimaalse toodangu 250 MWh/h korral, millele on lisatud 50 MW soojussalvesti

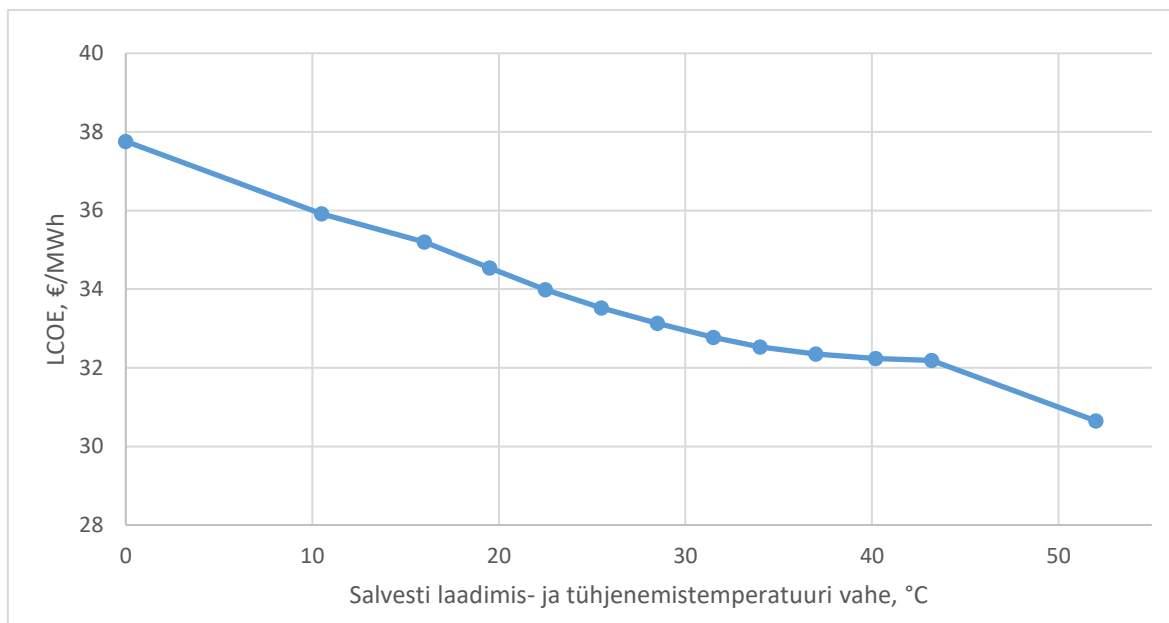
Soojuspumba investeering, miljonit €	165,00
Soojussalvesti investeering, miljonit €	133,11
Koguinvesteering, miljonit €	29811
Fikseeritud hoolduskulud aastas, miljonit €	0,50
Kulutused elektrienergiaks, miljonit €	23,77
Võrgutasu, miljonit €	2,25
Muutuvad hoolduskulud aastas, miljonit €	3,94
Aastased kogukulud, miljonit €	30,46
Diskontomäär, %	6
Soojuspumba tööperioodi pikkus, a	25
Aastane soojusenergia kogutoodang, GWh	1494,42
Toodetava soojuste omahind (LCOE), €/MWh	35,99

Arvutustest selgub, et sellise stsenaariumi korral on toodetava soojuste omahinnaks 35,99 €/MWh_{soojus}. Stsenaariumite, milles on lisaks soojuspumbale kasutatud ka 50 MW võimsusega salvestit, arvutuste tulemusena selgub, et salvestit kasutades on majanduslikul kasumlikum paigaldada väiksema koguvõimsusega soojuspump, sest siis on soojuspumbast ja soojussalvestist toodetava soojusenergia omahind kõige väiksem. Kui soojuspumbaga toota 150 MWh/h soojusenergiat, millele lisaks on kasutusel 50 MW salvesti, siis sellisel juhul kujuneb soojuste omahinnaks 34,87 €/MWh_{soojus}. Sama suurusega salvesti, aga olukorras kus soojuspumbaga toodetakse 250 MWh/h soojusenergiat oleks soojuste omahind 35,99 €/MWh_{soojus}, tootmise 400 MWh/h korral hind 37,76 €/MWh_{soojus} ja tootmise 600 MWh/h oleks soojuste omahind 43,88 €/MWh_{soojus}.

3.3.4 Soojuse hind kui soojussalvesti laadimine ja tühjenemine toimub erinevatel temperatuuridel

Elenevates punktides kirjeldatud stsenaariumite korral toimub soojussalvesti laadimine ja tühjenemine ühe ja sama kindla temperatuuri juures. Käesolevas punktis analüüsitakse, kuidas muutub soojuste omahind, kui soojussalvestit laetakse kõrgemate välistemperatuuride juures ja kasutatakse salvestis olevat võimsust vaid madalate välistemperatuuride korral. Selle stsenaariumi iseloomustamiseks on vaadeldud juhtumit, kus toimub soojusenergia tootmine soojuspumpade

abil vastavalt Tallinna soojustarbimisprofiilile, kuid maksimaalselt toodetakse 400 MWh/h. 50 MW sojussalvestit laetakse ja sealt ammutatakse energiat erinevate temperatuuride juures. Antud stsenaariumi kirjeldamiseks, on joonisel 3.12 välja toodud toodetava sojuse omahinna (LCOE) sõltuvus temperatuuride vahest, millega sojussalvesti laadub ning tühjeneb.



Joonis 3.12. Sojuse omahinna sõltuvus sojussalvesti laadimis- ja tühjenemistemperatuuri vahest.

Jooniselt 3.12 selgub, et mida kõrgem on sojussalvesti laadimistemperatuur ja mida väiksem on temperatuur, mille korral sojussalvestist sojust toodetakse, siis seda väiksem on sojuse omahind. Omahinna muudab väiksemaks asjaolu, et mida suurem on temperatuuride vahe, seda väiksem on aastane maksimaalne sojusenergia kogus sojussalvestis. See omakorda vähendab salvestisse tehtavat investeeringut. Väiksem investeering sojussalvestisse muudab ka sojuse omahinna odavamaks. Seetõttu võib järeldada, et mida vähem salvestit laetakse, seda väiksem investeering tuleb salvestisse teha, ning seda odavam on toodetav sojuse omahind. Kui sojussalvestit üldse ei laeta ning seetõttu ka investeeringut ei tehta, siis on sojuse omahinnaks 30,65 €/MWh_{sojus}, mis on võrdne ilma sojussalvestita stsenaariumiga. Järeldub, et ilma sojussalvestita stsenaariumi korral on toodetav sojuse omahind odavam, kui mistahes temperatuuride juures laetava ja tühjeneva sojussalvestiga stsenaariumi korral.

3.4 Sojuse hind koostootmisjaamas

Tulenevalt sellest, et käesoleva töö eesmärgiks on sojuspumpade konkurentsivõime uurimine kaugküttesüsteemis Eesti tingimustes, siis on oluline võrrelda leitud sojuse omahindu,

soojuspumpade korral, koostootmisjaamas toodetud soojuse omahinnaga. Sellest tingituna on leitud soojuse tootmise omahinnad ka koostootmisjaama puhul.

Koostootmisjaama soojuse omahinna arvutamise korral on arvestatud, et kütuseks kasutatakse hakkepuitu, mille hind on keskmiselt 13 €/MWh. [40] Biomassil töötava koostootmisjaama puhul on arvestatud kasuteguriga 93%, püsikuludeks 29 000 €/MW/aastas ning muutuvkuludeks 3,9 €/MWh. [31]

Investeering, mis koostootmisjaama tehakse on võetud Väo 2 koostootmisjaama investeeringu näitel. Kui eelnimetatud koostootmisjaama maksumus on 65 miljonit eurot, ning soojuslik võimsus vastavalt 76,5 MW ja elektriline võimsus 21,4 MW, siis on antud näitel koostootmisjaama investeeringukuluks keskmiselt 0,66 miljonit €/MW. [41]

Koostootmisjaama soojuse omahinna leidmisel on kasutatud samuti LCOE valemit 2.6, ning hind on leitud kolmel erineval juhul. Esiteks sellisel viisil kus arvestatakse omahinna leidmisel taastuenergia toetuse saamisega, elektri toodanguga ja elektrimüügist saadava tuluga. Teisel juhul on võrreldes esimese viisiga jäetud arvestamata elektrienergia müügist saadav taastuenergia toetus. Kolmas viis on alternatiivse katlamaja meetod, mille korral elektriline osa ning toetused välistatakse, mis on kirjeldatud punktis 2.2.

3.5 Tulemused

Selgitamaks välja Eesti tingimustes majanduslikult kõige kasumlikumat soojusallikat soojuspumbale, on võrreldud nelja erinevat võimalikku soojusallikat. Nendeks on välisõhk, merevesi, Tallinna reovesi ning Tallinnas asuva serveripargi jääsoojus. Tabelis 3.11 on välja toodud valemi 3.6 järgi arvutatud kõikide eelnimetatud soojusallikate puhul soojuspumbast toodetava soojuse omahind €/MWh_{soojus}, kui toodetakse soojust sellisel määral, et katta Tallinna baaskoormust 60 MWh/h.

Tabel 3.11. Soojuspumbast toodetava soojuse omahind erinevate soojusallikate korral

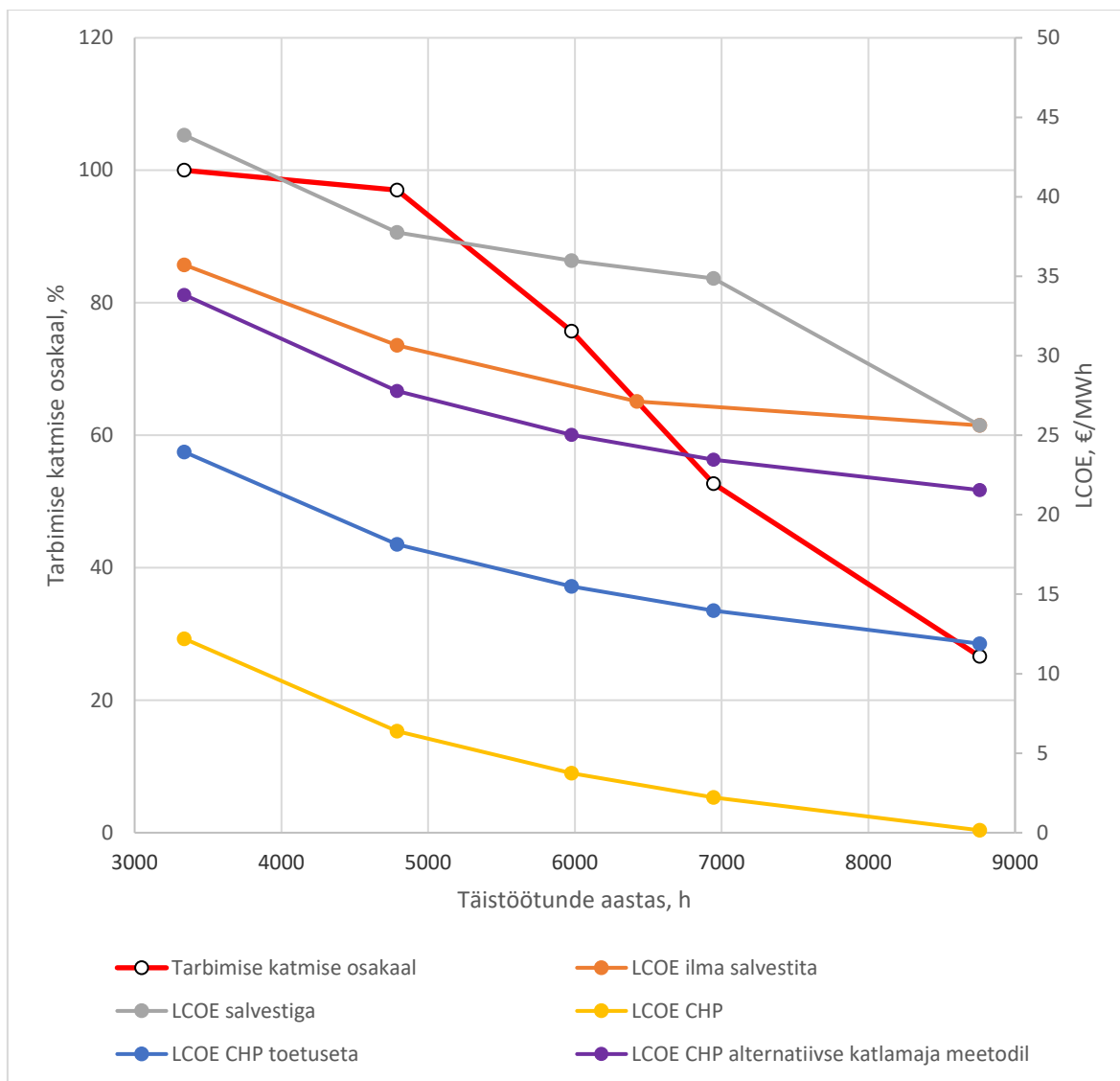
	LCOE, €/MWh _{soojus} .
Välisõhk	25,62
Merevesi	25,92
Tallinna reovesi	23,51
Serveripargi soojuse ülejääk	18,54

Tabeli 3.11 põhjal selgub, et kõige kasumlikum on soojust toota serveripargi soojuste ülejäägist. Siiski on see stsenaarium väga oletuslik, kuna ei ole teada, kui suures mahus on võimalik sealt soojust kasutada soojuspumba jaoks ning kas antud soojusallikas on tasuta, mistõttu antud stsenaariumit pikemalt ei uuritud.

Teiseks kõige kasumlikumaks variandiks on Tallinna reovesi. Siiski ei sobi ka see variant, sest punktist 3.1.3 selgub, et Tallinnas ei ole reovett piisaval hulgal, et sealt oleks võimalik soojust eraldada isegi soojustarbimise baaskoormuse katmiseks. Võimalik on vaid eraldada kuni 45 MWh/h.

Eelnevalt väljatoodud takistustest tulenevalt on võimalik soojusallikana kasutada välisõhku, mis on merevee kasutamisest mõnevõrra odavam, kuna lisaks tabelis 3.11 väljatoodud soojuste hindadele on merevee stsenaariumi puhul vaja arvestada veel ligi mitme kilomeetrise torude maksumusega, mis tuleks paigaldada vette.

Tulenevalt sellest, et on välja selgitatud, et baaskoormuse katmiseks Tallinnas on kõige realistlikum kasutada soojusallikana välisõhku, siis on arvatud ka stsenaariumid, mille korral uuritakse soojuste hinda sõltuvalt tootmisprofiilist ehk juhul kui toodetakse soojuste tarbimisprofiili järgi, kuid maksimaalseks energiatoodanguks on 200 MWh/h, 400 MWh/h ja 600 MWh/h. Lisaks on arvatud ka soojuste omahind kui soojust toodetakse soojuspumba abil välisõhust Tallinna soojuste tarbimisprofiili järgi, kuid maksimaalselt 150 MWh/h, 250 MWh/h, 400 MWh/h ning 600 MWh/h ning antud juhul veel nüansiga, et iga stsenaariumi puhul on ehitatud 50 MW soojussalvesti, mille opereerimine on kirjeldatud punktis 3.3.1. Kõikide eelnimetatud stsenaariumite tulemused on kirjeldatud joonisel 3.13.



Joonis 3.13. Soojuse omahinna võrdlus, sõltuvalt täistöötundide arvust, erinevate stsenaariumite korral.

Tingituna töö eesmärgist, milleks on uurida soojuspumpade konkurentsivõimet kaugküttesüsteemis Eesti tingimustes, siis on oluline võrrelda soojuspumbast toodetava soojuse omahinda koostootmisjaamas toodetava soojuse omahinnaga.

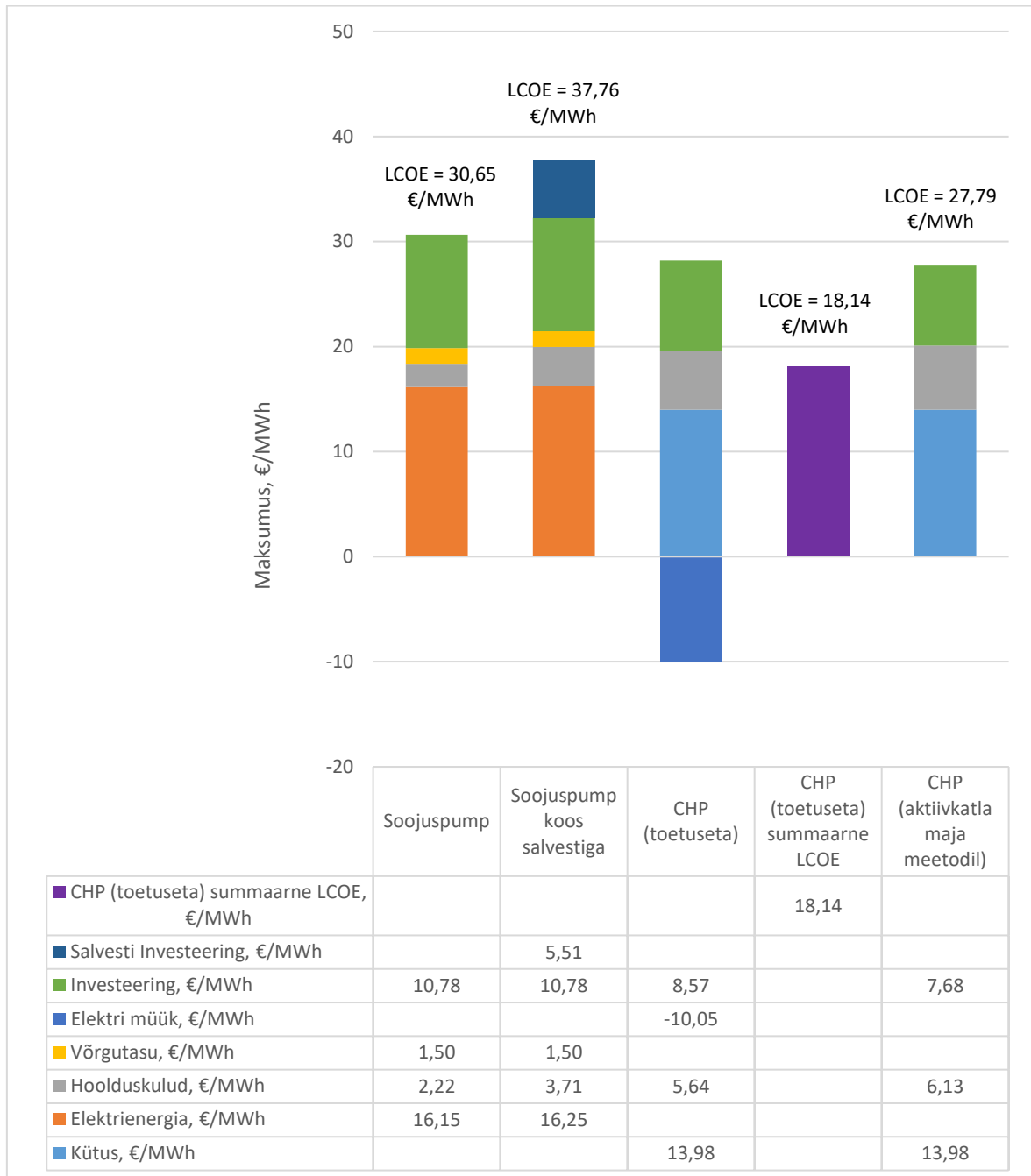
Arvutuste tulemusi kirjeldab joonis 3.13 ning selgub, et märkimisväärselt kõige odavam soojuse omahind tuleb koostootmisjaamas ning seda juhul, kui lisaks soojuse toodangule ja müügile arvestatakse ka veel elektri toodangut ning müüki ja elektritootmiselt saadavat taastuvenergiatoetust. Stsenaarium, mille korral arvestatakse küll lisaks soojuse toodangule ja müügile ka elektrienergia toodangut, kuid ei arvestata taastuvenergiatoetust, on mõnevõrra kallim tootmaks soojust, kuid siiski märgatavalt odavam, kui toota soojusenergiat soojuspumpade abil välisõhust.

Esimesel juhul, kui võetakse arvesse ka taastuenergiatoetust on toodetavaks soojuse omahinnaks Tallinna soojustarbimise baaskoormuse 60 MWh/h katmisel 0,15 €/MWh_{soojus} ning ilma toetuseta stsenaariumi puhul 11,89 €/MWh_{soojus}. Sellest järeldub, et taastuenergiatoetus muudab koostootmisjaama käitamise ülimalt kasumlikuks, kuna Konkurentsiametiga kooskõlastatud soojuse tootmise piirhind Utilitas Tallinna Elektriijaam OÜ jaoks vastavalt: Väo 1 koostootmisjaam 27,74 €/MWh +km ja Väo 2 koostootmisjaam 33,63 €/MWh +km. Kui, aga leida soojuse omahind vastavalt konkurentsiameti alternatiivse katlamaja meetodile, mida on lähemalt kirjeldatud punktis 2.2, kus lihtsustatult öeldes võetakse soojuse hinna kalkulatsioonis arvesse vaid soojuse tootmiseks tehtavaid kulutusi ning saadavaid tulusid, siis on sellisel juhul toodetava soojuse omahinnaks Tallinna soojustarbimise baaskoormuse 60 MWh/h katmisel 21,55 €/MWh_{soojus}.

Võrreldes omavahel koostootmisjaama puhul arvatud soojuse omahinda alternatiivse katlamaja meetodil ning soojuse omahinda, mis on toodetud soojuspumbaga välisõhust salvesti olemasolu puudumisel, ei ole nende kahe stsenaariumi hinnaerinevus suur. Baaskoormuse katmisel on soojuspumbast toodetava soojuse omahinnaks 25,62 €/MWh_{soojus}. Erinevus nende kahe stsenaariumi vahel on antud täistöötundide juures ligikaudselt 15%, mis võib olla tingitud ka arvutuslikust veast või töös tehtud lihtsustustest. Arvutuste tulemustest ning jooniselt 3.13 selgub, et rohkemate täistöötundide ehk suurema protsentuaalse tarbimise osakaalu katmise korral kahe eelnimetatud stsenaariumi omahindade vahe väheneb. Siiski selgub, et Tallinna soojustarbimise katmiseks mistahes tootmisprofiili korral on odavam toota soojust koostootmisjaamas, kui soojuspumpade abil.

Lisaks eelnevatele stsenaariumitele on veel vaadeldud olukorda, kus soojuspumbaga koos on ehitatud 50 MW soojussalvesti. Soojussalvestit ei ole arvestatud baaskoormuse katmisel, vaid alates juhul, kui toodetakse Tallinna soojuse tarbimisprofiili järgi, kuid maksimaalselt 150 MWh/h. Selgub, et 6950 täistöötundi juures on antud stsenaariumi puhul arvutuslikuks soojuse omahinnaks 34,87 €/MWh, samas kui alternatiivkatlamaja meetodil on koostootmisjaama soojuse omahinnaks samade töötundide korral 23,47 €/MWh_{soojus} ning soojuspumba korral ilma salvestita ligikaudu 26,20 €/MWh_{soojus}. Jooniselt 3.13 on näha, et sarnaselt kõikide teiste stsenaariumite korral suureneb ka soojussalvestiga stsenaariumi korral suurema protsentuaalse tarbimise osakaalu katmise ehk rohkemate täistöötundide korral soojuse omahind. Sellest järeldub, et soojussalvestiga stsenaarium on majanduslikult kõige ebamõistlikum. Analüüsi käigus selgus ka asjaolu, et mida suurem on soojussalvesti laadumis- ja tühjenemistemperatuuride vahe, seda

väiksem on LCOE, kuid siiski jääb antud stsenaariumi puhul LCOE alati kõrgemaks, kui salvestita variandi korral.



Joonis 3.14. Erinevate tootmisüksuste puhul tehtavad kulutused

Jooniselt 3.14, kus on kirjeldatud erinevate stsenaariumite korral tehtavad kulutused, kui soojust toodetakse vastavalt Tallinna soojuse tarbimisprofiilile, kuid maksimaalselt 400 MWh/h, selgub, et isegi juhul, kui koostootmisjaama soojuse omahinna arvutamisel jätta arvestamata saadav taastuenergia tasu, kuid arvestada siiski elektri tootmist ja sellest saadud tulu, siis on sellest saadav

tulu nii märkimisväärselt suur, mis teeb soojuste omahinna märgatavalt soodsamaks, kui soojuspumpade puhul. Stsenaariumi puhul kus on paigaldatud soojuspump ning ehitatud lisaks veel ka soojussalvesti toob endaga kaasa ligikaudu 40% suurema hoolduskulu. Kuid kõige suurem faktor, mille tõttu on soojussalvestiga stsenaarium kallim, on soojussalvestisse tehtav investeering. Siiski ei anna soojussalvestisse tehtav investeering odavamalt soojuste omahinda, nagu selgub jooniselt 3.13, vaid antud stsenaarium on kõikidest uuritud variantidest kõige kallim soojusenergia tootmiseks. Siiski tuleb ära märkida, et soojuspumpade puhul moodustab enam kui 50% kogukulutustest elektrienergiale tehtavad kulutused. Sellest järeldub, et soodsamate elektrienergia hindade puhul oleks soojuspumbast toodetava soojusenergia hind madalam ja rohkem konkurentsivõimelisem koostootmisjaamas toodetava soojuste hinnaga. Koostootmisjaama puhul on miinuseks võrreldes soojuspumbaga selle rohkem kui kaks korda suuremad hoolduskulud.

3.6 Järeldused

Käesolevas töös on jõutud järeldusele, et soojuspumpadel on keeruline konkureerida koostootmisjaamadega, kui viimaste puhul soojuste omahinna arvutamisel arvestada elektrienergia toodangut ja müüki ning sellelt saadavat taastuenergia toetust. Siiski, kasutades koostootmisjaamade soojuste omahinna arvutamisel Konkurentsiameti alternatiivkatlamaja meetodit on koostootmisjaamades toodetava soojuste omahind ligikaudu 10-15% soodsam, kui soojuspumbast toodetava soojuste omahind. Erinevus võib tuleneda ka arvutuslikest vigadest või antud töös tehtud lihtsustustest või piirangutest. Töös tehtud analüüsist järeldub, et soojussalvesti ehitamine ei ole majanduslikult tasuv salvestisse tehtava suure investeeringu tõttu ning kokkuvõttes tuleb soojuste omahind kallim võrreldes salvestita stsenaariumiga. Selgub, et soojuspumpade kogukuludest üle 50% moodustavad elektrienergiale tehtavad kulutused, seega tulevikus soodsama elektrienergia hinna korral, võiksid soojuspumpad kindlasti koostootmisjaamadega konkureerida.

Uurimisprotsessis on tehtud teatavaid lihtsustusi ja seatud piiranguid, mis võiksid muuta uuringu tulemusi. Antud töös on arvestatud elektrienergia muudust ühe aasta jooksul ja ei ole arvestatud muutuva biomassi hinnaga. Valitud on selline talvine ning suvine kaugküttesüsteemi temperatuur, mille korral soojuspumpadest toodetava soojuste omahinna tulemused oleksid soodsaimad. Lisaks on arvutused tehtud II generatsiooni kaugküttesüsteemi kohta. Tulevastes uurimustes oleks oluline arvestada tegureid, mida antud töös ei ole uuritud, näiteks elektrienergia erinevatel aastatel, muutuv biomassi hind, muutuv kaugküttesüsteemi temperatuur ning arvutused IV generatsiooni kaugküttesüsteemi ehk madalamate temperatuuride ja kaugjahutuse olemasolu korral.

KOKKUVÕTE

Kaugküttesüsteemil on nii täna kui ka tulevikus oluline roll taastuvenergiastüsteemides, mis tuleneb Euroopa Liidu kliimapoliitika eesmärkidest vähendada süsinikdioksiidi emissioone ning taastumatute energiaallikate kasutamist. Nende eesmärkide täitmisele aitab kaasa soojuspumpade kasutamine kaugküttesüsteemis. Soojuspumpade abil kaugküttevõrku soojuse tootmine ei põhjusta lokaalseid emissioone ning soojuse allikatena kasutatakse taastuvenergiaallikaid. Kaugküttesüsteemi elektrifitseerimine soojuspumpade abil võimaldab kokku hoida biomassi ning muid taastuvaid kütuseid, mida on võimalik kasutada muudes sektorites näiteks transpordis ja lennunduses, suureneb elektrisüsteemi paindlikkus, tänu millele on tulevikus võimalik näiteks suure tuuleenergia toodangu korral see salvestada soojussalvestitesse või tarbida otse soojuse tootmiseks. Antud töös on uuritud, milliseks kujuneb kaugküttesoojuse hind soojuspumpade kasutamise korral Eesti tingimustes ning hinnatud erinevate stsenaariumite puhul soojuspumpade konkurentsivõimet võrreldes koostootmisjaamadega. Konkurentsivõime hindamiseks on antud töös kasutatud LCOE (ingl. k. *levelized cost of electricity*) meetodit, arvutamaks soojuse omahinda erinevate variantide korral.

Soojuspumpade paremaks konkurentsivõime saavutamiseks selgitati välja, milline soojusallikas ning mil määral on Tallinna tingimustes kõige sobivam kasutamiseks. Välisõhu kasutamisel soojusallikana on soojuse omahinnaks baaskoormuse katmisel LCOE valemi järgi 25,62 €/MWh_{soojus}. Välisõhu kasutamine ei taga küll nii head soojustegurit ega soojusenergia omahinda, kui serveripargi soojuse ülejäägi või puhastatud reovee kasutamine, tulenevalt muutlikust temperatuurist. Siiski on välisõhu kasutamine Tallinna tarbimiskoormuse katmiseks käesolevatest variantidest kõige realistlikum, sest antud soojusallikas on tasuta ning piiramatus koguses. Selgub, et uuritud neljast variandist on mereveest soojuse tootmine kõige kallim, baaskoormusel on toodetava soojuse omahinnaks 25,92 €/MWh_{soojus}. Serveripargi soojuse ülejäägi kasutamise puhul ei ole teada soojusallika maht ning sellega kaasnevad tasud. Tallinna reovee mahu piiratuse tõttu on võimalik toota antud soojusallikast vaid 45 MWh/h hinnaga 23,64 €/MWh_{soojus}.

Käesolevas töös uuriti ka, kuidas sõltub soojuse hind tootmisprofiilist kasutades majanduslikult kõige otstarbekamat soojusallikat ehk välisõhku. Maksimaalse energiatoodangu 200 MWh/h ja 400 MWh/h on soojuse hindadeks vastavalt 27,12 €/MWh_{soojus} ja 30,65 €/MWh_{soojus}. Järeldub, et mida suurem osa protsentuaalsest tarbimisest osakaalust soojuspumpade abil katta ehk mida rohkem on soojustootmisüksusel täistöötunde, seda kallimaks muutub ühikuline soojuse hind. Seetõttu oleks soojuspumpade abil kõige mõistlikum katta vaid baaskoormust.

Lisaks uuriti töö käigus, kuidas kujuneb soojuse hind sõltuvalt soojusprofiilist kui soojuspumbale on juurde ehitatud soojussalvesti, kuhu kõrgemate välistemperatuuride korral soojust salvestatakse ja kust madalamate temperatuuride juures soojust ammutatakse. Tulemusena saab järeldada, et soojussalvesti ehitamine ei ole tasuv, sest soojuse omahind antud stsenaariumi korral suureneb.

Soojuspumpade konkurentsivõime analüüsimiseks on leitud ka koostootmisjaamas toodetava soojuse hind kolmel erineval juhul. Esiteks kui arvestatakse lisaks soojuse tootmisele ja müügile ka veel elektri tootmist, müüki ja elektri müügist saadavat taastuenergia toetust. Teisel juhul on taastuenergiatoetus on kalkulatsioonist välja jäänud, ning kolmandal juhul alternatiivkatlamaja meetodil. Järeldub, et kahel esimesel juhul ei suuda soojuspumbad koostootmisjaamadega konkureerida, sest sellistel juhtudel on koostootmisjaamas toodetud soojuse omahind väga madal. Alternatiivkatlamaja meetodi järgi on soojuse omahinnaks baaskoormuse katmisel 21,55 €/MWh_{soojus}. Saab järeldada, koostootmisjaamas on soojuse tootmine siiski odavam. Nende kahe stsenaariumi puhul on soojuse omahinna erinevus ligikaudu 10-15%, mis võib tuleneda ka arvutuslikest vigadest või antud töös tehtud lihtsustustest või piirangutest.

Selgub, et soojuspumpade kogukuludest üle 50% moodustavad elektrienergiele tehtavad kulutused, seega tulevikus soodsama elektrienergia hinna korral suudaksid soojuspumbad koostootmisjaamadega paremini konkureerida. Ka koostootmisjaamadel moodustab kuludest 50% kütus, mistõttu mõjutab nende omavahelist konkurentsivõimet ka näiteks puidu hinna muutus. Lisaks on soojuspumba eelis koostootmisjaama ees asjaolu, et sama võimsuse korral on soojuspumbaga seonduvad hoolduskulud enam kui kaks korda väiksemad, võrreldes koostootmisjaamaga.

Käesolevas analüüsis on seatud teatud piirangud ja tehtud lihtsustused ning jäetud arvestamata mõningad tegurid, mis võisid muuta uurimuse tulemusi. Arvestamata on jäetud muutuv biomassi hind, valitud on sellised talvised ja suvised kaugküttesüsteemi temperatuurid, mille korral soojuspumpadest toodetava soojuse omahind on soodsaim. Tulevikus tehtavates uuringutes tuleks arvestada eelnimetatud tegureid ning muutuvat elekrihinda aastate lõikes, lisaks veel leida tulemused, kui tegu oleks IV generatsiooni kaugküttesüsteemiga, millel oleks ka kaugjahutus, kuna antud töös tehtud arvutused näitavad tulemusi II generatsiooni kaugküttesüsteemi kohta. Vaatamata mõningatele lihtsusustele, mis antud töös on tehtud, on saadud koostootmisjaamade puhul tulemus, mis on suhteliselt sarnane Konkurentsiameti poolt kooskõlastatud soojuse hinnaga ning on alust arvata, et soojuspumbad võiksid konkureerida teatud turu tingimustes kindlasti koostootmisjaamadega, eriti juhul kui elektrienergia hind tulevikus odavneks.

SUMMARY

The district heating system, both today and in the future, has an important role to play in renewable energy systems resulting from the European Union's climate policy goals of reducing CO₂ emissions and the use of non-renewable energy sources. The use of heat pumps to produce heat from the district heating system contributes to the European Union's climate policy objectives. Heat production using district heat pumps does not generate local emissions and uses renewable energy sources as a heat source. Electrification of a district heating system with heat pumps allows to save biomass and other renewable fuels that can be used in other sectors such as transport and aviation, increases the flexibility of the electricity system, which makes it possible, for example, in case of high wind power production to store it in heat storages or to consume it directly for heat production. In this work, it has been investigated how the price of district heat will be formed in case of using heat pumps in Estonian conditions and in case of different scenarios evaluated the competitiveness of heat pumps compared to combined heat and power (CHP) plants. In order to assess competitiveness, the LCOE (levelized cost of electricity) method has been used in this work to calculate the cost of heat for different variants.

In order to achieve better competitiveness of heat pumps, it was identified which heat source and to what extent is the most suitable for use in Tallinn. When using ambient air as a heat source, the cost of heat to cover the base load is 25,62 €/MWh_{heat} according to the LCOE formula. The use of ambient air does not guarantee that good coefficient of efficiency and cost of heat energy, as the use of surplus heat from the server park or the use of sewage water, due to variable temperature. However, the use of ambient air as heat source is the most realistic from studied scenarios, as this heat source is free and unlimited in quantity. It turns out that the cost of heat is highest, when seawater is used as heat source with the price of 25,92 €/MWh_{heat} at base load. When using the data server surplus heat, the heat source volume and associated charges are unknown. Due to the limited volume of sewage water in Tallinn, it is possible to produce only 45 MWh/h at a price of 23,64 €/MWh_{heat}.

In this work, it was also studied how the price of heat depends on the production profile using the economically most feasible heat source, ambient air. When the maximum energy output is 200 MWh/h and 400 MWh/h then the price of heat would be 27,12 €/MWh_{heat} and 30,65 €/MWh_{heat} respectively. It is concluded that the higher the percentage of consumption is covered, the more the heat production unit has full-load hours, the higher the price of heat would be. Therefore, it would be most sensible to cover only the base load with heat pumps.

Additionally, in this work was examined how the heat price depends on the heat profile when heat storage unit is built in addition to the heat pump, where heat is stored at higher ambient temperatures and heat is extracted at lower temperatures. As a result, it can be concluded that the construction of a heat storage unit is not economically viable as the cost of heat in this scenario increases.

In order to analyze the competitiveness of heat pumps, the price of heat produced in a combined heat and power (CHP) plant has also been found in three different cases. Firstly, in addition to the production and sale of heat, there is also a renewable energy subsidy for the electricity production, electricity production and sale, which are taken into account. Secondly, the price is calculated when the renewable energy subsidy is excluded from the calculation. And in the third case, the alternative boiler house method is used. In the first two cases, it is concluded that heat pumps are not able to compete with CHP plants because in such cases the cost of the heat produced in the CHP plant is very low. However, according to the alternative boiler house method, the cost of heat for CHP plant for covering the base load is 21,55 €/MWh_{heat}. It can be concluded that the difference in heat price between the CHP plant and heat pump is about 10-15% which may be due to computational errors.

Costs for electricity are over 50% of the total costs when using heat pump to generate electricity. Therefore, it can be concluded that in the future with more favorable electricity prices, heat pumps could compete better with CHP plants. Also in CHP plants, 50% of the cost is fuel, which is why the competitiveness is also effected by the wood price for example. In addition, the advantage of a heat pump in front of a CHP plant is that, at the same capacity, the maintenance costs associated with the heat pump are more than twice as low as the CHP plant maintenance costs.

Some limitations and simplifications are set in this work and some of the factors that could change the results of the study are ignored. The variable cost of biomass has not been taken into account, and the water temperatures in district heating system are chosen so that the cost of heat produced from heat pumps would be the most favorable. Future studies should take into account the above-mentioned factors, and the variable electricity prices over the years. Furthermore, to analyze the scenarios when IV generation district heating system with district cooling is developed and in use. The calculations made in this work show the results if II generation district heating system is in use. In spite of some simplifications that have been made in this work, in the case of CHP plants, the result is relatively similar to the heat price that is agreed by the Competition Authority. The cost of heat is lower in some scenarios compared to the CHP plant. Therefore, there is reason to believe that heat pumps could compete with CHP plants under certain market conditions, especially if the price of electricity would fall in the future.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] A. Paist, A. Poobus, „Soojusgeneraatorid," 2009.
- [2] Danish Energy Agency, „Technology Data for Energy Plants. Updated chapters, August 2016 ," 2016.
- [3] A. Jõelet, M. Gaškov, M. Polikarpus, „Soojussüsteemi puurkaevu ja –augu mõju põhjavee ja pinnase füüsikalistele omadustele ning põhjavee keemilisele koostisele Eesti tingimustes," 2012.
- [4] Airconditioning Systems, Heat Pump COP. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.airconditioning-systems.com/heat-pump-cop.html>. [Kasutatud 7. 02. 2019].
- [5] Heat Pumps & Energy Efficiency Influencers - Making the right choice. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.star-ref.co.uk/smart-thinking/how-to-choose-an-efficient-heat-pump-large-scale-heat-pumps-and-district-heating-making-the-right-choice.aspx>. [Kasutatud 11. 02. 2019].
- [6] Large heat pumps in district heating systems. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://energia.fi/files/976/Large_heat_pumps_in_district_heating_systems_Summary.pdf. [Kasutatud 11. 02. 2019].
- [7] Large scale heat pumps in Europe. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.ehpa.org/fileadmin/red/03._Media/03.02_Studies_and_reports/Large_heat_pumps_in_Europe_MDN_II_final4_small.pdf. [Kasutatud 14. 02. 2019].
- [8] H. Averfalk, P. Ingvarsson, U. Persson, M. Gong, S. Werner, “Large heat pumps in Swedish district heating systems“. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117307839>. [Kasutatud 18. 02. 2019].
- [9] Energiatalgud, Kasutustegur. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://energiatalgud.ee/index.php/M%C3%B5iste:Kasutustegur>. [Kasutatud 18. 02. 2019].

- [10] Arengufond, „Kaugkütte energiasääst," 2013.
- [11] Energiatalgud, Kaugküte. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://energiatalgud.ee/index.php?title=Kaugk%C3%BCte#cite_note-RRO-18. [Kasutatud 25. 02. 2019].
- [12] Statistikaameti andmebaas. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.stat.ee/andmebaas>. [Kasutatud 25. 02. 2019].
- [13] AS Fortum Tartu, Kaugküte. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.fortumtartu.ee/tooted-ja-teenused/kaugkute/>. [Kasutatud 27. 02. 2019].
- [14] Kaugkütte võrguvee reguleerimise temperatuurigraafik 2013/2014 kütteperioodil. [Võrgumaterjal]. Saadaval: http://www.aserivv.ee/files/articles/V%C3%B5rguvee_kvalitatiivse_reguleerimise_temperatu_urigraafik_20132014_talveperioodil.pdf. [Kasutatud 27. 02. 2019].
- [15] Utilitas, Meie kaugküttesüsteem. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.utilitas.ee/meie-kaugkuttetesustee/> [Kasutatud 27. 02. 2019].
- [16] Energiatalgud, Soojusmajanduse regulatiivne keskkond. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://energiatalgud.ee/index.php/Soojusmajanduse_regulatiivne_keskkond. [Kasutatud 28. 02. 2019].
- [17] Energiatalgud, Soojusmajandus. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://energiatalgud.ee/index.php/Soojusmajandus_2010-2014?menu-5. [Kasutatud 28. 02. 2019].
- [18] Energiatalgud, Kaugküttesoojuse hind. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://energiatalgud.ee/index.php/Kaugk%C3%BCttesoojuse_hind. [Kasutatud 28. 02. 2019].
- [19] Konkurentsiamet. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.konkurentsiamet.ee/>. [Kasutatud 03. 03. 2019].
- [20] H. Koduvere, AEK0010/EES5010 Energeetika arengu plaanimine III loeng – loengukonspekt. TTÜ, 2018.
- [21] J. Steinbach, D. Staniaszek, “Discount rates in energy system analysis”. [Võrgumaterjal]. Saadaval:

http://bpie.eu/uploads/lib/document/attachment/142/Discount_rates_in_energy_system-discussion_paper_2015_ISI_BPIE.pdf. [Kasutatud 27. 03. 2019].

- [22] Mereviki, Läänemeri. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://mereviki.vta.ee/mediawiki/index.php/L%C3%A4%C3%A4nemeri>. [Kasutatud 27. 03. 2019].
- [23] Riigi Ilmateenistus, Merevee temperatuur Tallinna Lahes. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.ilmateenistus.ee/ilmatarkus/ilmajutud/merevee-temperatuur-tallinna-lahes/>. [Kasutatud 27. 03. 2019].
- [24] Keskkonnaministeerium, Merekeskkonna kaitse. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.envir.ee/et/merekeskkonna-kaitse>. [Kasutatud 27. 03. 2019].
- [25] BeeHosting PRO, Serveripark ja seadmed. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.onlineexpo.com/ee/kodumess-2016/tark-kodu/beehosting-it-lahendused/serveripark-ja-seadmed/>. [Kasutatud 02. 04. 2019].
- [26] Tallinn, Reoveekäitlus. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.tallinn.ee/Indicator-9_Wastewater_Tallinn_est. [Kasutatud 03. 04. 2019].
- [27] AS Utilitas Tallinn
- [28] Keskkonnaagentuur
- [29] AS Tallinna Vesi
- [30] Geoinfosüsteemi merekaart. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://gis.ee/>. [Kasutatud 05. 04. 2019].
- [31] Danish Energy Agency, „Technology Data for Energy Plants," 2012.
- [32] AS ELVESO, Soojus, Tarbimislepingu tüüptingimused. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://elveso.ee/soojus/tarbimislepingud/tarbimislepingu-t%C3%BC%C3%BCptingimused/>. [Kasutatud 08. 05. 2019].
- [33] J. Valtin, Energiasüsteemide ökonoomika AES3136 – loengukonspekt. TTÜ, 2013.

- [34] U.S. Department of Energy, Levelized Cost of Energy (LCOE). [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/08/f25/LCOE.pdf>. [Kasutatud 09. 05. 2019].
- [35] Konkurentsiamet, „Koostootmisjaama kulude jagamise põhimõtted soojuse ja elektri koostootmisel,“ 2013 [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.konkurentsiamet.ee/index.php?id=18306>. [Kasutatud 09. 05. 2019].
- [36] Eesti Soojustehnikainseneride Selts, 4GDH rakendamise võimalikkusest Eestis. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://estis.ee/4gdh-rakendamise-voimalikkusest-eestis/>. [Kasutatud 09. 05. 2019].
- [37] H. Lund, S. Werner, R. Wiltshire, S. Svendsen, J. E. Thorsen, F. Hvelplund, B. V. Mathiesen, “4th Generation District Heating (4GDH). Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems”. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544214002369>. [Kasutatud 09. 05. 2019].
- [38] NordPool. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.nordpoolgroup.com/>. [Kasutatud 09. 05. 2019].
- [39] Elering AS, Võrguteenus. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://elering.ee/vorguteenus/>. [Kasutatud 09. 05. 2019].
- [40] Eesti Metsameister, Eestit ootab puidupuudus. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://eestimetsameister.ee/eestit-ootab-puidupuudus/>. [Kasutatud 11. 05. 2019].
- [41] AS Utilitas Tallinn, Utilitase uus jaam Väos on valmimas. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.utilitas.ee/utilitase-uus-jaam-vaos-on-valmimas/>. [Kasutatud 11. 05. 2019].