



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Energiatehnoloogia instituut

SOOJUSPUMPADE MAJANDUSLIK TASUVUS MAAPIIRKONDADE KAUGKÜTTEVÕRKUDES

ECONOMIC FEASIBILITY OF HEAT PUMPS IN RURAL DISTRICT HEATING NETWORKS BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Kiur Kalme

Üliõpilaskood: 185404EACB

Juhendaja: Kertu Lepiksaar, doktorant-
nooremteadur

Tallinn 2021

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.

"....." 2021 .

Autor: Kiur Kalme

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 2021 .

Juhendaja: Kertu Lepiksaar

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

".....".....2021 .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/allkirjastatud digitaalselt/

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Kiur Kalme 15.06.1999

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Soojuspumpade majanduslik tasuvus maapiirkondades

mille juhendaja on Kertu Lepiksaar,

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

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

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

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

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

_____ /allkirjastatud digitaalselt/

24.05.2021

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Kiur Kalme, 185404EACB

Õppekava, peaariala: EACB17/17 Keskkonna-, energia- ja keemiatehnoloogia

Juhendaja: doktorant-nooremteadur, Kertu Lepiksaar, +37258162989

Lõputöö teema:

Soojuspumpade majanduslik tasuvus maapiirkondade kaugküttevõrkudes

Economic feasibility of heat pumps in rural area's district heating networks.

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Leida soojuspumbaga toodetud soojuse tarbijahind erinevatel tingimustel
2. Teha soojuse hinna võrdlus praeguse ja soojuspumbaga toodetud soojuse vahel
3. Näidata kuidas mõjutavad erinevad tegurid soojuse lõpphinda tarbijale

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Koguda vajalikud algandmed ja valmistada arvutamise kava	15.02
2.	Lõpetada arvutused ja veenduda tulemuste õigsuses	15.03
3.	Koostada lõputöö lõpliku vorminguga	24.05

Töö keel: Eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg:

06.06.2021

Üliõpilane: Kiur Kalme

.....
/allkirjastatud digitaalselt/

24.05.2021

Juhendaja: Kertu Lepiksaar

.....
/allkirjastatud digitaalselt/

24.05.2021

Programmijuht: Oliver Järvik

.....
/allkirjastatud digitaalselt/

24.05.2021

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

SISUKORD	5
EESSÕNA	6
Lühendite ja tähiste loetelu	7
SISSEJUHATUS	8
1. KAUGKÜTTEVÕRK	9
1.1 Kaugküttevõrk Eestis	9
1.2 Kaugküttevõrgus soojuse tootmine	10
1.3 Kaugküttevõrgu piirhinna määramine	11
2. SOOJUSPUMBAD	12
2.1 Soojuspumpade teooria	12
2.2 Külmaagensi valik	13
2.3 Soojuspumpade tüübid	14
2.3.1 Maasoojuspump	15
2.3.2 Õhksoojuspump	17
3. ARVUTAMISE METOODIKA	18
3.1 Algandmete valik ja töötlemine	18
3.2 Soojuskoormuse graafikud	19
3.3 Maapinna temperatuuri arvutamine	20
3.4 Soojusteguri arvutamine	22
3.5 Majanduslik arvutus	24
4. TULEMUSTE ANALÜÜS	27
4.1 Tarbijahind	27
4.2 Mõju elektrisüsteemile	30
KOKKUVÕTE	33
SUMMARY	34
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	36
LISAD	38
Lisa 1	38
Lisa 2	40

EESSÕNA

Käesoleva bakalaureuse töö teema sõnastati lõputöö juhendaja Kertu Lepiksaare ja töö autori Kiur Kalme ühisel arutelul. Teema on aktuaalne soojusenergia tarbimise tõhusamaks muutmise kontekstis.

Töö peamised andmed, mida on kasutatud arvutuste aluseks on võetud Eleringi kodulehelt, soojusmajandus arengukavadest ning riikliku ilmateenistuse kodulehelt. Andmete kogumisel oli peamiseks abiks juhendaja Kertu Lepiksaar.

Töö raames on leitud kohalike omavalitsuste soojusmajanduse arengukavadest soojustarbimised, mis on jagatud gruppidesse. Seejärel on simuleeritud programmiga EnergyPro soojuse tarbimise graafikud gruppidele ning nende põhjal on arvutatud igatunnise resolutsiooniga soojuse maksumus praeguste hindade juures. Seejärel on arvutatud soojuse hind praeguste hindade juures ning võrreldud erinevate soojuspumba lahendustega. Lisaks on kasutatud matemaatilist mudelit, et arvutada maapinna temperatuur ühe meetri sügavusel kasutades välisõhu temperatuuri, lume paksust ja pinnale omaseid keskmisi füüsikalisi omadusi.

Saadud tulemusi saab rakendada esialgse tasuvuse hinnangu koostamisel erineva suurusega kaugküttevõrkudes üle Eesti.

Soojuspump, tasuvus, kaugküte, soojuse omahind, maapinna temperatuur, bakalaureusetöö

Lühendite ja tähiste loetelu

A	kapitalikulu (EUR/MWh)
COP	Soojuspumba soojustegur (ingl k <i>Coefficient of Performance</i>)
C_A	pinnase soojusmahtuvus, millest antud töös on vee tahkestumise ja jää sulamise sulamissoojus välja jäetud ($\text{J m}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)
D_S	Lume paksus (m).
$e^{-f_S D_S}$	Lumikattest tingitud empiiriline parandustegur
ε_{Carnot}	Carnot' efektiivsustegur
f_S	Empiiriline lumikattest tingitud soojusjuhtivust pidurdav tegur (m^{-1})
h	Soojuse piirhind (EUR/MWh)
K_T	Pinnase soojusjuhtivustegur ($\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)
MK	Muutuvkulud (EUR/MWh)
Q	Soojuse müügiimaht regulatsiooniperioodil (MWh)
PT	Põhjendatud tulukus (EUR/MWh)
RV	reguleeritav vara (EUR/MWh)
T_1	Pealevoolu Temperatuur (K)
T_1	Soojusallika temperatuur ($^\circ\text{C}$)
T_{AIR}^t	Õhu temperatuur ajahetkel t ($^\circ\text{C}$)
$T_{lubatud}$	Lubatud müügitulu (EUR/MWh)
T_Z^t	Pinnase temperatuur sügavusel Z_S , ajahetkel t ($^\circ\text{C}$)
T_*^{t+1}	Pinnase temperatuur sügavusel Z_S , mis ei arvesta lumikatte parandustegurit ($^\circ\text{C}$)
TK	Tegevuskulud (EUR/MWh)
T_Z^{t+1}	Pinnase temperatuur sügavusel Z_S , ajahetkel t+1 ($^\circ\text{C}$)
Δt	Ajavahemik t ja t+1 vahel (s)
WACC	Kaalutud keskmine kapitali hind ehk tulukuse määr
Z_S	Sügavus pinnases (m)

SISSEJUHATUS

Euroopa Liidu visioon on 2050. aastaks saavutada energeetikasektoris kliimanetraalsus, et pidada kinni Pariisi kokkuleppest. Eestis tarbiti 2018. aastal alla 6300 GWh soojusenergiat, millest 70% moodustas kaugkütte (4400 GWh) [1] ning veidi üle 9500 GWh elektrienergiat [2]. See tähendab, et veidi üle veerandi Eesti energia tarbimisest on kaugkütte võrgustikus ning peame leidma viise kuidas ka soojusenergeetikas minna üle kliimanetraalsemale tootmisele.

Praegusel hetkel võib Eesti erinevatest soojusmajandus arengukavadest lugeda, et maapiirkondades on kaugküttevõrkudes soojuse allikatena kasutusel katlad, mille kütusteks on valdavalt puit, põlevkiviõli, turvas või maagaas. Kasutavatest kütustest kolm on fossiilkütused ja vaid biomassi puhul on tegemist taastuvkütusega. Samas on ka biomassi taastuvus piiratud selle taastootmisvõimega erinevalt näiteks tuule-, päikese või hüdroenergiast.

Euroopa Parlamendi ja nõukogu direktiivis 2012/27/EL on välja toodud, et energiatõhus kaugküttesüsteem kasutab vähemalt 50% heitsoojust, 50% taastuenergiat, 75% koostoodetud soojust või 50% taolise soojuse ja energia kombinatsiooni [3].

Energiatõhusasse kaugküttesüsteemi sobib eelmainitud direktiivi alusel ka soojuspumba tehnoloogia, mis kasutab väliskeskkonnas leiduvat soojuse energiat ja elektrit et toota meile kasulikku soojust energiatõhusamalt ja majanduslikult soodsamalt kui seda katlad suudavad teha. Soojuspump on energiatõhusam just tänu tema võimele kasutada ära väliskeskkonna soojust ning mida iseloomustab soojustegur (edaspidi COP), mis näitab suhet soojuspumba poolt kulutatava elektrienergia ja kasuliku soojusenergia suhet [4]. Eestis oli 2019. aastal taastuvatest allikatest toodetud elektri osakaal elektri kogutarbimises 22% [2] ja tegemist on tõusva trendiga tänu Euroopa liidu süsinikuneutraalse poliitikale.

Soojuspumba tehnoloogia sobib ka ideaalselt ühendamiseks soojussalvestitega, mis lisavad süsteemi kõrgele efektiivsusele veelgi rohkem paindlikkust ja võivad vähendada rahalisi kulusid märgatavalt [5].

Käesolev bakalaureuse töö koosneb neljast osast. Esimeses osas antakse ülevaade Eesti kaugkütte võrkudest. Teises osas antakse ülevaade soojuspumpadest, soojuspumpade erinevatest tüüpidest ja nende soojusteguritest. Töö kolmandas osas kirjeldatakse arvutamise meetodikat ja mudelit. Töö neljandas osas võrreldakse arvutatud tulemusi.

1. KAUGKÜTTEVÕRK

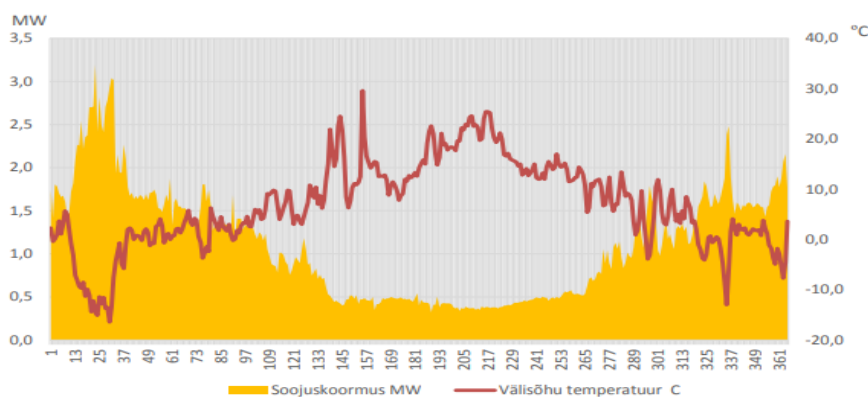
1.1 Kaugküttevõrk Eestis

Kaugküte on kesksest või tsentraalsest asukohast soojuse tootmine ning seejärel toodetud soojuse kaugküttevõrgu kaudu soojusenergiat soovivatele klientidele jagamine. Kaugkütet reguleerib Eestis kaugkütteseadus [6]. Seadusest lähtuvalt on igal kohalikul omavalitsusel ülesanne korraldada soojusmajandust ehk kehtestada kaugküttepiirkonnad ja teenuse pakkumise kord.

Selleks, et korraldada soojusmajandust peavad kohalikud omavalitsused tegema koostööd soojusettevõtetega nagu näiteks AS Utilitas Eesti, AS Fortum Tartu, Adven Grupp, OÜ Kose Vesi. Soojusettevõtja peab tagama võimalikult efektiivse, kindla, põhjendatud hinnaga, usaldusväärse ning tarbijate vajadusele ja keskkonnanõuetele vastava soojavarustuse.

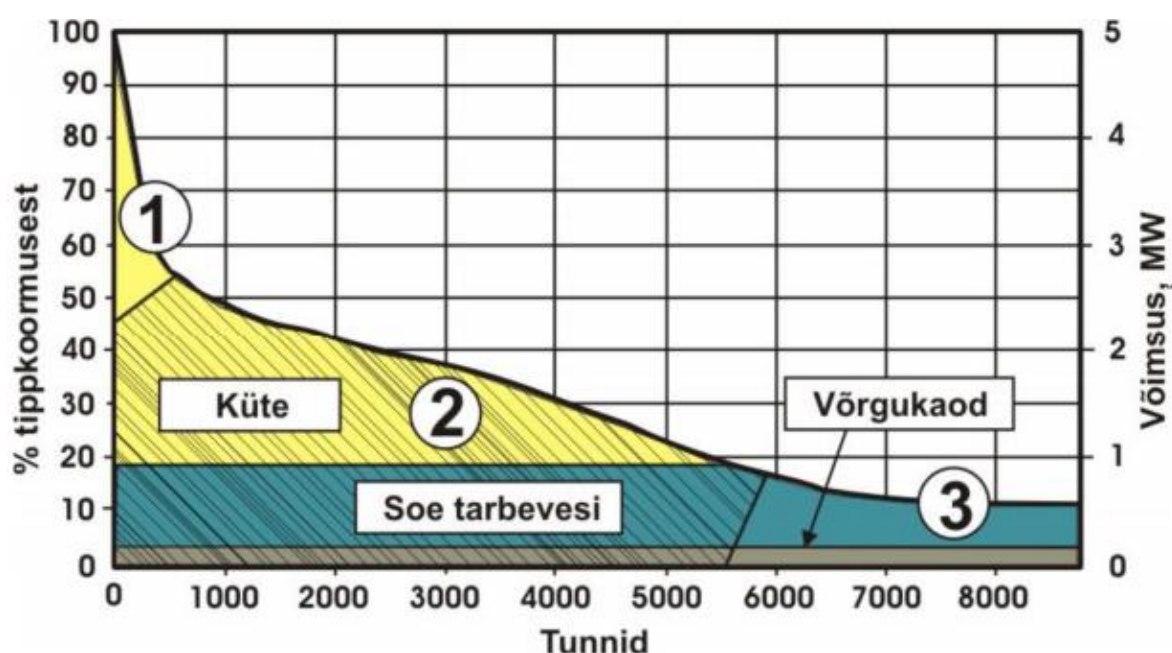
Euroopa Liidu Struktuuritoetust ehk ühtekuuluvuspoliitika fondide vahendeid eraldatakse Eestile perioodil 2021-2027 vahemikus 3,37 miljardit eurot, mille kasutamise aluseks on Euroopa Komisjon andnud igale riigile soovitusel. Lisaks on pikaajalises strateegias „Eesti 2035“ [7] käsitletud arengusihid ja vajadused, mille hulka kuuluvad ka säästliku energiatarbimise arendamine kaugkütte ja energiasalvestuse näol [8].

Soojuse nõudlus on kaugküttevõrkudes läbi aasta erinev. Seda iseloomustab koormusgraafik ning näitena on toodud Loo aleviku katlamaja 2014. aasta koormusgraafik joonisel 1 [9]. Antud joonisel on toodud iga ööpäeva soojuse tarbimise andmed ning lisaks on toodud ära ka välisõhu temperatuur. See loob väga hea ettekujutuse, kuid võrd palju on soojuse tarbimine seotud välisõhu temperatuuriga. Mida külmem on välisõhk, seda rohkem tarbitakse kaugküttevõrgus soojust.



Joonis 1. Loo aleviku katlamaja 2014. aasta koormusgraafik [9]

Soojuskoormuse kestusgraafik (joonis 2 [10]) näitab kui mitu tundi aastas kestab kindla soojusvõimsuse nõudlus soojusvõrgus. Soojuskoormuse kestusgraafikut on vaja soojusvõrgu jaoks vajalike tootmisvõimsuste määramiseks ja torustiku dimensioneerimiseks. Kaugküttes eristatakse aasta kestvusgraafikul tipukoormust, baaskoormust ja suvist soojuskoormust, mis joonisel 2 [10] märgitud vastavalt 1, 2 ja 3. Suvist soojuskoormust kaetakse eelistatult baaskoormuse katmiseks mõeldud katlaga. Esineda võib olukordi, kus vähesest soojuse tarbimisest tingituna peab kasutama tipukatelt. Tipukatla kasutamine suurendab kulutusi kuna tipukoormuse katmiseks kasutatakse eelistatult vedelkütust või gaasi kasutatavate kateltega. [10]



Joonis 2. kaugküttevõrgu koormuste kestvusgraafik [10]

1.2 Kaugküttevõrgus soojuse tootmine

Kaugküttevõrku toodetakse soojust tsentraalselt ehk ühest või paarist suuremast omavahel ühendatud katlamajast või koostootmisjaamast. Need on süsteemi soojuse allikad ning mööda kaugküttetorustikke juhitakse toodetud soojus tarbijateni, milleks võivad olla kortermajad, eramajad, büroohooned, kaubamajad jt.

Küttesüsteemi planeerimisel tuleks kindlasti teha erinevate soojusallikate võrdlus ja võrrelda nende efektiivsust lähtudes kasutatavast kütusest. Sellega määratakse ära valitud soojusallika keskkonnamõjud, rajamiseks vajalikud investeeringud, rahalised kulud kütusele ning hoolduskulud ja süsteemi mugavuse [11].

Kaugküttevõrgus saab soojust toota erinevatest energiaallikatest, mida liigitatakse [11]:

- Biomass ehk kohapealne kütus (hakkepuut, turvas, puut)
- Vedelkütus (põlevkiviõli, diisel)
- Kivisüsi
- Gaas
- Elekter (elektrivõrgust)

Eestis kõige enamlevinud kütus kaugkütte soojuse tootmiseks oli 2019. aasta novembri seisuga hakkepuut ehk biomass- mille osakaal kasutatud kütustest oli 51,5%. Sellele järgnes maagaas - 21,2% [1]. See tähendab, et suur hulk soojust toodetakse ikka veel keskkonda saastavate kütustega ning biomassi jalajälg ei ole täielikult süsinikuneutraalne tänu transpordile ning tema taastuvus on piiratud [12], [13].

1.3 Kaugküttevõrgu piirhinna määramine

Eestis on kokku 230 kaugkütte võrgupiirkonda, milles soojusenergia käibemaksuta hinnad olid 2019. aasta novembri seisuga vahemikus 35,33 €/MWh Narvas kuni 86,96 €/MWh Harkus. Aritmeetiline keskmine käibemaksuta hind oli 60,27 €/MWh. Reeglina on keskmisest suurema soojusenergia hinna põhjuseks kaugküttevõrgu halb tehniline olukord, väike tarbimistihedus ning kallite kütuste nagu maagaasi või põlevkiviõli kasutamine [1]. Vastavalt kaugkütteseadusele peab soojusettevõtja enne tarbijale soojuse müümist kooskõlastama Konkurentsiametiga soojuse piirhinna, mille kooskõlastamisel arvestatakse soojuse tootmiseks ja edastamiseks tehtud põhjendatud kulutusi ning lähtakse põhimõttest, et soojusenergia piirhind oleks kulupõhine. Soojuse hinda mõjutavad peamiselt kasutatavate kütuste hindade muutused ning tehtavad investeeringud kaugküttevõrgu ning katlamajade tehnilise olukorra parandamiseks. Gaasi hinna kõikumist illustreerib hästi järgnev joonis 3 [14]



Joonis 3. 2020. aasta jooksul maagaasi hind Eleringi andmetel [14]

2. SOOJUSPUMBAD

2.1 Soojuspumpade teooria

Soojuspump muundab õhust, veest või maapinnast võetud soojuse mehaanilise töö abil kaugküttevõrgus kasutatavaks soojuseks. Seade koosneb neljast peamisest osast: kompressorist (rõhu tõstmiseks kasutatav seade), paisventiilist (ventiil rõhu langetamiseks), kondensaatorist ja aurustist. Need põhikomponendid on ühendatud omavahel torustiku kaudu moodustades suletud süsteemi. Soojuspumpade puhul on väga oluliseks näitajaks nende soojustegur, ehk COP - (Coefficient of Performance). COP näitab soojuspumba kompressori poolt tarbitud energia ja soojuspumba poolt toodetud kasuliku soojusenergia suhet (valem 1) ehk mitu korda rohkem toodab seade soojusenergiat kui tarbib elektrienergiat [4]. Valemist järeldub, et kui soojuspumba COP on 3, siis andes 1 kW elektrienergiat, saame seadmest 3 kW soojusenergiat.

$$\text{COP} = \frac{\text{Toodetud soojusenergia, kW}}{\text{kulutatud elektrienergia, kW}} \quad (1)$$

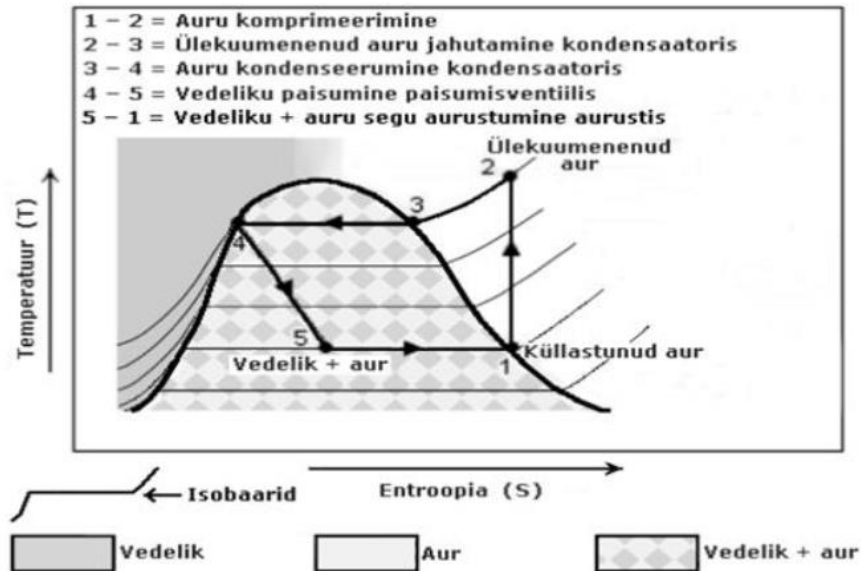
Soojuspumba süsteemis ringleb väliskeskkonna poolses suletud ringis külmaagens ehk külmaaine, mis on ühes süsteemi osas gaasilises, teises vedelas olekus (joonis 4). Kuna vedelikel sõltub keemistemperatuur rõhust, siis kasutades seda füüsikalist omadust ära kasutatakse külmaagensina väga madala keemistemperatuuriga vedelikku (tavaliselt -40°C), mis võimaldab teda kasutada ka väga madalate temperatuuriga soojusallika juures [15].



Joonis 4. Külmaaine ringlus soojuspumbas [17]

Antud ringrotsessi kirjeldab temperatuuri ja entroopia diagramm (joonis 5). Joonisel punkti 1 ja 2 kahe vahel tõstetakse temperatuuri ning küllastunud aurust saab ülekuumenenud auruks. Seejärel punkti 2 ja 3 vahel jahutakse ülekuumenenud aur kondensaatoris kuni üleküllastunud auruni, mille järel hakkab aur kondenseeruma.

Punkti 4 ja 5 vahel paisub vedelik paisumisventiilis, mis vähendab temperatuuri ja suurendab entroopiat. Punkti 5 ja 1 vahel hakkab auru ja vedeliku segu aurustis aurustuma ning temperatuuri muutumiseta entroopia kasvab.



Joonis 5. Teoreetiline ringprotsess soojuspumbale TS-diagrammil [16]

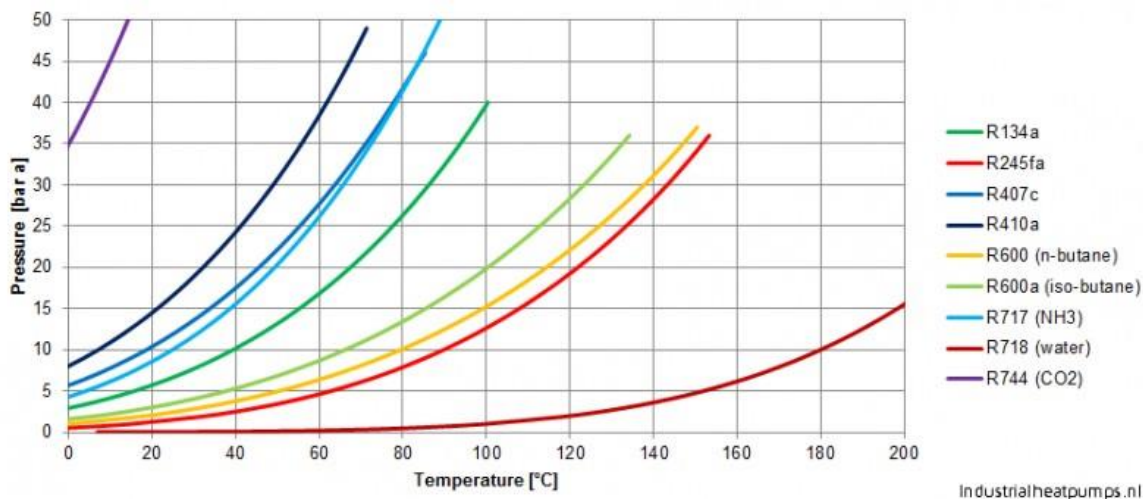
2.2 Külmaagensi valik

Külmaagensi valik on soojuspumba puhul kriitiline, kuna see määrab soojuspumba soojateguri ning nende ainete füüsikaliste omaduste erinevus tähendab erinevatele otstarvetele sobimist.

Soojuspumba külmaagensi valikul tehakse otsus järgmiste kriteeriumite järgi [17]:

- Kondensatsiooni rõhk – sama temperatuuri juures on erinevate külmaagenside kondensatsiooni rõhud erinevad. Mõningate külmaagensidele on kõrgete temperatuuride juures kondensatsioonirõhk liiga kõrge, et tavalisi kompressoreid saaks kasutada. Vastupidisel juhul, kui rõhk muutub liiga madalaks, muutub maht mida kompressor peab läbi töötama liiga suureks ja soojuspumba suurus peab selle võrra suurenema, millega kaasneb investeeringute maksumus.
- soojustegur – soojuspumba soojusteguri määrab suuresti ära külmaagensi valik.
- Kasvuhoone gaasi tugevus – valik loodusliku või sünteetilise külmaagensi vahel. Enamik sünteetilisi külmaagense (HFC-l põhinevad ehk hüdro-fluoro-kloriididel põhinevad) on kordades tugevamad kasvuhoonegaasid kui on süsinikdioksiid. Lisaks on sünteetilised külmaagensid tihti lisa turvalisuse meetmeid vajavad ained, ehk suurendavad investeeringute maksumust.

Tihedamalt kasutust leidvad külmaagensid on R134a, R245fa, R407c, R410a, R600 (n-butaan), R600a (iso-butaan), R717 (NH₃ ehk ammoniaak), R718 (vesi) ja R744 (süsinikdioksiid). Nende ainete aurustumise temperatuuri funktsioon rõhust on toodud järgneval joonisel 5:



Joonis 5. Külmaagensite aurustumise temperatuuride funktsioonid [17].

Kõige sobilikum külmaagens suurtele, tööstuslikele soojuspumpadele on R717 ehk ammoniaak. Ammoniaagil on kõrge soojustegur ning teda saab kergesti kasutada alla 80°C temperatuuride korral. Lisaks on ammoniaak naturaalne külmaagens, mis ei ole kasvuhoonegaas ning seda on väiksemates ja keskmistes külmutussüsteemides kasutatud palju. Seetõttu on tema käsitlemisega kogemust ja ohud teada. Ammoniaak on mittesüttiv ja toksiline, kuid tema tugeva lõhna tõttu on lekke leidmine kiire [17].

2.3 Soojuspumpade tüübid

Viise kuidas erinevatest keskkondadest kasulikku energiat saada on mitmeid. Tuues näitena jõgedest soojusenergia ammutamise, on olemas avatud ja suletud tsükliga soojuspumbad. Avatud tsükliga soojuspumpas võetakse näiteks jõe puhul soojemat vett otse süsteemi ning juhitakse pumpade abil soojusvahetite juurde, kus temalt külmaagens ammutab sooja ning vesi juhitakse veidi külmemana tagasi jõkke.

Soojuspumpasid liigitatakse järgnevalt:

- Tööpõhimõtte järgi (absorbtsioon soojuspumbad, aurukompressor soojuspumbad, gaasikompressor soojuspumbad, termoelektrilised soojuspumbad jt);
- Külmaagensi järgi;
- Töösükli järgi (avatud või suletud);
- Soojusallikate järgi (maapind, õhk, vesi)

Esmaseks valikukriteeriumiks on soojuspumba puhul alati soojusallikas. Soojusallika põhjal liigitatakse soojuspumpasid omakorda järgnevalt:

- Maasoojuspump;
- Õhksoojuspump;
 - Õhk – õhk – soojuspump;
 - Õhk – vesi – soojuspump;
- Veesoojuspump

Veesoojuspumpasid pole käesolevas töös arvestatud võimaliku soojuspumba variandina kuna see soojuspumba liik eeldab veekogu või rohke veetootlikkusega pinnast, mis sõltub väga tugevalt geograafiliselt asukohast ja geoloogilisest kohapealsest olukorrast.

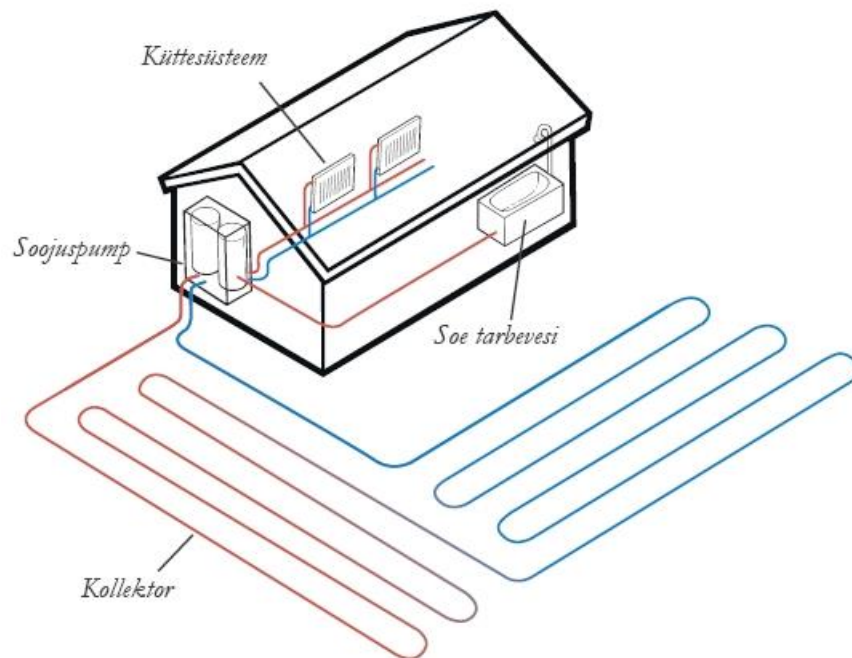
Veesoojuspumba puhul kasutatakse soojuseallikana kas põhjavett või lähedal asuvat veekogu. Veekogu olemasolu korral paigaldatakse kollektor kas avatud või suletud süsteemina veekogu põhja. Põhjavee puhul on aastaringselt temperatuur 4 – 12 °C, millest soojuspump saab puuraukude kaudu soojust ammutada. Õigesti ehitatud veesoojuspumba puhul on põhjavee reostus välistatud. Rohke veetootlikkusega pinnases on võimalik tekitada ringlus maapinnas oleva vee ja soojuspumba vahel läbi puuraukude ja sedasi soojust ammutada [18].

2.3.1 Maasoojuspump

Maasoojuspump on seade, mis utiliseerib maapinnasesse talletunud päikeseenergiat. Suvel salvestub pinnase ülemistesse kihtidesse päikeseenergia, millele lisandub maapinna lähedase õhu ja vihmavee soojusenergia. See aga ei ole ainuke viis maapinda talletunud energiat ammutada. Maasoojuspumpade alla kuulub kaks erinevat energiaallikat: maapind (horisontaalne maakollektor) ja energiakaev. Maasoojuspumba eelis on tema soojusteguri stabiilsus, väike hoolduse nõudlus ning keskkonnasõbralikkus [18].

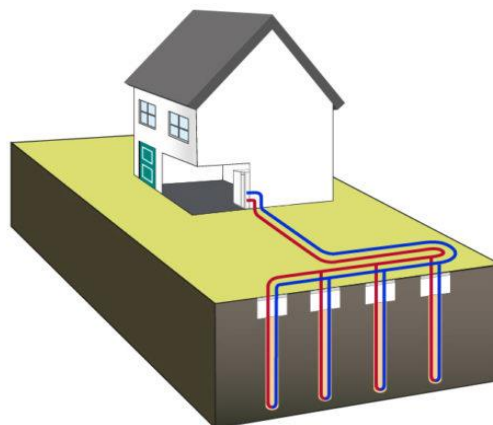
Maasoojuspump, mis kasutab horisontaalset maakollektorit on ühe kuni kahe meetri sügavusele paigaldatud plastiktorustik, mille pikkus sõltub soojuspumba võimsusest. Horisontaalset maakollektorit saab kasutada, kui on piisavalt vaba maa-ala kuhu torustikku paigutada. Linnades on raske horisontaalset kollektorit paigutada ruumipuuduse tõttu ning eelistatud on energiakaevu tüüpi kollektor. Kahe kontuuri minimaalne vahekaugus on üks meeter [18]. (joonis 6) Selles torustikus ringleb olenevalt soojuspumba tüübist kas eelnevalt mainitud külmaagens või külmaaine, mis võtab soojusallikast soojust ja annab selle soojuspumba ringlusele. Külmaaine on

madala sulamistemperatuuriga aine (nt vee-glükooli lahus) ja külmaagens on madala aurustumistemperatuuriga aine. Suurim soojuspumba tootlikkus saavutatakse niiske pinnase korral [18].



Joonis 6. Maakollektori paigutus maja näitel [19].

Maapinna aluskihtides on Maa sisemise geotermilise soojuse tõttu temperatuur suhteliselt konstantne aastaringelt. Seda kasutatakse ära maasoojuspumbas, mis kasutab energiakaevu tüüpi kollektorit ning puuritakse vertikaalsed või kaldus puuraugud, mille läbimõõt sõltub kasutatavast torustiku materjalist ja sügavus soovitatavast võimsusest, pinnase temperatuurist ning pinnase tüübist. Juhul kui energiakaevud ei täitu iseeneslikult veega, siis nad täidetakse. Energiakaevust meetri kohta saadav soojus on vähemalt kaks korda suurem võrreldes horisontaalse maakollektori paigutusega [18]. Joonisel 7 on näidatud kuidas energiakaevu tüüpi soojuspumba puhul kollektor asetseb.



Joonis 7. Energiakaevu tüüpi maakollektor [19]

2.3.2 Õhksoojuspump

Õhksoojuspumbad kasutavad välisõhus leiduvat soojusenergiat süsteemi kütmiseks. Tänu külmaagensi füüsikalistele omadustele on võimalik kasutada ka madala temperatuuriga välisõhu soojust. Õhksoojuspump on võrreldes maasoojuspumbaga odavam lahendus, kuid tema soojustegur sõltub kõvasti välisõhu temperatuurist. Talvel väga külmade ilmade korral võib soojustegur langeda ühe lähedale ning õhksoojuspump funktsioneerib sel juhul elektriküttena [20].

Õhk-õhk soojuspump ehk ka lihtsalt õhksoojuspump ammutab vajaliku energia välisõhust ning annab selle edasi süsteemis ringlevale soojuskandjale. Antud töös seda soojuspumba varianti rohkem ei käsitleta, kuna kaugkütte vajab vee soojendamist ning õhk-õhk tüüpi soojuspump seda ei võimalda.

Õhk-vesi soojuspump kasutab sarnaselt õhk-õhk tüüpi soojuspumbale välisõhku soojusallikana, kuid erinevalt eelnevast, soojendab antud soojuspump vett. Selle tüüpi soojuspumba eelis on lihtne paigaldus, sest puudub maakollektori paigaldamise vajadus, erinevalt maasoojuspumbast. Lisaks võimaldab õhk-vesi soojuspump ka jahutamise režiimi. Sarnaselt aga õhk-õhk soojuspumbale, vajab talvekuudel õhk-vesi soojuspump lisakütteallikat, eriti kui on tegemist suure nõudlusega. Õhk-vesi tüüpi soojuspumba puhul avaldab õhu temperatuur väga suurt rolli soojustegurile ning seetõttu on ta ebastabiilsem kui maasoojuspump. Lisaks Eesti kliimaoludes jääb soojustegur soovitusel madalamaks just siis kui seda kõige rohkem vaja oleks, ehk talvekuudel.

Õhk-vesi soojuspumba tugevuseks on see, et traditsioonilisi katlaid saab väga väikese vaevaga asendada õhk-vesi soojuspumbaga, sest ta sobitub hästi väikeste kaugkütte süsteemidega [21].

3. ARVUTAMISE METOODIKA

3.1 Algandmete valik ja töötlemine

Algandmed maapiirkondades olevate kaugküttevõrkude kohta on leitud kohalike omavalitsuste soojusmajanduse arengukavadest. Soojusmajanduse arengukavades on seaduses sätestatud nõuete kohaselt käsitletud järgmised teemad [22]: võrgupiirkonna arenguperspektiivid, piirkonna iseloomustus, pikaajalised eesmärgid, mille raames käsitletakse ka soojusmajanduse juhtimist kohaliku omavalitsuse tasandil, katlamajade, kaugküttevõrkude ja soojussõlmede tehniline seisund ja iseloomulikud näitajad, soojustarbijad koos nende hetkeolukorra ja tuleviku perspektiiviga, soojuse hind ja tarbijate maksevõime, soojusvarustuse arengu võimalused, soojusvarustuse võimaluste pikaajaline majanduslik tasuvus ning soovituslik tegevuskava.

Kuna töö keskendub maapiirkondade kaugküttevõrkudele, siis välistasin kõik kaugküttevõrgud, mille tarbimine ületas 15 GWh. Sellele kriteeriumile tegin kaks erandit Keila ja Laagri kaugküttevõrgu näol, et näidata kuidas mõjutab suurem tarbimise maht ja kõrgem pealevoolu temperatuur lõpphinda. Seejärel välistasin kaugküttevõrgud, kus soojuse tootmiseks kasutatav katel on renoveeritud 2006 või hiljem, sest nendes võrkudes on seadmed veel heas korras ning täiendavate investeeringute järele ei ole hetkel vajadust. Selle kriteeriumi juures on puuduseks soojusmajanduse arengukavade ebaühtlus ning kasutatava soojusallika vanuse puudumine vastavas arengukavas.

Seejärel võtsin lõplikku valikusse ka need kaugküttevõrgud mille katel või katlad töötavad fossiilsetel kütustel nagu maagaas, põlevkiviõli ja turvas. Lõplik kaugküttevõrkude valim on toodud Lisas 1.

Seejärel jagasin antud valimi normaalaasta soojustarbimise põhjal viite gruppi. Gruppidesse jaotasin tabelis 1 toodud vahemike alusel. Selline jaotus valimist grupeerib samas suurusjärgus olevad kaugküttevõrgud ning on võimalik grupi keskmise tarbimise põhjal koostada soojuskoormuse graafikud.

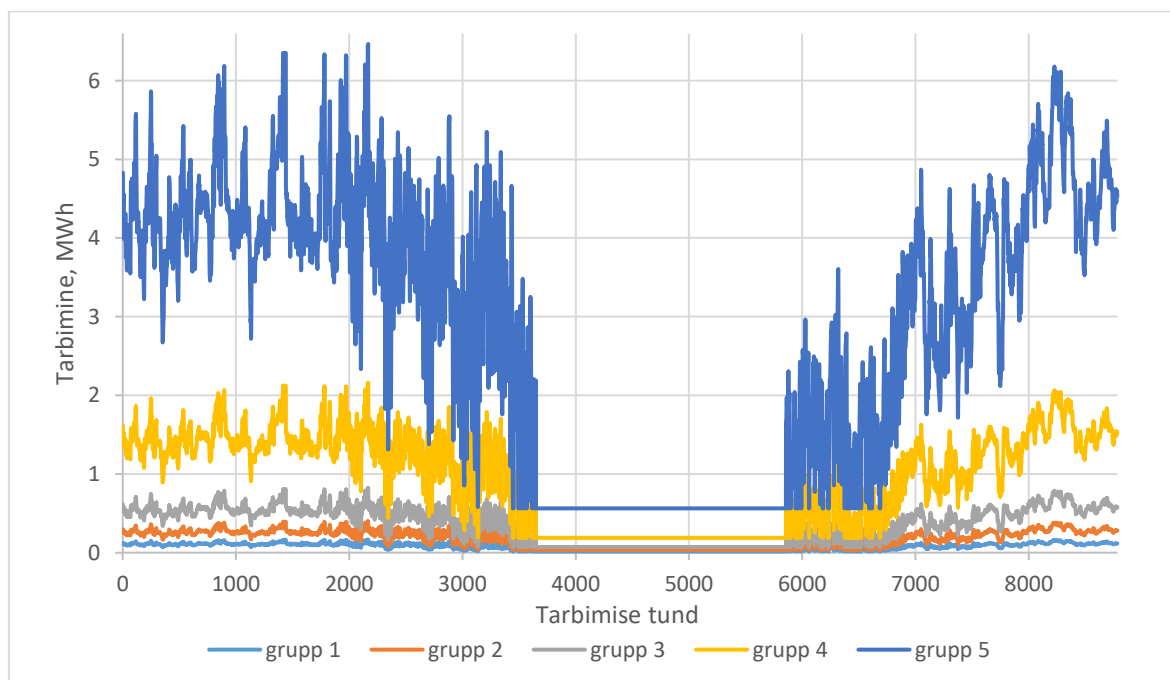
Ainuke erandlik grupp on 5. grupp, kuhu kuulub ainult kaks kaugküttevõrku – Keila ja Laagri. Nende kahe tarbimine on võrreldes teistega palju suurem, kuid annavad hea võrdluspunkti suurematest kaugküttevõrkudest.

Tabel 1. Soojustarbimise grupid

grupp	Aastane soojustarbimine ,MWh	Grupi keskmine aastane soojustarbimine, MWh
1.	<1000	633,9
2.	1000 - 2000	1521,7
3.	2001 - 4500	3135,1
4.	4501 - 10000	8237,3
5.	>10000	24650,0

3.2 Sojuskoormuse graafikud

Kasutades sisendiks tabelis 1 toodud gruppide keskmisi aastaseid soojustarbimisi, koostasime gruppidele koormusgraafikud (joonis 7) kasutades EnergyPro tarkvara koormusgraafiku simuleerimiseks. EnergyPro programm kasutab asukohapõhiseid andmeid ning valitud aasta (2020) välisõhu temperatuuride andmeid.



Joonis 7. Gruppide simuleeritud koormusgraafikud

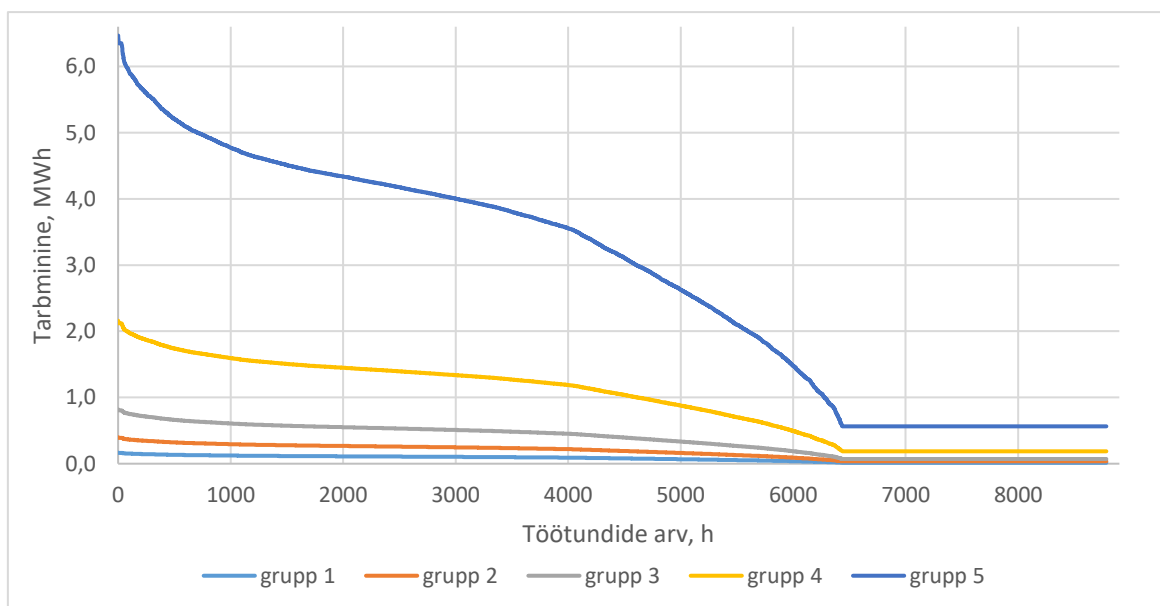
Nagu jooniselt on näha, on simuleeritud graafikutel suvine sojuskoormus väga madal või olematu. Suurema soojustarbimisega gruppide korral nagu grupp 4 ja 5, varustatakse kaugküttevõrgus tarbijaid teatud mahus sooja veega.

Antud töös on uurimise all kogu tootmise asendamine ühe sojuspumbaga. Seetõttu on vaja leida tiputarbimine, et tagada ka maksimaalsel koormusel sojusvarustus. Seda on kõige lihtsam teha kestvusgraafiku alusel, nagu on peatükkis 1.1 joonisel 2 toodud näites. Seetõttu koostasime koormusgraafikute alusel igale grupile

kestvusgraafiku (joonis 8) ning sain sellest tipukoormused. Tipukoormused on ära toodud tabelis 2.

Tabel 2. Gruppide tipukoormused

grupp	maksimaalne koormus , kWh
1	167
2	400
3	823
4	2161
5	6467



Joonis 8. gruppide kestvusgraafikud

3.3 Maapinna temperatuuri arvutamine

Horisontaalse maakollektoriga maasoojuspumba soojusteguri arvutamisel on tarvis teada maapinna temperatuuri sellel sügavusel kuhu paigaldatakse horisontaalne maakollektor. Peatükis 2.3.1 on välja toodud, et maakollektor paigaldatakse ühe ja kahe meetri vahele. Antud töös on valitud minimaalne pinnase sügavus ning seetõttu on arvatud maapinna sügavus ühe meetri sügavusel.

Maapinna temperatuuri (°C) arvutamiseks ühe meetri sügavusel, kasutasin Rankinen *et al.* 2004 [23] maapinna temperatuuri arvutamise mudelit (2) [23]:

$$T_Z^{t+1} = T_*^{t+1} e^{-f_s D_s} \quad (2)$$

Kus

T_Z^{t+1} on otsitav pinnase temperatuur ($^{\circ}\text{C}$) sügavusel Z_s (m) (antud töös 1 meeter) ajahetkel $t+1$ (s);

T_*^{t+1} on esialgne pinnase temperatuur sügavusel Z_s , mis ei arvesta lumikatte parandustegurit ($^{\circ}\text{C}$);

$e^{-f_s D_s}$ on lumikattest tingitud empiiriline parandustegur;

f_s on empiiriline lumikattest tingitud soojusjuhtivust pidav tegur, mis antud töös on Rankinen *et al.* Jokioineni mõõtepunkti 1201 järgi võetud $-7,10$ (m^{-1}) [23];

D_s on lume paksus (m).

Esialgne pinnase temperatuur sügavusel Z arvutatakse (3) [23]:

$$T_*^{t+1} = T_Z^t + \frac{\Delta t K_T}{C_A (2Z_s)^2} [T_{AIR}^t - T_Z^t] \quad (3)$$

Kus

T_Z^t on eelmise päeva pinnase temperatuur sügavusel Z_s ($^{\circ}\text{C}$);

Δt on ajavahemiku t (s) ja $t+1$ vahel, mis antud töös on 3600 sekundit ehk 1 tund;

K_T on pinnase soojusjuhtivustegur mis antud töös on Rankinen *et al.* Jokioineni mõõtepunkti 1201 järgi võetud $0,61$ ($\text{W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) [23];

C_A on pinnase soojusmahtuvus, millest antud töös on vee tahkestumise ja jää sulamise sulamissoojus välja jäetud, kuna antud sügavusel ei jäätu maapind täielikult. Väärtus on antud töös võetud Rankinen *et al.* Jokioineni mõõtepunkti 1201 järgi võetud $1,3 * 10^6$ ($\text{J m}^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) [23];

T_{AIR}^t on õhu temperatuur ajahetkel t ($^{\circ}\text{C}$).

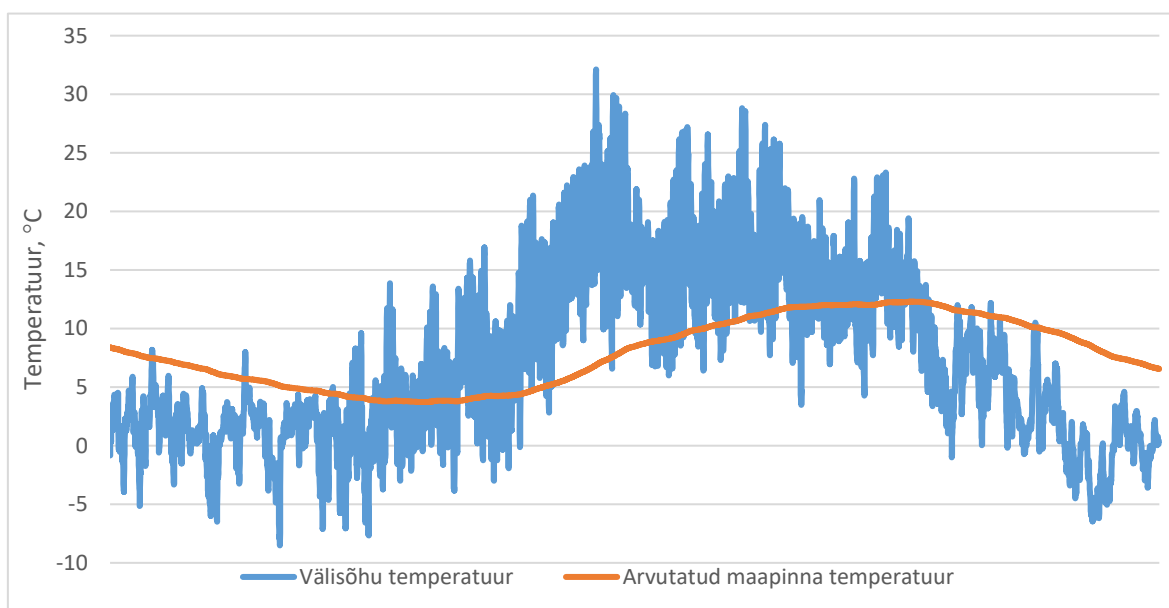
Antud mudel nõuab kolme füüsikalist parameetrit – keskmist pinnase soojusjuhtivust, pinnase soojusmahtuvust ning empiirilist lume parameetrit. Need parameetrid on võetud Jokioineni mõõtepunkti 1201 järgi, kuna selles punktis asuvad kambriumi ajastu pinnase horisondid [24], mis sarnaneb kõige rohkem Eesti keskmisele [25] ning on mõõtepunktidest geograafiliselt kõige lähem Eestile. Sisendiks vajab mudel iga tunni õhu temperatuuri ning lume paksust. 2020. aasta igatunnised õhu temperatuurid on võetud EnergyPro programmist, kuna see kasutab lokaalseid andmeid arvutuste tegemiseks. Lume paksus erineb piirkonniti oluliselt ning kasutatud on ilmteenistuse

artikli andmeid [26], mis toob välja Eesti lumekatte keskmise paksuse kuude lõikes põllu- ja metsa marsruutvaatluste 1992.-2006. aasta andmetel.

Et vältida kogu pinnase profiili arvutamist teeb mudel lihtsustusi ning ei arvesta soojusjuhtivust allpool soovitud pinnase sügavust Z_S ning võrdsustab pinnase pealmise kihi temperatuuri õhu temperatuuriga. See aga lihtsustab mudelit märgatavalt ning mudeli arvutamine toimub kolme sammuliselt [23]:

1. Anda esialgne pinnase temperatuur T_Z^t sügavusel Z_S ajal $t=0$.
2. Arvutada temperatuur T_*^{t+1} valemist (3) kasutades õhu temperatuuri T_{AIR}^t ja teada olevat pinnase temperatuuri T_Z^t (kas antud väärtusest või arvutatud väärtusest).
3. Arvutada uus pinnase temperatuur T_Z^{t+1} sügavusel Z_S ajale $t+1$.

Kasutades kirjeldatud mudelit ning andes iga järgneva tulemuse algpunktiks eelneva maapinna temperatuuri sügavusel 1 m, saame esialgseks pinnase temperatuuriks 8,39 °C. Selle põhjal saab joonistada graafiku, mis on toodud joonises 9 ning millele on toodud ka igatunnine õhu temperatuur. Jooniselt on näha, et maapinna temperatuur liigub nihkes võrreldes õhu temperatuuriga ning selle muutumine võtab kauem aega.

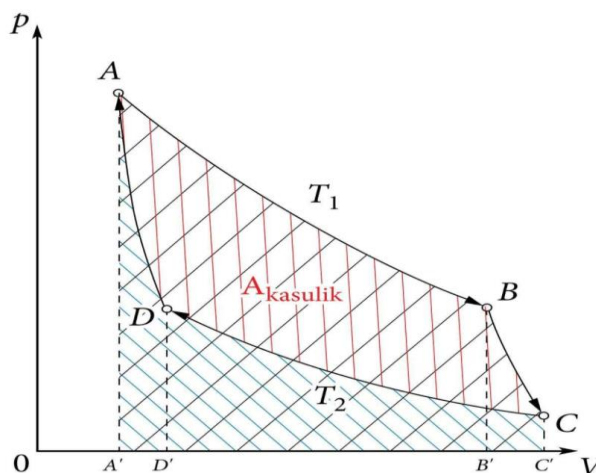


Joonis 9. 2020. aasta arvutuslik maapinna temperatuur

3.4 Soojusteguri arvutamine

Soojustegur ehk COP on soojuspumpade puhul kriitiliselt tähtis parameeter, mis näitab kui mitu ühikut soojusenergiat suudab soojuspump toota ühest ühikust tarbitavast elektrienergiast. Teoreetilise maksimaalse soojusteguri arvutamiseks kasutatakse

prantsuse füüsiku Nicolas Léonard Sadi Carnot matemaatilist mudelit, kus soojustegur sõltub ainult temperatuuride vahest. Antud protsessi kirjeldab joonis 10 [27], kus $T_1 > T_2$. Punktist A punktini B paisub gaas isotermiliselt ja soojeneb. Punktist B punktini C paisub gaas adiabaatiliselt (gaasi siseenergia ei muutu) ja jahtub. Seejärel surutakse gaasi kokku isotermiliselt punktist C punktini D ning gaas annab soojust ära. Punktist D punktini A surutakse gaasi kokku adiabaatiliselt ning gaasi temperatuur tõuseb. Sellest protsessist järeldub, et mida suurem on temperatuuride vahe soojusallika ja soojendatava vee vahel, seda kõrgem on soojustegur. Joonis 10 kirjeldab klassikalist soojusmasinat. Soojuspump on klassikalise soojusmasina pöördprotsess, kus temperatuuride vahe vähenedes suureneb soojustegur.



Joonis 10. Klassikaline Carnot' tsükkel P-V diagrammil [28]

Soojuspumba maksimaalse teoreetilise soojusteguri saab arvutada sellest tulenevalt valemiga (4) [28]. Erinevalt Carnot' tsüklile, kus temperatuuride vahe suurenedes kasutegur suureneb, suureneb COP väärtus mida väiksem on temperatuuride vahe, sest sellisel juhul peab soojuspump vähem tööd tegema, et soojusallikast soojust toota.

$$COP_{Carnot} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \quad (4)$$

Kus

T_1 on pealevoolu temperatuur ehk soojendatava vee saavutatav temperatuur (K);

T_2 on soojusallika temperatuur (K).

Reaalsuses ei ole võimalik sellist soojustegurit saavutada, sest soojusülekanne ei ole ideaalne, isolatsioon ei ole ideaalne, süsteemis esinevad kaod, soojusülekanne võtab aega ja paljud muud tegurid, mis vähendavad soojustegurit. Seetõttu on kasutusele võetud Carnot' efektiivsustegur ε_{Carnot} , mis seob tegeliku soojusteguri ja teoreetilise soojusteguri COP_{Carnot} (valem 5) [28]. Carnot' efektiivsustegur erineb soojuspumpade

lõikes, kuid üldiselt suurte tööstuslike soojuspumpade puhul on see vahemikus 0,5 kuni 0,7 [28].

$$\varepsilon_{Carnot} = \frac{COP_{tegelik}}{COP_{Carnot}} \quad (5)$$

Soojusteguri arvutamisel kasutasin valemeid (4) ja (5) võttes pealevoolu temperatuuriks iga grupi keskmise pealevoolu temperatuuri vastavalt soojusmajanduse arengukavades toodud andmetele (tabel 3). Arvutasin igale grupile iga tunni õhu- ja maapinna temperatuuride alusel õhksoojuspumba ja maasoojuspumba soojusteguri. Tulemused on toodud Lisas 2. Lisas toodud tulemustest on näha, et õhksoojuspumpade puhul on soojustegur väga hüppeline ning madalate välisõhu temperatuuride korral, siis kui kõige rohkem on soojustarbimist, on õhksoojuspumpade soojustegur madalam kui maasoojuspumpadel samal perioodil. Maasoojuspumpade puhul tuleb välja ka nende suhteline stabiilsus aastaringelt, kus soojusteguri kõikumine jääb alla ühe ühiku.

Tabel 3. gruppide pealevoolu temperatuurid

grupp	keskmise pealevoolu temperatuur, °C
1.	84,5
2.	80,8
3.	77,8
4.	72,5
5.	105,0

3.5 Majanduslik arvutus

Majandusliku võrdluse aluseks on võetud soojuse tarbijahind. Soojuse piirhinna arvutamise meetodikana on kasutatud Konkurentsiameti soojuse piirhinna kooskõlastamise põhimõtete meetodikat [29]. Punktis 3.1 meetodika põhjal valitud kaugküttevõrkude mediaan soojuse hind on 59,51 EUR/MWh käibemaksuta. Selle põhjal jagasin valimi kaheks – odavama tarbijahinnaga grupid ja kallima tarbijahinnaga grupid ning arvutasin omakorda nende mediaanhinnad. Tulemused on toodud tabelis 4. Selline hindade jaotus annab võrdluspunktid majandusliku tasuvuse hindamiseks.

Tabel 4. Hetkel olevad soojuse hinnad

	soojuse hind EUR/MWh
Odavama tarbijahinnaga gruppide mediaanhind	54,51
Üldine Mediaan hind	59,51
Kallima tarbijahinnaga gruppide mediaanhind	68,32

Soojuse piirhinda arvutatakse Konkurentsiameti metoodika järgi (valemid 6, 7 ja 8).
Soojuse müügitulu võrdub antud töös grupi keskmise tarbimisega.

$$h = \frac{T_{lubatud}}{Q} \quad (6)$$

kus

h on soojuse piirhind (EUR/MWh);

Q on soojuse müügitulu regulatsiooniperioodil ehk aasta jooksul (MWh);

$T_{lubatud}$ on lubatud müügitulu (EUR/MWh);

$$T_{lubatud} = MK + TK + A + PT \quad (7)$$

Kus

MK on muutuvkulud ehk kulud, mis muutuvad soojuse tootmismahu muutudes (EUR/MWh);

TK on tegevuskulud ehk soojuse hinda lülitatavad põhjendatud kulud, mis ei sisalda muutuv-, kapitali- ja finantskulusid (EUR/MWh);

A on kapitalikulu ehk soojuse hinda lülitatav kulu, mis on seotud põhivara soetamisega (EUR/MWh);

PT on põhjendatud tulukus (EUR/MWh);

$$PT = WACC * RV \quad (8)$$

Kus

$WACC$ on kaalutud keskmise kapitali hind, mis hetkel on 5,76% soojuse tootjatele [30];

RV on reguleeritav vara (EUR/MWh).

Muutuvkulud võib jagada kaheks: kütuse ehk elektri kulud ja muud hoolduse ja käiduga seonduvad kulud. Elektri kulude arvestamiseks kasutan peatükis 3.4 arvatud soojustegureid, gruppide koormusgraafikuid (joonis 7) ja elektri turuhinda, et arvutada iga tunni soojuse tootmiseks kuluvat elektri hinda. Elektri igatunnised hinnad on võetud Eleringi kodulehelt, kus on Nordpooli elektrituru andmed [31]. Rahaline kulu elektrile on arvatud igal tunnil 2017-2020 aasta elektrihinnaga ning seejärel saadud tulemustest

on võetud aritmeetiline keskmine. Alandmete aasta keskmise hinna elektri hinnad on toodud tabelis 5. Hoolduse ja käiduga seonduvate kulude hindamiseks kasutasin Euroopa komisjoni poolt tellitud uurimust [32], kus on hinnatud kulu suurusjärguks 14 €/kW_{th} ehk installeeritud võimsuse kohta.

Tabel 5. Elektri aasta keskmised hinnad [31]

aasta	Keskmine hind, EUR/MWh
2017	33,20
2018	47,06
2019	45,85
2020	33,65
keskmine	39,97

Tegevuskulude alla käivad kanalisatsiooni ja vee kulud, hoonete valgustusele ja kaugküttevõrgu pumbale kuluv elekter, tööjõukulud ja muud taolised kulud. Erinevate soojusmajandusarengukavade põhjal on tegevuskulude suurus keskmiselt 17,64 EUR/MWh.

Kapitalikulu ehk investeeringute maht on võetud IRENA ehk rahvusvahelise taastuvenergia agentuuri raportist [33]. Installatsiooni kulude suhe soojuspumba maksumusega on maasoojuspumba puhul 55:45 [34] ning see kuulub samuti kapitalikulu alla. Installatsioonikulude alla kuuluvad soojusallikaga seotud tööd, elektriga seotud tööd, ehitusega seotud tööd ja konsulteerimistasud [35]. Õhksoojuspumba puhul on suhe sarnane, kuid komponentide osakaal on erinev 52:48 [35]. Soojuspumba eluiga on eeldatavalt 20 aastat [32], mistõttu on algkapitali kulud jagatud 20 aasta peale. Kapitalikulust soetatud vara on korrutatud kaalutud keskmise kapitali hinnaga (WACC) valemi 8 põhjal, et leida põhjendatud tulukus.

Kasutades väljaarvutatud kulusid valemities 6 ja 7, saan arvutada soojuse piirhinna h iga MWh kohta.

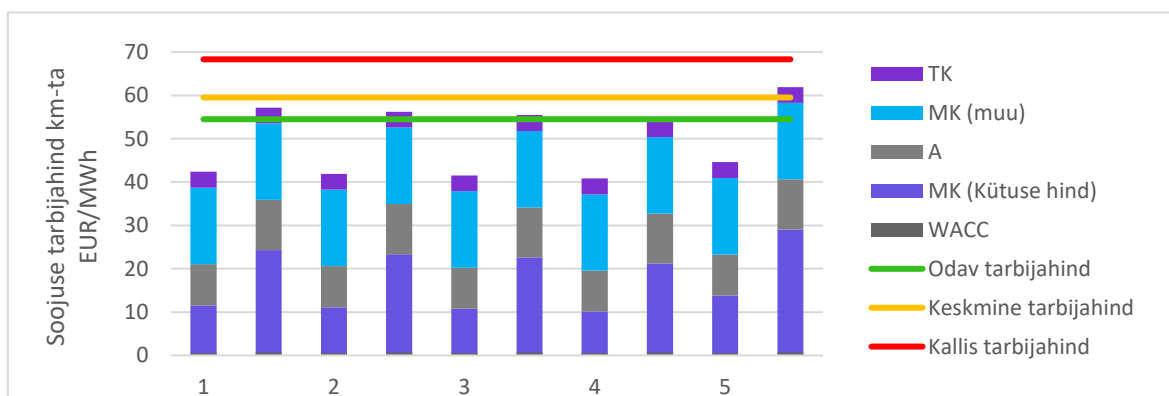
4. TULEMUSTE ANALÜÜS

4.1 Tarbijahind

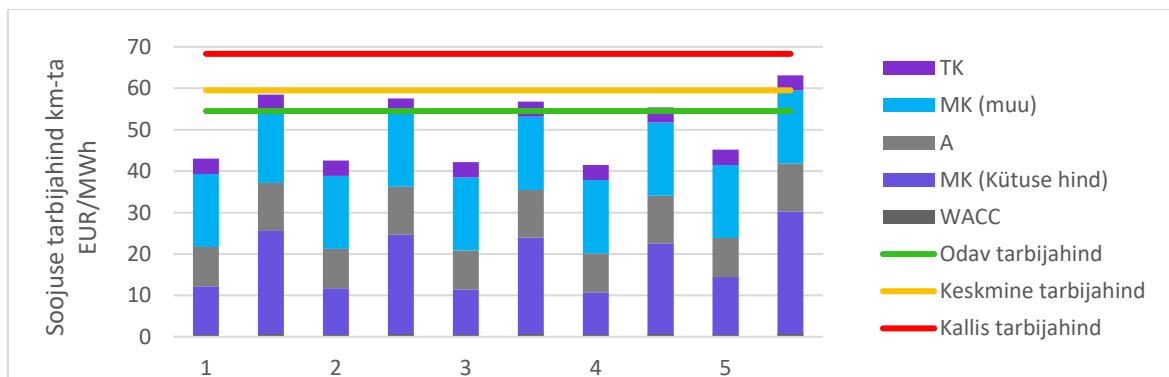
Tulenevalt hindade kõikumisest elektribörsil, ehituse maksumuse sõltuvusest asukohast ja kohaspetsiifikast, soetatava soojuspumba soojustegurist ning välistemperatuuri ettearvamast kõikumisest on antud töös võimalike hinnakõikumiste mõjude ulatuse hindamiseks koostatud maksimaalse tarbijahinna ja minimaalse tarbijahinna stsenaarium igale tabelis 1 toodud kriteeriumi alusel loodud grupile, mis on seletatud tabelis 6. Antud tabelis on stsenaariumid toodud joonistel 11 ja 12 esinemise järjekorras vasakult paremale.

Tabel 6. Hinna stsenaariumid

Hinna stsenaarium	Stsenaariumi kirjeldus
1	Elektri keskmine hind 20% 2017-2020 keskmisest odavam, Kapitalikulu 10% keskmisest odavam, $\epsilon_{Carnot} = 0,7$
2	Elektri keskmine hind 20% 2017-2020 keskmisest kallim, Kapitalikulu 10% keskmisest kallim, $\epsilon_{Carnot} = 0,5$



Joonis 11. Maasoojuspumba km-ta tarbijahinna komponendid



Joonis 12. Õhksoojuspumba km-ta tarbijahinna komponendid

Joonistel 11 ja 12 on toodud hinnavõrdluseks tabelis 4 toodud soojuste käibemaksuta tarbijahinnad. Joonistelt on näha, et odava hinnastsenaariumi korral jääb tarbijahind alla odava käibemaksuta tarbijahinna, milleks on 54,51 eurot. Vaid 5. grupi maksimaalse hinnastsenaariumi puhul on tarbijahind üle keskmise tarbijahinna, kus kõrge pealevoolu temperatuur tõstab kütuse kulu oluliselt.

Tulemuste põhjal saab järeldada, et soojuspumba paigutamine oleks tarbijale hinnavõit nii majanduslikult kui keskkonnaalaselt, kuna soojuspumbad saavad taastuvenergiast toodetud elektrit kasutada kütusena soojuste tootmiseks. Antud tulemuste põhjal on soojuspump ka ilma toetusteta hea alternatiiv teistele soojusallikatele kaugküttevõrgus. Maksimaalne ja minimaalne hind ja hinnavahe on toodud iga grupi jaoks tabelis 7, kust on näha, et erinevate hinnakriteeriumite mõju tarbijahinnale on suur.

Tabel 7. Maksimaalne ja minimaalne tarbijahind ja selle hinnavahe keskmise käibemaksuta tarbijahinnaga

Grupp	Maksimaalne hind maasoojuspump km-ta (EUR/MWh)	Hinnavahe Eesti keskmise km-ta tarbijahinnaga (EUR/MWh)	Minimaalne hind maasoojuspump km-ta (EUR/MWh)	Hinnavahe Eesti keskmise km-ta tarbijahinnaga (EUR/MWh)
1	57,87	1,64	42,93 €	16,58
2	56,91	2,60	42,45 €	17,06
3	56,14	3,37	42,08 €	17,43
4	54,74	4,77	41,41 €	18,10
5	62,59	-3,08	45,15 €	14,36
Grupp	Maksimaalne hind õhksoojuspump km-ta (EUR/MWh)	Hinnavahe Eesti keskmise km-ta tarbijahinnaga (EUR/MWh)	Minimaalne hind õhksoojuspump km-ta (EUR/MWh)	Hinnavahe Eesti keskmise km-ta tarbijahinnaga (EUR/MWh)
1	59,16	0,35	43,54	15,97
2	58,21	1,30	43,08	16,43
3	57,45	2,06	42,71	16,80
4	56,07	3,44	42,04	17,47
5	63,81	-4,30	45,72	13,79

Tabelis 6 kirjeldatud kriteeriumid on valitud lähtudes reaalsest kõikumistest turgudel. Elektri keskmise hinna kõikumine - 20%, on valitud Eleringi [31] andmetest lähtuvalt 2017-2020 aasta keskmisi võrreldes. Tabelis 5 toodud keskmine elektri hind 2017-2020 perioodil oli käibemaksuta 39,97 EUR/MWh. Kõige odavam oli elekter 2017. aastal, mil

keskmise käibemaksuta hind oli 33,23 EUR/MWh, mis on 17% odavam kui nelja aasta keskmine hind. Kõige kallim oli elekter 2018. aastal, mil keskmine käibemaksuta hind oli 47,11 EUR/MWh, mis on 18% kallim kui nelja aasta keskmine hind. Stsenaariumites on eelneva põhjal kütuse hinnateguriks valitud üles ümardatult 20% kõikumine. Lõpphinna arvutamisel on käibemaks sisse arvatud. Peatükis 3.4 toodud Carnot' efektiivsusteguri vahemik on võetud aluseks viimaseks hinda mõjutavaks kriteeriumiks.

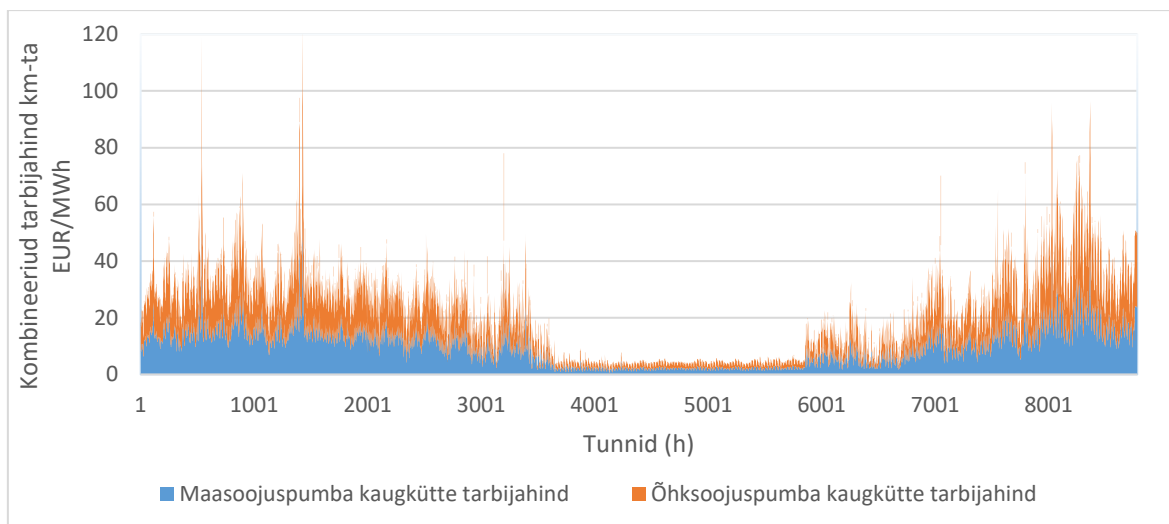
Kapitalikulu kõikumine 10% on valitud IRENA raporti [33] järgi, kus on toodud konkreetsete soojuspumpade hinnad dollarites, kuid inflatsiooni arvestades on konverteeritud eurodeks. (tabel 8). Et arvestada soojuspumba maksumuse erinevustega on valitud kõikumiste ulatuseks 10%, sest see vahemik katab suurima hulga soojuspumpade maksumusi. Raportis on toodud ka soojuspumpade maksumus, mille soojuslik võimsus ületab 250 kW soojuspumpade maksumused, kuid andmete ebapiisavuse tõttu on suuremate soojuspumpade kapitalikulu arvutamiseks on kasutatud 100-250 kW vahemikus oleva soojuspumba keskmist maksumust.

Tabel 8. Soojuspumba hinnanguline maksumus

Soojuspumba võimsus, kW	Maksumus EUR/kW
0-50	1 847
50-100	694
100-250	360

Tabelist on näha, et suurema tarbimise korral on mõju tarbijahinnale suurem kui väiksema tarbimise korral. Grupp 5 erineb teistest gruppidest oma kõrge keskmise pealevoolu temperatuuri puhul (tabel 3), mis tõstab Carnot' tsüklist lähtuvalt alandab soojustegurit ning väljendub tarbijale kallimas lõpphinnas. Sellest järeldub, et soojuspumpadel töötava kaugküttevõrgu suurema efektiivsuse tagamiseks on arengud madalatemperatuurilise kaugküttevõrgu poole üliolulised. Kuna vanade majade renoveerimisel ja uute projekteerimisel pööratakse tähelepanu soojuskadude vähendamisele, siis on antud ettepanek mõistlik.

Joonistelt 11 ja 12 on näha, et õhksoojuspumpade ja maasoojuspumpade vahel ei ole lõpphinna kujunemisel soojuspumba tüüp tähtis, sest sääst kütuse hinnas maasoojuspumba puhul tasakaalustub õhksoojuspumba odavama kapitalikulude tõttu. Hinnavahet kütuse hinnas iseloomustab joonis 13, kus on näha, et õhksoojuspumba puhul on väga ettearvamatu ja hüplik hind ning just suurema nõudlusega kütteperioodil, mis tõstab keskmist kütuse hinda tarbija jaoks. Seetõttu varustuskindluse mõttes on kaugküttevõrgule eelistatum soojuspumba tüüp maasoojuspump.



Joonis 13. Kombineeritud kaugkütte tarbijahind

4.2 Mõju elektrisüsteemile

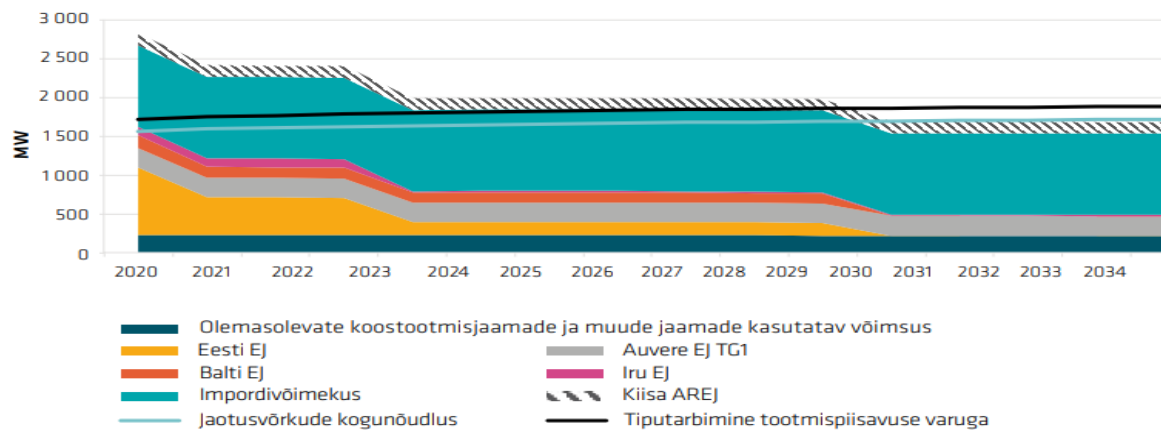
Kui kõik töös käsitletud kaugküttevõrgud vahetaksid oma kaugküttevõrgu soojusallika katlalt soojuspumba vastu, siis suureneks talvel kõige suuremate tarbimiskoormuste ajal elektritarbimine 47,9 MW, mis suurendaks Eesti maksimaalsest tarbimist 3,02%. Eesti maksimaalse tarbimismaksimumi rekord oli 2010. aastal 1587 MW [36] erakordselt külma talve tõttu. Eleringi 2020. aasta varustuskindluse aruande põhjal suureneb Eesti maksimaalne tarbimine 2035. aastaks 1717 MW 10% kõikumisega, ehk maksimaalne prognoositav tiputarbimine on 1827 MW [37]. See tähendab, et 50 MW lisa koormust elektrivõrgule soojuse tootmisest oleks arvestatav, kuid mitte kõige rohkem mõju avaldav liige. 2020. aastal oli tipukoormuse katmiseks kindlat ja kasutatavat tootmisvõimsust 1. jaanuar 2020. seisuga 1779 MW ning installeeritud netovõimsusust ehk võimsused mis ei ole kindlad nagu taastuvenergia allikad ja tootmisest väljas, kuid taaskäivitatavad võimsused nagu Eesti elektrijaama blokid, on 3041 MW [37]. Elektrivõrku ühendatud tootmiseseadmete ülevaade on toodud Tabelis 9. Mikro- ja väiketootjad alla 15 kW võimsusega on tabeli mahtu arvestatud koos teiste elektrijaamadega vastavalt elektrijaama tüübile.

Tabel 9. Eesti elektrisüsteemiga ühendatud tootmisseedmed 2020. aastal [37]

Elektrijaam	Installeeritud netovõimsus, MW	Võimalik tootmisvõimsus, MW
Eesti elektrijaam	1355	867
Balti elektrijaam	322	165
Auvere elektrijaam	272	250
Iru elektrijaam	111	111
Kiisa avariireservielektrijaam	250	150
Põhja SEJ	78	78
Sillamäe SEJ	16	8
Tallinna elektrijaam	39	39
Tartu elektrijaam	22	22
Pärnu elektrijaam	20,5	20,5
Enefit	10	4
Muud tööstuste ja koostootmisjaamad	80	60
Hüdroelektrijaamad	8,4	4
Tuuleelektrijaamad	329	0
Päikseseelektrijaamad	128	0
Summa	3041	1779

Tootmisvõimsuse prognoosi kohaselt ei kata Eesti aastal 2035 tarbmist ka impordi võimekusega ehk tekib kerge defitsiit (joonis 14 [37]), mille katmiseks on kaalutlusel energiasalvestustehnoloogiad nagu gravitasioonipõhine energiasalvesti ja pump-hüdroelektrijaam, vesiniku tootmine energia salvestmise eesmärgil ja tarbimise juhtimine [37]. Soojuspump on sobitub antud variantidest tarbimise juhtimisse, kuna soojuse tootmisel on suurem inerts ning mõne minutiline tootmise lõpetamist ei märka tarbija ning kombineerituna soojussalvestus tehnoloogiatega, võib soojuspumpadest saada hea tarbimise juhtimise tööriist elektrivõrgu operaatoritele. Antud teema vajab rohkem uuringuid.

Tootmise suurendamises on kõige rohkem potentsiaali riikidevahelisel merevõrgul, kuhu saaks ühendada suurel määral tuuleenergiaal töötavaid elektritootmiseadmeid [37].



Joonis 14. Kasutatav tootmisvõimsus, impordivõimekus ja tipunõudluse eeldatav prognoos talvel [37]

KOKKUVÕTE

Käesolevas bakalaureusetöös on hinnatud soojuspumpade majanduslikku tasuvust maapiirkondade kaugküttevõrkudes läbi tarbijahinna.

Töös on keskendunud soojuspumba paigaldamisel kaugküttepiirkonda tarbijahinna komponentide arvutamisele läbi Konkurentsiameti hinnametoodika. Kõige täpsemalt on arvutatud soojuspumba kütusest ehk elektrist tuleneva muutuvkulu arvutamisele. Elektri hinna maksumuse arvutamiseks on kasutatud välisõhu temperatuurist sõltuva maapinna temperatuuri arvutamise mudelit ja soojuspumbale omase soojusteguri arvutamist läbi Carnot' efektiivsusteguri. Hinnakomponendid on arvutatud viiele grupile, mis on koostatud maapiirkondades asuvate kaugküttevõrkude põhjal ning millele on EnergyPro arvutusprogrammiga koostatud soojuskoormuse graafikud.

Töö esimeses osas on kirjeldatud Eesti kaugküttevõrke, soojuse tootmist kaugküttevõrkudes ning piirhinna määramise põhimõtteid.

Töö teises osas on kirjeldatud soojuspumpade tööpõhimõtteid ja kirjeldatud erinevaid tüüpe. Täpsemalt on kirjeldatud õhk- ja maasoojuspumpasid. Lisaks on kirjeldatud külmaagensi valiku olulisust ja soojuspumba soojusteguri mõistet

Töö kolmandas osas on kirjeldatud töös kasutatud arvutusmetoodikaid – kasutatud maapinna temperatuuri arvutamise metoodikat, soojusteguri arvutamist ja Konkurentsiameti piirhinna arvutamise põhimõtteid. Kolmanda osa alguses on toodud ära algandmete valiku põhimõtted ning soojuskoormuse graafikute koostamine EnergyPro programmiga.

Töö neljandas osas on arvutatud tulemused ja analüüs, mille põhjal saab väita, et soojuspumpad on ka ilma toetusteta majanduslikult tasuv alternatiiv praegustele soojusallikatele. Lisaks on neljanda osa lõpus toodud soojuspumpade potentsiaalne mõju Eesti elektrisüsteemile.

Antud töö tulemuste põhjal on soojuspumpadel võimekus, et ka majanduslikult konkureerida kaugküttevõrgus soojusallikana. Lisaks tarbijahinna samal tasemel hoidmisele või alandamisele on soojuspumpad ka üks viis liikuda energiatõhusama soojussektori suunas ning toetada üleminekut kliimanetraalsele energiasüsteemile. Uurima peaks veel soojuspumpade võimekust olla elektri reguleerimisturul paindliku tarbijana, soojuspumpade ja soojussalvestite kombinatsiooni maapiirkondades ning muude soojuspumba tüüpide kasutamist maapiirkondades. Soojuspumpade potentsiaali maksimeerimiseks on arengud madalatemperatuurilise kaugküttevõrgu poole üliolulised

SUMMARY

This Bachelor's thesis has evaluated heat pump economic feasibility in rural district heating networks through consumer price.

The thesis is focused on calculating the consumer price components in district heating networks via the Estonian Competition Authority's price methodology. In-depth calculation has been done to calculate the heat pump's electrical consumption component and the resulting price for the consumer. To calculate the electrical consumption, ground temperature is calculated using a model that depends on air temperature and then coefficient of performance for heat pumps is calculated using Carnot's efficiency factor. Price components were calculated for five groups with different heat consumption ranges, that were aggregated from district heating networks residing in rural areas and to which heat demand profiles were simulated using EnergyPro program.

In the first part of the thesis district heating networks in Estonia, current heat generation in district heating and consumer price ceiling are described.

In the second part of the thesis heat pump principles and the different types of heat pumps are described. Air source and ground source heat pumps are described in more detail. In addition, the importance of refrigeration agent choice and the term coefficient of performance are explained.

The third part of the thesis describes used calculation methodologies such as ground temperature modelling, coefficient of performance and Estonian Competition Authority's price methodologies. In the beginning of the third part, the data selection criteria and head demand profile simulation with EnergyPro program for the aggregated groups are explained.

The fourth part of the thesis results are analysed, and conclusions are presented. From the analysis it becomes apparent that heat pumps can be an economically viable alternative to current heat generation even without extra financial support. In addition, the potential effects of converting all rural district heating networks in the data selection to heat generation using heat pumps is analysed.

The results of this thesis state that heat pumps can compete economically with traditional heat generation sources in district heating networks. In addition to equal or lowered consumer price, heat pumps are an option to a more energy efficient heating sector and support the transition to a climate neutral energy system. Further research

is required to understand the potential of heat pumps as flexible consumers, the combination of heat pumps and heat accumulators and the use of other types of heat pumps in rural district heating networks. To fully utilize the potential of heat pumps, development towards low temperature district heating networks are required.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] "Soojusmajandus | Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium." <https://www.mkm.ee/et/tegevused-eesmargid/energeetika/soojusmajandus> (accessed Mar. 22, 2021).
- [2] "Energeetika | Statistikaamet." <https://www.stat.ee/et/avastatistikat/valdkonnad/energia-ja-transport/energeetika> (accessed Mar. 22, 2021).
- [3] "Euroopa Parlamendi ja nõukogu direktiiv 2012/27/EL. 2012." Accessed: Mar. 22, 2021. [Online].
- [4] "Soojustegur." <http://www.soojuspumbaliit.ee/Soojustegur> (accessed Mar. 22, 2021).
- [5] A. Hesaraki, S. Holmberg, and F. Haghghat, "Seasonal thermal energy storage with heat pumps and low temperatures in building projects - A comparative review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43, pp. 1199–1213, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.12.002.
- [6] "Kaugkütteseadus – Riigi Teataja." <https://www.riigiteataja.ee/akt/KK%C3%BCtS> (accessed Mar. 24, 2021).
- [7] "Strateegia 'Eesti 2035' | Eesti Vabariigi Valitsus." <https://valitsus.ee/strateegia-eesti-2035-arengukavad-ja-planeering/strateegia> (accessed Mar. 24, 2021).
- [8] "Säästlik energiatarbimine, rohelisem Eesti." https://www.struktuurifondid.ee/sites/default/files/sf_events/2021_teem_alehed/s44stlik_energiatarbimine_rohelisem_eesti_teemaleht_0.pdf (accessed Mar. 24, 2021).
- [9] "Töö nr ENE 1517." Accessed: Mar. 30, 2021. [Online]. Available: www.joelahtme.kovtp.ee.
- [10] "Kaugkütte energiasääst." <http://www.kolmtex.ee/files/Upload/Kasulikku/Kaugk%C3%BCtte%20energi%C3%A4%C3%A4stu%20uuring.pdf> (accessed Apr. 04, 2021).
- [11] "Kütte- ja jahutusesüsteemide juhtimine." http://opiobjektid.tptlive.ee/Automaatjuhtimine/ktte_ja_jahutusessteemide_juhtimine.html (accessed Mar. 27, 2021).
- [12] "Metsarikkad riigid: bioenergia on oluline osa taastuvenergiast ning varustuskindlusest | Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium." <https://www.mkm.ee/et/uudised/metsarikkad-riigid-bioenergia-oluline-osa-taastuvenergiast-ning-varustuskindlusest> (accessed Mar. 27, 2021).
- [13] "Biomass ja bioenergia | Maaeluministeerium." <https://www.agri.ee/et/eesmargid-tegevused/biomajandus/biomass-ja-bioenergia> (accessed Mar. 27, 2021).
- [14] "Elering Live." <https://dashboard.elering.ee/et/gas-trade/price?interval=hours&period=years&start=2019-12-31T22:00:00.000Z&end=2020-12-31T21:59:59.999Z> (accessed Mar. 25, 2021).
- [15] "Soojuspumba tööpõhimõte." <http://www.soojuspumbaliit.ee/Soojuspumba-toopohimote> (accessed Mar. 22, 2021).
- [16] "ETIS - Soojusgeneraatorid : õppematerjal." <https://www.etis.ee/Portal/Publications/Display/8e240ad0-3f41-4dba-8fb2-dee5b347bd51> (accessed Apr. 06, 2021).
- [17] "Refrigerants / Industrial Heat Pumps." https://industrialheatpumps.nl/en/how_it_works/refrigerants/ (accessed Mar. 27, 2021).
- [18] "Maasoojuspump." <http://www.soojuspumbaliit.ee/Maasoojuspump> (accessed Mar. 29, 2021).

- [19] "NIBE Ground Source Heat Pumps | Save Money & Energy." <https://www.nu-heat.co.uk/renewables/heat-pumps/ground-source-heat-pumps/> (accessed Mar. 29, 2021).
- [20] "Õhksoojuspumbad." <http://www.soojuspumbaliit.ee/Ohksoojuspumbad> (accessed Mar. 30, 2021).
- [21] "Õhk-vesi-soojuspumbad." <http://www.soojuspumbaliit.ee/Ohk-vesi-soojuspumbad> (accessed Mar. 30, 2021).
- [22] "Soojusmajanduse arengukava koostamise toetamise tingimused – Riigi Teataja." <https://www.riigiteataja.ee/akt/106052015011> (accessed Apr. 07, 2021).
- [23] K. Rankinen, T. Karvonen, and D. Butterfield, "A simple model for predicting soil temperature in snow-covered and seasonally frozen soil: Model description and testing," *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 8, no. 4, pp. 706–716, 2004, doi: 10.5194/hess-8-706-2004.
- [24] "View of Soils in an agricultural landscape of Jokioinen, south-western Finland." <https://journal.fi/afs/article/view/5677/4876> (accessed Apr. 08, 2021).
- [25] "X-GIS 2.0 [geoloogia50k]." <https://xgis.maaamet.ee/xgis2/page/app/geoloogia50k> (accessed Apr. 08, 2021).
- [26] "Lumekattekoormus" https://www.ilmateenistus.ee/wp-content/uploads/2013/01/eesti_ilma_riskid_2012_lumikatejalumekoormus.pdf (accessed Apr. 08, 2021).
- [27] "Carnot' tsüklid." <https://opik.fyysika.ee/index.php/exp/display/18208> (accessed Apr. 08, 2021).
- [28] A. Zottl, R. Nordman, and M. Miara, "Seasonal Performance factor and Monitoring for heat pump systems in the building sector SEPOMO-Build Benchmarking method of seasonal performance." Accessed: Apr. 08, 2021. [Online].
- [29] "Soojuse piirhinna kooskõlastamise põhimõtted." https://www.konkurentsiamet.ee/sites/default/files/Soojus/soojuse_piirhinna_koosk_lastamise_p_him_tted.pdf (accessed Apr. 12, 2021).
- [30] "Kaalutud keskmise kapitali hinna arvutamise juhend." https://www.konkurentsiamet.ee/sites/default/files/juhend_kaalutud_keskmise_kapitali_hinna_ar.pdf (accessed Apr. 12, 2021).
- [31] "Elering Live." <https://dashboard.elering.ee/et/nps/price?interval=minute&period=years&start=2019-12-31T22:00:00.000Z&end=2020-12-31T21:59:59.999Z> (accessed Apr. 12, 2021).
- [32] F. Knobloch and R. Lewney, "A technical analysis of FTT:Heat - A simulation model for technological change in the residential heating sector" 2017. Accessed: Apr. 11, 2021. [Online].
- [33] M. Taylor, "Perspectives for the Energy Transition End-use Sectors & Heat Pumps," 2017. Accessed: Apr. 12, 2021. [Online].
- [34] "Ground Source Heat Pump Prices & Costs 2021 | GreenMatch." <https://www.greenmatch.co.uk/heat-pump/ground-source-heat-pump/ground-source-heat-pump-prices> (accessed Apr. 12, 2021).
- [35] H. Pieper, T. Ommen, F. Buhler, B. Lava Paaske, B. Elmegaard, and W. Brix Markussen, "Allocation of investment costs for large-scale heat pumps supplying district heating" in *Energy Procedia*, 2018, vol. 147, pp. 358–367, doi: 10.1016/j.egypro.2018.07.104.
- [36] "Elektri tarbimine ja tootmine | Elering." <https://elering.ee/elektri-tarbimine-ja-tootmine> (accessed Apr. 26, 2021).
- [37] "EESTI ELEKTRISÜSTEEMI VARUSTUSKINDLUSE ARUANNE 2020." Accessed: Apr. 26, 2021. [Online].

LISAD

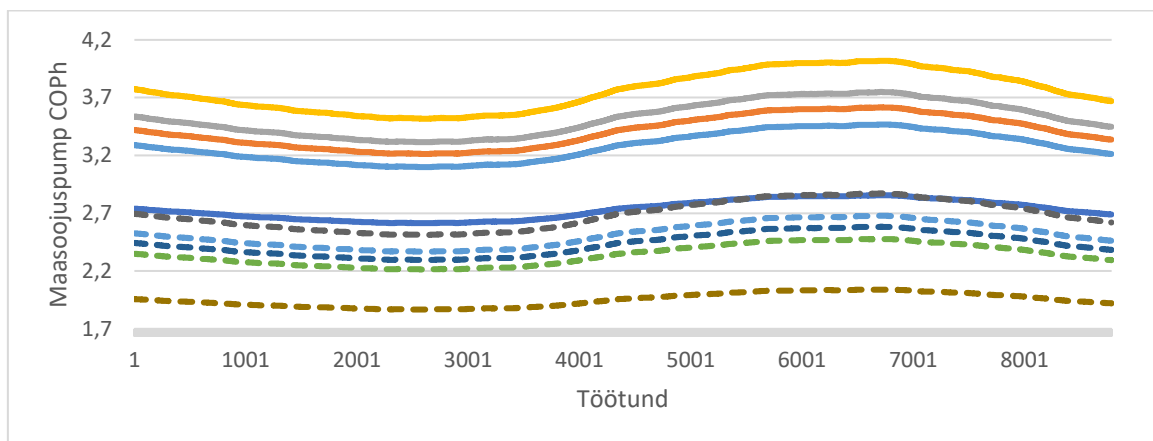
Lisa 1

Tabel 10 Algandmete valik

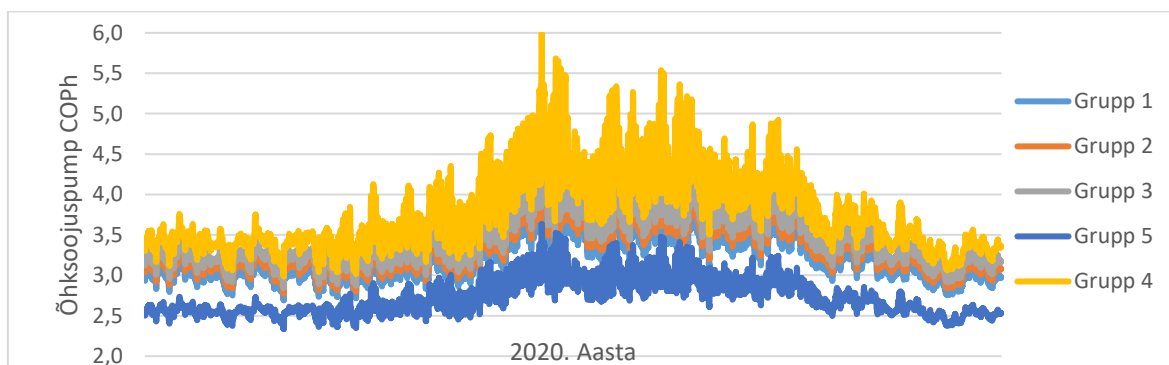
Asukoht	Normaalaasta tarbimine, MWh	Hind tarbijale MWh kohta km-ta	Normaalaasta tarbimine koos sooja tarbeveega (ka neil mil ei ole seda), MWh	Kasutatav Katel 1	Kasutatav Katel 2	Kasutatav Katel 3
Ahja	495	66,20 €	495	maagaas	maagaas	x
Ala	355	67,55 €	426	põlevkiviõli	x	x
Aravete	3000	58,26 €	3600	põlevkiviõli	põlevkiviõli	biogaas
Aseri	9800	59,97 €	9800	maagaas	puiduhake	x
Avinurme	2560	58,28 €	2560	puiduhake	põlevkiviõli	x
Harkujärve	1090	54,56 €	1308	maagaas	x	x
Hulja	1352	56,00 €	1622	kivisüsi	kivisüsi	x
Ilmatsalu	1800	78,83 €	2160	põlevkiviõli	biogaas	x
Kadrina	9041	56,63 €	9041	puiduhake	põlevkiviõli	x
Karksi- Nuia	5100	54,43 €	6120	puiduhake	x	x
Keila	34000	50,03 €	34000	puiduhake	põlevkiviõli	põlevkiviõli
Kostivere	2600	70,43 €	3120	maagaas	maagaas	x
Kuldala	4500	41,45 €	4500	maagaas	maagaas	x
Kärdla	7500	59,26 €	9000	puiduhake	põlevkiviõli	x
Laagri	15300	58,51 €	15300	puiduhake	maagaas	maagaas
Laekvere	1500	73,48 €	1800	põlevkiviõli	x	x
Lavassaare	3500	57,41 €	3500	turvas	turvas	x
Linna küla	583	63,21 €	583	puiduhake		x
Linte	1100	51,55 €	1320	puiduhake	halupuud	x
Luu	2300	47,94 €	2760	halupuud	halupuud	x
Lõpe	423	77,50 €	507,6	puit	halupuud	halupuud
Merirahu	3000	69,09 €	3000	maagaas	maagaas	x
Mooste	1500	65,64 €	1500	puiduhake	põlevkiviõli	x
Muhu	1600	39,17 €	1920	puiduhake	puiduhake	põlevkiviõli
Mustvee	2300	55,00 €	2760	puiduhake	puiduhake	põlevkiviõli

Mõisaküla	1100	71,62 €	1320	põlevkiviõli	x	x
Märja	1400	78,68 €	1680	põlevkiviõli	põlevkiviõli	põlevkiviõli
Palivere	2200	65,32 €	2640	turvas	x	x
Peetri (Kareda)	920	88,00 €	920	põlevkiviõli	x	x
Päri	925	77,97 €	1110	põlevkiviõli		x
Püssi	3200	65,92 €	3840	maagaas	maagaas	
Ramsi	3000	56,56 €	3600	puiduhake	põlevkiviõli	x
Ristipalo	430	47,00 €	430	halupuud	x	x
Rõuge	1300	57,76 €	1560	puiduhake	x	x
Sangaste	2500	63,70 €	2500	puiduhake	x	x
Sindi	6000	47,05 €	7200	turvas	turvas	maagaas
Tabasalu	10000	75,74 €	10000	maagaas	maagaas	x
Taebla	1400	56,00 €	1680	turvas	põlevkiviõli	x
Tilsi	1200	44,96 €	1440	puiduhake	põlevkiviõli	x
Tootsi	6500	54,07 €	6500	turvas	turvas	põlevkiviõli
Triigi	700	62,98 €	840	puiduhake	x	x
Türi-Alliku	680	77,30 €	816	põlevkiviõli		x
Vana- Antsla	700	63,67 €	840	põlevkiviõli	puiduhake	x
Vastseliina	2645	46,02 €	2645	puiduhake	x	x
Väimela	4000	54,45 €	4000	põlevkiviõli	põlevkiviõli	põlevkiviõli
Vändra Jannseni	2480	59,76 €	2976	maagaas	maagaas	x
Vändra vana	629	59,76 €	754,8	maagaas	x	x
Kihlevere	300	80,00 €	360	halupuud	halupuud	x

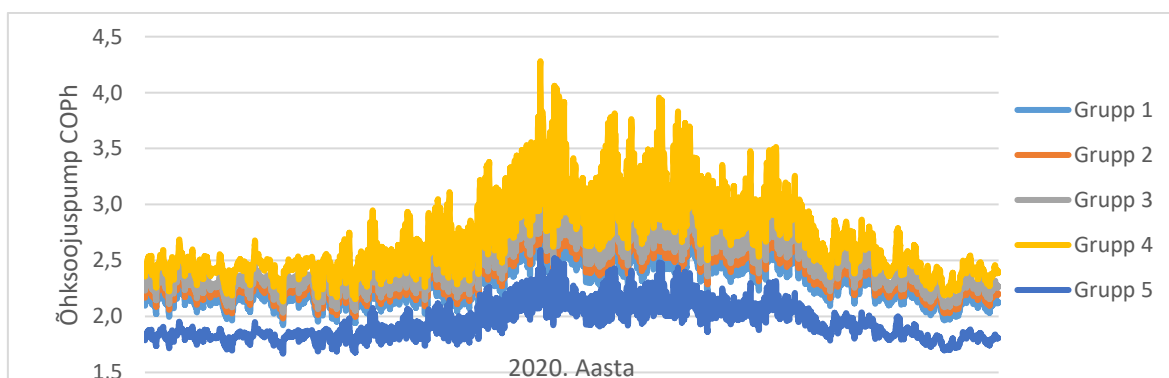
Lisa 2



Joonis 15. Maasoojuspumba iga tunni COP, kus punktiirjoonega on tähistatud Carnot' kasuteguriga 0,5 ja sujuva joonega Carnot' kasuteguriga 0,7 COP väärtused



Joonis 16. Õhksoojuspumba iga tunni COP Carnot' kasuteguri 0,7 korral



Joonis 17. Õhksoojuspumba iga tunni COP Carnot' kasuteguri 0,5 korral