



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO  
INSENERITEADUSKOND  
Ehituse ja arhitektuuri instituut

# MUSEUMILAEV VALVASE KÜTTEKULUDE VÄHENDAMINE

## REDUCING HEATING COSTS OF MUSEUMSHIP VALVAS

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Hanna-Kristiina Karu  
Üliõpilaskood: 182175EAKI  
Juhendaja: Jarek Kurnitski, Professor  
Kaasjuhendaja: Jevgeni Fadejev,  
doktorant-nooremteadur

Tallinn 2023

## 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.

"....." ..... 20.....

Autor: .....  
/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." ..... 20.....

Juhendaja: .....  
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....." .....20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....  
/ nimi ja allkiri /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina Hanna-Kristiina Karu

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

„Muusumilaev valvas küttekulude vähendamine“,

mille juhendaja on Jarek Kurnitski,

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.

---

\_\_\_\_\_ (allkiri)

\_\_\_\_\_ (kuupäev)

---

<sup>1</sup> Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Hanna-Kristiina Karu, 182175EAKI

Õppekava, peeriala: EAKI02/17 – Hoonete sisekliima ja veetehnika

**Juhendaja(d):** Professor, Jarek Kurnitski, jarek.kurnitski@taltech.ee  
Doktorant-nooremteadur, Jevgeni Fadejev,  
jevgeni.fadejev@taltech.ee

### Lõputöö teema:

(eesti keeles) ..... *Muuseumilaev Valvas küttekulude vähendamine*

(inglise keeles)..... *Reducing heating costs of Museumship Valvas*

### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Leida alternatiivsed küttelehendid Muuseumilaev Valvas küttekulude vähendamiseks
2. Koostada laeva simulatsioonimudel IDA ICE tarkvaras
3. Analüüsida merekütte soojuspumba ja muid kombineeritud küttelehendusi
3. Pakkuda välja tehniliselt ja majanduslikult sobivaim küttelehendus

### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Teoreetilised alused ja kirjanduse analüüs	08.03.23
2.	IDA ICE simulatsioonimudel	22.03.23
3.	Küttesüsteemide arvutused	18.04.23
4.	Küttesüsteemide analüüs ja järeldused	27.04.23

**Töö keel:** eesti keel      **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 15. mai 2023.a

**Üliõpilane:** ..... ".....".....2023.a  
/allkiri/

**Juhendaja:** ..... ".....".....2023.a  
/allkiri/

**Kaasjuhendaja:** ..... ".....".....2023.a  
/allkiri/

**Programmijuht:** ..... ".....".....2023.a  
/allkiri/

# SISUKORD

EESSÕNA .....	7
Lühendite ja tähiste loetelu .....	8
SISSEJUHATUS .....	9
1.    KIRJANDUSE ÜLEVAADE .....	11
2.    TEOREETILISED ALUSED .....	16
2.1. Laevade kütte- ja ventilatsioonisüsteemid .....	16
2.2. Soojuspumbad .....	17
2.2.1. Soojuspumba tööpõhimõte .....	17
2.2.2. Soojuspumba soojustegur .....	19
2.2.3. Merevee soojuspumbad .....	22
2.2.4. Õhk-vesi soojuspumbad .....	24
2.2.5. Külmutusagensid .....	26
2.3. Katlakütused .....	27
2.3.1. Pellet .....	28
2.3.2. Vedelkütused .....	29
3.    METOODIKA .....	30
3.1. Uurimisobjekt .....	30
3.1.1. Uurimisobjekti tutvustus .....	30
3.1.2. Konstruktsioon .....	31
3.1.3. Küttesüsteem .....	32
3.1.4. Ventilatsioonisüsteem .....	33
3.2. Lähteandmed .....	33
3.3. Simulatsioonimudel .....	35
3.4. Küttesüsteemide arvutused .....	38
3.4.1. Soojuspumpade arvutused .....	39
4.    SIMULATSIOONIMUDELI ANALÜÜS JA TULEMUSED .....	46
4.1. Küttekoormuste simulatsioon .....	46
4.2. Energiasimulatsioon .....	47
5.    KÜTTESÜSTEEMIDE VÕRDlus .....	49
5.1. Õhk-vesi soojuspump .....	49
5.1.1. Tehniline teostatavus ja efektiivsus .....	49
5.1.2. Hooldustööd ja hoolduskulud .....	51
5.1.3. Maksumus ja tasuvusaeg .....	51
5.1.4. Keskkonnamõju .....	53
5.2. Merevee soojuspump .....	53
5.2.1. Tehniline teostatavus ja efektiivsus .....	53

5.2.2.	Hooldustööd ja hoolduskulud .....	56
5.2.3.	Maksumus ja tasuvusaeg .....	56
5.2.4.	Keskkonnamõju .....	58
5.3.	Kombineeritud soojuspumpsüsteem .....	58
5.3.1.	Tehniline teostatavus ja efektiivsus .....	58
5.3.2.	Hooldustööd ja hoolduskulud .....	60
5.3.3.	Maksumus ja tasuvusaeg .....	60
5.3.4.	Keskkonnamõju .....	61
5.4.	Pelletikatel .....	62
5.4.1.	Tehniline teostatavus ja efektiivsus .....	62
5.4.2.	Hooldustööd ja hoolduskulud .....	63
5.4.3.	Maksuvus ja tasuvusaeg .....	63
5.4.4.	Keskkonnamõju .....	64
6.	JÄRELDUSED .....	65
	KOKKUVÕTE .....	68
	SUMMARY .....	69
	KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	70
	LISAD .....	74

## EESSÕNA

Käesoleva lõputöö teema on välja pakutud SA Eesti Meremuuseum poolt, kelle huvi on vähendada muuseumilaev Valvase kütmise kulusid. Töö eesmärk on leida sobiv ja energiatõhus alternatiiv laeva olemasolevale küttesüsteemile, milleks on diiselkütust kasutatav katel. Eelistatavalt soovitakse lõpetada fossiilse kütuse kasutamine ja minna üle taastuenergia kasutamisele.

Töö käigus loodi laeva simulatsioonimudel kasutades IDA ICE 4.8 tarkvara. Laeva seisukord ja täpsemad andmed on täpsustatud laeva külastustel ja koostöös laeva meeskonnaga. Küttesüsteemide tehnilise lahenduse leidmisel, toodete valikul ja hinnapakkumistega oli abiks Maaküte Oü ja AIT-nord OÜ, süsteemide arvutustel abistas Jevgeni Fadejev. Autor tänab kõiki osapooli, kes aitasid kaasa antud magistritöö valmimisele.

Võtmesõnad – Õhk-vesi soojuspump, merevee soojuspump, küttesüsteemid, IDA ICE, pellet, magistritöö

## Lühendite ja tähiste loetelu

EVS – Eesti vabariigi standard;

COP – Soojuspumba soojustegur (ingl k *Coefficient Of Performance*)

SCOP - Soojuspumba sesoonne soojustegur (ingl k *Seasonal Coefficient of Performance*)

ÕVSP – Õhk-vesi soojuspump

MVSP – Merevee soojuspump

IDA ICE - Simulatsiooniprogramm *IDA Indoor Climate and Energy*

ESPL – Eesti Soojuspumba Liit



## SISSEJUHATUS

Energihindade tõustes otsitakse aina rohkem energiasäästlikke alternatiive ja iga valdkond proovib tegutseda keskkonnasõbralikumalt. Fossiilsete kütuste kasutamist vähendatakse ja otsitakse energiatõhusamaid lahendusi. Näiteks 2017. aastal kasutati Eestis kodumaiseid fossiilseid kütuseid 16 309,3 tuhat tonni, järgneva viie aasta jooksul on kasutamine järk-järgult vähenenud ning 2021. aastal oli langenud fossiilsete kütuste kasutamine 10 114,6 tuhande tonnini. [1]

Lisaks hoonetele vajavad kütmist ka laevad. Riigi ja asutuste laevastiku uuendamine on kulukas ning süsteemide renoveerimine on ruumipuuduse ja eripäraste lahenduste tõttu tihti keerukas. Seetõttu on jäädud vanade kütte- ja ventilatsioonisüsteemide juurde, mis kasutavad enamjaolt soojusenergia saamiseks fossiilseid kütuseid, mis tekitab muret nii keskkonnasõbralikkuse osas kui ka omanike majanduslikule poolele tänaste kütusehindade juures.

Antud magistritöö eesmärk on analüüsida erinevaid küttesüsteemide lahendusi muuseumilaev Valvase kütmiseks ning leida energiatõhusaim ja majanduslikult sobivaim lahendus. Hetkel kasutatakse laeva kütmiseks katelt diiselmootoriga. Soovitud sisetemperatuuri saavutamiseks kulub talvisel perioodil sõltuvalt välistemperatuurist keskmiselt 100 liitrit diislikütust päevas. Kütteleahenduse leidmisel keskendutakse soojuspumpadega süsteemidele, et vältida tulevikus fossiilsete kütuste kasutamist. Uuritakse ka kombineeritud lahendusega soojuspumpsüsteemi – kahe soojusvahetiga, samas kontuuris välissõhu soojusvaheti ning merevee läbipumpamisel põhinev soojusvaheti. Energiatõhususe tähtsuse kasvades on soojuspumbad leidnud rohkem kasutust, sest soojust on võimalik toota keskkonda saastamata ja liigselt maavarasid kasutamata. Alternatiivide valiku laiendamiseks analüüsitakse ka pelletikatla kütteleahendust.

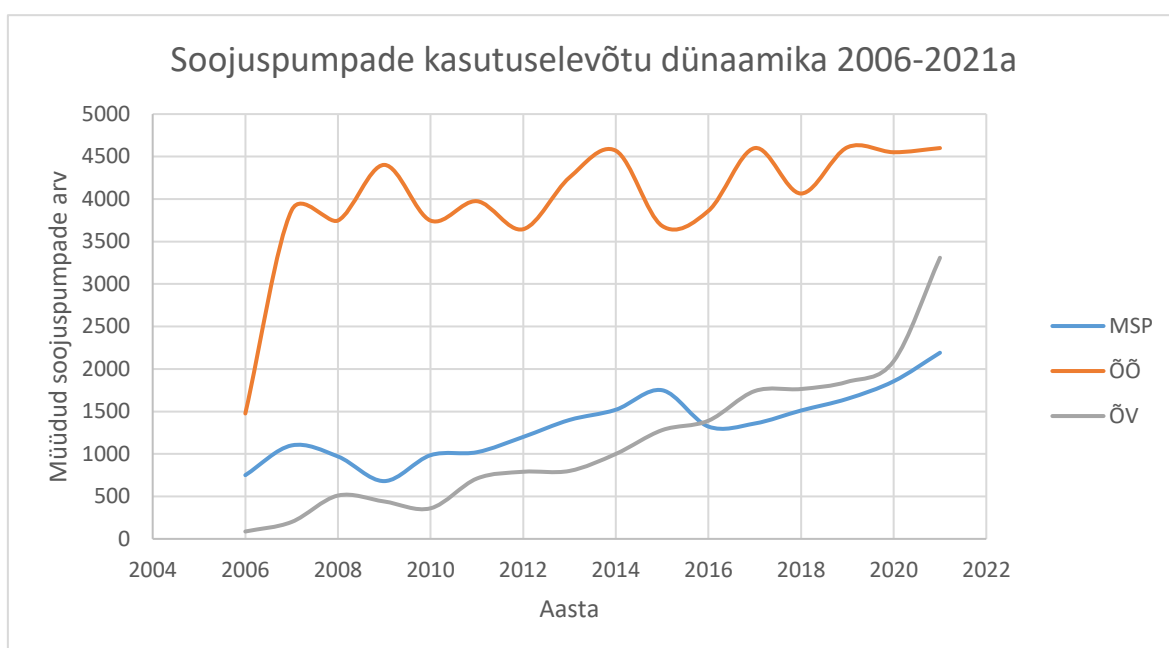
Laeva lähteandmete põhjal koostatakse simulatsioonitarkvaras *IDA Indoor Climate and Energy* (IDA ICE) laeva mudel. Simulatsioon kujutab endast reaalse süsteemi jäljendamist ajas, mille tulemusena selguvad küttekoormused ja energiatarbimine. Simulatsioonimudeli tulemuste põhjal analüüsitakse erinevate kütteleahenduste energiatarbimist ja tasuvust ning valitakse sobivaim.

Antud töö esimeses peatükis antakse ülevaade teemaga seotud kirjandusest. Teises peatükis käsitletakse magistritöös uuritavate teemade teoreetilisi aluseid. Kolmandas peatükis tutvustatakse uurimisobjekti lähteandmeid ja lõputöö uurimismetoodikat. Neljas peatükk käsitleb simulatsioonimudeli koostamist ja simulatsioonide analüüsi

tarkvaras IDA ICE. Viiendas peatükis esitatakse küttelahenduste arvutused ja võrdlused. Kuuendas peatükis tehakse lõplik analüüs ja järeldused.

# 1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

Soojuspumpade kasutuselevõtt on aastate jooksul järk-järgult kasvanud. Soojuspumpade paigaldamine on Eestis toimunud alates 1993. aastast. Soojuspumpade kasutuselevõtu statistika Eestis on välja toodud Eesti Soojuspumba Liidu (ESPL) poolt, milles on arvestatud ESPL liikmete poolt müüduid soojuspumpade koguseid. Joonisel 1.1 on kujutatud 2006-2021. aastatel müüduid maasoojuspumpade (MSP), õhk-õhk soojuspumpade (ÕÕ) ja õhk-vesi soojuspumpade (ÕV) kogused. Viimaste aastate müüduid soojuspumpade tegelik suurusjärg on suurem, sest liidu liikmete poolt müüakse alla poole riiki toodavast soojuspumpade kogusest. [2]



Joonis 1.1 Soojuspumpade kasutuselevõtu dünaamika Eestis aastatel 2006-2021.

Hoonete renoveerimisel asendatakse tihti vana küttesüsteem soojuspumba lahendusega. Hoonete küttekulude alandamise eesmärgil on tehtud mitmeid võrdluseid erinevate küttesüsteemide lahenduste kohta. G. Grosstali magistritöös „Elamu küttelehenduste üleviimine taastuenergiale“ on analüüsitud erinevaid küttesüsteemide alternatiive eesmärgiga vahetada välja eramut küttev gaasikatel. Kütteseadmete võrdlus on läbi viidud maasoojuspumba, maagaasikatla ning pelletikatla vahel, mille täpsemad tulemused on välja toodud tabelis 1.1. Uuringust selgub, et maasoojuspumba algne investeering on küll kõige suurem, kuid edaspidised kulud on väiksemad ning maasoojuspump tasuks end ära 12,8 aastaga. Lisaks kasutatakse maagaasi- ja pelletikatla puhul taastumatuid energiaallikaid ning nende transpordil või põletamisel tekib CO<sub>2</sub> heitmeid. [3]

Kütteliik	Kütteseadmee eluiga (a)	Masina maksumus koos paigaldusega (€)	Eluea hoolduse hind (€)	Küttehinde eluea jooksul (€)	Maksumus kokku eluea jooksul (€)	Maksumus kokku 15 aasta jooksul (€)
Maasoojus	25	10315	2250	7500	20065	16165
Maagaas	15	2597,5	900	16530	20027,5	20027,5
Pellet	20	5773,5	800	40000	46573,5	36373,5

Tabel 1.1 Kütteseadmee kulude võrdlus

Soojuspumpasid liigitatakse soojusallika järgi ning liigiti on soojuspumpade efektiivsus erinev. Tallinna Tehnikaülikooli poolt läbi viidud uuringus on teostatud võrdlus maasoojuspumba ja õhk-vesi soojuspumba kasutamisest 200 m<sup>2</sup> kütava pinnaga eramaja kütmiseks ja tarbevee soojendamiseks, kus küttevõimsus on 9 kW ning sooja tarbevee jaoks 1kW. Hoone täpne mudel kalibreeriti IDA ICE tarkvaras ning simulatsioonid viidi läbi õhk-vesi soojuspumbaga ja maasoojuspumbaga. Simulatsioonide tulemusel saadi õhk-vesi soojuspumba tootlikkuseks kütte ja ventilatsiooni jaoks 16911 kWh, sooja tarbevee jaoks 4251 kWh ning keskmiseks soojusteguriks 2,6. Kütteperioodi soojusteguriks õhk-vesi soojuspumbaga saadi 2,7 ning suvisel perioodil 2,5. Maasoojuspumba aastane soojustootlikkus simulatsiooni tulemusel oli 17179 kWh küttele ja ventilatsioonile, sooja tarbevee tootmiseks 4256 kWh ning aasta keskmine soojustegur 2,9. Suvisel perioodil keskmine soojustegur oli 2,6 ning kütteperioodi soojustegur 3,2. Seega kütteperioodi keskmine soojustegur COP on maasoojuspumbal kõrgem kui õhk-vesi soojuspumbal. [4]

Soojuspumpade soojusallikana on võimalik kasutada merevee soojusenergiat. Eestis on merevee soojuspumpad ka aktuaalne lahendus – üheks näiteks on 2012. aastal Lennusadama Meremuuseumi renoveerimise käigus paigaldatud kolm merevee soojuspumpa, millega soojendatakse hoone põrandküttesüsteemis ringlevat soojuskandjat[5]. Soojuspumpade veehaare asub Lennusadama Kai ääres, muuseumilaeva Suur-Tõll vööri läheduses. Kai sees on pumbad, mis pumpavad merevee soojusvahetiteni ning soojuse loovutanud vesi pumbatakse tagasi merre. Veehaardetoru oli algselt viidud merre ligikaudu 1 meetri sügavusele, kuid aastase kasutamisaja jooksul selgus, et veehaardetoru tuleb viia sügavamale, sest madalate välistemperatuuride korral jõuab soojusvahetiteni liiga madala temperatuuriga merevesi. Probleemi lahendamiseks paigaldati veehaardetoru 3 meetrit sügavamale.[6]

Mere soojusenergia kasutamisel on oluline, et merevee temperatuur ei langeks liiga madalale. Tallinna Tehnikaülikooli Meresüsteemide Instituudi poolt läbi viidud uuringus on analüüsitud Eesti territoriaalmere soojusenergia potentsiaali. Selles uuringus on keskendunud suurematele mereküttesüsteemidele, mille merevee soojusenergia saadakse mere sügavamatest kihtidest. Potentsiaalseteks geotermaalenergia allikateks peetakse piirkondi, kus vee sügavus on rohkem kui 45 m ning kuhu veesamba talvine jahtumine ei ulatu. Soome lahe sügavamates kihtides püsib merevee temperatuur üle 4,5-5 °C, mida loetakse soojuspumpade veehaarde jaoks sobivaks. Küll aga ranna lähedal on keskmine temperatuur veidi kõrgem kui rannast kaugemates piirkondades – näiteks Tallinna ja Muuga lahtedes on talvine keskmine merevee temperatuur 3,5 kraadi. [7]

Veehaarde paigutamine rannast kaugele on kulukas ning seetõttu ei ole ka väiksemate süsteemide puhul tasuv. Ranna lähedale veehaarde paigutamisel tuleb arvestada, et mereveest ei ole võimalik soojust omastada kui temperatuur langeb alla 2 °C. Uuringu kohaselt saab ranna lähedalt pumbatavat vett kasutada hoonete soojendamiseks ligikaudu detsembri lõpuni. Kui merevee temperatuur langeb liiga madalale, tuleb talve teises pooles lisaks mereveele kasutada täiendavaid energiaallikaid. [7]

Merevee soojuspumpade soojusvõtuks on levinud kaks varianti – kai äärest või puuraugust merevee pumpamine otse soojusvahetini või merevette või puurauku paigaldatud kollektorite abil. Daliani Tehnikaülikooli poolt tehtud uuringus võrreldi otsese veehaardega ja puurkaevu veehaardega soojuspumpasid. Otsese veehaarde puhul oli soojuspumpade veehaare 1-5 m sügavusel meres ning merevesi pumbati esmalt merevee basseini, kust vesi jõudis soojusvahetiteni. Teisel juhul oli maismaal merepiirist 800 m kaugusel 42 m sügavune puurauk, kust pumbati vesi üles soojusvahetini. Otsese veehaarde korral oli talvisel perioodil soojusvahetini jõudva merevee temperatuur keskmiselt 5,8 °C ning puurkaevust pumbatava vee keskmine temperatuur 12,9 °C. Kütteperioodi keskmine soojuspumba soojustegur oli otsese veehaarde korral 2,99 ning puuraugu veehaardega pumbal 4,66. Otsese veehaarde korral oli talve madalaim sisse pumbatava merevee temperatuur 1 °C ning tagastuv - 0,6 °C, mille puhul tekib jäätumisoht (30‰ soolsuse korral on merevee jäätumistemperatuur -1,7 °C). Samuti oli puuraugust pumbatava vee temperatuur perioodi jooksul stabiilsem, mis parandab samuti soojuspumba soojustegurit. [8]

A. Vaabi magistritöö „Laeva kütuse- ja energiakulu vähendamise võimalused Silja Europa näitel“ käsitleb erinevaid aspekte laeva energiasäästlikumaks muutmisel. See hõlmab ka laeva kütte- ja ventilatsioonisüsteeme. Silja Europa näitel ei asendatud küll

laeva küttesüsteemi, kuid süsteemides tehti mitmeid korrekture, mis aitasid energia tarbimist vähendada. M/S Silja Euroopal on 40 kliimaseadet, millele paigaldati uus juhtimissüsteem. Kõikidele ventilaatoritele lisati sagedusmuundurid, temperatuuriandurid vahetati välja ja lisati juurde ning lisati ka CO<sub>2</sub> andurid. Seadmete jahutuskalorifeeridele paigaldati uued juhtventiilid, mis võimaldasid tõhusamat temperatuuri reguleerimist ning andsid märgatava jahutusenergia kokkuhoiu suveperioodil. Kütte- ja tarbeveesüsteemi ringluspumpadele lisati sagedusmuundurid ja rõhuandurid. Süsteemide renoveerimise tulemusena vähenesid laeva abimasinate töötunnid 21 %. [9]

Soojuspump võimaldab kasutada ka mitut energiaallikat ühes süsteemis. Bologna ülikooli poolt läbi viidud uuringus on käsitletud kahe soojusallikaga soojuspumba energia tarbimist. Uuringus on analüüsitud soojuspumpa, mille soojusallikateks on välisõhk ja maapind. Õhksoojuspumpade efektiivsus langeb madala välisõhu temperatuuri ja kõrge niiskuse korral. Sel juhul viib soojuspump perioodiliselt läbi mitmeid sulatustsükleid, et sulatada tekkinud jääd välise soojusvaheti pinnalt, mis omakorda suurendab energiakulu. Maasoojuspumpade puhul on soojusallika temperatuur stabiilsem, mis muudab süsteem efektiivsemaks. Süsteemide puudujääkide kompenseerimiseks on võimalik süsteemis kasutada kahte soojusvahetit, mida saab lülitada vastavalt väliste tingimustele ja suurima efektiivsuse saamisele. [10]

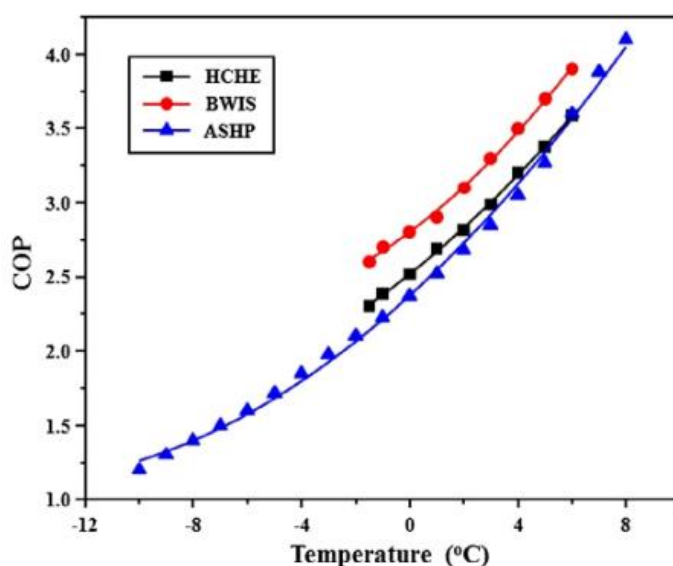
Uuringus viidi läbi simulatsioonid ja analüüsi kolme olukorda: A) Süsteemi toimimine kasutades välisõhu soojusvahetit; B) Süsteemi toimimine kasutades maasoojusvahetit; C) Süsteemi toimimine kombineerides välisõhu- ja maasoojusvahetit. B variandi puhul on kasutuses kaks 105 m sügavust puurauku, et katta hoone maksimaalne soojusvajadus. Variant C puhul on katsetatud erineva sügavusega puurauke. [10]

		Case C1	Case C2	Case C3	Case C4	Case C5	
Borehole configuration (number × length)		2 × 105 m	2 × 90 m	2 × 75 m	1 × 105 m	1 × 90 m	
Total length		$L_0$	0.86 $L_0$	0.71 $L_0$	0.50 $L_0$	0.43 $L_0$	
		SCOP		SEER		APF	
		1 <sup>st</sup> year	15 <sup>th</sup> year	1 <sup>st</sup> year	15 <sup>th</sup> year	1 <sup>st</sup> year	15 <sup>th</sup> year
Ground-source mode	(Case B)	3.52	3.42	4.25	4.25	3.57 (+27.5%)	3.47 (+24.0%)
DSHP	(Case C2)	3.40	3.35	4.31	4.31	3.49 (+24.6%)	3.41 (+21.8%)
	(Case C3)	3.27	3.22	4.31	4.31	3.33 (+18.9%)	3.28 (+17.1%)
	(Case C4)	3.09	3.07	4.32	4.32	3.15 (+12.5%)	3.13 (+11.8%)
	(Case C5)	3.00	2.99	4.32	4.32	3.07 (+9.6%)	3.06 (+9.3%)
Air-source mode	(Case A)	2.79	2.79	2.92	2.92	2.80	2.80

Tabel 1.2 Bologna ülikooli kahe soojusvahetiga soojuspumba efektiivsuse uuringu tulemused

Tulemused on välja toodud tabelis 1.2, millest selgub, et maasoojuspumba ning kombineeritud lahenduse soojustegurid on suhteliselt sarnased. Erinevus seisneb algses investeeringus, sest kombineeritud lahenduse puhul ei ole vajalik nii sügav soojuspuurauk, kui ainult maasoojuspumba lahendusega. Seega on kombineeritud soojuspumba puhul kokkuhoid alates 6% (stsenaarium C2) kuni 32 % (stsenaarium C5).[10]

Antud töös on võimalik kombineerida soojuspumba soojusallikatena merevett ja välisõhku. Hiinas tehtud Tianjini ülikooli uuringus on võrreldud merevee soojuspumpade ja õhk-vesi soojuspumba efektiivsust madalatel välisõhutemperatuuridel. Merevee soojuspumpasid on katsetatud kahe erineva soojusvahetuse meetodiga – 11 meetri sügavusele paigaldatud spiraalne kollektor, milles ringleb etüleenglükool-vesi lahus ning 5 meetrit sügav puurauk, kust pumbatakse merevesi soojusvahetini. Alla 2 °C merevett soojusvahetuseks kasutada ei saa ning sel hetkel peaks toimuma ümberlülitus välisõhu soojusvahetile. Kuna merevee ja välisõhu temperatuurid on üldjuhul samaaegselt madalad, siis on sel hetkel ka välisõhu soojusvaheti efektiivsus madal. Uuringus välja toodud soojustegurid vastavalt soojusallika temperatuurile on välja toodud joonisel 1.2.



Joonis 1.2 Tianjini ülikooli uuringu soojusteguri sõltuvus soojusallika temperatuurist

## 2. TEOREETILISED ALUSED

### 2.1. Laevade kütte- ja ventilatsioonisüsteemid

Toimivad kütte- ja ventilatsioonisüsteemid on olulised pardal viibijate heaolu ja tervise seisukohalt. Küttesüsteem on alati vajalik külmemates piirkondades reisivatel ja töötavatel laevadel. Ekstreemselt madalate välisõhu temperatuuride korral ja suure küttevajaduse korral on tekitanud probleeme liigne õhu kuivamine, mis tekitab ebamugavustunnet meeskonna ja resijate ninakäikude, kurgu ja naha kuivamise tõttu. [11]

Hea õhukvaliteedi tagamiseks on oluline laevade ventilatsioon ja õhu konditsioneerimine, mida määratleb Euroopa standard EVS-EN ISO 7547:2005 (*Ships and marine technology - Air-conditioning and ventilation of accommodation spaces*). [12] Laevadel õhu konditsioneerimise süsteemi kavandamise teeb keeruliseks pidevalt muutuvad ilmastikuolud ja ruumipuudus laeval.

Laevaruumide kütteks on üldjuhul ette nähtud auru-, kuumavee- või elektriküttesüsteemid. Väiksematel sadama- ja siseveekogude laevadel on tavaliselt kasutusel kuumavee- ja elektrikütte süsteemid. Suurematel merelaevadel kasutatakse konditsioneeritud õhuga mittevarustatud laevaruumides aurküttesüsteeme, mille soojuskandjaks on küllastunud veeaur, survega kuni 0,3 Mpa ja temperatuuriga kuni 155 °C. Aurküttesüsteemi kasutamise eeliseks laevadel on väikeste läbimõõdudega torude kasutamine. Veeauru kondenseerumisel eraldub suur soojushulk ning auru liikumiskiirus torudes on kuni 40 m/s, mis võimaldab kasutada väikese läbimõõduga torusid. [13]

Kasutusel on nii ühetoru- kui kahetorusüsteemid. Kahetorusüsteemide puhul on laevaruumide küttekehad ühendatud paralleelselt, mis võimaldab ruumide temperatuuri individuaalselt reguleerida, ilma et see mõjutaks teiste ruumide soojusväljastust. Ühetorusüsteemides on küttekehad ühendatud järjestikku, mistõttu on ruumipõhine temperatuuri reguleerimine keerulisem ja võib küttesüsteemi tasakaalust välja viia. Ühetorusüsteemi eeliseks on materjali ja ruumi kokkuhoid.[13]



## 2.2. Soojuspumbad

Soojuspumbad kasutavad soojuse tootmiseks väliskeskkonnas ümbritsevat soojusenergiat, mida leidub maapõues, välisõhus, põhjavees, merevees, ventileeritavas õhus või heitvees. Soojuspump klassifitseerub taaskasutatavaks energiaallikaks. Soojusenergia on võimalik soojuspumba kompressori ja soojusvahetite abil siirdada kasulikuks soojuseks, millega on võimalik kütta hooneid ja soojendada tarbevett. [14]

Soojuspumpasid saab liigitada tööpõhimõtte, kasutatava soojusallika ja töötsükli tüübi järgi:

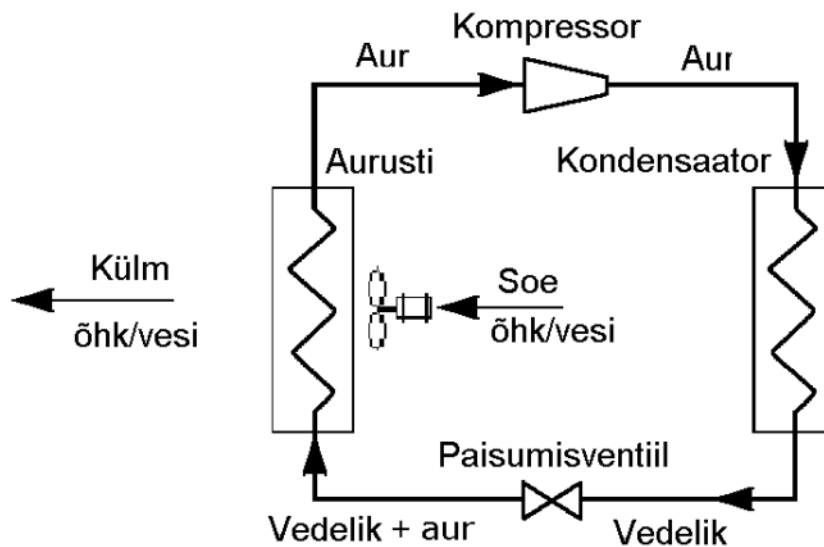
- Tööpõhimõtte järgi: aurukompressorsoojuspump, absorptsioonsoojuspump
- Kasutatav soojusallikas: õhksoojuspump, maasoojuspump
- Töötsükkel: avatud, suletud, otseaurustusega

Soojuspumpasid ei dimensioneerita maksimaalse küttevajaduse järgi, sest suurem osa aastast on küttevajadus väiksem ning suurema võimsusega pump töötaks lühiajaliste tsüklitena, mis lühendaks soojuspumba eluiga. Tõhusam on dimensioneerida pump 80 % vajalikust maksimaalsest küttevõimsusest, et pumba töötsüklid oleks pikemad. [15]

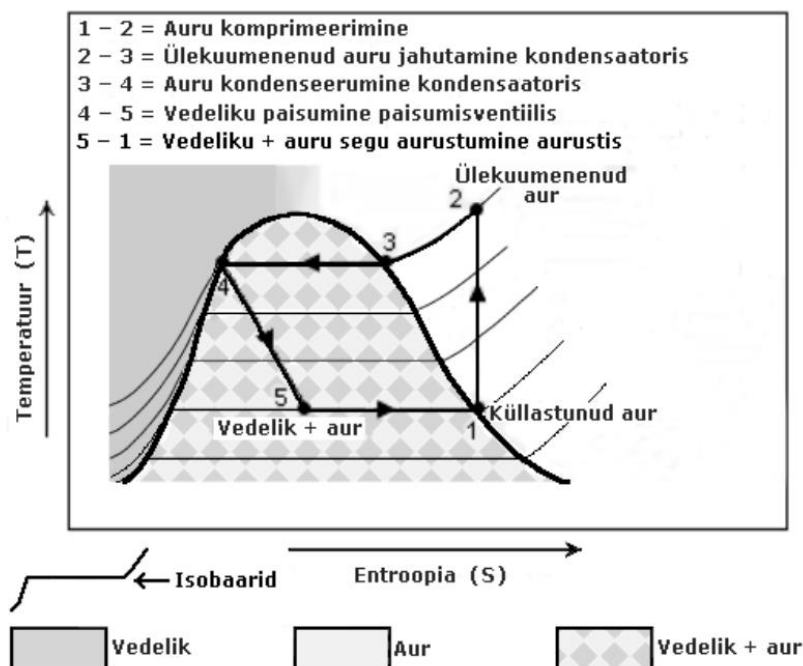
### 2.2.1. Soojuspumba tööpõhimõte

Kõige rohkem kasutatavad soojuspumbad on aurukompressor soojuspumbad. Need koosnevad neljast põhikomponendist: kompressor, paisventiil, kaks soojusvahetit – aurusti ja kondensaator. Kõik komponendid on omavahel ühendatud suletud süsteemiks, milles ringleb külmutusagens. [16]

Aurustis hoitakse külmutusagensi temperatuur madalamal kui soojusallika temperatuur, mille tulemusel toimub soojusülekanne soojusallikalt külmutusagensile. Aurustis külmutusagens aurustub ning liigub kompressorisse, kus külmutusagensi kokkusurumisel tõstetakse rõhku ja temperatuuri. Kompressorist liigub gaasilises olekus külmutusagens kondensaatorisse, kus toimub kondenseerumine, mille tagajärjel soojus vabaneb ja see kantakse üle küttesüsteemile. Kondensaatorist liigub kondenseerunud külmutusagens paisventiili, kus toimub paisumine, et kondensaat jahtuks madalatemperatuurilise soojusallika temperatuurini. Aurukompressor soojuspumba põhimõtteline skeem on näidatud joonisel 2.1 ja soojuspumba teoreetiline ringprotsess joonisel 2.2. [17]



Joonis 2.1 Aurukompressor-soojuspumba põhimõtteline skeem



Joonis 2.2 Soojuspumba teoreetiline ringprotsess T-S diagrammil

Kompressor töötab üldjuhul elektrienergia, kuid võib töötada ka sisepõlemismootoriga, mille puhul saab ära kasutada ka mootori jahutusvedeliku ja põlemisgaaside soojusenergiat. Kasutatakse on-off tüüpi kompressoreid või inverterkompressoreid. On-off tüüpi kompressor töötab standardkiirusel nii kaua kuni seadeväärtus on saavutatud. On-off reguleerimisviis on lihtne, kuid puuduseks on ebatäpsus ja kompressori katkendlik töötamine. Inverterkompressoriga soojuspump reguleerib kompressori pöörded vastavalt hoone hetkelisele küttevajadusele, mis annab kokkuhoiu

energiakuludelt. Inverter muudab vahelduvpinge sageduse ja kompressori töökiiruse soojusvajadusele vastavaks. [16] Laevala paigaldavate soojuspumpade puhul tuleb arvestada, et kompressorid ei talu kõikumist üle 45 ° nurga, et vältida kompressori õlide segunemist.

Kondensaator on soojusvaheti, mis võimaldab külmutusainel üle kanda soojuse tarbijale, mis on saadud külmutusaine ülekuumendamisel kompressoris. Kondensaatoris peab olema madalam temperatuur, kui külmutusainel, et soojusülekanne oleks võimalik. Eristatakse õhk-jahutusega ja vesi-jahutusega kondensaatoreid. Õhk-jahutusega kondensaatorites kantakse ülekuumendatud külmaaine soojus üle õhule, mis läbib kondensaatori soojusvahetit. Kondensaatoris võib olla üks või mitu ventilaatorit, et suurendada soojusvahetit läbivat õhukogust. Õhk-jahutusega kondensaatorid on üldjuhul paigaldatud väliskeskkonda, sest eemaldatav soojus võib tõsta liigselt ruumi temperatuuri. Vesi-jahutusega kondensaatoritel puuduvad ventilaatorid ning õhu asemel kasutatakse vett. Vesi-jahutusega kondensaatorid on vähem tundlikumad välistemperatuuri muutustele ja nendes kondensaatorites on võimalik kasutada heitvett või retsirkuleerida kondensaatoris juba kondenseerunud vett. [18]

Paisventiili abil alandatakse külmutusaine rõhku ja temperatuuri, et uue tsükli alguseks oleks külmutusaine endistel parameetritel ja aurustisse jõuaks vastav kogus külmaainet. Paisventiili sisenev külmaaine on kõrge temperatuuri ja rõhuga. Paisventiilis alandatakse rõhku ja temperatuuri läbivoolatava külmutusaine piiramise abil. Paisventiilist väljub külmaaine, mis on ligikaudu 80% vedelas olekus ning 20 % gaasilises olekus. Eristatakse termostaatilisi, automaatseid ja kapilaarseid paisventiile. [18]

Aurusti töötab soojusvahetina soojusallika ja külmaaine vahel. Aurustit läbiva külmaaine temperatuur peab olema madalam kui soojusallika temperatuur. Soojusallika soojus kantakse üle aurustit läbivale külmaainele. Külmaaine keemistemperatuur on madal, tänu millele toimub külmaaine keemine ja aurustumine. Aurusti töötab alla kastepunkti temperatuuril, mis põhjustab niiskuse välja kondenseerumist. [19]

### **2.2.2. Soojuspumba soojustegur**

Soojuspumba soojustegur COP ( ingl. k. Coefficient Of Performance) väljendab mitu kWh soojusenergiat saadakse soojuspumbaga ühest kWh elektrienergiast [20]. Kui

soojuspump toodab 3 kWh soojusenergiat, milleks kulub 1 kWh elektrienergiat, siis soojuspumba soojustegur COP on 3. [21]

$$COP = \frac{\text{Toodetud soojusenergia (kWh)}}{\text{Kulutatud elektrienergia,sh ventilaatorid,pumbad ja juhtautomaatika (kWh)}} \quad (1)$$

Soojustegur on muutuv väärtus, mis sõltub soojuspumba sisend- ja väljundtemperatuurist. Euroopa Liidus müüdavate soojuspumpade soojutegurid on testitud ja arvatud vastavalt Euroopa standardites EN 255 ja EN 14511 määratletud nõuetel. Soojuspumpade tootjate poolt antud soojustegurid on antud maasoojuspumpadele tööpunktis  $T_{\text{vedelik}}/T_{\text{pealevool}} 0/35 \text{ } ^\circ\text{C}$ , õhk-vesi soojuspumpadele tööpunktis  $T_{\text{välis}}/T_{\text{pealevool}} +7/35 \text{ } ^\circ\text{C}$  ja õhk-õhk soojuspumpadele tööpunktis  $T_{\text{välis}}/T_{\text{sise}} +7/20 \text{ } ^\circ\text{C}$ . [22]

Soojuspumpade soojustegurid on keskmiselt suurusjärgus 2-5. Soojuspumpade aasta keskmised soojutegurid vastavalt soojuspumba liigile ja küttegaafikule on välja toodud tabelis 2.1.[23]

Küttegaafik	Maasoojuspump, on/off	Maasoojuspump, inverter	Õhk-vesi soojuspump	Õhk-õhk soojuspump	Väljatõmbeõhu soojuspump
–				3,0	3,0
30/25	4,5	4,8	3,1		
35/28	4,3	4,7	3,0		
40/33	4,0	4,4	2,9		
45/35	3,8	4,3	2,9		
50/35	3,6	4,2	2,8		
55/40	3,4	4,0	2,7		
60/40	3,3	3,9	2,7		
Soe tarbevesi	2,6	2,7	2,0		

Tabel 2.1. Soojuspumpade aasta keskmised soojustegurid

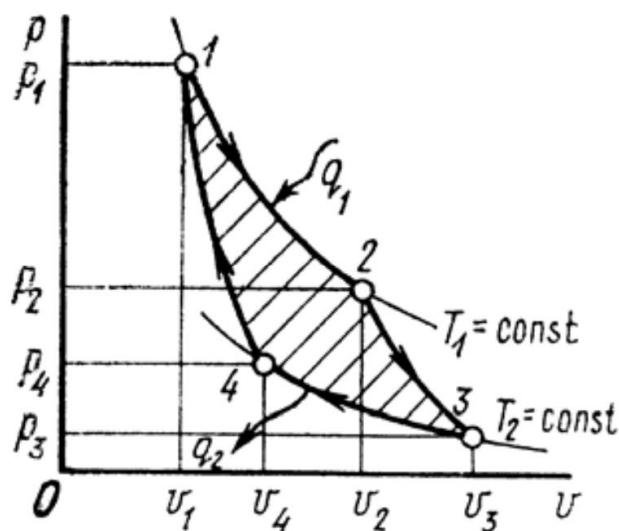
Soojuspumba hooajalise efektiivsuse väljendamiseks on soojuspumba hooajaline soojustegur SCOP (ingl.k. Seasonal Coefficient Of Performance). SCOP väljendab kütteperioodi jooksul toodetud taastuva soojusenergia ja tarbitud elektrienergia suhet. [23] Hooajalise soojusteguri SCOP arvutusvalem vastavalt standardile EVS-EN 14825:2022 [24]:

$$SCOP = \frac{Q_H}{Q_{HE}} \quad (2)$$

$Q_H$  – aastane küttevajadus, kWh

$Q_{HE}$  – aastane energiatarbimine, kWh

Teoreetiliselt on soojuspumba protsess kirjeldatav prantsuse füüsiku ja inseneri S. Carnot' ringprotsessi ideega, mille teostamiseks on piisav kahe erineva temperatuuriga keha olemasolu süsteemis. Selle teooria järgi on võimalik soojuspumba kasutegurit arvutada võttes arvesse vaid soojendi ja jahuti temperatuure. Carnot' ringprotsessi koostisosadeks on kaks isotermset ja kaks adiabaatset protsessi (Joonis 2.3). [25]



Joonis 2.3 Carnot' ringprotsess p-v diagrammil

Carnot' ringprotsessi kohaselt paisub protsessi lõigul 1-2 termodünaamiline keha (gaas) isotermsetl suurimal rõhul  $p_1$  ja temperatuuril  $T_1$ , sooritades töö ja saades soojusallikalt soojushulga  $q_1$ . Protsessi lõik 2-3 on adiabaatne, gaas kasutab töö sooritamiseks siseenergiat, mille tulemusena alaneb temperatuur  $T_1$ -lt  $T_2$ -ni. Protsessi lõik 3-4 on isotermne, temperatuur  $T_2$  on konstante ning gaas komprimeeritakse. Sooritatud töö on negatiivne, sest komprimeerimisel gaas kuumeneb, kuid soojushulk  $q_2$  eemaldatakse jahutajale  $T_2 = \text{konst.}$  tingimuse täitmiseks. Protsessi lõigul 4-1 toimub gaasi adiabaatne komprimeerimine, soojushulka ei lisandu. Lõigul 4-1 on gaasi poolt sooritatud töö negatiivne, komprimeerimisel temperatuur ja rõhk suurenevad algväärtusteni  $p_1$  ja  $T_1$ . Süsteem on läbinud ühe tsükli ning termodünaamiline keha on oma algolekus tagasi. Süsteemi poolt sooritatud töö avaldub p-v diagrammil 1-2-3-4 punktide ühendusest tekkinud viirutatud pindalana. [25]

Carnot't teoreem on sõnastatud järgmiselt: „Carnot' ringprotsessi termiline kasutegur oleneb ainult soojusallika temperatuurist  $T_1$  ja jahutaja temperatuurist  $T_2$  ega olene töötava keha omadustest.“. Carnot' maksimaalne teoreetiline soojustegur on arvutatav valemiga 3.

$$\text{COP}_C = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \quad (3)$$

$T_1$  – jahutaja absoluutne temperatuur (väljundtemperatuur)

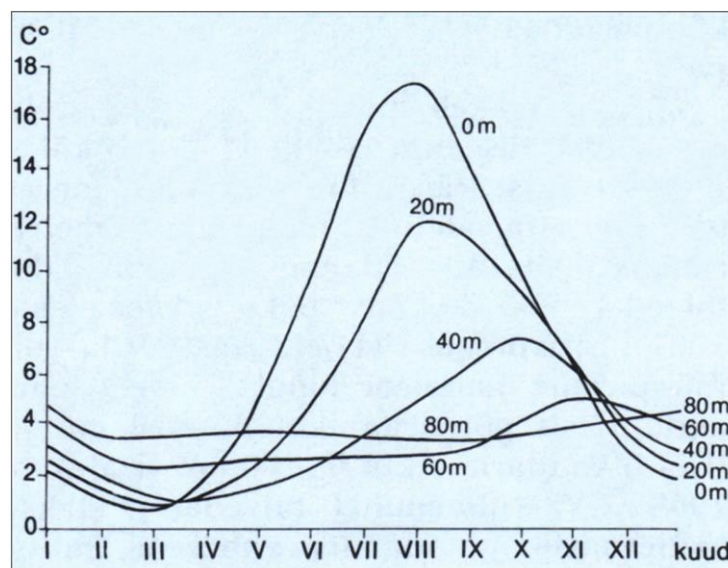
$T_2$  – soojusallika temperatuur (sisendtemperatuur)

Carnot' arvutusmeetodika annab praktikas liialt optimaalse tulemuse, sest ei arvestata soojuspumpade seadmete energia tarbimisega ja eeldatakse, et seadmed töötavad 100%-se kasuteguriga. Praktikas on soojuspumba soojustegur ligikaudu 50% Carnot' maksimaalsest teoreetilisest kasutegurist.

### **2.2.3. Merevee soojuspumbad**

Merevee soojuspumbad töötavad sarnaselt maasoojuspumpadele. Maasoojuse kasutamiseks on mitmeid erinevaid madalatemperatuurilisi energiaallikaid: energiakaev, maapind, põhjavesi või veekogu. Vastavalt hoone asukohale ja energiavajadusele valitakse sobivaim energiaallikas. Merevee soojuspumbad võivad olla avatud, suletud või otseaurustusega süsteemid. Avatud süsteemis võetakse merevesi, mis pumbatakse läbi soojuspumba aurusti ning juhitakse tagasi merre. Suletud süsteemis ringleb madala keemistemperatuuriga külmaagens merevette paigaldatud torustikus, kust ammutatakse merevee soojus ning kantakse üle aurustis soojuspumba ringi külmaainele. Otseaurustumisega maasoojuspumpadel puudub külmakandja tsirkulatsiooniring, soojusenergia kantakse väliskeskkonnast üle otse külmaainele. [26]

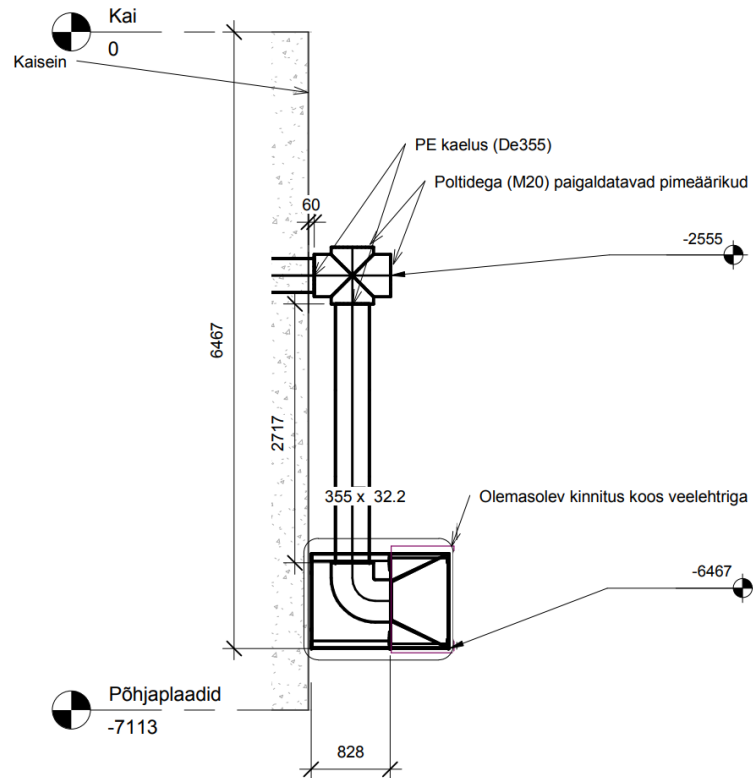
Merevee temperatuur püsib mere sügavamates kihtides aastaringselt stabiilsena. Merevee pinnatemperatuur mere avaosades on talvel ligikaudu 2–3 °C, lahtedes umbes 0 °C. Halokliini all püsib merevee temperatuur aastaringselt umbes 5 °C. Soojusvahetini jõudev merevesi ei tohiks olla madalam kui +2 °C, et ei tekiks jäätumisohtu soojusvahetis. Merevee jäätumistemperatuur sõltub merevee soolsusest, mis on Läänemere pinnakihtides ligikaudu 6-7 ‰, mille juures on jäätumistemperatuur ligikaudu -0.5 °C. [27] [28] Merevee temperatuuride muutumine vastavalt sügavustele on välja toodud joonisel 2.4. [29]



Joonis 2.4 Merevee temperatuuri muutumine vastavalt sügavusele aasta lõikes

Talvisel perioodil on merevesi üldjuhul soojem kui välisõhk, mis teeb merevee soojuspumba efektiivsemaks kui õhksoojuspumba. Suvisel perioodil püsib merevee temperatuur madalam kui välisõhu temperatuur ning soojuspumpa on võimalik kasutada ruumide jahutamiseks. [30]

Merevee soojuspumpade veehaarde projekteerimisel tuleb arvestada prügi, koorikloomade või muude organismidega, mis võivad ummistada veehaarde resti ja filtri. Veehaarde toru ots peab olema laienev koonus, et vähendada voolukiirust sissevooluavas. Koonuse otsa paigaldatakse rest ning jämefilter, mille ees ei tohiks siseneva merevee kiirus olla suurem kui 0.5 m/s. Veehaardete puhul kasutatakse isepuhastuvat Bernoulli filtrit. Suurema voolukiiruse korral ei saa restile kinnitunud koorikloomad või muud organismid sellelt lahti ning rest võib ummistuda. Merevee voolukiirus haardetorus peab olema suurem kui 2 m/s, et takistada koorikloomade ning muude organismide toru seintele kinnitumist ja seal kasvamist. Soojuspumpsüsteemi veehaardetoru lõige O3 Technology poolt projekteeritud Meremuuseumi Vesilennukiangaari veehaardetoru näitel on välja toodud Joonisel 2.5.



Joonis 2.5 Veehaardetoru lõige Meremuuseumi näitel

Merevee soolasisalduse tõttu on soojuspumpade osadele suur korrosioonioht. Soojuspumba efektiivselt töötamiseks on erakordselt tähtis soojusvaheti puhtus. Merevee soojuspumpade puhul on tootjad kasutanud titaaniumist või nikroomist soojusvaheteid, et vältida soojusvaheti pinna korrodeerumist. [31]

Merevee soojuspumpade soojustegur sõltub merevee temperatuurist. Soojuspumpade efektiivsus on suurem, kui kasutatakse põhjakihtide merevett, kus vee temperatuur püsib stabiilsena ja kõrgemana kui pinnakihtides. Rannaäärse veehaardega soojuspumba soojustegur on pidevas muutumises vastavalt merevee temperatuuri muutumisele. Mida kõrgem on merevee temperatuur, seda kõrgem on soojuspumba soojustegur.

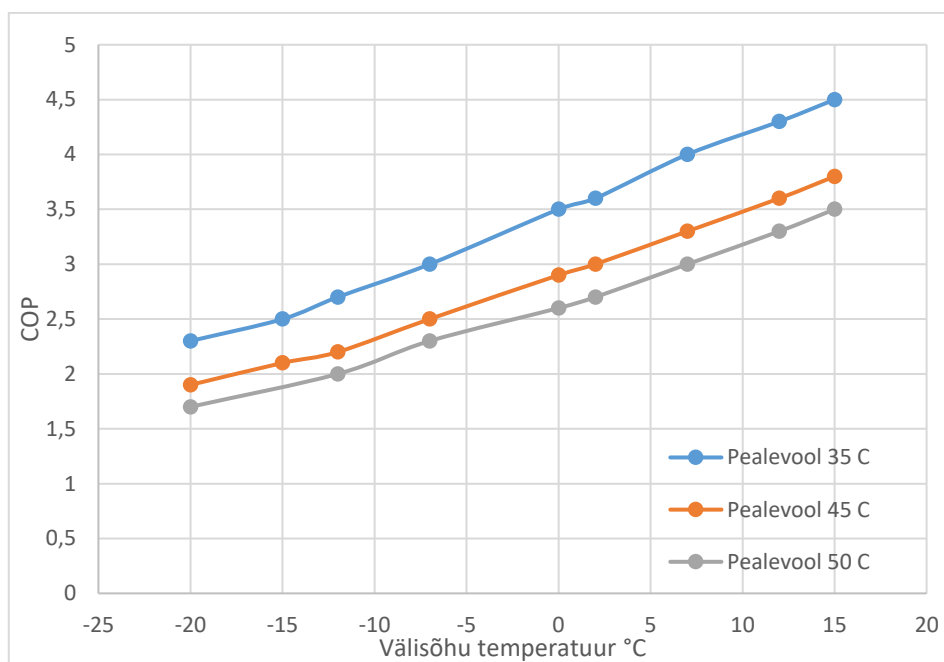
#### 2.2.4. Õhk-vesi soojuspumbad

Õhk-vesi soojuspumpade soojusallikaks on välisõhk ning soojus edastatakse hoone vesiküttesüsteemile ja tarbevee soojendamiseks. Õhk-vesi soojuspumpade eeliseks maasoojuspumpade ees on maa- või veekollektori puudumine ning erinevalt õhk-õhk soojuspumbast ei ole vaja täiendavalt kombineerida teiste küteliikidega.



Dimensioneerides õhk-vesi soojuspumba üle 10-20%, on soojuspump võimeline ka suuremate miinuskraadidega küttevajadust katma, kuid üledimensioneeritud soojuspumba kompressori töötsüklid jäävad liiga lühikeseks ja lühendavad soojuspumba eluiga. Eesti kliimas on siiski tihti vajalik soojuspumbas elektrikütteallika olemasolu. [32]

Õhk-vesi soojuspumpade soojustegur on tundlikum välisõhu temperatuuri muutustele kui maasoojuspumpade soojustegur, sest maapinna temperatuur püsib välisõhu temperatuuri muutudes stabiilsena. Välisõhu temperatuuri alanedes väheneb õhk-vesi soojuspumba soojustegur ning küttevajaduse katmiseks on vajalik kasutada elektrilist lisaküttekeha. Joonisel 2.6 on näidatud soojusteguri sõltuvus välisõhu temperatuurist. Soojuspumba andmed on mõeldud kasutamiseks Tallinna Tehnikaülikooli projektides ja on väljastatud antud töö juhendaja poolt.



Joonis 2.6 Õhk-vesi soojuspumba soojusteguri sõltuvus välisõhu temperatuurist

Õhk-vesi soojuspumpasid on kahte liiki – monoblokk ja split tüüpi soojuspumbad. Monoblokk tüüpi õhk-vesi soojuspumbal toimub soojusülekanne pumba välisosas. Monoblokk tüüpi soojuspumbad väljuvad tehasest hermeetiliselt suletud süsteemina. Paigaldusel monteeritakse vaid veetorud ning külmutusagensi ühendusi tegema ei pea. Monoblokk tüüpi soojuspumpade müratase on madalam kui split tüüpi õhk-vesi soojuspumpadel. Split tüüpi õhk-vesi soojuspumbad väljuvad tehaselt hermeetiliselt mittesuletud süsteemina. Paigaldusel teostatakse külmutusagensi torustiku ühendused pumba sise- ja välisosa vahel. [33]

## 2.2.5. Külmutusagensid

Soojuspumpades kasutatakse erinevaid külmutusagense, mis teevad soojuspumbas soojuse tootmise võimalikuks. Soojuspumba ringprotsessi külmaaine peab olema sobiv termodünaamilisest, füüsilisest ja keemilisest seisukohast. Külmutusagensi tähtsaimad omadused [34]:

- Kõrge küllastusrõhk
- Kõrged kriitilised parameetrid
- Omab suurt faasimuundussoojust
- Omab väikest mõju osoonikihi suhtes
- Ei soodusta kasvuhoooneefekti
- On väikse toksilisusega
- Ei ole tuleohtlik
- Ei juhi elektit
- Ainel on suur tihedus
- Seguneb hästi kompressori poolt kasutatava õliga
- Ei lahustu vees

Külmutusagensid on süsivesinike baasil toodetud vedelikud, mille rahvapärane nimetus freon on tulnud keemiafirma DuPont kaubamärgist Freon. Külmutusagenside tähistuse aluseks on ANSI/ASHRAE standard 34-1997, mille järgi on külmutusaine tähiseks „Rxyz“, kus x= süsinikuaatomite arv + 1, y= vesinikuaatomite arv - 1, z= fluoriaatomite arv aine molekulis. [34]

Soojuspumpades külmainetena on enamjaolt kasutuses segud R407, R410 ja R32, mis kuuluvad fluorosüsivesinike (HFC) hulka. Maasoojuspumpade maakontuuris kasutatakse bioetanooli. [35]

Külmutusagensid põhjustavad osoonikihi hävinemist ja kliimasoojenemist, mille iseloomustamiseks on tegurid ODP (Ozone Depletion Potential) ja GWP (Global Warming Potential). Alates aastast 2025 keelustatakse Euroopa Liidus kliimaseadmetel külmaained, mille GWP on suurem kui 750. [36]

## 2.3. Katlakütused

Katelseadmetes vabaneb soojus kütuse põlemisel ja kandub läbi metallist küttepinna küttesüsteemis ringlevale veele. Katla osa, kus toimub kütuse põlemine, nimetatakse koldeks, mis jaotuvad kamberkolleteks ja kiht- ehk restkolleteks. Gaaskütuste, vedelkütuste ja pelletite põletamine toimub kamberkolletes. Kiht- ehk restkolletes toimub tahkete kütuste põletamine. [37]

Kolde soojuskoormus näitab kütusepõlemisel ajaühikus koldes eralduvat soojushulka. Kolde soojuskoormus on arvutatav valemiga:

$$Q_{\text{kolle}} = B \cdot Q_a^t \quad (3)$$

, kus:

$Q_{\text{kolle}}$  – kolde soojuskoormus kW

$B$  – kütusekulu kg/s

$Q_a^t$  – tarbimisaine alumine kütteväärtus kJ/kg

Katla kasutegur on soojusvõimsuse suhe sellel võimsusel ajaühikus kulutatud kütuse põletamisel eralduva soojusenergiaga. Kasutegur on arvutatud nominaalkoormusel, koormuse vähenemisel või katla üle forsseerimisel langeb katla kasutegur. Katla kasutegur otsese bilansi järgi on leitav valemiga:

$$\eta_k = \frac{100 \cdot Q_{\text{kas}}}{B \cdot Q_a^t} \quad (4)$$

$$Q_{\text{kas}} = G(h_2 - h_1) \quad (5)$$

, kus:

$\eta_k$  – katla kasutegur

$Q_{\text{kas}}$  – kasulikult kasutatav soojushulk kW

$G$  – katelt läbive vee kulu kg/s

$h_1$  – katlasse siseneva vee entalpia kJ/kg

$h_2$  – katlast väljuva vee entalpia kJ/kg

Katelseadmete kasutegurid on välja toodud Majandus- ja taristuministri määruses nr. 58 (Tabel 2.2).

Soojusallikas	Kasutegur
Kaugküte	0,9
Õli- või gaasikatel	0,85
Õli, kondensatsioonikatel	0,90
Gaas, kondensatsioonikatel	0,95
Pelletikatel	0,85
Muu tahkekütuse katel	0,75
Elekterküttega katel	1,0
Ahi	0,6

Tabel 2.2 Soojusallika kasutegur kütuse tarbimisaine alumise kütteväärtuse alusel

### 2.3.1. Pellet

Pelletid on väikesed 6-8 mm läbimõõduga silindrilise lõikega saepurugraanulid, mida toodetakse metsa- ja puidutööstustes tekkivast saepurust ja hõvellaastust. Puidutööstuse jääkmaterjal jahvatatakse ning pressitakse suurel rõhul pelletiteks. Pellet on tänapäeval ainuke kodumaine taastuenergia valdkonda kuuluv katlakütus, mille kasutamisel nii väikestel kui ka suurtel võimsustel saavutatakse vedel- ja gaasikütuse puhtus, mugavus ja automatiseeritus. [38]

Pelletid põlevad CO<sub>2</sub> neutraalselt ehk põletamisel eraldub sama suur kogus süsinikdioksiidi, kui Maa atmosfäär kasutas puu kasvamise ajal. Kütteväärtus näitab ühe kg pelleti põletamisel eralduvat soojust, mida mõjutab graanuli niiskus- ja tuhasisadlus. Niiskussisaldusega 5-8 % pelleti kütteväärtus on vahemikus 4,6-5 kWh/kg. Kõrgeima kütteväärtusega pellet on toodetud männi- või kuusesaepuru või hõvellaastu segust. Eestis toodetud pelletid on enamasti kõrge kütteväärtusega, sest need on toodetud just männi- või kuusepuidust. [39]

Katlad kasutavad pelletiga kütmiseks eraldi spetsiaalseid põleteid, mis töötavad automaatrežiimil ning tarbija ülesanne on jälgida, et kütusepunkris oleks piisavalt pelleteid. Küttesüsteemide renoveerimisel on võimalik pelletipõleti lisada ka varem muud kütust kasutanud katlale.

### **2.3.2. Vedelkütused**

Vedelkütus on vedel põlevaine, mida saab kasutada energiaallikana soojusjõumasinares ja muudes selleks sobivates energiamuundamisseadmetes. Katlakütusena on levinumad kerge või raske kütteõli, diislikütus, või põlevkivikütteõli. [40]

Katlakütusena kasutatakse rasketest kütteõlidest nafta töötlemise saaduseid, mille omadused võivad sõltuda toornafta kvaliteedist ja selle ümbertöötlemise viisist. Rasket kütteõli on ligikaudu 20 °C kraadi juures viskoossed vedelikud [41]. Kerged kütteõlid jagunevad suvisteks ja talvisteks, mis erinevad oma viskoossuselt. Suvise kütteõli viskoossus 20 °C kraadi juures on ligikaudu 5 mm<sup>2</sup>/s ning talvise 4 mm<sup>2</sup>/s. Kergeid kütteõlisid kasutatakse katlakütusena eramutes, tööstustes põllumajanduses ja laevadel. Kerge kütteõli alumine kütteväärtus on ligikaudu 10,0 kWh/l. Diislikütuse alumine kütteväärtus on 9,7 kWh/l. [42]

### **3. METOODIKA**

Lõputöö koostamisel täpsustatakse laeva lähteandmed, koostatakse ja kalibreeritakse laeva simulatsioonimudel, arvutatakse soojuskoormused ja energiakulu, katsetatakse ja analüüsitakse erinevate küttesüsteemide sobivust ja energiatõhusust arvestades laeva ehituslike eripäradega.

#### **3.1. Uurimisobjekt**

##### **3.1.1. Uurimisobjekti tutvustus**

Valvas on Eesti Meremuuseumile kuuluv laev, mis seisab Tallinnas Lennusadama kai ääres meres ning on kasutusel muuseumina. Laeva pikkus on 55 meetrit, laius 11,3 meetrit ning süvis 3,7 meetrit. Laev on ehitatud 1943. aastal Zenith Dredge Company poolt Minnesotas Duluthis. Esimest korda lasti laev vette 11. novembril 1943. aastal. Laev võeti teenistusse 1944. aastal BITTERSWEET nime all. Laev teenis Alaskal kuni 1976. aastani, hiljem oli laeva kodusadamaks Woods Hole Massachusettsis Ameerika Ühendriikides. Laeva renoveeriti Ameerika Ühendriikides kaks korda – aastatel 1976-1978. ja 1991. aastal. [43]

Aastal 1997. kingiti laev Ameerika Ühendriikide laevastiku uuendamise tõttu Eestile. See laev on esimene Eesti riigilaev, mis ületas Atlandi ookeani. Eestis sai laev nimeks VALVAS. Eestis oli laev esialgu kasutuses Pärnu lähel jää lõhkumiseks kaubalaevade jaoks, kuid ostutus selleks siiski liiga väikseks ja peamasinad liiga nõrgaks. Laev eemaldati teenistusest 2010. aastate alguses. Alates 2014. aastast kuulub laev Eesti Meremuuseumile. [44]

Laeval on kokku 6 tekki ja 400 m<sup>2</sup> köetavat pinda. Teisel alumisel tekil asuvad mageveetankid, diiselmootori hoidlad, masinaruum, fekaaltanki ruum ja laod. Esimesel alumisel tekil asuvad mageveetankid, diiselmootori hoidlad, peamootori ruum, masinaruum, 2 töökoda, saun koos eesruumi ja dushiruumiga, 5 kajutit, triikimis- ja pesuruum. Peatekil on kajutid, puhkeruumid, wc- ja dushiruumid, masinaruum ja roolimasina ruum. Esimesel ülemisel tekil asub komandöri ruum koos wc- ja dushiruumiga. Ülemisel teisel tekil on raadio ruum ja kaardi ruum. Ülemisel kolmandal tekil asub kaptenisild.

### 3.1.2. Konstruksioon

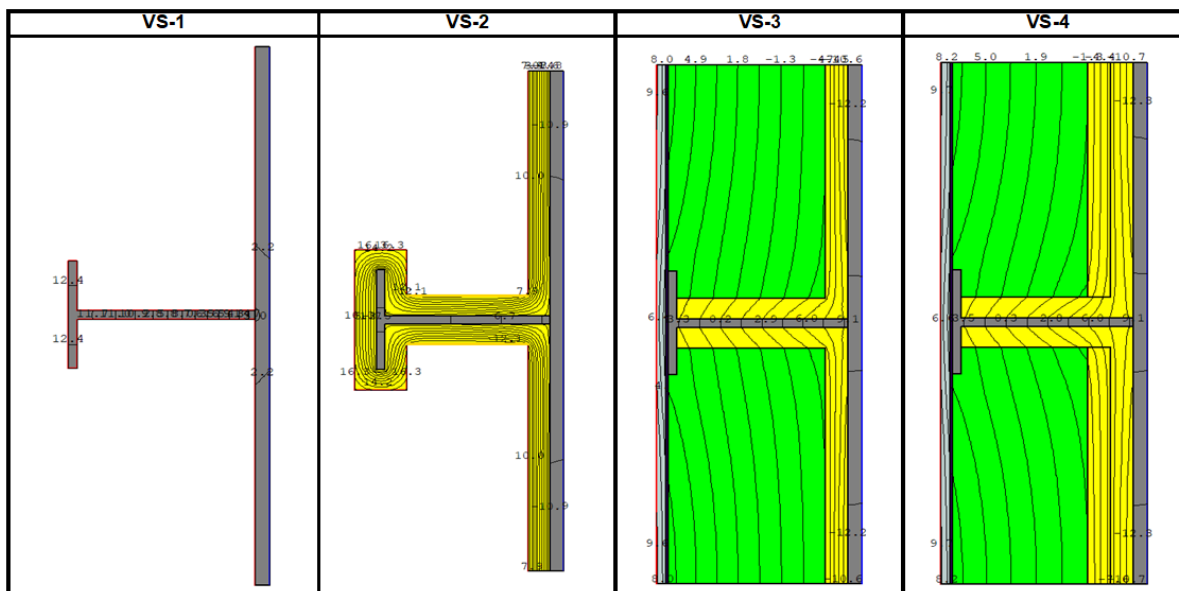
Laev on valmistatud terasest ning laevakere välimise terase paksus on 10-12 mm. Laeva suured soojuskaod on tingitud terase kõrgest soojusjuhtivusest, vähesest isolatsioonimaterjalist ja terastaladest tekkivatest läbivatest külmasildadest. Laeva teraskonstruksioon koosneb I ja T taladest. Piirete vertikaalse karkassi samm on 1100 mm ning horisontaalse 500 mm. Vahelagede ja katuslae teraskarkassi samm on 520 mm.

Soojustusmaterjalina on kasutatud tulevilla ning tulekindla kattega villaplaate. Allpool veepiiri masina- ja mootoriruumides pole kasutatud soojustusmaterjale, ladudes ja olmeruumides katab terast 20 mm paksune tulevill ning kajutites on lisaks metallkarkassil laminaat. Veepiirist kõrgemal asuvates mootoriruumides katab terast 20 mm paksune tulevill ning kajutites ja eluruumides on lisaks tulevillale karkassi vahele paigaldatud tulekindla kattega villaplaat ning viimisluskihina laminaat. Vaheseinad on metallkarkassil, karkassi vahel oleva soojustusmaterjali paksus on varieeruv 20-30 mm.

Materjal	Materjali- kihi paksus, mm	Soojuseri- juhtivus $\lambda$ , W/(m·K)
<b>VS-1</b>		
Teras	12	50
$U = 5,8 \text{ W/(m·K)}$		
<b>VS-2</b>		
Teras	12	50
Kivivill	20	0,05
$U = 2,6 \text{ W/(m·K)}$		
<b>VS-3</b>		
Teras	12	50
Kivivill	20	0,05
Alumiinium	2	200
Laminaatplaat	8	0,2
$U = 2,5 \text{ W/(m·K)}$		
<b>VS-4</b>		
Teras	12	50
Kivivill	20	0,05
Villaplaat	50	0,05
Alumiinium	2	200
Laminaatplaat	8	0,2
$U = 2,0 \text{ W/(m·K)}$		

Tabel 3.1 Piirete tüübid ja omadused

Piirete soojustehniline toimivus on kontrollitud LBNL Therm 7.6 tarkvaraga. Laeva välispiirded on sõltuvalt laeva teki kõrgusest muutuva paksusega, mille tõttu on modelleeritud lihtsustatud piiretetüübid. Piirete soojustehnilisel arvutusel kasutatud materjalide omadused on välja toodud tabelis 3.1 ja piirete lõiked joonisel 3.1.



Joonis 3.1 Piirete lõiked isotermidega

### 3.1.3. Küttesüsteem

Laeva kütmiseks on kaks diislikütust kasutavat katelt, millest üks on pidevalt töös ning teine on reservkatel, mis pole hetkel töökorras. Katla tootja on Way-Wolff ning mudel Ship-Heater 5848-14, toodetud 1987. aastal. Katla norminaalne soojusväljastus on 420 000 B.T.U/HR ehk 123 kW ning maksimaalne soojusväljastus 840 000 B.T.U/HR ehk 246 kW.

Laeva eluruumidesse (kajutid, kontorid, puhkeruumid) on paigaldatud puhurkonvektorid tootjatelt Carrier ja Wesper. Puhurkonvektor on ruumipõhiselt juhitav seinale paigaldatud juhtpuldilt. Lisaks on laeva renoveerimise käigus peateki kajutitesse paigaldatud vesiradiaatorid termostaatventiilidega ning elektriradiaatorid osadesse wc- ja dushiruumidesse. Masinaruumis ja mootoriruumis on paigaldatud vesiküttega kalorifeerid, mis ei ole töökorras. Torude külmumise vältimiseks on masina- ja mootoriruumidesse paigaldatud elektril töötavad puhurid, mida kasutatakse vastavalt vajadusele.



Küttesüsteemi pealevoolu temperatuur on juhitav katla juurest manuaalselt. Automatiseeritud välistemperatuurist sõltuvat küttegraafikut kasutusel ei ole. Talvisel perioodil on küttesüsteemi vee pealevoolu temperatuur 55 °C.

Laevas on perioodiline küte. Puhurkonvektorid hoitakse töös ruumides, kus inimesed viibivad – üldjuhul komandörruum, peatekil meeskonna mess, kasutuses olevad kajutid ning esimese alumise teki koridor. Ülejäänud kajutitel ja ruumidel hoitakse ukсед lahti ning köetakse vastavalt vajadusele. Viibitavates ruumides hoitakse siseõhu temperatuur keskmiselt 18-20 °C. Juhul kui välisõhu temperatuur on üle 0 °C, lülitatakse ööseks katel välja, sest pumpade müra häirib öisel ajal laeval viibivaid meeskonna liikmeid. Sellises olukorras, kus katel öösel ei tööta, on hommikuti kajuti siseõhu temperatuur ligikaudu 8-10 C°, mis annab märgatava kokkuhoiu küttekuludelt võrreldes ööpäevaringselt siseõhu temperatuuri 18-20 °C hoidmisega.

### **3.1.4. Ventilatsioonisüsteem**

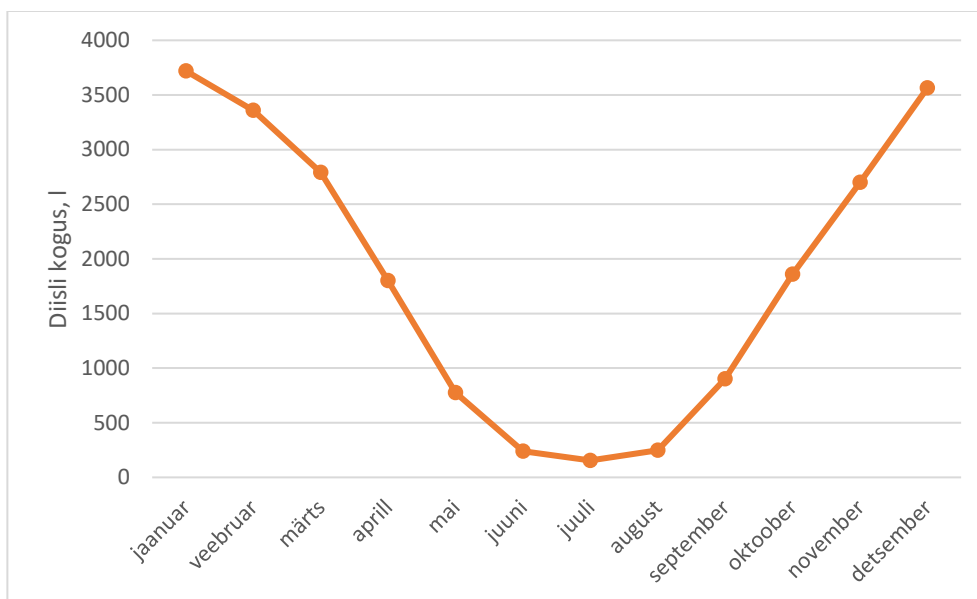
Laeval on välja ehitatud soojustagastuseta sissepuhke-väljatõmbe ventilatsioon, mis ei ole igapäevaselt kasutuses ning on vaid osaliselt töökorras. Esimesel alumisel tekil on kajutides sissepuhke ja väljatõmme, wc- ja dushiruumis väljatõmme. Sissepuhke- ja väljatõmbeventilaatorid on käivatavad juhtpuldilt, mis asub esimesel alumisel tekil. Vastavalt laeva meeskonna infole käivatatakse ventilaatoreid vastavalt vajadusele, kuid enamjaolt need kasutust ei leia. Saab järeldada, et laeval sunventilatsioon puudub.

Masinaruumist lähevad katusele õhutustorud, mille kaudu toimub loomulik ventilatsioon. Õhu liikumine saab toimuda ka läbi uste ja akende, sest laeva ukсед ei ole õhukindlad ning illuminaatorite tihendid on kulunud.

## **3.2. Lähteandmed**

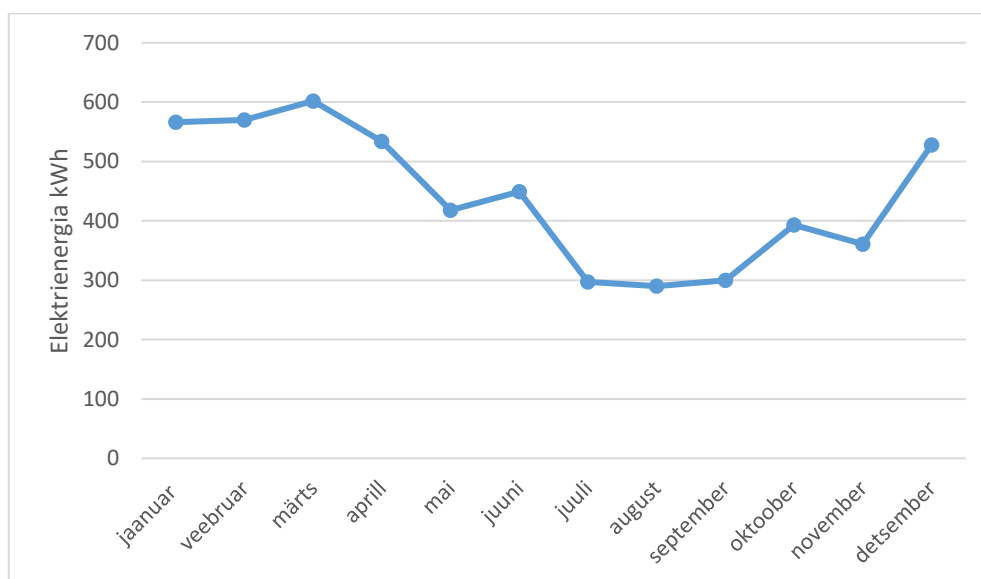
Laeva kütmiseks kuluva diisli kogus on arvatud lähtuvalt tellitud kogusest ja tellimuste vahelisest ajavahemikust. Reaalse päevase koguse mõõtmine on keeruline, sest diislitankides olevat kogust ei ole võimalik täpselt mõõta. Novembrist märtsini on kulunud laeva kütmiseks 70-110 liitrit diiselkütust päevas. Näiteks 2021. aasta detsembris, kui keskmine kuu keskmine välisõhu temperatuur oli -0,9 °C, kulus

diiselkütust 3352 liitrit, ehk keskmiselt 108 liitrit päevas. Märtsist kuni oktoobrini kulub samal aastal 9300 liitrit kütust, mis teeb suveperioodi keskmiseks kütusekuluks 39 liitrit päevas.



Joonis 3.2 Laeva aastane diislikulu küttele

Laeva elektritarbimine on talvekuudel keskmiselt 500-600 kWh ning suvekuudel 300-400 kWh. Elektrit tarbivad valgustid, seadmed ja elektriradiaatorid. Kuna laev töötab muuseumilaevana, siis laeva peamasinad kasutuses ei ole. Elektritarbimise vähenemine suvekuudel võib olla tingitud elektriradiaatorite kasutamisest, mis on paigaldatud osadesse kajutitesse ja neid kasutatakse vastavalt vajadusele. Laeva elektritarbimine on 2022. aasta näitel on välja toodud joonisel 3.3.

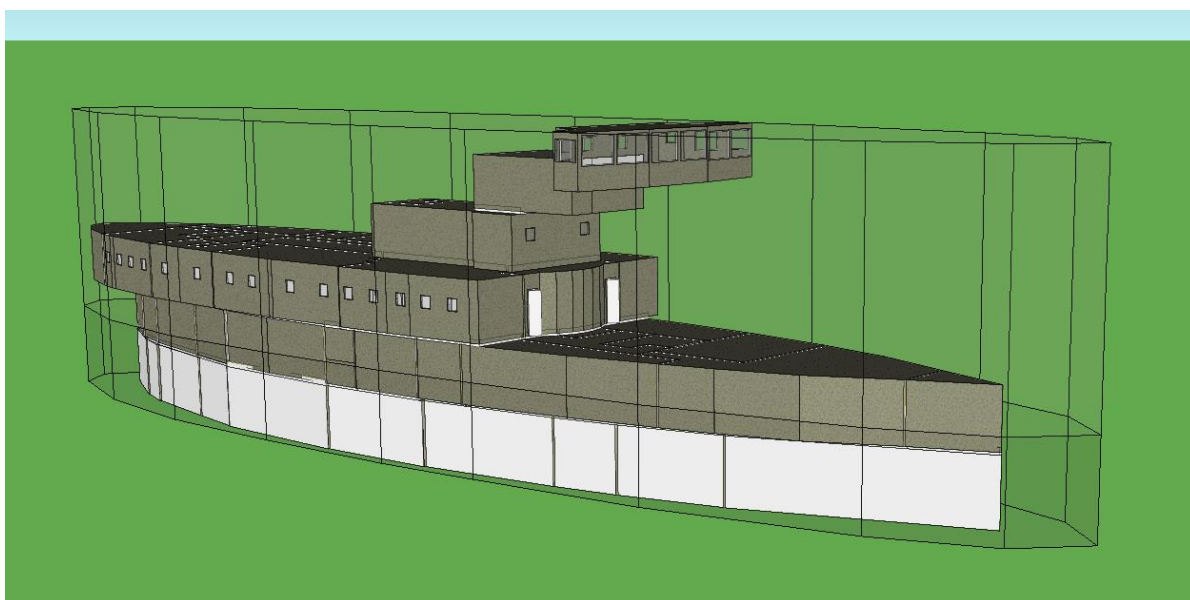


Joonis 3.3 Laeva elektrienergia tarbimine 2022. aastal

### 3.3. Simulatsioonimudel

Küttekoormuste ja energiatarbimise arvutusteks on loodud mudel simulatsioonitarkvaras IDA Indoor Climate and Energy. Laeva võimalikult täpse geomeetria sisestamiseks tarkvarasse on imporditud laeva korruseplaanid CAD joonistena. Jooniste põhjal on määratud ruumide mõõtmed ja asukohad. Mudelis on ruumid jaotatud arvutussoonideks, millest ühesuguse kasutusprofiili ja temperatuuriga ruumid on ühendatud ühte tsooni. Laeva omapärast geomeetriat arvestades on mudeli *building body* määratud laeva kõige laiema teki järgi ning ülejäänud tsoonide välistingimused on määratud igale seinale eraldi. Simulatsioonimudel on näidatud joonisel 3.4.

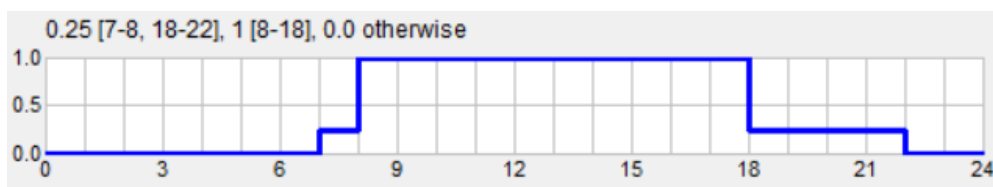
Simulatsioonide läbiviimisel on mudeli lokatsiooniks määratud Tallinn. Laeva vöör on suunatud lõunakaarde. Välistingimuste saavutamiseks väljaspool välispiirdeid on kasutatud Eesti kliimat simuleerivat Estonia TRY kliimafaili. Allpool veeliini olevate piirete väliskeskonna simuleerimiseks on tehtud lihtsustus ning määratud konstantne merevee temperatuur 3 kraadi, mis on köetava perioodi keskmine merevee temperatuur.



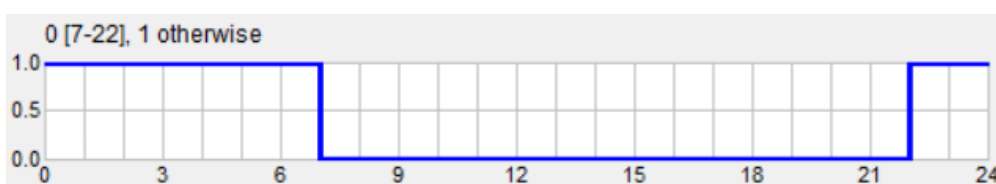
Joonis 3.4 Laeva simulatsioonimudeli 3D vaade IDA ICE tarkvaras

Korrektsete simulatsioonitulemuste saamiseks peab olema mudel kalibreeritud ning vastama reaalsele andmetele. Esmalt täpsustati laeva kasutusprofiilid. Tööpäevadel

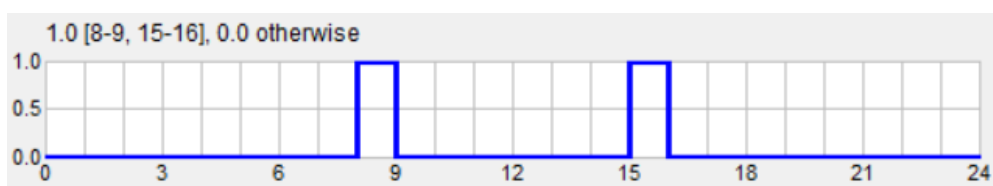
viibib laeval keskmiselt 3 inimest. Öösiti on laeval 1 kuni 2 inimest. Inimeste aktiivsustase on pigem madal – kergelt aktiivne liikumine, millele vastab 1,5 met. Laeval on kuus tekki, inimesed viibivad põhiliselt peatekil või ülemisel esimesel tekil, lühiajaliselt alumistel tekkidel. Mudelis on määratud inimeste kasutusprofiilid vastavale ruumitüübile (joonis 3.4, 3.5 ja 3.6)



Joonis 3.4 Laeva eluruumide inimeste kasutusprofiil



Joonis 3.5 Laeva kasutusel olevate kajutite inimeste kasutusprofiil



Joonis 3.6 Laeva masina- ja mootoriruumide inimeste kasutusprofiil

Täpsustati laeva valgustuse ja seadmete kasutusprofiilid ja võimsused. Laev on kasutusel vaid muuseumilaevana ning laeva peamasinad- ja mootorid ei tööta. Laeval on köök, mida kasutatakse söögi tegemiseks keskmiselt 2 korda päevas. Kasutatakse elektripliiti, mille võimsus on 2 kW. Valgustusena on laevas kasutusel päevavalguslambid ning ühe valgusti võimsuseks arvestatud 40 W. Seadmetest töötavad kütte- ja tarbeveesüsteemi ringluspumbad, komandörikajutis arvuti ning mõnes kajutis lisaks elektriradiaator. Seadmete tööaeg on sisestatud mudelisse vastavalt laevameeskonna kirjeldustele.

Mudelisse on sisestatud laeva piirdetarindid ja soojusjuhtivused vastavalt peatükis 3.1.2 välja toodud väärtustele. Illuminaatorid on mudelisse sisestatud ühekordse klaaspaketina, mille soojusjuhtivus  $U=5,8 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Kaptenisillal on kahekordse klaaspaketiga aknad, mille soojusjuhtivus  $U=3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Välisüksed on terasest ning soojustusetu, nende soojusläbivuseks on arvestatud piirde VS-1  $U$ -arv  $5,8 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ .

Ruumides hoitav siseõhu temperatuur on sõltuvalt ruumi kasutusest erinev. Viibitavates ruumides hoitakse keskmiselt 18-20 °C, harva viibitavates ruumides 12-15 °C ning masina- ja mootoriruumides hoitakse talvisel perioodil torude jäätumise vältimiseks miinimum 0 °C. Mudeli tsoonid koos temperatuuridega on välja toodud tabelis 3.2.

Tarbevee soojendamiseks on arvestatud sooja tarbevee kulu 35 liitrit inimese kohta päevas. Mageveetankid täidetakse kaitl külma tarbeveega ning tarbevee soojendamine toimub katlaga.

<b>Korrus</b>	<b>Ruum</b>	<b>Pindala, m<sup>2</sup></b>	<b>Temperatuur, °C</b>
II alumine tekk	Masinaruum	66,7	5
II alumine tekk	Peamootori ruum - alumine	27,7	5
II alumine tekk	Diiselmootori tankid - alumine	22,6	-
II alumine tekk	Laoruumid 1	54,7	5
II alumine tekk	Laoruum 2	22,5	5
II alumine tekk	Fekaaltanki ruum	58,7	-
II alumine tekk	Magaveetank - alumine	8,3	-
II alumine tekk	Magaveetank2 - alumine	30,2	-
II alumine tekk	Ladu 3	6,3	5
II alumine tekk	Võõrpiik - alumine	29,5	-
I alumine tekk	Sauna eesruum	39,9	15
I alumine tekk	Kajutid 1	27,2	15
I alumine tekk	Saun	4,4	15
I alumine tekk	Duširuum	8,6	15
I alumine tekk	Tualettruum 1	9,4	12
I alumine tekk	Koridor 1	19,8	18
I alumine tekk	Töökoda	22,2	5
I alumine tekk	Kajut 2	5,2	10
I alumine tekk	Laoruum 3	37,3	5
I alumine tekk	Laoruum 4	6,6	5
I alumine tekk	Pesuruum-ladu	15,3	5
I alumine tekk	Peamootori ruum - ülemine	66,6	10
I alumine tekk	Diiselmootori tankid - ülemine	23,5	-
I alumine tekk	Peamootoriruum 2 - ülemine	26,4	-
I alumine tekk	Laoruum 5	8,8	5
I alumine tekk	Laoruum 6	5,6	5
I alumine tekk	Võõrpiik - ülemine	3,6	-
Peatekk	Kambüüs - meeskonna mess	39,5	20
Peatekk	Kajut - kasutuses 1	13,0	18
Peatekk	Tualetid	6,1	15
Peatekk	Ambulants	5,0	15
Peatekk	Kajut - kasutuses 2	15,6	18
Peatekk	Kajut - pole kasutuses 1	5,9	12

Peatekk	Kajut - pole kasutuses 2	11,1	12
Peatekk	Tualett	2,8	10
Peatekk	Roolimasina ruum	17,7	5
Peatekk	Ohvitseride mess	20,6	12
Peatekk	Dekikontor puhkeruum	33,8	18
Peatekk	Koridor-peatekk	34,3	18
Peatekk	kajutid - pootsman tüürimees	11,1	12
Peatekk	Puhvet - ohvitseride mess	4,4	10
Peatekk	Masinaruum-peatekk	21,6	5
Peatekk	Puhvet - köök	4,0	12
Peatekk	Peateki koridorid sissekäigud	15,1	5
I ülemine tekk	Komandörikajut	30,7	18
I ülemine tekk	Tualett - komandöri	2,8	15
II ülemine tekk	Kaardiruum Raadioruum	21,5	5
III ülemine tekk	Kaptenisild	27,4	0

Tabel 3.2 IDA ICE simulatsioonimudeli tsoonid

### 3.4. Küttesüsteemide arvutused

Laeva küttesüsteemi alternatiivide võrdluseks võetakse neli küttelehendust, mida on võimalik laeval rakendada ja mis sobivad meie kliimatingimustesse. Küttesüsteeme võrreldakse järgmistes kategooriates:

- Tehniline teostatavus
- Efektiivsus
- Hooldustööd ja hoolduskulud
- Eluiga
- Keskkonnamõju
- Tasuvusaeg võrreldes olemasoleva küttesüsteemiga

Võrreldavad küttesüsteemid:

- Õhk-vesi soojuspump
- Merevee soojusvahetiga vesi-vesi soojuspump + lisaküte
- Kombineeritud soojuspumpsüsteem, samas kontuuris merevee läbi pumpamisel põhineva soojusvahetiga ja välisõhu soojusvahetiga
- Pelletiküttel katel

### 3.4.1. Soojuspumpade arvutused

Soojuspumpsüsteemi analüüsiks koostatakse tunnipõhine arvutus baasaasta põhjal, mille abil saab võrrelda soojuspumpade võimsuseid ja soojustegureid vastavalt välistemperatuurile ja siseneva soojuskandja temperatuurile. Kombineeritud soojuspumpsüsteemi arvutusel valitakse tunnipõhise arvutuse alusel vastavatel tingimustel efektiivsemalt töötav soojusvaheti. Soojuspumpade arvutuste jaoks katsetati erinevaid valemeid.

1) Carnot' teoreemi kohaselt:

$$\text{COP}_C = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \quad (6)$$

$T_1$  – jahutaja absoluutne temperatuur (väljundtemperatuur)

$T_2$  – soojusallika temperatuur (sisendtemperatuur)

2) Scientific Data soojuspumpade efektiivuse uuringus energiamudeli jaoks tuletatud valem koos vastavate konstantidega [45]:

$$\text{COP} = a_0 + a_1 \cdot \Delta T + a_2 \cdot \Delta T^2 \quad (7)$$

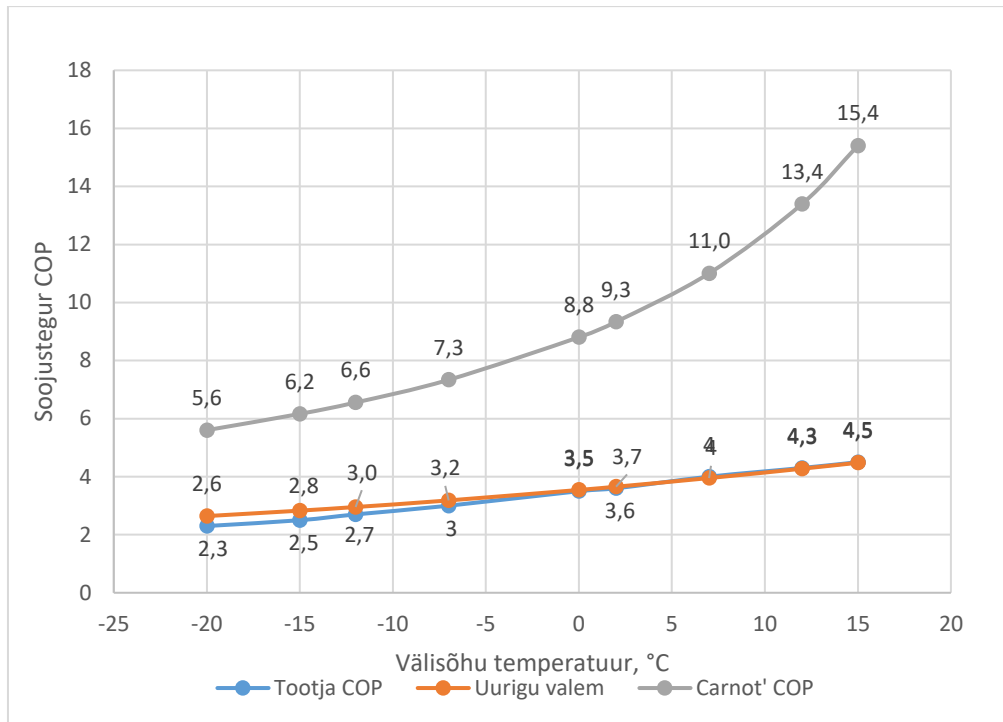
$$\Delta T = T_{\text{väljund}} - T_{\text{allikas}}$$

Konstandid  $a_0$ ,  $a_1$  ja  $a_2$ :

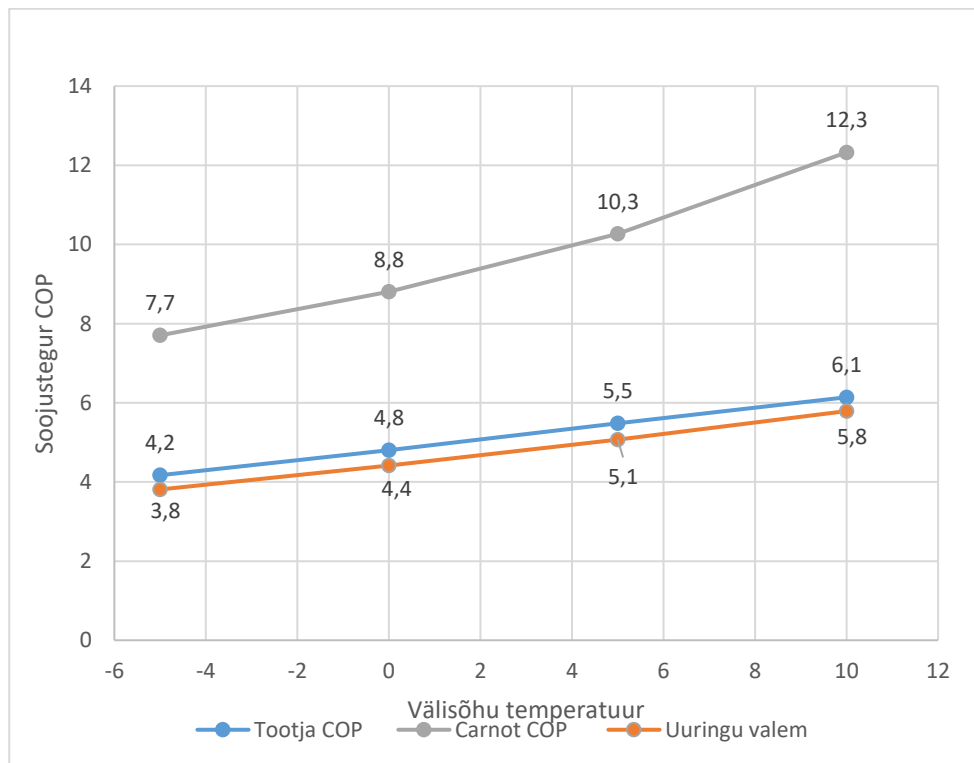
veesoojuspumpadele:  $a_0=9,97$ ,  $a_1=-0,2$  ja  $a_2=0,0012$

õhksoojuspumpadele:  $a_0=6,08$ ,  $a_1=-0,09$  ja  $a_2=0,0005$

maasoojuspumpadele:  $a_0=10,29$ ,  $a_1=-0,21$  ja  $a_2=0,0012$



Joonis 3.7 ÕVSP arvatud soojustegurite võrdlus



Joonis 3.8 MSP arvatud soojustegurite võrdlus

Valemeid katsetati ja võrreldi soojuspumpade tootja poolt antud soojusteguritega erinevatel välisõhu- ja pealevoolutemperatuuridel ning pealevoolutemperatuuril 35 °C (joonis 3.7 ja 3.8). Carnot' valemiga arvatud soojustegurid tulid ligikaudu 50-70 % suuremad tootja poolt antud soojustegurist, sest valem ei arvesta süsteemi kadudega.



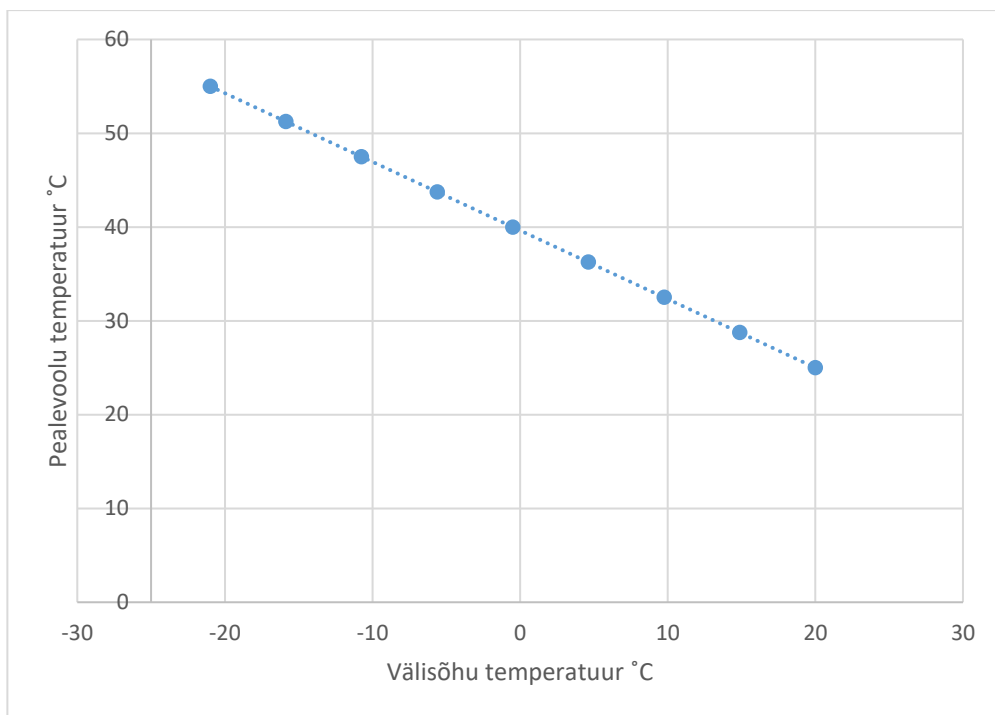
Scientific Data uuringust pärit valemiga arvatud õhk-vesi soojuspumpade soojustegurid ühtisid tootja soojusteguriga välisõhu temperatuuridel üle 0 °C, madalamatel välisõhu temperatuuridel oli erinevus ligikaudu 2 %.

Maasoojuspumpade puhul oli uuringu valemiga arvatud soojustegur 2-3 % madalam kui tootja poolt lubatud soojustegur. Katsetusest saab järeldada, et Scientific Data uuringu soojusteguri valemeid on võimalik kasutada soojuspumba efektiivsuse hindamiseks, kuid peab arvestama 2-3 % veaga. Juhul kui on olemas soojuspumba tootelehel mitmetel temperatuuridel soojustegurid, saab konstandid ise tuletada ning arvutada täpsemad andmed konkreetse soojuspumba efektiivsuse kohta erinevatel tingimustel.

Tunnipõhises arvutuses on olemasolevate andmetena sisestatud Estonian TRY tunnipõhiseid õhutemperatuurid, Tallinna lahes mõõdetud merevee temperatuurid 5 m sügavusel ning IDA ICE energiasimulatsiooni tulemusel saadud tunnipõhised energiavajadused küttele ja soojale tarbeveele. Tunnipõhiste andmete põhjal on arvatud igale tunnile vastav pealevoolutemperatuur, soojuspumpade soojustegurid ja väljastatavad küttevõimsused, vajaliku lisakütte võimsus, soojuspumpade kompressorite elektritarve ning välisõhu soojusvaheti elektritarve.

Pealevoolu temperatuur on arvatud vastavalt välisõhu temperatuurile. Pealevoolu temperatuur on sõltuv välisõhu temperatuurist ning merevee temperatuuri ei arvestata, sest allpool veeliini olevates ruumides ei viibita pikema aja vältel ja konstantset ruumi temperatuuri pole vaja hoida. Kui laeva allpool veeliini olevate ruumide kütetorustik oleks eraldi süsteemina, siis oleks võimalik kasutada nendes ruumides merevee temperatuurist sõltuvat kütteevee pealevoolu temperatuuri. Samuti on ruumides olevad kütteseadmed üledimensioneeritud, mistõttu ei teki probleeme alumiste ruumide küttega ka siis kui välisõhu temperatuur on kõrgem kui merevee temperatuur. Maksimaalne pealevoolu temperatuur on -21 °C välisõhu temperatuuril 55 °C ning minimaalne 25 °C välisõhu temperatuuril 20 °C. Pealevoolu temperatuurid sõltuvalt välisõhu temperatuurist avalduvad küttegraafikul (joonis 3.9) ja valemiga:

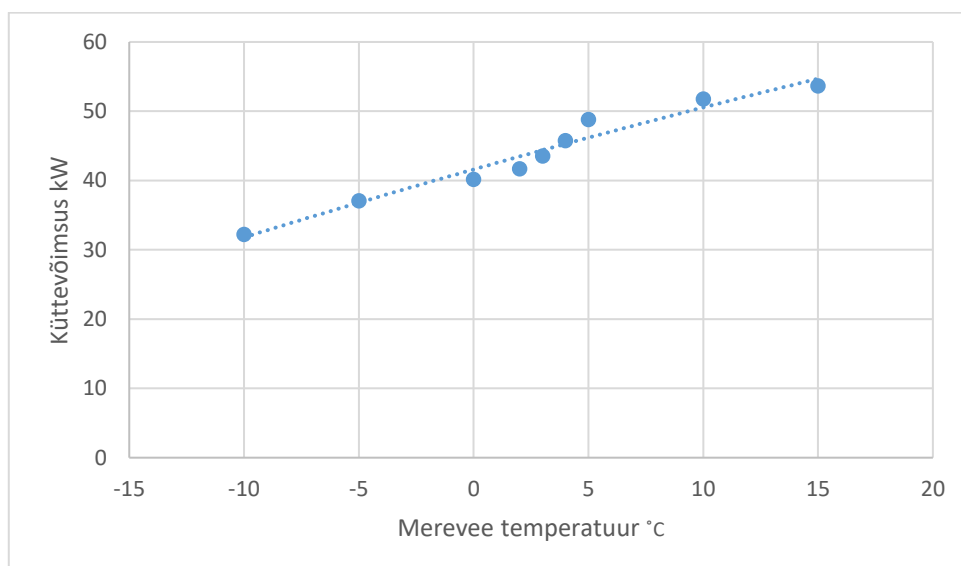
$$T_{pv} = -0,7317 \cdot T_{v\ddot{o}} + 39,634 \quad (8)$$



Joonis 3.9 Pealevoolu temperatuur sõltuvalt välisõhu temperatuurist

Merevee soojuspumba poolt väljastatava küttevõimsuse arvutamiseks on kasutatud soojuspumba tootja poolt väljastatud andmeid, mille alusel on loodud graafik. Soojuspumba väljastatav küttevõimsus on arvatud vastavalt sisenevale merevee temperatuurile  $T_{mv}$ .

$$Q_{MSP} = -0,0511 \cdot T_{mv}^2 + 1,4483 \cdot T_{mv} + 58,977 \quad (9)$$

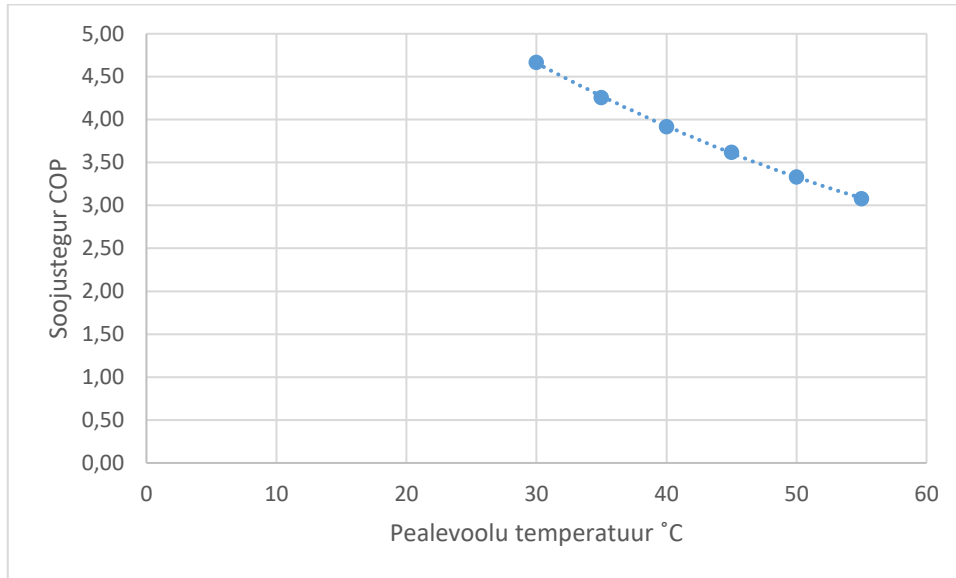


Joonis 3.10 MVSP küttevõimsus sõltuvalt sisenevast merevee temperatuurile

Merevee soojuspumba tunnipõhine soojustegur on arvatud vastavalt tootja poolt antud soojusteguritele kindlates punktides, mille alusel loodi graafik ning tuletati valem.

Soojustegur on arvatud vastavalt pealevoolu temperatuurile  $T_{pv}$ , mis sõltub välisõhu temperatuurist.

$$\text{COP}_{\text{MSP}} = 0,0007 \cdot T_{pv}^2 - 0,1221 \cdot T_{pv} + 7,6949 \quad (10)$$



Joonis 3.11 MVSP soojustegur vastavalt pealevoolu temperatuurile

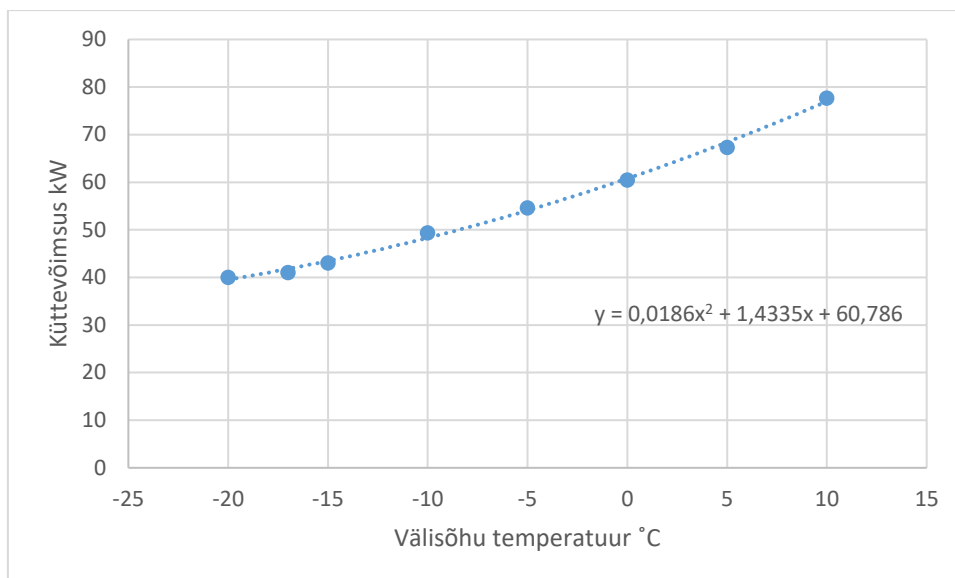
Soojuspumba kompressori elektrienergia tarve  $P_{\text{kompressor}}$  on arvatud valemiga:

$$P_{\text{kompressor}} = \frac{Q_{\text{SP}}}{\text{COP}} \quad (11)$$

$Q_{\text{SP}}$  – Soojuspumba väljastatav küttevõimsus, kW

Õhk-vesi soojuspumba poolt väljastatav küttevõimsus ( $Q_{\text{õvSP}}$ ) vastavalt välisõhu temperatuurile ( $T_{v\text{õ}}$ ) on arvatud soojuspumba tootja andmetest tuletatud graafikuga abil. Tunnipõhise väljastatava küttevõimsuse arvutamiseks on kasutatud valemit:

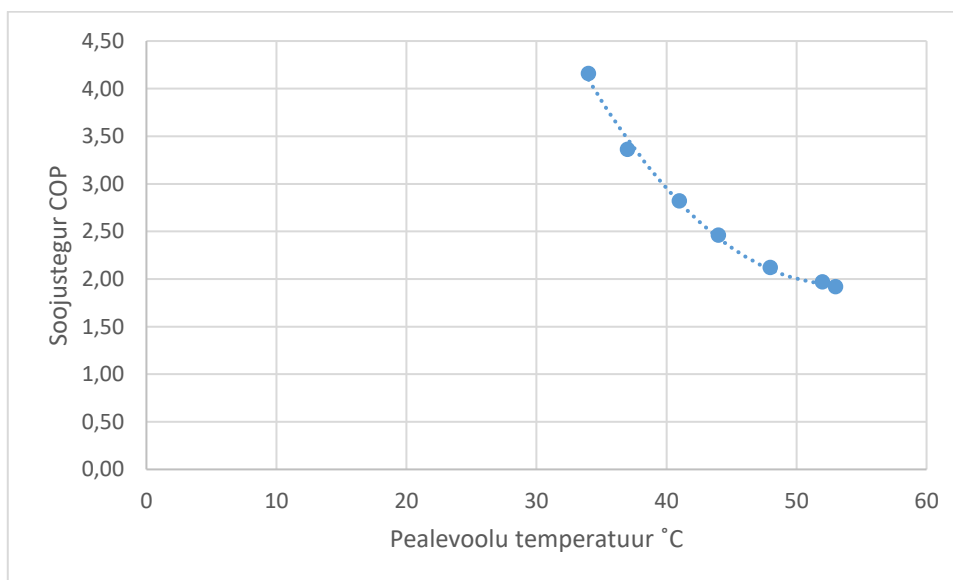
$$Q_{\text{õvSP}} = 0,0186 \cdot T_{v\text{õ}}^2 + 1,4335 \cdot T_{v\text{õ}} + 60,786 \quad (12)$$



Joonis 3.12 ÕVSP väljastatav küttevõimsus sõltuvalt välisõhu temperatuurist

Õhk-vee soojuspumba soojustegur on arvatud vastavalt tootja poolt toodud andmetele vastavatel välisõhu temperatuuridel, mille alusel on tuletatud graafik ja valem tunnipõhise soojusteguri arvutamiseks.

$$\text{COP}_{\text{ÕVSP}} = 0,0059 \cdot (T_{\text{pv}})^2 - 0,6287 \cdot T_{\text{pv}} + 18,616 \quad (12)$$



Joonis 3.13 ÕVSP soojustegur sõltuvalt välisõhu temperatuurist

Vedelikjahuti võimsuse arvutamiseks on kasutatud järgnevat valemit:

$$Q_{vj} = \frac{Q_{SP} \cdot (COP - 1)}{COP} \quad (13)$$

$Q_{SP}$  – soojuspumba väljastatav võimsus, kW

COP – soojuspumba soojutegur

Vedelikjahuti elektrienergia tarbimise arvutamiseks on kasutatud seost tarbitava energia ja küttevõimsus vahel. Elektrienergiate suhe on võrdeline võimsuste suhtega kuubis

$$\frac{P_1}{P_2} = \left( \frac{Q_{aur1}}{Q_{aur2}} \right)^3 \quad (14)$$

$$P_1 = P_2 \cdot \left( \frac{Q_{aur1}}{Q_{aur2}} \right)^3 \quad (15)$$

$P_1$  – vedelikjahuti elektrienergia tarbimine, kW

$P_2$  – vedelikjahuti elektrienergia tarbimine nimivõimsusel, kW

$Q_{aur1}$  – Vedelikjahuti võimsus, kW

$Q_{aur2}$  – Vedelikjahuti nimivõimsus, kW

## 4. SIMULATSIOONIMUDELI ANALÜÜS JA TULEMUSED

### 4.1. Küttekoormuste simulatsioon

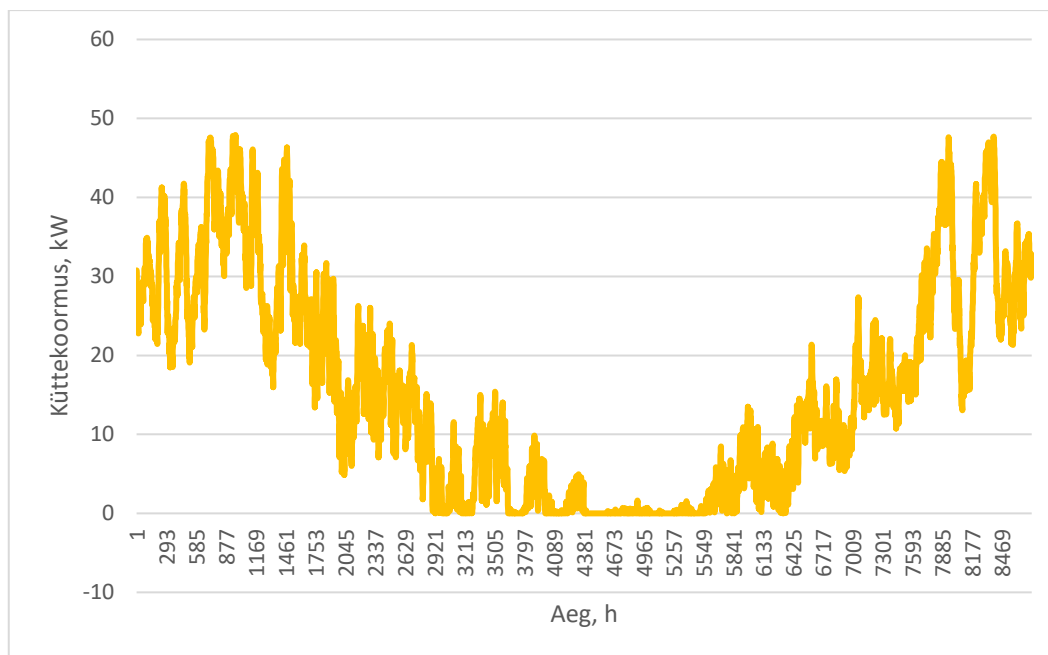
Küttekoormuste arvutamiseks kasutatakse IDA ICE tarkavaras *heating load* simulatsiooni. Arvutustel ei arvestata vabasoojustega, et tulemused oleksid kõige kriitilisema olukorra kohta, kus lisasoojuseid ruumis ei ole. Välisõhu arvutuslikuks temperatuuriks on fikseeritud välisõhutemperatuur, mis on vastavalt standardile EVS-844:2022 on Tallinnas -21 °C [46]. Simulatsioon on läbi viidud pilvitu ilmaga. Simulatsioon toimub ühe ööpäeva jooksul konstantsel välistemperatuuril, simuleeritavale päevale eelneb 14 päeva samal välisõhu temperatuuril simulatsiooni, et jäljendada olukorda, kus välisõhu temperatuur -21 °C püsib pikema aja vältel.

Küttesüsteemile on määratud küttegraafik vastavalt välisõhu temperatuurile ning katla kasuteguriks 0,7. Küttesüsteemi pealevoolu temperatuuri muudetakse manuaalselt, mis võib tekitada erinevusi võrreldes välja toodud küttegraafikuga. Ölikatla kasuteguriks on Majandus- ja taristuminsitri määruse nr. 58 järgi 0,85, kuid laeva katla puhul on arvestatud, et katel on 20 aastat vana ning süsteemi soojuskaod võivad olla suhteliselt suured.

Küttekoormuste simulatsiooni tulemusel saadud maksimaalsed küttekoormused on välja toodud tabelis 4.1 ning aasta lõikes joonisel 4.1.

Süsteem	Maksimaalne küttekoormus neto, kW	Maksimaalne küttekoormus kadudega, kW
Tsoonide küte	58,6	77,7
Soe tarbevesi	0,25	0,36

Tabel 4.1 Laeva maksimaalsed küttekoormused



Joonis 4.1 Tunnipõhine küttekoormus aasta lõikes

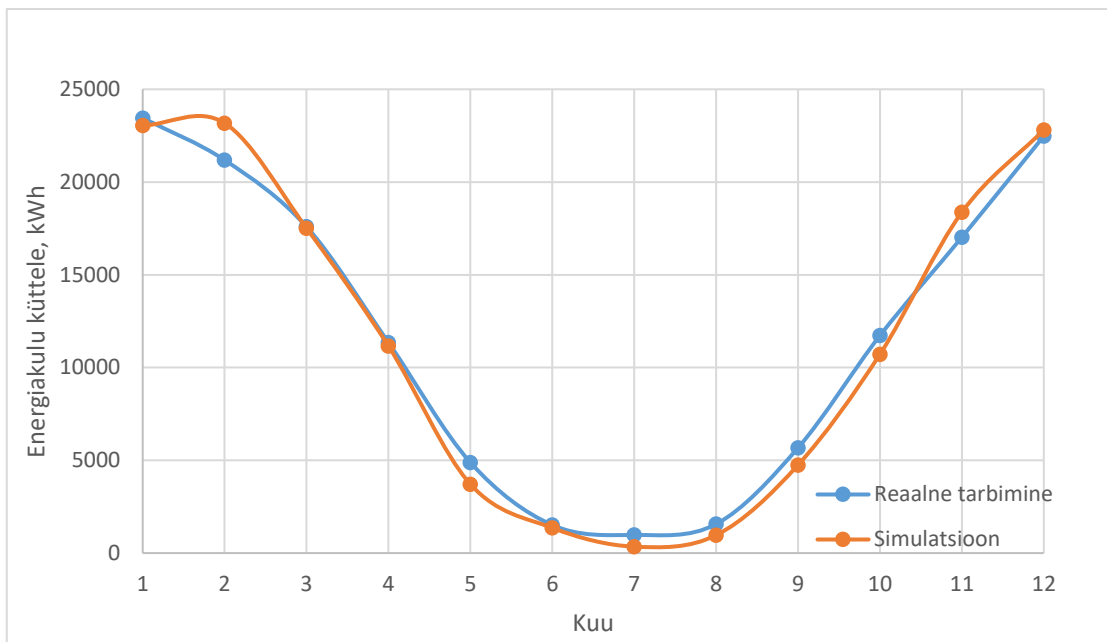
## 4.2. Energiasimulatsioon

Energiasimulatsioon on läbi viidud ühe aasta kohta. Väliskliimana on kasutatud Estonia TRY kliimafaili. Arvestatud on ruumide vabasoojustega. Tulemused on välja toodud tabelis 4.2. Simulatsiooni tulemusel saadud energiakulu küttele ja elektrienergiakulu võrreldi olemasolevate andmetega (joonised 4.2 ja 4.3). Võrdlusest saab järeldada, et mudeli on korrektselt kalibreeritud. Elektrienergia tarbimise erinevus võrreldes simulatsiooni tulemustega võib olla tingitud valgustuse kasutusest suvisel perioodil, sest simulatsioonimudel on valgustuse kasutusprofiil aastaringelt ühesugune.

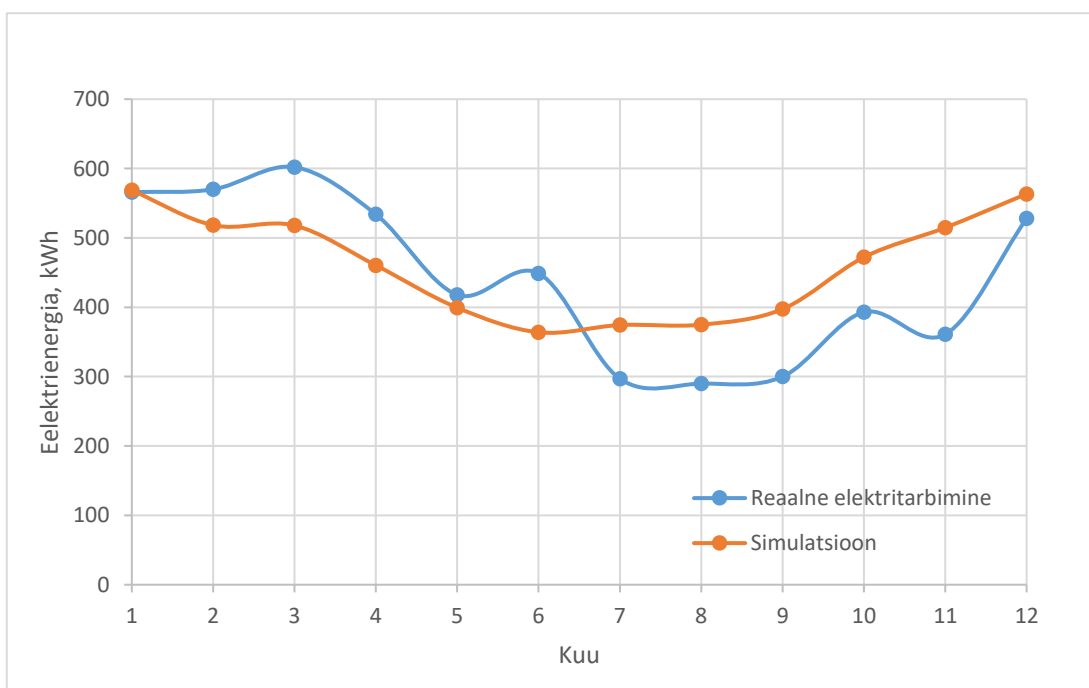
Kuu	Energiakulu küttele, kWh	IDA ICE energiakulu küttele, kWh	Elektrienergia tarbimine 2022a, kWh	IDA ICE elektrienergia kulu, kWh
jaanuar	23455	24888	566	569
veebruar	21185	25067	570	518
märts	16614	18610	602	518
aprill	11349	11522	534	461
mai	5864	3714	418	399
juuni	3783	1030	449	364
juuli	1955	347	297	374
august	3323	966	290	375

september	5675	4751	300	397
oktoober	11727	11182	393	472
november	15132	19801	361	514
detsember	23455	24661	528	563
<b>Kokku</b>	<b>143514</b>	<b>145147</b>	<b>5308</b>	<b>5523</b>

Tabel 4.2 Tarbimise ja simulatsiooni tulemuste võrdlus



Joonis 4.2 Simulatsiooni tulemuste ja reaalse energiakulu küttele võrdlus



Joonis 4.3 Simulatsiooni tulemuste ja reaalse elektrienergia tarbimise võrdlus



## 5. KÜTTESÜSTEEMIDE VÕRDLUS

Antud peatükis võrreldakse laevale sobivate küttesüsteemide efektiivsust, teostatavust ja nende tasuvust. Kõikide süsteemide ühiseks tingimuseks on katta laeva maksimaalne küttevõimsus kütteks ja sooja tarbevee tootmiseks 58,6 kW ja kogu energiavajadus küttele 145 147 kWh. Küttesüsteem peab tagama töös määratud ruumide temperatuurid.

Tasuvusarvutusel arvestatud ühikhinnad

- Elektrienergia 0,18 €/kWh
- Diislikütus 1,4 €/l = 0,14 €/kWh

### 5.1. Õhk-vesi soojuspump

#### 5.1.1. Tehniline teostatavus ja efektiivsus

Soojuspumba siseosa paigaldatakse laeva masinaruumi ning välisosa laeva välistekile. Õhk-vesi soojuspumpsüsteemi põhimõtteline skeem on näidatu Lisas 4. Õhk-vesi soojuspumpa on võimalik kasutada aastaringelt, kuid madalatel välisõhu temperatuuridel langeb soojustegur ning soojusväljastus. Valitud on Daikini õhk-vesi soojuspumbad nominaalvõimsusega ( tingimustel  $T_{\text{välis}}/T_{\text{pealevool}} +7/35$  °C) 61,8 kW ja 40 kW, mille tehnilised andmed on välja toodud Lisas 1 ja 2. Valitud on kaks soojuspumpa, et analüüsida soojuspumba dimensioneerimist ligikaudu 70 % ja 100 % küttevõimsusele. Soojuspumpade soojusväljastus sõltuvalt välisõhu temperatuurist on näidatud tabelis 5.2.

Välisõhu temp.	T <sub>pv</sub>	Q <sub>SP</sub> kW (61,8 kW)	Q <sub>SP</sub> kW (40 kW)
-20	48	40	21
-17	48	41	22
-15	48	43	25
-10	46	49	28
-5	44	55	30
0	41	60	33
5	37	67	39
10	34	78	45

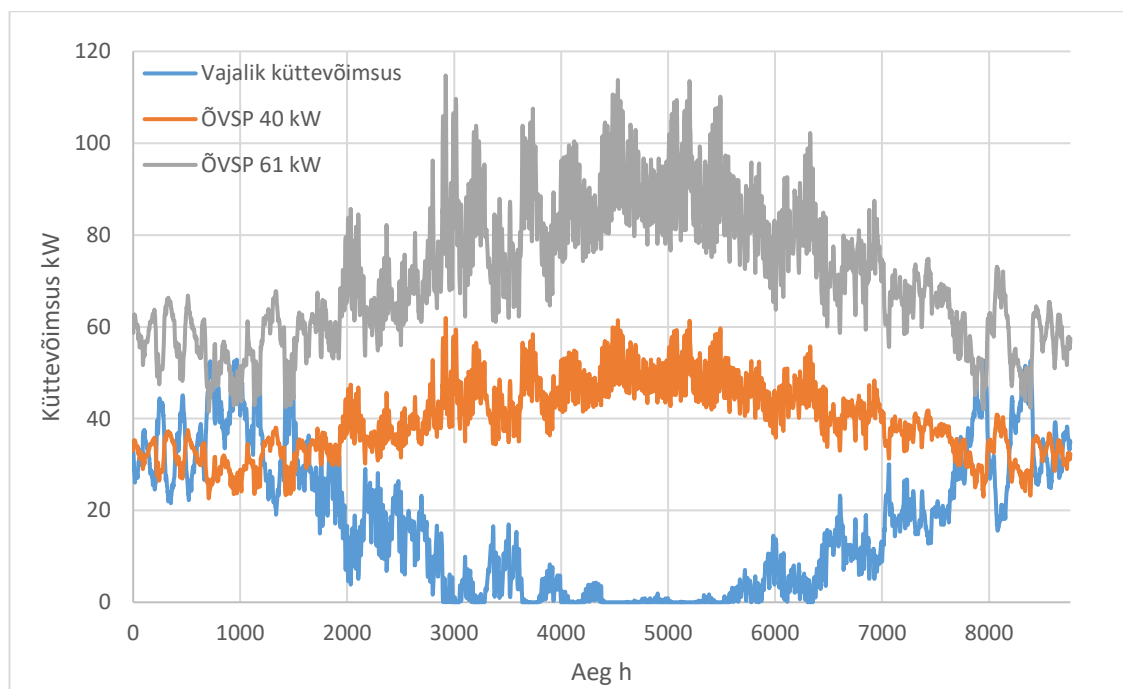
Tabel 5.2 ÕVSP soojusväljastus ja COP erinevatel välisõhu temperatuuridel

Vastavalt tunnipõhisele arvutusele katab suurema võimsusega ÕVSP 99 % aastasest küttevajadusest. Lisaküte peab katma 1 % ja 913 kWh soojusenergiavajadusest, maksimaalne küttevõimsus lisaküte ajal on 10 kW. Väiksema võimsusega soojuspumbaga kaetakse tunnipõhise arvutuse alusel 87% aastasest küttevajadusest ning 13% lisaküttega. Lisakütte maksimaalne küttevõimsus peab olema 30 kW. Lisaküttena on võimalik kasutada läbivoolu elektrikatelt TK-STL, kaheastmelise juhtimisega, mille juhtimisahelas on termostaadid.

Soojuspumpade võrdlus on välja toodud tabelis 5.3 ning näidatud joonisel 5.1.

SP mudel	SP kaetav soojusenergia vajadus kWh/a	Lisaküte kWh/a	Lisakütte maks. võimsus kW/a	Kompressor kWh/a	SCOP	SPF (koos lisaküttega)
ÕVSP 61,8 kW	144268	913	10,6	52528	2,76	2,7
ÕVSP 40kW	126895	18286	29,7	44559	2,84	2,0

Tabel 5.3 ÕVSP võrdlus



Joonis 5.1 ÕVSP maksimaalne soojusväljastus aasta lõikes

## **5.1.2. Hooldustööd ja hoolduskulud**

Õhk-vesi soojuspumba hooldustööd teostatakse kord aastas. Korrapärane hooldamine tagab soojuspumba efektiivsuse säilimise, aitab vältida kütteperioodil tekkivaid probleeme ja pikendab soojuspumba eluiga. Kõige väiksema eluaega seadmed soojuspumpsüsteemis on 20 aastat. Kogu süsteemi eluiga on eeldatavalt pikem, kui teostada vajadusel väiksemate seadmete väljavahetus.

Hooldustööde hulka kuuluvad:

- Soojussõlme kütte, jahutuse ning veetorustike lekete kontroll;
- Paisupaakide vasturõhkude kontroll;
- Töörõhkude kontroll (küte / jahutus / tarbevesi);
- Soojuspumpade peale- ning tagasivoolu temperatuuride vahe kontroll;
- Lisakütteallika rakendumise kontroll;
- Soojussõlme ringluspumpade töörežiimide kontroll ning seadistamine;
- Külmaaine ringi imi- ja survepoole töötemperatuuride kontroll;
- Kompressori töötemperatuuride mõõtmine;
- Soojuspumba külmaringi lekke kontroll;
- Temperatuuriandurite kontroll;
- Juhtautomaatikate ning elektriseadmete signaali kontroll;
- Vajadusel elektriklemmide pingutamine;
- Juhtautomaatikate programmseadistuste kontroll;
- Isolatsiooniparandused (vajadusel);
- Primaarringi soojuskandja konsistentsi kontroll.

Iga-aastase korralise hoolduse maksumus on ligikaudu 135.- € + km.

## **5.1.3. Maksumus ja tasuvusaeg**

Õhk-vesi soojuspumbale on võetud pakkumised, mille hinnad on välja toodud tabelis 5.4. Hinnapakumised on koostanud Maaküte OÜ. Süsteemi ehitusmaksumuses sisaldub kõikide soojuspumpsüsteemi seadmete, süsteemi elektrikaabelduse ning automaatika tarne ja paigaldus. Välja toodud hinnad on indikatiivsed ning võivad muutuda süsteemi täpsustumisel ja projekteerimistööde käigus.

Seadme mudel	Seadme maksumus €	Automaatika €	Lisakütte el. katel €	Paigaldus-tööd €	Maksumus kokku + km €
Daikin EWYT064CZI-A2+EWYT064CZO-A2 61,8 kW	32774	3200	1000	13690	60797
Daikin EWYT040CZI-A1 + EWYT040CZO-A1 40 kW	28444	3200	500	12600	53693

Tabel 5.4 ÖVSP süsteemi maksumus

Lisaküttena on võimalik kasutada olemasolevat diislikütust kasutatavat katelt, paigaldada läbivoolu elektrikatel või väiksema lisakütte vajaduse korral akumulatsioonipaaki paigaldatavaid elektrilist küttekeha. Arvutustel on arvestatud läbivoolu elektrikatla TK-STLj, väiksema soojuspumbaga kasutatakse ühte 10 kW ning suurema soojuspumbaga kahte 15 kW läbivoolu elektrikatelt. Elektrikatel on paigaldatud soojuspumba ja akumulatsioonipaagi vahele pealevoolu torule. Soojuskandja läbib katelt ning kui pealevoolu temperatuur ei ole saavutatud, lülitub sisse elektrikatel. Soojuspumba aastased kulud on arvatud ja välja toodud tabelis 5.5 koos olemasoleva süsteemi võrdlusega.

Soojus-pump	ÖVSP soojuse maksumus €/kWh	Lisakütte soojuse maksumus €/kWh	Soojuse maksumus aastas	Hooldus-kulu aastas €	Kulu aastas €	Kulu diislile aastas €	Sääst aastas €
61,8 kW	0,065	0,18	9560	135	9695	30800	21105
40 kW	0,063	0,18	11312	135	11447	30800	19353

Tabel 5.5 ÖVSP aastased kulud

Tasuvusaeg on arvatud mõlemale soojuspumbale. Tasuvusaeg on arvatud võrreldes olemasoleva diislikütust kasutava süsteemiga.

1. Soojuspump 61,8 kW + 2 x 15 kW läbivoolu elektrikatel

$$\text{Tasuvusaeg} = \frac{\text{Algne investeering}}{\text{Sääst aastas}} = \frac{62597}{21105} = 3 \text{ aastat}$$

2. Soojuspump 40 kW + 10 kW läbivoolu elektrikatel

$$\text{Tasuvusaeg} = \frac{\text{Algne investeering}}{\text{Sääst aastas}} = \frac{55767}{20394} = 2,7 \text{ aastat}$$

#### 5.1.4. Keskkonnamõju

Süsteemi keskkonnamõju hinnatakse võrreldes olemasoleva süsteemi süsinikdioksiidi heitekoguse eraldusega. Eriheitekogused on vastavalt Keskkonnaministeeriumi 2020. a andmetel. Diislikatla süsteemil on arvestatud katla kasuteguriga ning soojuspumpsüsteemi elektrienergiatarbimisse on arvestatud soojuspumba kompressori ja lisakütte tarbimine.

Küttesüsteem	Diisel	Soojuspump
Eriheitmed kgCO <sub>2</sub> e/kWh	0,266	0,5895
Tarbitud energia kWh	207353	53441
CO <sub>2</sub> heitekogus kgCO <sub>2</sub> e	55155,9	31503,5
CO <sub>2</sub> heitkoguse vähenemine kgCO <sub>2</sub> e	23652,4	

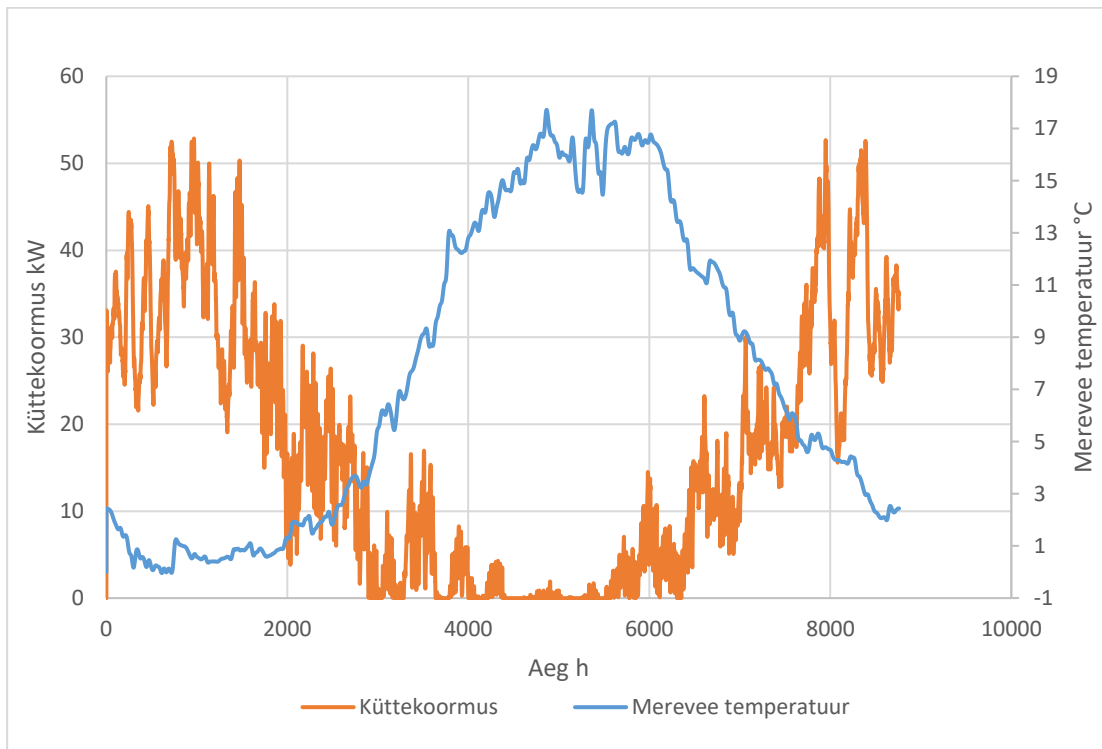
Tabel 5.6 CO<sub>2</sub> heitkoguse võrdlus

## 5.2. Merevee soojuspump

### 5.2.1. Tehniline teostatavus ja efektiivsus

Merevee kasutamine soojuspumba soojusallikana on võimalik, kui merevee temperatuur on kõrgem kui 2-3 °C. Alla selle temperatuuri tekib soojusvaheti jäätumisoht ning mereveest pole võimalik piisavalt soojust omastada. Merevee temperatuur on alla 3 °C ligikaudu 4000 tundi aastas, perioodil detsembri keskpaigast märtsini, kui on ka soojusvajadus kõige suurem (joonis 5.1). Seega on võimalik merevett soojusallikana kasutada aprillist kuni detsembrini.

Süsteem koosneb soojuspumbast, mille kontuuris on merevee läbipumpamisel põhinev soojusvaheti. Soojuspumba põhimõtteline skeem on näidatud Lisas 5. Soojusvaheti ja soojuspumba vahelises kontuuris ringleb bioetanol. Soojusvaheti sisu on valmistatud titaanist, et vältida soojusvaheti pinnale tekkivat korrosiooni ja selletõttu soojusvaheti efektiivsuse langemist. Soojuspump koos soojussõlmega paigaldatakse laeva masinaruumi. Veehaarde pump paigaldatakse masinaruumi ning veehaarde toru viiakse laeva alla 5 m sügavusele merre. Merevesi suunatakse läbi soojusvaheti ning seejärel läbi tagastuva toru merre. Siseneva ja tagastuva toru vahe on vähemalt 4 meetrit. Veehaarde väljaehituse ajaline kulu on ligikaudu 2-3 nädalat.



Joonis 5.2 Tunnipõhised merevee temperatuurid ja küttekoormus aasta lõikes

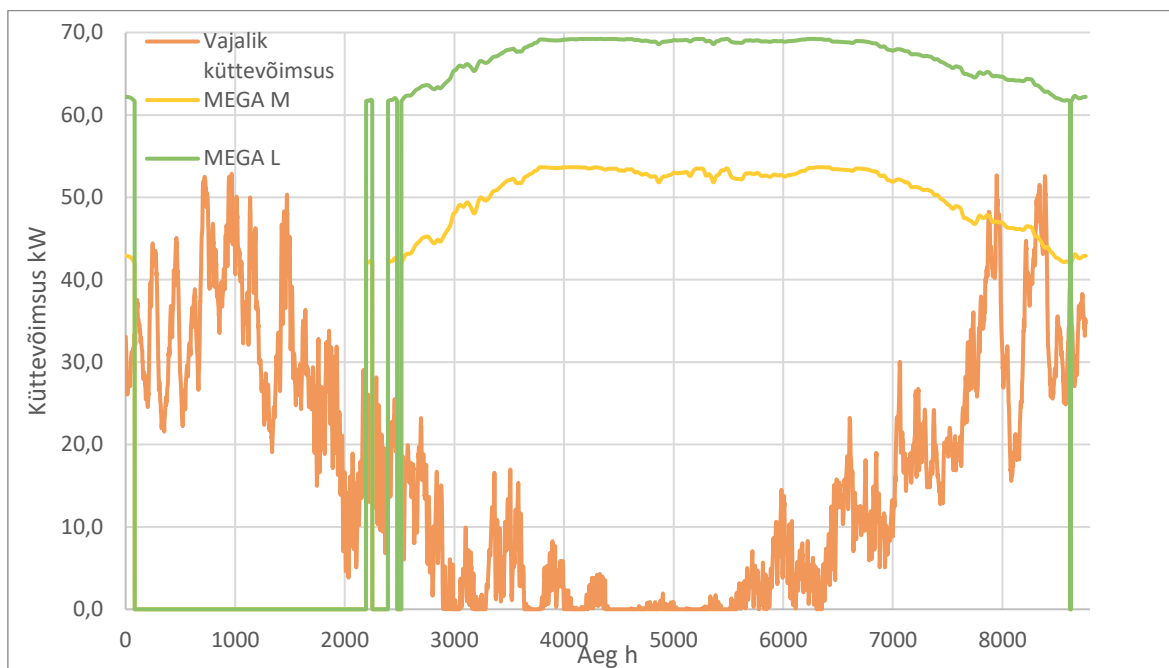
Valitud on kaks soojuspumpa, Thermia Mega M nominaalse väljundvõimsusega 44 kW ning Theria Mega L nominaalse väljundvõimsusega 59 kW. Thermia Mega L soojuspump katab võimalikul kasutusajal laeva küttevajaduse ning lisakütet vaja ei ole. Samas on suurem osa aastast vajalik küttekoormus väiksem ning soojuspump töötab madalamal võimsusel. Thermia Mega M soojuspump on väiksem ja soodsam, kuid väga madalate välistemperatuuride juures tuleb tipukoormuste katmiseks kasutada läbivoolu elektrikatelit. Mõlema soojuspumba soojusväljastus vastavalt sisenevale merevee temperatuurile on välja toodud tabelis 5.7.

$T_{\text{merevesi}}$	$T_{\text{pv}}$	$Q_{\text{SP}}, \text{ kW}$ (58,4 kW)	$Q_{\text{SP}}, \text{ kW}$ (44 kW)
2	55	55,36	41,69
3	50	57,25	43,54
4	45	63,11	47,78
5	40	66,22	48,83
10	35	79,33	51,76
15	30	90,61	53,67

Tabel 5.7 MVSP soojusväljastus vastavalt merevee temperatuurile

Joonisel 5.2 on näidatud soojuspumpade maksimaalne väljundvõimsus ning vajalik tunnipõhine küttevõimsus aasta jooksul. Võimalikul kasutusajal katab Thermia Mega L

soojuspump kogu laeva küttevajaduse. Thermia Mega M soojuspumbaga on tipukoormuste katmiseks vajalik paigaldada pealevoolutorule läbivoolu elektrikatel võimsusega 10 kW.



Joonis 5.3 Soojuspumpade maksimaalne soojusväljastus ja tunnipõhine vajalik küttevõimsus

Baasaasta soojusenergiavajaduse alusel on soojuspumbaga võimalik katta kogu energivajadusest 38 %. Alandades kasutatava merevee temperatuuri 1 °C võrra, ehk minimaalne kasutatav merevee temperatuur 2 °C, on võimalik katta 51 % kogu laeva soojusenergiavajadusest (tabel 5.8).

Soojuspumba mudel	Min. merevee temperatuur	Soojuspumbaga kaetav soojusenergiavajadus kWh	Lisaküte kWh	Kompressor kWh	Kasutusaja SCOP
Thermia Mega M	MSP $T_{\text{meri}} > 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$	74063	71085	18698	3,96
	MSP $T_{\text{meri}} > 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$	54964	90183	13823	3,98
Thermia Mega L	MSP $T_{\text{meri}} > 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$	74905	70242	18795	3,99
	MSP $T_{\text{meri}} > 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$	55649	89497	13973	3,98

Tabel 5.8 Merevee soojuspumba efektiivsuse võrdlus

## **5.2.2. Hooldustööd ja hoolduskulud**

Merevee soojuspump nõuab suuremat tähelepanu hoolduse poolelt kui õhk-vesi soojuspump, sest merevesi võib tekitada korrosiooni ja meres elutsevad organismid võivad ummistada resti ja filtri. Eriti tähtsad süsteemi korrektseks toimiseks ja eluea pikendamiseks on veehaarde resti, filtri ja soojusvaheti puhtus. Veehaarde resti ja filtrit käiakse puhastamas kaks korda aastas tuukrite abil.

Kaks korda aastas teostatavad hooldustööd:

- Kiilrihmade kontroll ja reguleerimine, vajadusel rihmade vahetus.
- Pumpade, mootorite ja muude pöörlevate seadmete laagrite kontroll, vajadusel määrimine, hooldus või remont.
- Töövõttu kuuluvate reguleerimis- ja kontrollseadmete toimimine ja seadenäitude õigsuse kontroll, vajadusel hooldus või remont.
- Filtrite ja veehaarde resti seisukorra kontroll ja puhastamine, vajadusel vahetus.

Kord aastas teostatavad hooldustööd:

- Pumpade, mahutite jms käivitus-, peatamis- ja häirepiiride kontroll, vajaduse korral remont, vajadusel veevarustusseadmete tihendite vahetamine
- Torustikele paigaldatud filtrite puhastus.

Merevee soojuspumba aastane kulu hooldusele on ligikaudu 300 € + km. Hoolduse maksumus võib varieeruda vastavalt süsteemi seisukorrale ja vajalikele töödele.

## **5.2.3. Maksumus ja tasuvusaeg**

Merevee soojuspumpade maksumus koos paigaldusega on välja toodud tabelis 5.9. Hinnapakumised on koostanud Maaküte OÜ. Soojuspumba hinnas sisaldub ringluspumpade, merevee soojusvaheti ja veehaarde filtri hind. Veehaarde ehitus on suuremahuline töö ja selle maksumus võib muutuda vastavalt süsteemi väljaehitamise keerukusele.



Seadme mudel	Soojuspumba maksumus koos lisaseadmetega €	Paigaldustööd €	Maksumus kokku + km €
Thermia MEGA M	44955	42500	104946
Thermia MEGA L	49431	42500	110317

Tabel 5.9 Merevee soojuspumba maksuvus

Veehaarde filtriks paigaldatakse isepuhastuv filter ALF-B tootjalt Alfa Laval. Filtril on roostevaba perforeeritud silindriline sisu, mille avade läbimõõdud on 2-3 mm. Filtreerimisel kogunev sade ja osakesed kogunevad silindri pinnale, rõhu suurenedes avatakse läbipesu ventiil ning silindri pinnale kogunenud osakesed uhutakse filtri pinnalt välja. Merevee soojusvaheti on titaanist sisuga plaatsoojusvaheti võimsusega 70 kW. Merevee soojusvaheti on üledimensioneeritud, et vältida soojusvaheti jäätumist.

Väljaspool merevee soojuspumba kasutusaega on võimalik kasutada läbivoolu elektrikatel või olemasolevat diislikütust kasutatavat katelt. Mõlema variandi ligikaudsed aastased kulud on välja toodud tabelis 5.5 koos olemasoleva süsteemi võrdlusega. Juhul, kui lisaküttena kasutatakse diislikatelt, tuleb Thermia Mega M soojuspumbal maksumusele juurde arvestada tipukoormuste katmiseks vajalik 10 kW võimsusega elektriline küttekeha, mille maksumus on ligikaudu 500 €. Väljaspool kasutusaega on vajalik suurema võimsusega läbivoolu elektrikatel. Selleks saab paigaldada 2x 25 kW läbivoolu elektrikatel, mille maksumus on ligikaudu 1200 €.

Mudel	Lisaküte	MVSP soojusemaksumus €/kWh	Lisakütte soojusemaksumus €/kWh	Soojuse maksumus aastas €/kWh	Hoolduskulu aastas €	Kulu aastas €	Kulu diislile aastas €	Sääst aastas €
Mega M	elekter	0,045	0,18	16014	300	16314	30800	14786
	diisel	0,045	0,21	18122	300	18422	30800	12539
Mega L	elekter	0,045	0,18	16162	300	16462	30800	14638
	diisel	0,045	0,21	18261	300	18561	30800	12539

Tabel 5.5 Soojuspumpade aastased kulud

Merevee soojuspumba tasuvusaeg on arvatud võrdluses olemasoleva diislikütust kasutava küttesüsteemiga.

1. Thermia Mega M soojuspump

Lisaküttena diislikatel:

$$\text{Tasuvusaeg} = \frac{\text{Algne investeering}}{\text{Sääst aastas}} = \frac{105446}{12378} = 8,5 \text{ aastat}$$

Lisaküttena elektrikatel:

$$\text{Tasuvusaeg} = \frac{\text{Algne investeering}}{\text{Sääst aastas}} = \frac{106146}{14786} = 7,2 \text{ aastat}$$

## 2. Thermia Mega L soojuspump

Lisaküttena diislikatel:

$$\text{Tasuvusaeg} = \frac{\text{Algne investeering}}{\text{Sääst aastas}} = \frac{110317}{12539} = 8,8 \text{ aastat}$$

Lisaküttena elektrikatel:

$$\text{Tasuvusaeg} = \frac{\text{Algne investeering}}{\text{Sääst aastas}} = \frac{111517}{14638} = 7,6 \text{ aastat}$$

### 5.2.4. Keskkonnamõju

Süsteemi keskkonnamõju hinnatakse võrreldes olemasoleva süsteemi süsinikdioksiidi heitekoguse eraldusega. Eriheitekogused on vastavalt Keskkonnaministeriumi 2020. a andmetel. Diislikatla süsteemil on arvestatud katla kasuteguriga ning soojuspumpsüsteemi elektrienergiatarbimisse on arvestatud soojuspumba kompressori ja lisakütte tarbimine.

Küttesüsteem	Diisel	Soojuspump
Eriheitmed kgCO <sub>2</sub> e/kWh	0,266	0,5895
Tarbitud energia kWh	207353	89783
CO <sub>2</sub> heitekogus kgCO <sub>2</sub> e	55155,9	52927,1
CO <sub>2</sub> heitekoguse vähenemine kgCO <sub>2</sub> e	2228,8	

Tabel 5.10 CO<sub>2</sub> heitekoguse võrdlus

## 5.3. Kombineeritud soojuspumpsüsteem

### 5.3.1. Tehniline teostatavus ja efektiivsus

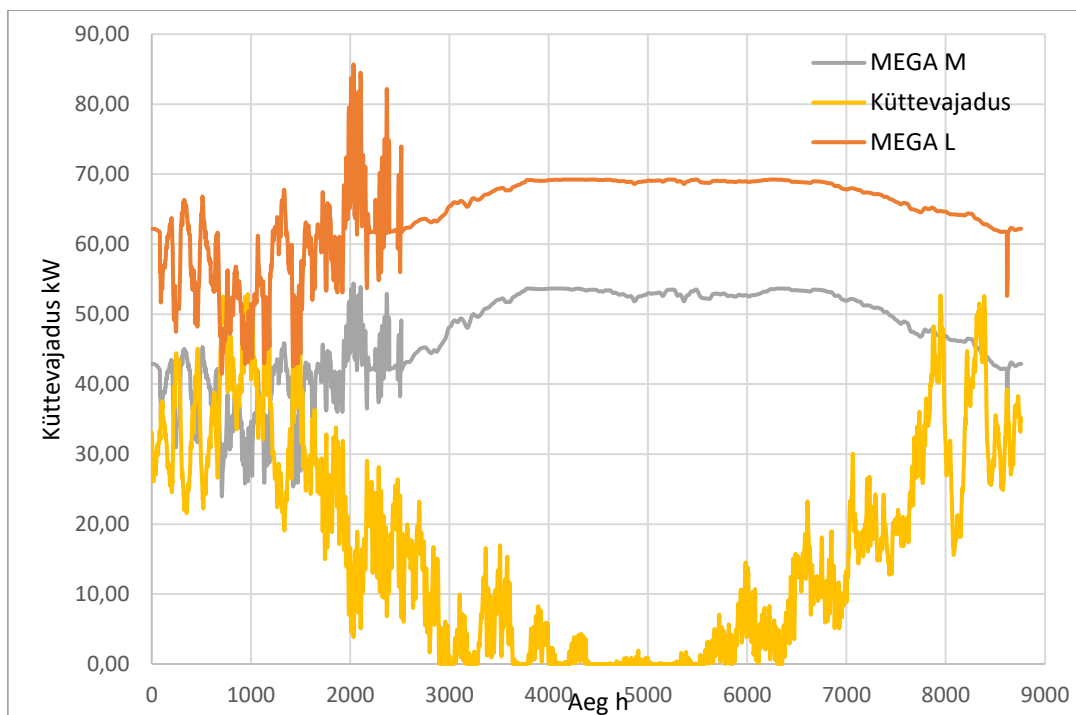
Merevee soojuspump on võimalikul kasutusajal efektiivsem, kui samal ajal õhk-vesi soojuspump (tabel 5.11). Süsteem on sarnane eelmises peatükis kirjeldatud merevee soojuspumba süsteemiga, kuid süsteemile on lisatud samasse kontuuri välisõhu soojusvaheti. Kui merevee temperatuur langeb alla 2 °C, kasutatakse välisõhu soojusvahetit. Kombineeritud soojuspumpsüsteemi põhimõtteline skeem on näidatud Lisas 5.

	MVSP	ÕVSP
COP	3,99	2,96
Kompressori energiatarve kWh	18795	25159
Lisaküte kWh	0	313

Tabel 5.11 MVSP ja ÕVSP võrdlus MVSP võimalikul töötamisajal

Tunnipõhise baasaasta arvutuse järgi saab merevee soojusvaheti töötada 5127 tundi aastas, millega kaetakse 51% kogu soojusvajadusest. Välisõhu soojusvahetiga kaetakse ülejäänud 49%. Välisõhu soojusvahetiks on AlfaBlue Double nominaalvõimsusega 45 kW. Ventilaatorite nominaalne elektriline võimsus on 11,5 kW.

Kombineeritud soojuspumpsüsteemi arvutused on teostatud Thermia Mega M ja Mega L soojuspumpadega. Baasaasta alusel arvutatud soojuspumpade maksimaalne võimalik soojusväljastus ja laeva vajalik küttekoormus on välja toodud joonisel 5.4. Tipukoormuste katmiseks on vajalik elektrilise lisakütte olemasolu, milleks saab kasutada Thermia Mega M pumbaga läbivoolu elektrikatelt võimsusega 2 x 15 kW ning Thermia L pumbaga 10 kW. Soojuspumba baasaasta arvutuse tulemused on välja toodud tabelis 5.12.



Joonis 5.4 Kombineeritud süsteemi soojusväljastus ja laeva küttekoormus

Soojuspumba mudel	MEGA M	MEGA L
Soojuspumbaga kaetav energiavajadus kwh	137711	144580
Lisakütte võimsus kW	28	10
Lisakütte vajadus kWh/a	7436	601
Välisõhu soojusvaheti ventilaatorid kWh/a	4733	1858
Kompressor kWh	40992	46278
SCOP	3,00	3,01
SPF (koos lisaküttega)	2,59	2,96

Tabel 5.12 Kombineeritud soojuspumpsüsteemi aastased andmed

### 5.3.2. Hooldustööd ja hoolduskulud

Peatükis 5.2.2. välja toodud merevee soojuspumba hooldustöödele lisandub välisõhu soojusvaheti hooldus ja puhastus. Iga-aastase hoolduse maksumus on ligikaudu 400 €.

### 5.3.3. Maksumus ja tasuvusaeg

Kombineeritud soojuspumpsüsteemi maksumus on välja toodud tabelis 5.13. Soojuspumba maksumusse on arvestatud bioetanooli, elektriarvesti, mereveefiltri ja merevee soojusvaheti hind. Väljatoodud hinnad on indikatiivsed ja võivad muutuda ehitustööde käigus. Hinnapakumised on koostanud Maaküte OÜ.

Seadme mudel	Soojuspumba maksumus koos lisaseadmetega €	Välisõhu soojusvaheti €	Lisakütte katel €	Paigaldustööd €	Maksumus kokku + km €
Thermia MEGA M	46169	19740	1000	67000	160691
Thermia MEGA L	50645	19740	500	67000	165462

Tabel 5.13 Kombineeritud soojuspumpsüsteemi maksumus

Kombineeritud süsteemi aastased kulud baasaasta arvutuse alusel ning võrdluses olemasoleva süsteemiga on välja toodud tabelis 5.14.

Soojuspumba mudel	Mega M	Mega L
Kombineeritud süsteemi soojusenergia maksuvus €/kWh	0,06	0,06
Lisakütte maksuvus €/kWh	0,18	0,18
Soojuse maksuvus aastas	9569	8773
Hoolduskulu aastas €	400	400
Kulu aastas kokku €	9969	9173
Kulu diislile aastas €	30800	30800
Sääst aastas €	20831	21627

Tabel 5.14 Kombineeritud soojuspumpsüsteemi aastased kulud

Tasuvusaeg on arvatud võrreldes hetkel kasutatava küttesüsteemiga. Thermia Mega M soojuspumbaga süsteemi maksumusele on juurde lisatud elektrilise katla maksuvus 500 € ning Thermia Mega L süsteemile 1000€. Hinnapakumised lisaküttele on koostanud Maaküte OÜ.

$$1. \text{ Thermia Mega M - Tasuvusaeg} = \frac{\text{Algne investeering}}{\text{Sääst aastas}} = \frac{160691}{20831} = 7,7 \text{ aastat}$$

$$2. \text{ Thermia Mega L - Tasuvusaeg} = \frac{\text{Algne investeering}}{\text{Sääst aastas}} = \frac{165462}{21627} = 7,6 \text{ aastat}$$

#### 5.3.4. Keskkonnamõju

Süsteemi keskkonnamõju hinnatakse võrreldes olemasoleva süsteemi süsinikdioksiidi heitekoguse eraldusega. Eriheitekogused on vastavalt Keskkonnaministeeriumi 2020. a andmetel. Diislikatla süsteemil on arvestatud katla kasuteguriga ning soojuspumpsüsteemi elektrienergiatarbimisse on arvestatud soojuspumba kompressori ja lisakütte tarbimine.

Küttesüsteem	Diisel	Soojuspump
Eriheitmed kgCO <sub>2</sub> e/kWh	0,266	0,5895
Tarbitud energia kWh	207353	89783
CO <sub>2</sub> heitekogus kgCO <sub>2</sub> e	55155,9	48136
CO <sub>2</sub> heitekoguse vähenemine kgCO <sub>2</sub> e	7019,9	

Tabel 5.15 CO<sub>2</sub> heitekoguse võrdlus

## 5.4. Pelletikatel

### 5.4.1. Tehniline teostatavus ja efektiivsus

Diislikütust kasutava katla alternatiivina on võimalik kasutada pelletikatelt. Katel, põleti, etteandetigu ja küteusemahuti moodustavad ühtse süsteemi. Olemasolevale katlale pelletipõletit lisada ei ole võimalik, sest diislikatla kolle on selleks liiga väike. Pelletikatla paigalduseks tuleb masinaruumist eemaldada olemasolevad katlad ning teostada uued ühenduse pelletikatlaga. Süsteemi ümberehitus on suhteliselt lihtne, sest uut soojussõlme pole vaja ehitada. Kütuste hinnad ja kulu on välja toodud tabelis 5.16. [47]

Kütus	Pellet	Diisel
Kütuse hind	0,29 €/kg	1,4 €/l
Alumine kütteväärtus	5 kWh/kg	9,7 kWh/l
Kütusekulu aastas	30557 kg/a	22000 l/a
Kütuse maksuvus aastas	8862 €/a	30800 €/a

Tabel 5.16 Pelleti ja diislikütuse võrdlus

Pelletikatlaks on valitud Everclean Pelltech katel võimsusega 50 kW. Katla kasutegur on 0,95. Katel on verikaalne, kahekäigulise konstruktsiooniga ning isepuhastuva põletiga. [48] Pelletikatla tehnilised andmed on välja toodud Lisas 3.

Pelletikatla puuduseks võrreldes olemasoleva diislikatla süsteemiga on suurem ruumivajadus pelletimahutile ja pelleti hoiustamiseks. Lisaks võib pelletite transportimine masinaruumi olla keerukas, sest laeva koridorid ja uksed on väikesed.

### 5.4.2. Hooldustööd ja hoolduskulud

Pelletikatla hooldus tuleb läbi viia soovituslikult kord aastas. Hoolduse käigus puhastatakse küttepinnad ja turbolaatorid, eelmaldatakse suitsutorudest sadestunud tahm vastava harjaga. Kütteperioodi lõppedes tuleb katel põhjalikult puhastada, et vältida tahma paakumist küttepindadele. Soovituslikult tuleb iga 500 kg pelletite põletamise järel puhastada pelletipõleti rest ja kolle ning tühjendada tuhapann. Pelletikatla hoolduseks on katla tootja poolt väljastatud juhised ning lihtsamaks hoolduse saab teostada katla valdaja ise. Küttelementide, ventilaatorite ja muude katla seadmete vahetuse teostab hooldustehnik. [49]

### 5.4.3. Maksuvus ja tasuvusaeg

Pelletikatla maksumus on välja toodud tabelis 5.17, kus on sisse arvestatud pelletipõleti, pelletimahuti, etteandetigu, internetimooduli, pealevoolvuanduri, akumulatsioonipaagi ja paaki paigaldatavad elektrilise küttekeha hinnad. Hinnapakkumised on koostanud SB Keskkütteseadmed OÜ. Katla ja paigaldustööde hind on indikatiivne, mis võib muutuda süsteemi täpsustumisel.

Seadme mudel	Pelletikatla maksumus koos lisaseadmetega €	Paigaldustööd €	Maksumus kokku + km €
Everclean Pelltech 50	8737	5000	17684

Tabel 5.17 Pelleti süsteemi maksumus

Pelletikatla aastase tarbimise maksumused baasaasta arvutuse järgi on välja toodud tabelis 5.18.

Pelleti soojusenergia maksumus €/kWh	Elektrienergia tarbimine kWh	Elektrienergia tarbimine €/kWh	Kulu aastas €	Kulu diislile aastas €	Sääst aastas €
0,061	43,8	0,18	8870	30800	21930

Tabel 5.18 Pelletikatla aastased kulud

Tasuvusaeg on arvatud võrreldes olemasoleva küttesüsteemiga.

$$\text{Tasuvusaeg} = \frac{\text{Algne investeering}}{\text{Sääst aastas}} = \frac{17684}{21930} = 0,8 \text{ aastat}$$

#### **5.4.4. Keskkonnamõju**

Pelleti põletamisel eralduvat CO<sub>2</sub> heitkogust ei arvestata, sest pelletid põlevad CO<sub>2</sub> neutraalselt (pt. 2.3.1). Mõju keskkonnale avaldab pelletite tootmine ja transport.



## 6. JÄRELDUSED

Küttesüsteemide võrdlusest selgusid süsteemide hinnad, efektiivsused, aastased kulud ja kokkuhoid aastas. Erinevate soojuspumpsüsteemide efektiivsused koos lisakütte osakaaluga on välja toodud tabelis 6.1.

Süsteem	SP kaetav energia-vajadus kWh/a	SP kaetav energia-vajadus kWh/m <sup>2</sup> *a	Lisa-küte kWh/a	Lisa-küte kWh/m <sup>2</sup> *a	SP kompressori elektri-energia kWh/a	SCOP	SPF
ÕVSP 40 kW	126895	317,2	18286	45,7	44559	2,85	2,02
ÕVSP 61,8 kW	144268	360,7	913	2,3	52528	2,75	2,70
MVSP Mega M	74063	185,2	71085	177,7	18698	3,96	0,82
MVSP Mega L	74905	187,3	70242	175,6	18795	3,99	0,84
Kombineeritud süsteem Mega M	137711	344,3	7436	18,6	40992	3,01	2,59
Kombineeritud süsteem Mega L	144580	361,5	601	1,5	46278	3,00	2,97

Tabel 6.1 Küttesüsteemide võrdlus

Kõige suurema osa energiavajadusest küttele katab kombineeritud soojuspumpsüsteem Thermia Mega L soojuspumbaga. Võimalikul kasutusajal on kõige efektiivsem merevee soojuspumpsüsteem, kuid kasutusajaväline suur lisaküte alandab süsteemi efektiivsust. Õhk-vesi soojuspumpadest katab suurema võimsusega pump ära enamuse küttevajadusest, kuid soojuspumba eluea perspektiivist on kasulikum valida väiksema võimusega soojuspump, et kompressori töötsükli ei olek nii tihedad ja lühikesed. Reaalsuses võib olla laeva lisakütte vajadus väiksem, sest laeva meeskond reguleerib ise ruumide temperatuuri ning eelkõige hoitakse soojana 2-3 ruumi, kus inimesed viibivad.

Küttesüsteemide maksumuste võrdlus ja tasuvusajad on välja toodud tabelis 6.2.

Küttesüsteem	Maksumus, €	Küttekulu aastas, €	Sääst aastas küttekuludelt, €	Tasuvusaeg, a
ÕVSP 40 kW	55767	11312	19488	2,7
ÕVSP 61,8 kW	62597	9560	21240	3
MVSP Mega M + diisel	107946	18122	12678	8,5
MVSP Mega M + elekter	110446	16014	14786	7,6
MVSP Mega L + diisel	110317	18261	12539	9
MVSP Mega L + elekter	115817	16162	14638	8,1
Kombineeritud süsteem Mega M	159491	9569	21231	7,9
Kombineeritud süsteem Mega L	164862	9173	21627	7,8
Pelletikatel	15884	8870	21930	0,8

Tabel 6.2 Küttesüsteemide võrdlus

Kõige soodsam, lühema tasuvusaja ja väiksema küttekuluga süsteem on pelletikatel. Võrreldes olemasoleva süsteemiga nõuab pelletikatel rohkem kasutaja poolset hooldust ja tähelepanu. Katla kasutaja ülesandeks on vajadusel täitsa pelletimahutit ning tühjendada tuhakasti. Kuna laeval on diiselkütuse tankid, siis eraldi ruumi masinaruumis diisli hoiustamiseks hetkel vaja ei ole. Pelletikatla lahenduse puhul on vaja ruumi pelletimahutile, mis on 300 l suurune ning ka pelletivarude hoiustamiseks. Masinaruumist tuleb eemaldada olemasolevad katlad ja võimalusel seadmed, mis ei ole enam kasutusel. Pelletikatla paigalduse eelduseks on olemasolev korstnaühendus ja piisav värskeõhu juurdevool, mis on tagatud masinaruumi õhutuskorstnatega. Puudusena võib välja tuua pelleti transportimise laeva masinaruumi, sest laeva koridorid ja uksed on kitsad.

Soojuspumpsüsteemi lahendused on keskkonnasõbralikumad, sest taastumatuid energiaallikaid ei kasutata. Laeva suure soojusvajaduse tõttu on soojuspumpsüsteemide maksumus kõrge ja seadmed suurte mõõtmetega. Soojuspumpsüsteemi lahendustest on kõige lühema tasuvusajaga õhk-vesi soojuspump. Õhk-vesi soojuspumba paigalduseks tuleb samuti masinaruumist eemaldada vanad kütteseadmed. Masinaruumi paigaldatava siseosa suurus on 700 x 830 x 1120 mm (kõrgus x laius x pikkus) ning välistekile paigaldatava välisosa suurus 1878 x 830 x 2906 mm.

Kombineeritud soojuspumpsüsteem tarbib küll vähem elektrienergiat, kui õhk-vesi

soojuspump, kuid süsteemi seadmete ja väljaehituse maksumus on kaks korda suurem. Merevee soojuspump on kasutusajal efektiivsem, kui õhk-vesi soojuspump, kuid väljaspool kasutusaega tuleb kasutada lisakütet, mis suurendab aastast energiakulu küttele. Merevee soojuspump oleks tõhusam, kui veehaare oleks võimalik viia sügavamale merre, et merevee kasutamine oleks aastaringelt võimalik.

## KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö põhieesmärk oli leida alternatiivsed küttelehendused Muuseumilaev Valvase kütmiseks, mis vähendaksid laeva küttekulusid. Töö eesmärk oli ka koostada laeva simulatsioonimudel IDA ICE tarkvaras, analüüsida soojuspumpsüsteemi lahendusi ja pakkuda välja tehniliselt ja majanduslikult kõige sobivam küttelehendus.

Magistritöös täpsustati laeva konstruktsioonid ja nende soojuslähivused, tarbimis- ja kasutusprofiilid ja koostati tarkvaras IDA ICE simulatsioonimudel. Simulatsioonimudel kalibreeriti kasutades olemasolevaid tarbimise andmeid. Simulatsioonide tulemusel saadi laeva sojuskaod, küttekoormused ja energiaarvutuste baasaasta alusel energiatarbimine. Simulatsioonitulemusi kasutati laeva küttesüsteemide arvutustel.

Laeva küttesüsteemide analüüsiks valiti õhk-vesi soojuspump, merevee soojuspump, kombineeritud soojuspump ning pelletikatel. Arvutused teostati ühe aasta lõikes energiaarvutuse baasaasta välisõhu temperatuuride ja olemasolevate merevee temperatuuride alusel. Arvutustest selgusid süsteemide efektiivsused, energiakasutused ja küttevajaduse katvus.

Arvutuste tulemusel selgus, et kõige väiksema alginvesteeringu ja tasuvusajaga on pelletikatla süsteem. Pelletikatla süsteemi tasuvusajaks on 10 kuud. Vältimaks taastumatute energiaallikate kasutamist, on teine lühema tasuvusajaga süsteem õhk-vesi soojuspumpsüsteem. Õhk-vesi soojuspumba tasuvusaeg on 2 aastat ja 8 kuud. Õhk-vesi soojuspumpsüsteemi ainukeseks puuduseks on suur ruumivajadus, sest suure küttevõimsusega seadmed on suurte mõõtmetega.

Merevee kasutamine soojuspumba soojusallikana on võimalik piiratud ajal, sest veehaare on võimalik paigaldada 5 meetri sügavusele merre, kus merevee temperatuur langeb kütteperioodil liiga madalale soojuse omastamiseks. Merevee soojuspump on võimalikul kasutusajal efektiivsem kui õhk-vesi soojuspump, kuid suure lisaküttevajaduse tõttu väljaspool kasutusaega süsteemi efektiivsus langeb. Kombineeritud süsteemis kasutatakse väljaspool merevee kasutusaega välisõhu soojusvahetit, mis annab efektiivsema tulemuse kui õhk-vesi soojuspump üksi. Kombineeritud süsteemi miinuseks on süsteemi väljaehitamise keerukus ja kõrge maksumus.

## SUMMARY

The aim of this Master's thesis was to find alternative heating solutions for the Museumship Valvas, which would reduce the ship's heating costs. The objective was also to create a simulation model of the ship in the IDA ICE software, analyze heat pump solutions, and propose the most technically and economically suitable heating solution.

The thesis specified the ship's constructions and their thermal conductivities, consumption and usage profiles, and created a simulation model in IDA ICE software. The simulation model was calibrated using existing consumption data. The simulation results provided the ship's heat losses, heating loads, and energy consumption based on the test reference year for energy calculations. The simulation results were used for the calculation of the ship's heating systems.

Air-to-water heat pump, seawater heat pump, combined heat pump, and pellet boiler were selected for analysis of the ship's heating systems. The calculations were performed for one year, based on the test reference year air temperatures and existing seawater temperatures. The calculations provided the systems' efficiencies, energy use, and coverage of heating demand.

As a result of the calculations, it was found that the pellet boiler system has the smallest initial investment and payback period. The payback period for the pellet boiler system is 10 months. To avoid the use of non-renewable energy sources, the second system with a shorter payback period is the air-to-water heat pump system. The payback period for the air-to-water heat pump is 2 years and 8 months. The only drawback of the air-to-water heat pump system is the large space requirement because high-capacity devices are large in size.

The use of seawater as a heat source for the heat pump is possible for a limited time because the intake can be installed 5 meters deep into the sea, where the seawater temperature drops too low during the heating season for effective heat transfer. The seawater heat pump is more efficient during the possible usage time than the air-to-water heat pump, but due to the high additional heating requirements outside the usage time, the system's efficiency drops. In the combined system, an outdoor air heat exchanger is used outside the seawater usage time, providing a more efficient result than the air-to-water heat pump alone. The drawback of the combined system is the complexity of the system's construction and the high cost.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] KODUMAISE TOORME KASUTUS | Toorme liik ning Aasta. Statistika andmebaas". [https://andmed.stat.ee/et/stat/keskkond\\_\\_keskonna-arvepidamine\\_\\_materjalivoo-arvepidamine](https://andmed.stat.ee/et/stat/keskkond__keskonna-arvepidamine__materjalivoo-arvepidamine) (vaadatud 6. märts 2023).
- [2] www.elitec.ee, „Statistika |“. <http://www.soojuspumbaliit.ee/Statistika> (vaadatud 28. märts 2023).
- [3] G.Grossthal, "Elamu küttelahenduste üleviimine taastuenergiatele."
- [4] T. Kaspar, K. Teet-Andrus, M. Alo, ja V. Villu, „The Application of the Ground Source and Air-to-Water Heat Pumps in Cold Climate Areas“, Smart Grid Renew. Energy, kd 2013.
- [5] „Lennusadama angaaride rekonstrueerimine sai väärrika tunnustuse "MEREBLOG", 1. aprill 2013. <https://www.mereblog.com/2013/04/01/lennusadama-angaaride-rekonstrueerimine-sai-vaarika-tunnustuse/> (vaadatud 6. märts 2023).
- [6] O3, „LENNUSADAM - MEREMUUSEUM -“, 18. august 2013. <https://o3.ee/lennusadam-meremuuseum/> (vaadatud 8. aprill 2023).
- [7] R. Uiboupin, I. Maljutenko, ja J. Elken, „Merevee soojuspotentsiaal geotermaalenergia allikana“.
- [8] X. Jia, L. Duanmu, ja H. Shu, „Effect of seawater intake methods on the performance of seawater source heat pump systems in cold climate areas“, Energy Build., kd 153, lk 317–324, okt 2017.
- [9] A. Vaab, T. Post, ja K. Pulk, „Laeva kütuse- ja energiakulu vähendamise võimalused Silja Europa näitel“, juuni 2020, Vaadatud: 18. märts 2023. <https://digikogu.taltech.ee/et/item/ae75388b-a4fb-47b0-8ee6-f4f880ef53d2>
- [10] Dynamic modelling and energy performance analysis of an innovative dual-source heat pump system. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1359431118309128?token=06930AE94E7839AB312A6E754151B1410431B6C318356074833C56A949E1E0A52D2D684986B79BD89C5927A2A3408691&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230320084012> (vaadatud 20. märts 2023).
- [11] H. D. McGeorge, Marine auxiliary machinery, 7th ed. Oxford [etc.]: Butterworth-Heinemann, 1995.
- [12] „EVS-EN ISO 7547:2005“, EVS. <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-7547-2005> (vaadatud 6. märts 2023).
- [13] H. Punab et al., Toim, Laeva abimehhanismid, seadmed ja süsteemid. 2. Laevamehhanismid. Tallinn: Eesti Mereakadeemia, 2014.

- [14] [www.elitec.ee](http://www.elitec.ee), Soojuspumba tööpõhimõte. <http://www.soojuspumbaliit.ee/Soojuspumba-toopohimote> (vaadatud 6. märts 2023).
- [15] Soojuspumba dimensioneerimine - Kliimaseade. <https://www.kliimaseade.ee/abiks-alla/espl/soojuspumba-dimensioneerimine/> (vaadatud 7. mai 2023).
- [16] R. Perälä, A. Perema, O. Perälä, A. Toom, ja R. Perälä, Soojuspumbad. Tallinn: Ehitame, 2010.
- [17] TTÜ.\_Mehaanikateaduskond.\_Soojuspumbad. Vaadatud: 22. märts 2023. [https://energiatalgud.ee/sites/default/files/images\\_sala/5/59/TT%C3%9C.\\_Mehaanikateaduskond.\\_Soojuspumbad.pdf](https://energiatalgud.ee/sites/default/files/images_sala/5/59/TT%C3%9C._Mehaanikateaduskond._Soojuspumbad.pdf)
- [18] E. Silberstein, Heat pumps, 2nd ed. Boston, Mass: Cengage Learning, 2016.
- [19] H. L. V. Cube ja F. Steimle, Heat Pump Technology. Elsevier, 2013.
- [20] [www.elitec.ee](http://www.elitec.ee), Soojustegur. <http://www.soojuspumbaliit.ee/Soojustegur> (vaadatud 6. märts 2023).
- [21] Soojuspumba soojustegur, Kliimaseade. <https://www.kliimaseade.ee/abiks-alla/espl/soojuspumba-soojustegur/> (vaadatud 7. mai 2023).
- [22] EVS-EN 14511-2:2022, EVS. <https://www.evs.ee/et/evs-en-14511-2-2022> (vaadatud 6. märts 2023).
- [23] Hoone energiatõhususe arutamise metoodika–Riigi Teataja. <https://www.riigiteataja.ee/akt/109062015021?leiaKehtiv> (vaadatud 6. märts 2023).
- [24] EVS-EN 14825:2022, EVS. <https://www.evs.ee/et/evs-en-14825-2022> (vaadatud 6. märts 2023).
- [25] Soojusfüüsika alused : tehniline termodünaamika. Soojuslõbikanne / Andres Talvari ; Sisekaitseakadeemia - E-Varamu". <https://www.e-varamu.ee/item/PJCJCTV4DQSVE2FCSH6EOEZONH5AF6RH> (vaadatud 6. märts 2023).
- [26] Maasoojuspump ehk maaküte, Kliimaseade. <https://www.kliimaseade.ee/abiks-alla/espl/maasoojuspump-ehk-maakute/> (vaadatud 25. märts 2023).
- [27] E. Ojaveer ja T. Eikholm, Läänemeri: ökosüsteemid ja elusvarud, nende hindamine ning haldamine. Tallinn: Teaduste Akadeemia Kirjastus, 2014.
- [28] OceanLim\_Notes06. Vaadatud: 25. märts 2023. Available at: [http://msi.ttu.ee/~elken/OceanLim\\_Notes06.pdf](http://msi.ttu.ee/~elken/OceanLim_Notes06.pdf)

- [29] Läänemere hüdroloogiline iseloomustus - Eesti Entsüklopeedia. [http://entsyklopeedia.ee/artikkel/l%C3%A4%C3%A4nemere\\_h%C3%BCdroloogiline\\_iseloomustus](http://entsyklopeedia.ee/artikkel/l%C3%A4%C3%A4nemere_h%C3%BCdroloogiline_iseloomustus) (vaadatud 6. märts 2023).
- [30] Soojuse tootmine kaugkütte jaoks – Jätkusuutlik kaugküte. <https://kaugkute.taltech.ee/soojuse-tootmine/> (vaadatud 6. märts 2023).
- [31] Araner, „Seawater Heat Exchanger | ARANER“. <https://www.araner.com/blog/comparison-heat-exchange-technologies-seawater-applications> (vaadatud 25. märts 2023).
- [32] Kuidas valida soojuspumpa, Ait Nord, 2. detsember 2021. <https://ait-nord.ee/kuidas-valida-soojuspumpa/> (vaadatud 7. mai 2023).
- [33] Daikin Altherma 3 M, Daikin Internet. [https://www.daikin.ee/et\\_ee/product-group/air-to-water-heat-pump-low-temperature/daikin-altherma-3-m.html](https://www.daikin.ee/et_ee/product-group/air-to-water-heat-pump-low-temperature/daikin-altherma-3-m.html) (vaadatud 7. mai 2023).
- [34] D. Loginov, „Jahutus- ja külmatehnika loengumaterjalid“, 2022
- [35] Kliimaseadmed ja soojuspumbad. <https://klab.ee/f-gaasid/alternatiivid/kliimaseadmed-ja-soojuspumbad/> (vaadatud 8. mai 2023).
- [36] Külmaaine R32 vs R410A, Kliimajaam, 20. veebruar 2018. <https://kliimajaam.ee/kulmaaine-r32-vs-r410a/> (vaadatud 8. mai 2023).
- [37] TTÜ. Katlad. Õppematerjal. Vaadatud: 1. aprill 2023. [https://energiatalgud.ee/sites/default/files/images\\_sala/b/be/TT%C3%9C\\_Katlad.\\_%C3%95ppematerjal.pdf](https://energiatalgud.ee/sites/default/files/images_sala/b/be/TT%C3%9C_Katlad._%C3%95ppematerjal.pdf)
- [38] Pelletite info, www.pellet.ee. <https://www.pellet.ee/pelletid/pelletite-info/> <https://www.pellet.ee/pelletid/pelletite-info/> (vaadatud 1. aprill 2023).
- [39] A-pellet. <https://www.apellet.ee/heating> (vaadatud 1. aprill 2023).
- [40] Vedelkütuse seadus–Riigi Teataja. <https://www.riigiteataja.ee/akt/129062014089?leiaKehtiv> (vaadatud 2. aprill 2023).
- [41] Tallinna Tehnikaülikool. Küte ja ventilatsioon. Raske kütteõli. 2008. Vaadatud: 2. aprill 2023. [https://energiatalgud.ee/sites/default/files/images\\_sala/d/d8/Tallinna\\_Tehnika%C3%BClikool.\\_K%C3%BCte\\_ja\\_ventilatsioon.\\_Raske\\_k%C3%BCtte%C3%B5li.\\_2008.pdf](https://energiatalgud.ee/sites/default/files/images_sala/d/d8/Tallinna_Tehnika%C3%BClikool._K%C3%BCte_ja_ventilatsioon._Raske_k%C3%BCtte%C3%B5li._2008.pdf)
- [42] MKM\_m63\_lisa4. Vaadatud: 2. aprill 2023. [https://www.riigiteataja.ee/akt/lisa/1181/0201/2001/MKM\\_m63\\_lisa4.pdf](https://www.riigiteataja.ee/akt/lisa/1181/0201/2001/MKM_m63_lisa4.pdf)
- [43] Bittersweet, 1944 (WLB 389), United States Coast Guard. <https://www.history.uscg.mil/Browse-by-Topic/Assets/Water/All/Article/2409250/bittersweet-1944-wlb-389/> (vaadatud 6. märts 2023).



- [44] VALVAS – Mereviki. <https://mereviki.vta.ee/mediawiki/index.php/VALVAS> (vaadatud 6. märts 2023).
- [45] O. Ruhnau, L. Hirth, ja A. Praktijnjo, „Time series of heat demand and heat pump efficiency for energy system modeling“, Sci. Data, kd 6, nr 1, Art. nr 1, okt 2019, doi: 10.1038/s41597-019-0199-y.
- [46] EVS 844:2022, EVS. <https://www.evs.ee/et/evs-844-2022> (vaadatud 10. aprill 2023).
- [47] Big Bag puitpellet - Eesti Puu OÜ, 22. september 2022. <https://puu24.ee/pellet/big-bag-puitpellet/> (vaadatud 7. mai 2023).
- [48] Pelletikatel Everclean 50 kW Pelltech. OÜ Cerbos - Küttesüsteemid. <https://cerbos.ee/et/pelletikatlad-kombikatlad/747-pelletikatel-everclean-50-pelltech.html> (vaadatud 7. mai 2023).
- [49] Pelletikatla hooldus. Pelletikatel Pelle hooldamine pelletipõleti korral, OÜ Cerbos - Küttesüsteemid. <https://cerbos.ee/et/content/101-pelletikatla-hooldus> (vaadatud 7. mai 2023).

# LISAD

**Lisa 1 Õhk-vesi soojuspumba tehnilised andmed**

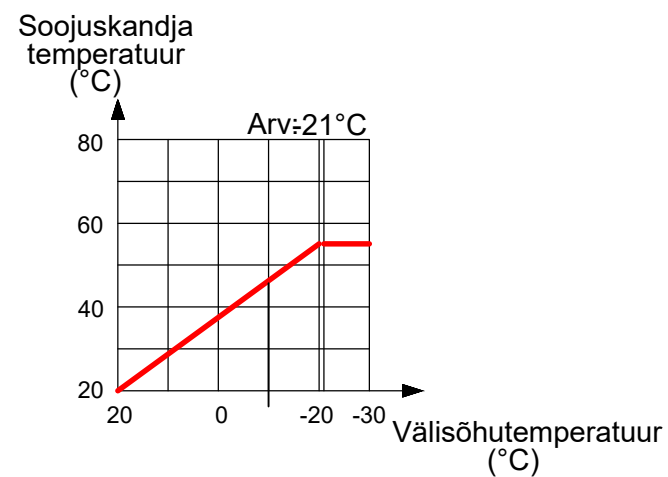
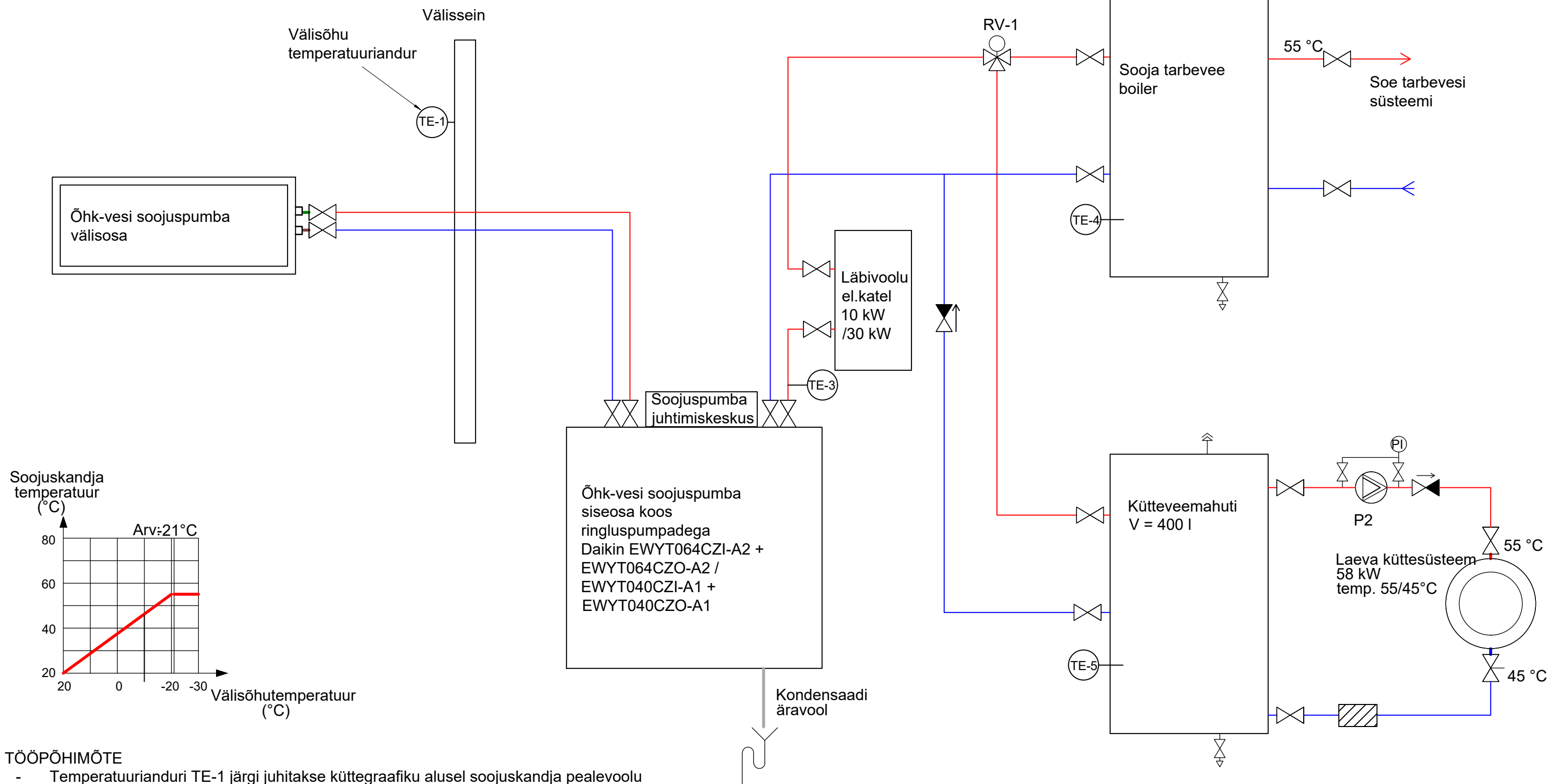
Mudel		EWYT064CZI-A2 + EWYT064CZO-A2	EWYT040CZI-A1 + EWYT040CZO-A1
<b>Küte</b>			
Küttevõimsus	kW	61,8	40
Kompressori võimsus	kW	19,2	11,7
COP		3,218	3,325
<b>Vedelik soojusvaheti kültele</b>			
Siseneva vee temperatuur	°C	40	40
Väljuva vee temperatuur	°C	45	45
Vee vooluhulk	l/s	3	1,9
Vee rõhulang	kPa	20,6	36,5
Õhu temperatuur		7	7
Õhu soojusvaheti		Al Fins&Cu Tubes	
Tüüp			
<b>Ventilaator</b>			
Tüüp		Axial	
Drive *		VFD	
Nominaalne õhuvooluhulk	l/s	8967	6701
Õhu temperatuur	°C	35	35
Kogus	Nr	3	2
Kiirus	rpm	800	900
Mootori võimsus	kW	1,2	1,1
<b>Mõõtmed</b>			
Kõrgus SISE/VÄLISOSA	mm	700/1878	700/1878
Laius SISE/VÄLISOSA	mm	830/814	830/802
Pikkus SISE/VÄLISOSA	mm	1120/2906	1120/1752
<b>Kaal</b>			
Seadme kaal SISE/VÄLISOSA	kg	172/620	144/357
Kompressor		Scroll 5.4 2	Scroll 3.2 1
Tüüp			
Kogus	Nr.		

## LISA 2 Merevee soojuspumba tehnilised andmed

MUDEL			MEGA M	MEGA L
Külmutusaine	Tüüp, kogus	kg	R4t0A, 4,4	R4t0A, 4,4
Kompressor	Tüüp Õli		Scroll POE	Scroll POE
Elektrilised andmed	Elektriline võimsus Kompressori elektritarve	Volt kW	400 17,5	400 22,2
Jõudlus	COP Küttevõimsus Sisendvõimsus SCOP, Põrandküte (35°C) SCOP, Radiaator (55°C) Võimsusväljastus (B0/W35)	kW kW	4,60 26,71 5,8 5 86 4,55 11-44	4,50 35,60 7,91 5,29 4,20 14-59
Energiaklass-süsteem	Põrandküte (35°C) Radiaator (55°C)		A+++ A+++	A+++ A+++
Maksimaalne süsteemi rõhk	Jahutus Küte	bar bar	6 6	6 6
Max/min temperatuur	Jahutus Küte	°C °C	20/10 65/20	20/t0 65/20
Müratase	Min/Max Helirõhutase	dB(A) dB(A)	41–56" 50	40–59" 43
Mõõdud (LaiusxPikkusxKõrgus) (ilma toruühendusteta)"			mm	692x796x1652 + 10
692x796x1652 + 10 692x796x1652 + 10 900x849x1644 +10			900x849xT 644 +10	
Mõõdud (LaiusxPikkusxKõrgus) (ilma toruühendusteta)"			mm	692x796x1722 +
10 692x796x1722 + 10 692x796x1722 + 10 900x849x1744 +10			900x849x1744 +10	
<b>Kaal</b>		kg	310	407

### LISA 3 Pelletikatla tehnilised andmed

Mudel	Ühik	PK50/51*
Väljundvõimsus	kW	47
Soojuskoormus	kW	50
Katla klass vastavalt EN 303-5		5
Kõrgeim töötemperatuur	°C	90
Ohutustermostaadi rakendustemperatuur	°C	95
Lubatud töö rõhk	bar	2,5
Testimise rõhk	bar	4
Katla veemaht	liiter	150
Katla kaal	kg	313
Mõõdud LxSxP	mm	600x800x1510
Laius ilma küljeplekkideta	mm	500
Põlemiskambri mõõtmed LxSxK	mm	330x600x700
Toitepinge		230v, 50Hz
Elektri tarbimine süütamisel	W	500
Elektri tarbimine töötamisel	W	50
Elektri tarbimine ootel	W	3
Katlaruumi õhuava mõõtmed	cm <sup>2</sup>	>300
Tuhakasti maht	l	54
Turbulaatorite arv	tk	7
Suitsutoru väljund	Ø mm	112
Korstna läbimõõt	mm	>120
Suitsugaaside temperatuur väljundvõimsusel	°C	150...180
Katla kasutegur temperatuuril 70	%	94



**TÖÖPÕHIMÕTE**

- Temperatuurianduri TE-1 järgi juhitakse küttegaafiku alusel soojuskanja pealevoolu temperatuuri.

**TARBEVESI**

- Sooja tarbevee valmistamine on primaarne. Juhul, kui temperatuurianduri TE-4 näit langeb alla 50 °C, juhib soojuspumba juhtimiskeskus mootorajamiga 3-tee ventiili RV-1 nii, et süsteem hakkab tootma sooja tarbevett.
- Juhul, kui soojuspump töötab täisvõimsusel ning TE-4 järgi ei tagata sooja tarbevee temperatuuri 55 °C, rakendub elektriline lisakütte katel.

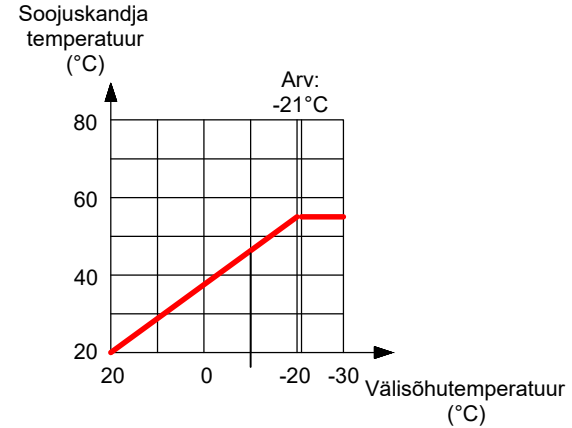
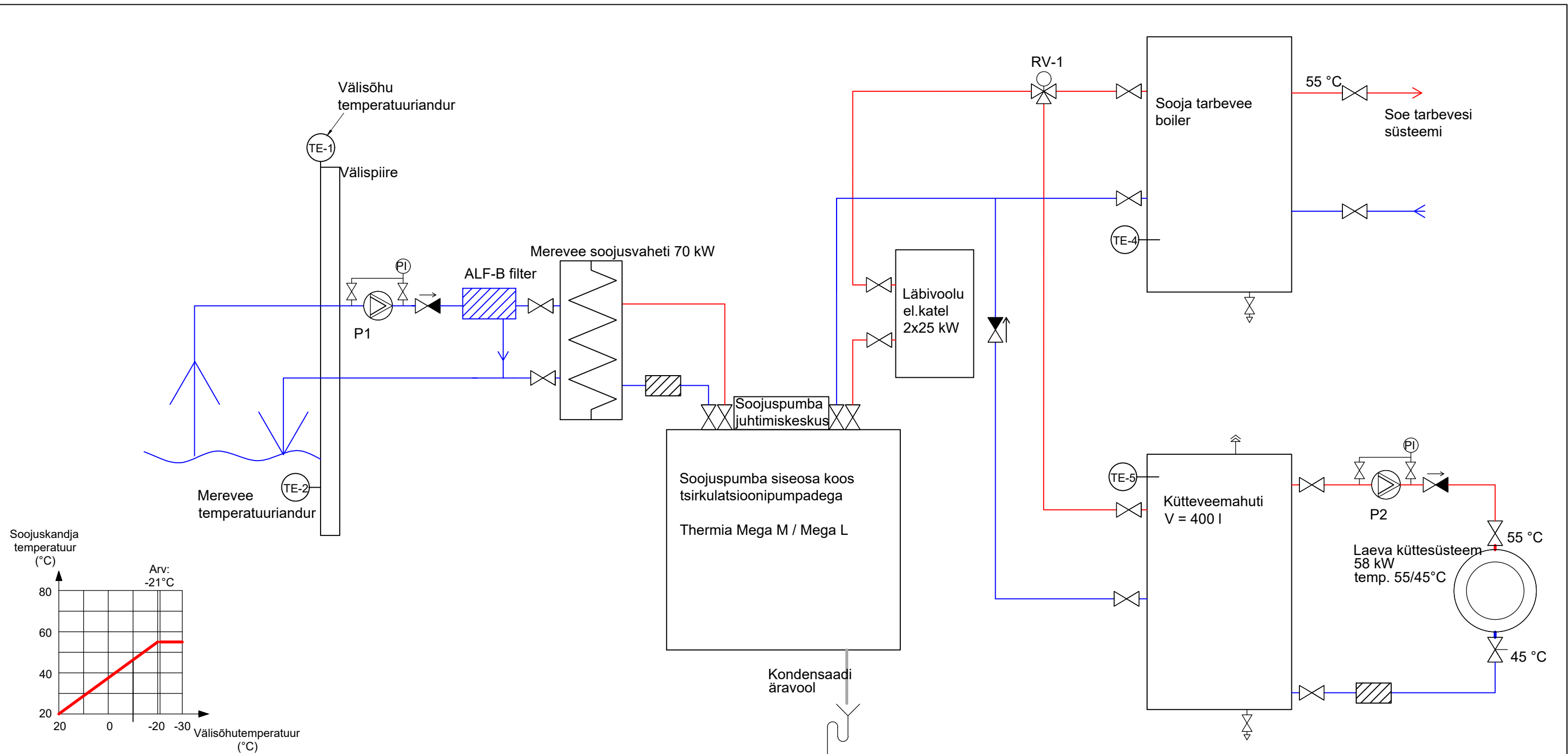
**KÜTE**

- Juhul, kui sooja tarbevett ei ole vaja teha, juhib soojuspumba juhtimiskeskus mootorajamiga 3-tee ventiili RV-1 nii, et süsteem toodaks soojust küttevahutisse.
- Elektriline lisakütte katel rakendub juhul, kui TE-5 järgi ei ole tagatud küttegaafikule vastav soojuskanja temperatuur.

**LEGEND:**

- Õhuti
- Temperatuuri andur
- Mootorajamiga 3-Tee reguleerventiil
- Sulgarmatuur
- Liiniseadeventiil
- Tagasilöögiklapp
- Tsirkulatsioonipump

	Tallinna Tehnikaülikool	Magistritöö pealkiri: Muuseumilaevalvase küttekulude vähendamine
	Koostaja: Hanna-Kristiina Karu	Nimetus: Õhk-vesi soojuspumpsüsteemi põhimõtteline skeem
Juhendaja: Jarek Kurnitski	Kuupäev: 13.05.2023	Leht: 1/3
Ehituse ja arhitektuuri instituut		



Tööpõhimõte

- Temperatuurianduri TE-1 järgi juhitakse küttegaafiku alusel soojuskandja pealevoolu temperatuuri.
- Merevee temperatuuri kontrollib temperatuuriandur TE-2. Juhul kui merevee temperatuur langeb alla 2 °C, lülitub välja pump P1 ja soojuspump. Soojuskandja kütmine toimub elektrilise lisakütte katlaga või muu alternatiivse kütteallikaga.

TARBEVESI

- Sooja tarbevee valmistamine on primaarne. Juhul, kui temperatuurianduri TE-4 näit langeb alla 50 °C, juhib soojuspumba juhtimiskeskus mootorajamiga 3-tee ventiili RV-1 nii, et süsteem hakkab tootma sooja tarbevett.
- Juhul, kui soojuspump töötab täisvõimsusel ning TE-4 järgi ei tagata sooja tarbevee temperatuuri 55 °C, rakendub elektriline lisakütte katel.

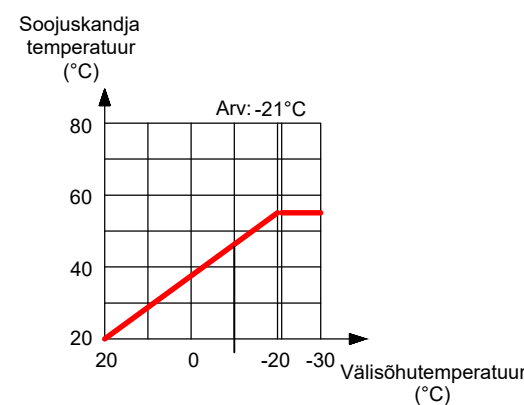
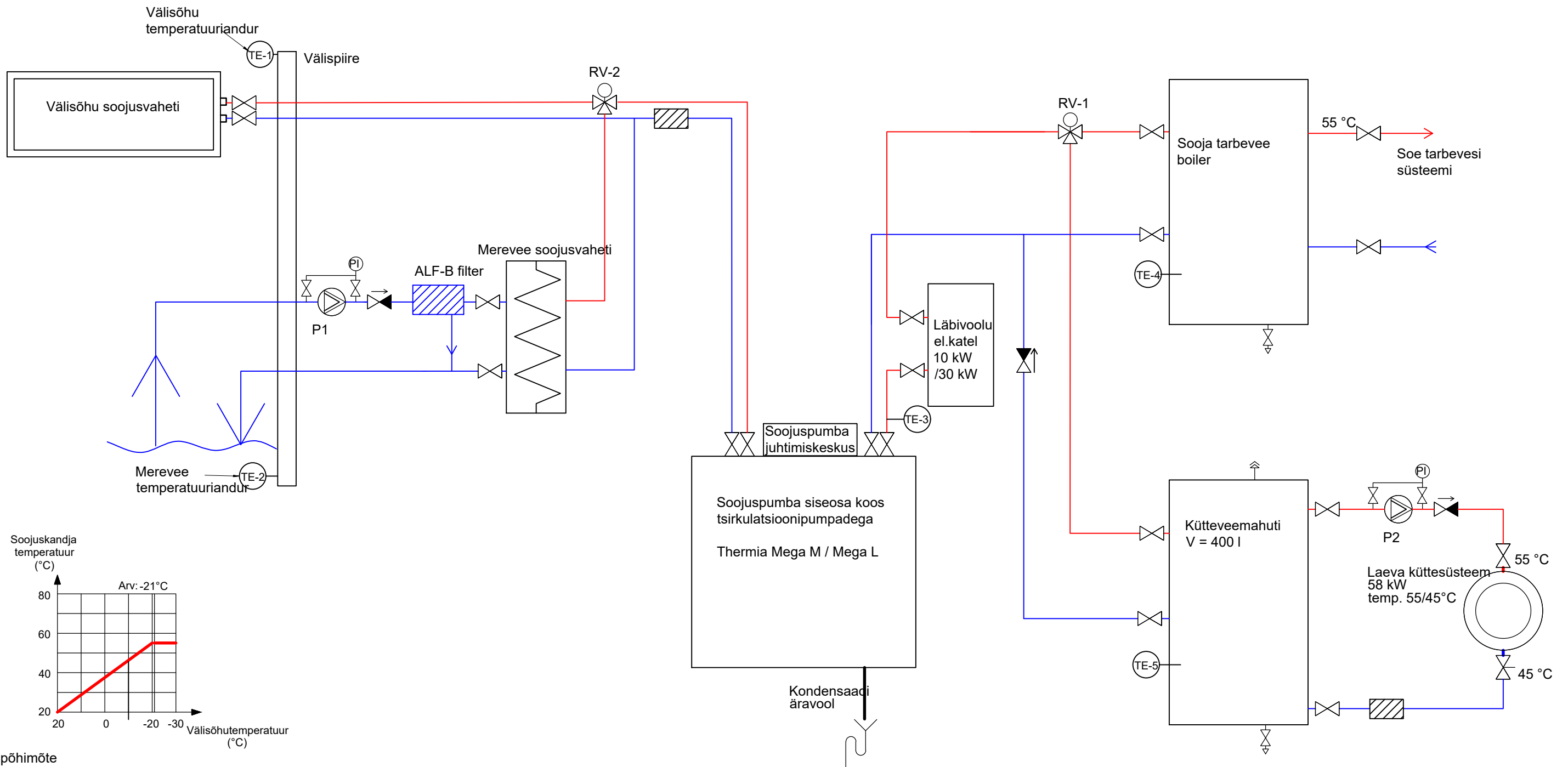
KÜTE

- Juhul, kui sooja tarbevett ei ole vaja teha, juhib soojuspumba juhtimiskeskus mootorajamiga 3-tee ventiili RV-1 nii, et süsteem toodaks soojust kütteveemahutisse.
- Elektriline lisakütte katel rakendub juhul, kui TE-5 järgi ei ole tagatud küttegaafikule vastav soojuskandja temperatuur.

LEGEND:

- ↑ Õhuti
- ⊙ (TE-1) Temperatuuri andur
- ⊗ Mootorajamiga 3-Tee reguleeriventiil
- ⊘ Sulgarmatuur
- ⊘ Liiniseadeventiil
- ⊘ Tagasilöögiklapp
- ⊙ Tsirkulatsioonipump

	Tallinna Tehnikaülikool	Magistritöö pealkiri: Muuseumilaev Valvase küttekulude vähendamine
	Koostaja: Hanna-Kristiina Karu	Nimetus: Merevee soojuspumpsüsteemi põhimõtteline skeem
	Juhendaja: Jarek Kurnitski	
Ehituse ja arhitektuuri instituut	Kuupäev: 13.05.2023	Leht: 2/3



Tööpõhimõte

- Temperatuurianduri TE-1 järgi juhitakse küttegaafiku alusel soojuskanja pealevoolu temperatuuri.
- Merevee temperatuuri kontrollib temperatuuriandur TE-2. Juhul kui merevee temperatuur langeb alla 2 °C, lülitub välja pump P1 ning soojuspumba automatika juhib mootorajamiga 3-tee ventiili RV-2, et soojuspumba külmaaine käib läbi välisõhu soojusvaheti.

TARBEVESI

- Sooja tarbevee valmistamine on primaarne. Juhul, kui temperatuurianduri TE-4 näit langeb alla 50 °C, juhib soojuspumba juhtimiskeskus mootorajamiga 3-tee ventiili RV-1 nii, et süsteem hakkab tootma sooja tarbevett.
- Juhul, kui soojuspump töötab täisvõimsusel ning TE-4 järgi ei tagata sooja tarbevee temperatuuri 55 °C, rakendub elektriline lisakütte katel.

KÜTE

- Juhul, kui sooja tarbevett ei ole vaja teha, juhib soojuspumba juhtimiskeskus mootorajamiga 3-tee ventiili RV-1 nii, et süsteem toodaks soojust küttevahutisse.
- Elektriline lisakütte katel rakendub juhul, kui soojuspump töötab täisvõimsusel ja TE-5 järgi ei ole tagatud küttegaafikule vastav soojuskanja temperatuur.

LEGEND:

- ↑ Õhuti
- ⊙(TE-1) Temperatuuri andur
- ⊙(RV) Mootorajamiga 3-Tee reguleerventiil
- ⊘ Sulgarmatuur
- ⊘(L) Liiniseadeventiil
- ⊘(T) Tagasilöögiklapp
- ⊙(P) Tsirkulatsioonipump

	Tallinna Tehnikaülikool	Magistritöö pealkiri: <b>Muuseumilaev Valvase küttekulude vähendamine</b>
	Koostaja: <b>Hanna-Kristiina Karu</b>	Nimetus: <b>Kombineeritud soojuspumpsüsteemi põhimõtteline skeem</b>
Juhendaja: <b>Jarek Kurnitski</b>	Kuupäev: <b>13.05.2023</b>	Leht: <b>3/3</b>
Ehituse ja arhitektuuri instituut		