



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehitus ja arhitektuuri instituut

ÕHK-VESI SOOJUSPUMPADE DEKLAREERITUD JA TEGELIKUD SOOJUSTEGURID

AIR TO WATER HEAT PUMPS DECLARED AND ACTUAL HEAT FACTORS

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Ketriin Murrik

Üliõpilaskood 165156EAKI

Juhendaja: Prof Jarek Kurnitski,
nooremteadur Karl Villem Võsa,
nooremteadur Alo Mikola

Tallinn 2022

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.

16. mai 2022.

Autor: Ketriin Murrik

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

16. mai 2022.

Juhendaja: Jarek Kurnitski

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

".....".....201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Ketriin Murrik (sünnikuupäev: 15.08.1997.)

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

Soojuspumpade deklareeritud ja tegelikud soojustegurid,

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on Jarek Kurnitski, Karl-Villem Võsa, Alo Mikola,

(juhendaja nimi)

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

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

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

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

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

/allkirjastatud digitaalselt/

16.05.2022 (kuupäev)

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Ketriin Murrik, 165156
Õppekava, peeriala: Küte ja ventilatsioon, EAKI
Juhendaja(d): professor Jarek Kurnitski, 58664370 (amet, nimi, telefon)
Nooremteadur Karl Villem Võsa, 58500018
Nooremteadur Alo Mikola, 56647035

Lõputöö teema: Õhk-vesi soojuspumpade deklareeritud ja tegelikud soojustegurid
(inglise keeles) Air to water heat pumps declared and actual heat factors

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Teostada eksperimentaalsed mõõtmised, et uurida välja kahe erineva soojuspumba soojustegurid.
2. Uurida, kas standardi järgi mõõdetud ja tootja poolt deklareeritud väärtused ühtivad.
3. Uurida, kas energiatõhususe määrase järgi arvutatud tulemused on sarnased võrreldes deklareeritud väärtuste kasutamisega.
4. Teostada IDA ICE simulatsiooniprogrammiga aastased simulatsioonid, et hinnata soojuspumpade energiatõhusust väikeelamu näitel.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Katsetulemuste andmeanalüüs koos arvutustega standardi järgi ja energiatõhususe määrase järgi. Valmis mudel koos arvutustega.	28.03
2.	Teoreetilise osa kirjutamine.	18.04
3.	Järeldused ja kokkuvõte.	14.05

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 16. mai 2022a

Üliõpilane: Ketriin Murrik /allkirjastatud digitaalselt/
/allkiri/ 16. mai 2022a

Juhendaja: Jarek Kurnitski / allkirjastatud digitaalselt/
/allkiri/ 16. mai 2022a

Juhendaja: Karl-Villem Võsa / allkirjastatud digitaalselt/
/allkiri/ 16. mai 2022a

Juhendaja: Alo Mikola / allkirjastatud digitaalselt/ 16. mai 2022a
/allkiri/

Konsultant: / allkirjastatud digitaalselt/ 16. mai 2022a
/allkiri/

Programmijuht: ".....".....2022a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA	8
Lühendite ja tähiste loetelu.....	9
1 SISSEJUHATUS	10
1.1 Probleem.....	10
1.2 Eesmärk	10
1.3 Töö struktuur	11
2 TEOREETILISED ALUSED	12
2.1 Soojuspumba üldine taust.....	12
2.2 Soojuspumba tehniline kirjeldus	12
2.3 Energiatõhusus.....	12
2.4 Küttegaafik.....	13
3 SOOJUSTEGURI ARVUTAMINE	15
3.1 Standardid.....	15
3.1.1 Bin arvutuse meetod	15
3.2 Bivalentne temperatuur (T_{biv})	17
3.3 Piiritöötemperatuur (TOL)	18
3.4 Arvutusmeetodid hooajalise ruumi kütmise efektiivsus $\eta_{s,h}$, SCOP, SCOP _{on} ja SCOP _{net} jaoks.....	18
3.4.1 Üldine valem SCOPi arvutamiseks	19
3.4.2 Võrdlusaasta küttevajaduse arvutus Q_H	19
3.4.3 Aastase energiatarbimise arvutus küttele Q_{HE}	20
3.4.4 SCOP _{ON} arvutus.....	20
3.5 Arvutusmeetod COP _{bin} väärtuste määramiseks osalise koormuse tingimustes.....	21
3.6 Arvutusmetoodika astmelise ja muutuva võimsusega seadmetele	21
3.7 Hindamine jäätumise ja sulatamise ajal.....	22
3.8 Energiatõhususe määrase järgi arvutus	23
KIRJANDUSE ÜLEVAADE.....	25
4 METOODIKA	27
4.1 Katsetatavad soojuspumbad	27

4.2 Kliimakamber	28
4.3 Mõõteprotseduur.....	29
4.3.1 Tegevused enne mõõtmisi	29
4.3.2 Tegevused mõõtmisel	30
4.3.3 Tegevused pärast mõõtmist	31
4.3.4 Katsetingimused	31
4.3.5 Katselised võimsused	31
4.3.6 Arvutulikud pealevoolu temperatuurid.....	33
4.3.7 Tootja katseandmed.....	34
4.4 Veaanalüüs.....	34
4.5 Simulatsioonid	35
4.5.1 Soojuspumba mudeli kalibreerimine	35
4.5.2 Parameetrite optimeerimine	37
4.5.3 IDA ICE eramu mudel.....	39
4.5.4 Eramu uus energiaarvutus	41
4.6 Standardi järgse külma kliima ja Eesti baasaasta võrdlus	41
5 TULEMUSED	43
5.1 Split tüüpi soojuspumba arvutuslikud soojustegurid.....	43
5.2 Mono tüüpi soojuspumba arvutuslikud soojustegurid.....	45
5.3 Spliti ja mono tulemused graafiliselt	46
5.4 Soojustegurid ilma tausttarbeta	48
5.5 Katsete analüüs	51
5.6 Arvutuslikud sesoonsed soojustegurid	54
5.6.1 Spliti aastased soojustegurid.....	54
5.6.2 Mono sesoonsed soojustegurid	55
5.7 Energiatõhususe määru järgi arvutatud aastased soojustegurid	57
5.8 Eramu energiaarvutuste tulemused.....	57
6 TULEMUSTE ANALÜÜS	60
KOKKUVÕTE	63
SUMMARY	65
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	67
LISAD	71

EESSÕNA

Igapäevases elus pööratakse aina enam tähelepanu seadmete energiatõhususele. Õhk-vesi soojuspumpad on väga laialdaselt kasutuses ning seda peetakse väga oluliseks tehnoloogiaks vähendades kütmisega seotud kasvuhoonegaase. Sellega seoses on väga oluline mõista, et kas tootja poolt esitatud andmed soojuspumpade energiatõhususe kohta vastavad reaalsusele.

Käesolev lõputöö teema on sõnastatud Jarek Kurnitski algatusel. Magistritöö raames tehti katsed Tallinna Tehnikaülikooli Ehituse Mäemajas, kus viidi läbi mõõtmised iseloomustamaks soojuspumba tööd erinevatel välisõhutemperatuuridel, et hilisemas andmete analüüsis arvutada välja soojustegurid ja aastased sesoonsed soojustegurid. Lisaks viidi läbi aastased arvutused simulatsiooniprogrammiga IDA ICE. Soojuspumba katsetuste jaoks paigaldas pumba maaletooja. Katse aitas tööle panna Alo Mikola ja Karl Villem Võsa. Autori ülesandeks oli katsete läbi viimine, kohapeal seadmete seadistamine, kontrollimine ja hilisem andmete töötlemine ning arvutuste tegemine. Konsultatsioonidega, katsete ja katsetulemuste töötlemisega abistas Karl Villem Võsa. Võtmesõnad, mis magistritöö kokku võtavad on: õhk-vesi soojuspump, soojustegur, aastane sesoonne soojustegur, IDA ICE, küttegaafik.

Lühendite ja tähiste loetelu

EER – energiatõhususe suhe (ingl k *Energy Efficiency Ratio*)

COP – soojuspumba soojustegur (ingl k *Coefficient of Performance*)

COP_d – soojuspumba soojustegur deklareeritud võimsusel (ingl k *coefficient of performance at declared capacity*)

SCOP – soojuspumba sesoonne soojustegur (ingl k *Seasonal Coefficient of Performance*)

SPF – hooaja keskmine soojustegur (ingl k *Seasonal Performance Factor*)

Ph – kütte võimsus (ingl k *Heating capacity*)

P_{Design} – Kütte võimsus vastavalt tootjale madalaimal kliimavööndi töötemperatuuril

P_{Rated} - Seadme auru kokkusurumistsükli jahutus- või küttevõimsus standardi järgsetel mõõtmistingimustel

T_j – Bin temperatuur SCOPi arvutamisel

T_{Design} - Kliimavööndi madalaim töötemperatuur vastavalt standardile EN 14511

TOL - Töötemperatuuri piir, alla selle temperatuuri soojuspump seiskub

Bin - välistemperatuuri intervall 1K (ingl k *Outdoor temperature interval of 1 K*)

T_{design} – tingimused ruumide kütmiseks (ingl k *Reference design conditions for space heating*)

Q_n – aastane võrdlusküttevajadus (ingl k *Reference annual heating demand*)

P_{sum} – soojuspumba sise- ja välisosa võimsused kokku liidetud

1 SISSEJUHATUS

Õhk-vesi soojuspumpasid vaadeldakse kui võtmetehnoloogiat keskkonna dekarboniseerimisel. Õhk-vesi soojuspumpasid kasutatakse hoone põhi- või lisaküttena, et optimeerida hoone püsikulusid. Pumba kasutamisel tuleb maksta vaid seadme tarbitava elektrienergia eest ja seepärast peetakse soojuspumpa üheks energiatõhusaimaks lahenduseks. Lisaks suudavad soojuspumbad oluliselt aidata eemaldada keskkonnast tekkivaid keskkonnagaase. [1]

Soojuspumba energiatõhusus on tähtis näitaja soojuspumba efektiivsuse hindamisel. Soojuspumba energiatõhususe arv on kohustuslik kõikidele tootjatele, kes soovivad oma tooteid müüa Euroopa Liidus. Soojuspumpade energiatõhusus on energiamärgistel märgitud kui ruumikütte hooajalise kasuteguriga η_s ehk sesoonne primaarenergiale taandatud külma kliima kasuteguriga protsentides. Hooajaline energiatõhususe näitaja on seotud laialt kasutatava näitajaga COP ehk soojusteguriga, mis on mõõdetud soojusenergia jagatuna soojuspumba tarbitava elektri energiaga. Soojuspumba energiatõhususe näitajaid on kasulikud arhitektidele, kütte inseneridele ja tarbijatele, et hinnata hoonete kasutus- ja elutsüklikulusid. [2]

Antud lõputöös keskendub autor ühe konkreetse tootja kahe erineva soojuspumba tüübi soojustegurite ja aastaste sesoonsete soojustegurite arvutamisele vastavalt standardile ja energiatõhususe määrusele. Olulist rõhku pannakse katsetele ja hilisemale andmete analüüsile.

1.1 Probleem

Soojuspumpade tootja deklareeritud andmeid ei ole varasemalt võrreldud katseliste mõõtmistega, seega ei ole üldisemat arusaama, mil määral deklareeritud andmed vastavad tegelikkusele. Autorile teadaolevalt ei ole sarnaseid mõõtmisi vastavalt standardile varasemates lõputöödes ega teadustöödes läbi viidud.

1.2 Eesmärk

Lõputöö eesmärk on anda ülevaade õhk-vesi soojuspumba mõõtetulemustest ja võrrelda neid tootja deklareeritud andmetega. Seejärel teha arvutused vastavalt standardile ja energiatõhususe määrusele ning arvutada soojuspumpade aastased soojustegurid. Lisaks viia läbi simulatsiooniprogrammiga IDA ICE aastased hoone energiaarvutused, kus on arvesse võetud sooja tarbevee tarbimine, et arvutada aastased soojustegurid küttele ja tarbeveele. Võrrelda standardi järgset külma kliima

erinevust Eesti baasaasta kliimaga ja hinnata standardi järgi arvutatud SCOPE tootja andmetega ning IDA ICE arvutustulemustega.

1.3 Töö struktuur

Magistritöö koosneb sissejuhatusest, põhiosast, metoodikast, mõõtmiste kirjeldusest, katsete mõõtetulemustest ning analüüsist.

Lõputöö põhiosas käsitletakse standardite järgi arvutamist, mõõtmisprotseduuri, küttegraafikut ja energiatõhususe määrase järgi arvutamist. Lõputöö analüüsi osas võrreldakse saadud katsetulemusi tootja deklareeritud andmetega. Lisaks antakse ülevaade simulatsiooniprogrammiga saadud tulemustest. Ühe lõputöö osana on võrrelda energiatõhususe määrase järgi arvutatud tulemusi reaalsete ja tootja andmetega. Analüüsi tulemusena soovib autor välja tuua tegurid, mis mõjutavad SCOPE'i ning erinevatest arvutusmetoodikatest tekkivaid erinevusi. Lisaks soovib autor püstitada omapoolseid küsimusi edasise uurimise ja analüüsi jaoks.

2 TEOREETILISED ALUSED

2.1 Soojuspumba üldine taust

Soojuspumbad (õhksoojuspump, õhk-vesi soojuspump ja maasoojuspump) kasutavad ära looduses olemasolevat soojusenergiat, et sellest toota kütteenergiat ruumide kütmiseks või tarbevee soojendamiseks. Soojusenergia kogumiseks ja kütteenergiaks muutmiseks peab soojuspump tegema tööd. Selleks kasutab seade elektrienergiat. Õhk-vesi-soojuspump kogub välisõhku salvestunud soojusenergia, muudab selle kütteenergiaks ja kannab siseruumidesse laiali vee kaudu. [3]

2.2 Soojuspumba tehniline kirjeldus

Soojuspump koosneb neljast põhiosast: aurustist, kondensaatorist, kompressorist ja paisventiilist. Need komponendid on ühendatud torustiku abil suletud süsteemiks. Süsteemis ringleb külmaagens, mis ühes süsteemi osas on gaasilises ja teises vedelas olekus. Vedelikel on sõltuvalt rõhust erinev keemistemperatuur ehk keemispunkt. Mida kõrgem rõhk seda kõrgem keemispunkt. Näiteks vee keemispunkt normaalrõhul (1atm) on 100 °C. Rõhku kahekordistades on vee keemispunkt 120 °C. Normaalrõhku poole võrra vähendades on vee keemispunktiks vaid 80 °C. Soojuspumbas ringlev külmaagens käitub sarnaselt, selle keemispunkt muutub sõltuvalt rõhu muutusest. Külmaagensi eripäraks on väga madal keemispunkt, mis on normaalrõhul - 40 °C. See võimaldab külmaagensi kasutada madalate temperatuuridega soojusallikate juures. [1]

2.3 Energiatõhusus

Soojuspumba energiatõhususe ja efektiivsuse hindamisel kasutatakse kahte mõistet:

- soojustegur COP, mis näitab toodetud soojusenergia ja kulutatud energia suhet
- hooaja keskmine soojustegur SPF, mis on aasta (hooaja) jooksul toodetud soojuse suhe kulutatud energiasse.

Enamasti mõõdetakse elektrienergia üldkulu, mõnikord eraldi ka soojuspumba elektrikulu. Seetõttu on SPF väärtused suuresti arvutuslikud või oletuslikud. [4]

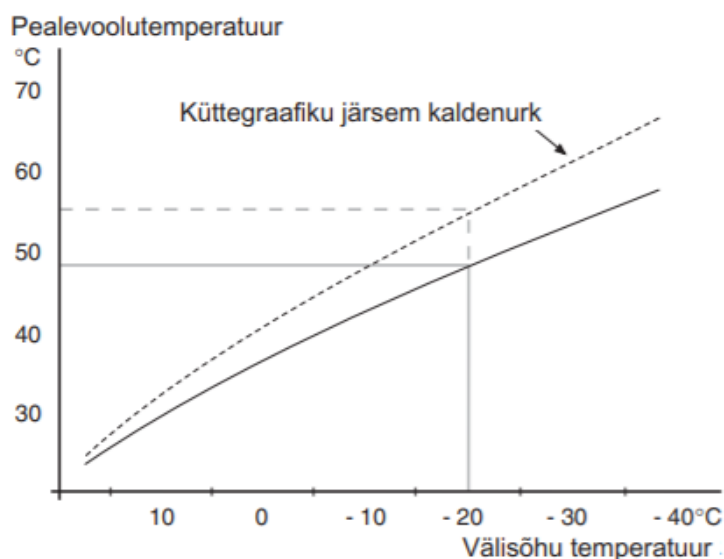
Energiatõhususe määrase järgi arvutades saadakse aastane soojustegur SPF, mis on võrreldav soojuspumba standardi järgi arvutatud sesoonse soojusteguriga SCOP.

2.4 Küttegaafik

Hoone soojusliku mugavuse tagamise peamiseks eesmärgiks on hoida ruumis võimalikult ühtlast temperatuuri. Selle jaoks peab hoone küttesüsteemi juhtima automaatikaga. Soojuspumba juhtimiseks kasutatakse küttegaafikut. Küttegaafiku funktsioon on tagada ühtlane ruumitemperatuur olenemata välisõhu temperatuurist ja seeläbi seadme ökonoomne töö. Küttegaafiku põhjal määrab soojuspumba juhtautomaatika küttesüsteemi pealevoolutemperatuuri ja kõige lõpuks ruumitemperatuuri. [5]

Küttegaafikut juhitakse astmeliselt kaldenurga abil. Küttegaafiku kaldenurk näitab, kui mitme kraadi võrra tuleb tõsta/alandada pealevoolutemperatuuri, kui välisõhu temperatuur alaneb/tõuseb. Mida järsem on kaldenurk, seda suurem on pealevoolutemperatuur teatud välisõhu temperatuuri puhul. [5]

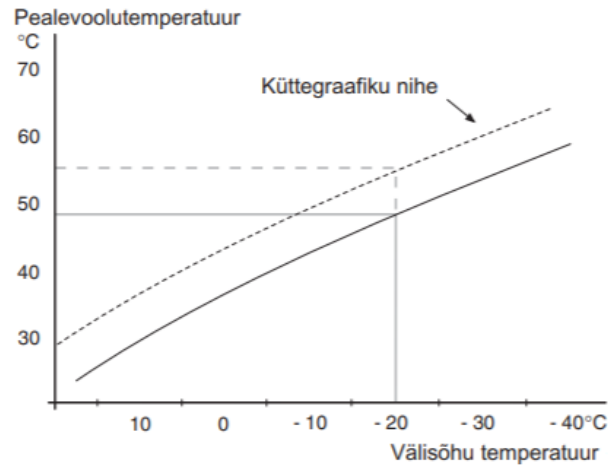
Joonisel 2.1 on näidatud, kuidas erinevate välisõhutemperatuuride juures muutub küttesüsteemi pealevoolutemperatuur ja seetõttu küttegaafiku kaldenurk.



Joonis 2.1 Küttegaafiku kaldenurk [5]

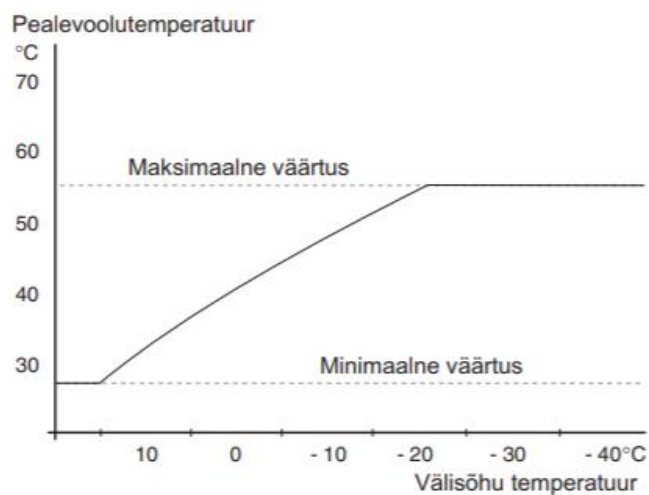
Optimaalne kaldenurk sõltub elukoha kliimatingimustest, milline on küttesüsteemi lahendus ja kui hästi on maja soojustatud. [5]

Küttegaafiku nihutamine tähendab seda, et pealevoolutemperatuur muutub ühtselt kõikidel välisõhu temperatuuridel, nt joonisel 2.2 küttegaafiku nihutamine +2 astme võrra suurendab pealevoolutemperatuuri 5 °C võrra kõikidel välisõhu temperatuuridel. [5]



Joonis 2.2 Küttegaafiku nihe +2 astet [5]

Pealevoolutemperatuuri ei saa seadistada maksimaalsest väärtusest kõrgemaks või minimaalsest väärtusest madalamaks. [5] Joonisel 2.3 on näha, et kui välisõhutemperatuur langeb aga pealevoolu maksimaalne temperatuur on seadistatud 55 °C, siis pealevoolu temperatuur enam tõusta ei saa ja graafik muutub sirgeks.



Joonis 2.3 Pealevoolutemperatuuri maksimaalsed ja minimaalsed väärtused [5]

3 SOOJUSTEGURI ARVUTAMINE

3.1 Standardid

Soojuspumba katsete ja avutuste läbiviimiseks kasutatakse kahte standardit. Standard, mis kirjeldab soojuspumpade arvutusmetoodikaid on EN 14825:2018 - kliimaseadmed, vedelikjahutid ja elektrilise ajamiga kompressoriga soojuspumbad ruumide kütmiseks ja jahutamiseks.

See Euroopa standard kirjeldab, kuidas arvutada sesoonset soojustegurit ($SCOP_{on}$ ja $SCOP_{net}$) ja ruumikütte hooajalist efektiivsust (η_s) õhk-vesi soojuspumbaga. Standardis on kirjeldatud katsemeetodid, arvutusmeetodid ja osakoormuste tingimused hooajaliste koefitsentide määramiseks. [6]

Teise standardina kasutatakse EN 14511-4:2018, mis kirjeldab katsemeetodeid õhk-vesi soojuspumpade võimsuse ja kasuteguri määramiseks standard tingimuste korral. [6]

3.1.1 Bin arvutuse meetod

Hooajalise soojusteguri arvutamiseks kasutatakse bin arvutuse meetodikat, kus soojuspumba jõudlus määratakse samm-sammult erinevatel tingimustel kütteperioodi jooksul. Kütterežiimi koormuskõver arvutatakse 16 °C tasakaalutemperatuuri juures. [6]

Küttevajadus $Ph(T_j)$ iga bini kohta, saab määrata korrutades täiskoormuse väärtuse ($P_{designh}$), binile vastava osakoormuse protsendiga. Osakoormuse % on arvutatud järgmiselt:

- Keskmise kliima jaoks: osakoormuse suhe % = $(T_j - 16) / (-10 - 16)$ %.
- Soojema kliima jaoks: osakoormuse suhe % = $(T_j - 16) / (+2 - 16)$ %.
- Külmemäe kliima jaoks: osakoormuse suhe % = $(T_j - 16) / (-22 - 16)$ % . [6]

Kütte binid on välja toodud allpool tabelis 3.1, kus on antud ühe kütte hooaja tundide arv iga välisõhu temperatuuri korral. Tunnid on toodud vastavalt kolmele erinevale kliimatingimusele – soe, keskmine ja külm.

		Warmer (W)	Average (A)	Colder (C)
j	T_j	h_{jW}	h_{jA}	h_{jC}
#	°C	h	h	h
1 to 8	-30 to -23	0	0	0
9	-22	0	0	1
10	-21	0	0	6
11	-20	0	0	13
12	-19	0	0	17
13	-18	0	0	19
14	-17	0	0	26
15	-16	0	0	39
16	-15	0	0	41
17	-14	0	0	35
18	-13	0	0	52
19	-12	0	0	37

20	-11	0	0	41
21	-10	0	1	43
22	-9	0	25	54
23	-8	0	23	90
24	-7	0	24	125
25	-6	0	27	169
26	-5	0	68	195
27	-4	0	91	278
28	-3	0	89	306
29	-2	0	165	454
30	-1	0	173	385
31	0	0	240	490
32	1	0	280	533
33	2	3	320	380
34	3	22	357	228
35	4	63	356	261
36	5	63	303	279
37	6	175	330	229
38	7	162	326	269
39	8	259	348	233
40	9	360	335	230
41	10	428	315	243
42	11	430	215	191
43	12	503	169	146
44	13	444	151	150
45	14	384	105	97
46	15	294	74	61

total	3 590	4 910	6 446
-------	-------	-------	-------

Tabel 3.1 Bin number j , välisõhutemperatuur T_j ja bin ühiku järgi tunnid h_j vastavalt kütmishooajale "warmer", "average", "colder". [7, lk 79 - 81]

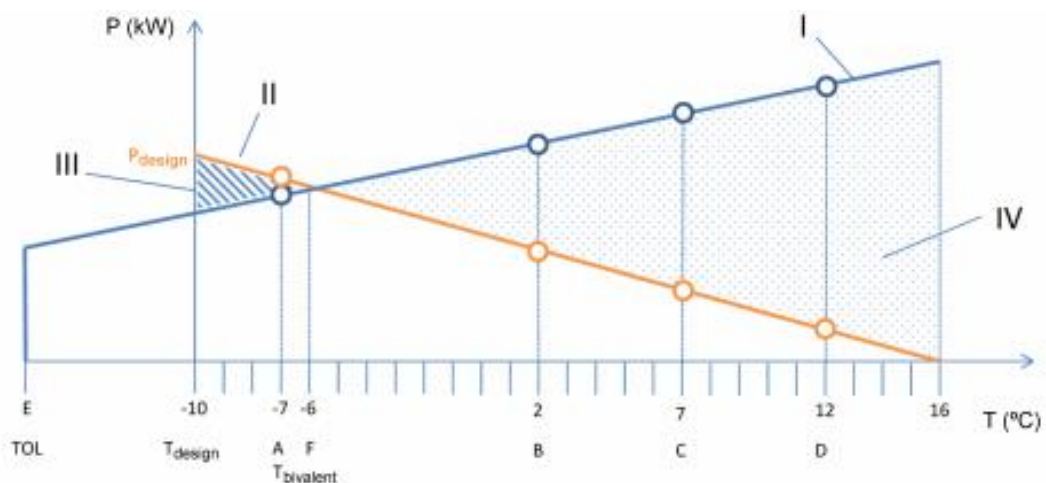
3.2 Bivalentne temperatuur (T_{biv})

Soojuspumba töö kirjeldamiseks on üheks oluliseks mõisteks bivalentne temperatuur. Bivalentne temperatuur on madalaim välisõhu temperatuuri punkt, kus soojuspump on deklareeritud rahuldama 100% küttevajadusest ilma täiendava küttevajaduseta. Allpool bivalentset punkti tuleb deklareeritud võimsust täiendada elektrilise varuküttevõimsusega, et kütmise osaline koormus oleks tagatud. [6]

Deklareeritud bivalentne temperatuur võib olla mis tahes välistemperatuur (kuiva termomeetri järgi) järgmistes piirides:

- Keskmise kütteperioodi puhul on bivalentne temperatuur $+2^{\circ}\text{C}$ või madalam.
- Külmemal kütteperioodil on bivalentne temperatuur -7°C või madalam.
- Soojemal kütteperioodil on bivalentne temperatuur $+7^{\circ}\text{C}$ või madalam. [6]

Allolev joonis 4 annab skemaatilise ülevaate osakoormuste suhtest, katse punktidest ja bivalentsest temperatuurist, mis on kirjeldatud standardis EN14825. Joonisel on näidatud õhk-vesi soojuspump, kus soojuspumba võimsus on suurem kui soojuskoormus bivalentse punkti kohal. Muutuva võimsusega soojuspumba (õhk-vesi või õhk-õhk) võimsust saab koormuskõvera järgimiseks pidevalt vähendada (oranž joon) teatud piirini. Suhteliselt kõrge välistemperatuuri jaoks, näiteks üle 10°C , on minimaalne soojuspumba võimsus suurem kui koormuskõver ja soojuspump lülitub reaalses olekus sisse ja välja. [6]



Joonis 3.2 SCOPon arvutuslike punktide skemaatiline ülevaade. (õhk-vesi soojuspump 1 on-off tsükkel, EN14825:2018, Annex E, lk. 74) [7, lk 103]

Joonise 3. märkused:

T – välisõhu temperatuur ($^{\circ}\text{C}$);

P – võimsus (kW);

I – deklareeritud võimsuse joon ja deklareeritud võimsused tingimustel A, B, C ja D;

II – koormuskõver ja osalises koormusel võimsus tingimustel A, B, C ja D;

III – elektriline lisakütteseade;

IV - on-off süteem;

T_{design} - referents temperatuur;

T_{bivalent} – bivalentne temperatuur. [6]

3.3 Piiritöötemperatuur (TOL)

Soojuspumba töö kirjeldamisel üheks oluliseks mõisteks on TOL ehk piiritöötemperatuur. Piiritöötemperatuur on välistemperatuur, millest madalamal on soojuspumba deklareeritud võimsus 0. Allpool piiritöötemperatuuri lõpetab soojuspump töötamise. Vastavalt määrusele on TOLi maksimaalsed väärtused järgmised:

- Keskmise kliimatingusega kütteperioodil, kuiva termomeetri järgi temperatuur –7 °C või madalam
- Külmema kliimatingimusega kütteperioodil, kuiva termomeetri järgi temperatuur –15 °C või madalam
- Soojema kliimatingimusega kütteperioodil, kuiva termomeetri järgi temperatuur +2 °C või madalam. [7]

Külmema kliima korral, kui piiritöötemperatuur on alla -20 °C, siis tuleb võtta täiendavaid arvtuspunkte. Seadme võimsus välisõhu temperatuuridel alla TOLi on 0 kW ja puuduv võimsus tuleb tagada, kas elektrilise varuküttega või fossiilsete kütustega. [7]

3.4 Arvutusmeetodid hooajalise ruumi kütmise efektiivsus $\eta_{s,h}$, SCOP, SCOP_{on} ja SCOP_{net} jaoks

Soojuspumba SCOPi üheks esitamise viisiks on kasuteguriga $\eta_{s,h}$. Hooajaline ruumi kütte efektiivsus $\eta_{s,h}$ väljendub % ja on defineeritud Valemiga 1.

$$\eta_{s,h} = \frac{1}{CC} \times SCOP - \sum F(i) \quad (1)$$

kus:

- CC teisendustegur, võrdne 2,5;
- SCOP hooajaline jõudlustegur;

$\Sigma F(i)$ on parandus, mis on arvutatud Valemi 2 järgi:

$$\Sigma F(i) = F(1) + F(2), \quad (2)$$

kus:

- $F(1)$ on parandustegur, mis arvestab küttekehade efektiivsust temperatuuri reguleerimise tõttu ja on võrdne 3%-ga;
- $F(2)$ on parandustegur, mis arvestab veepumbade energia tarbimist. See tegur on mõeldud ainult vesi-vesi ja õhk-vesi seadmetele ja on 5%. [7, lk 47–55]

3.4.1 Üldine valem SCOPi arvutamiseks

Aastane soojustegur SCOP näitab soojuspumba efektiivsust kogu kütteperioodi vältel ja on määratletud kui võrdlusaastale vastav küttevajadus Q_H jagatud aastase energiatarbimisega küttele Q_{HE} nagu näidatud Valemis 3.

$$SCOP = \frac{Q_H}{Q_{HE}} \quad (3)$$

kus:

- Q_H on aastane küttevajadus, väljendatuna kWh-des;
- Q_{HE} on aastane kütte energiatarbimine, väljendatuna kWh-des. [7, lk 47–55]

3.4.2 Võrdlusaasta küttevajaduse arvutus Q_H

Võrdlusaasta küttevajadus Q_H väljendub kWh ja arvutatakse vastavalt Valemile 4.

$$Q_H = P_{designh} \times H_{HE} \quad (4)$$

kus:

- $P_{designh}$ on tootja poolt deklareeritud küttevõimsus, väljendub kWh;
- H_{HE} on ekvivalentne küttestundide arv. [7, lk 47–55]

3.4.3 Aastase energiatarbimise arvutus küttele Q_{HE}

Aastase energiatarbimine kütmiseks Q_{HE} , väljendatuna kWh, sisaldab energiatarbimist aktiivrežiimis, termostaadi väljalülitusrežiimis, ooterežiimis, väljalülitatud režiimis ja karteri soojenduse režiimis põhineb Valemil 5.

Energiakulu aktiivses režiimis tuletatakse SCOP_{on} arvutamisest;

$$Q_{HE} = \frac{Q_H}{SCOP_{on}} + H_{TO} \times P_{TO} + H_{SB} \times P_{SB} + H_{CK} \times P_{CK} + H_{OFF} \times P_{OFF} \quad (5)$$

kus:

- Q_H on aastane küttevajadus, väljendatuna kWh-des;
- H_{TO} , H_{SB} , H_{CK} , H_{OFF} on tundide arv, milles üksus töötab termostaadi väljalülitusrežiim, ooterežiimis, soojendusrežiimis ja väljalülitatud režiimis, väljendatuna h;
- P_{TO} , P_{SB} , P_{CK} , P_{OFF} on toitesisendid termostaadi väljalülitusrežiimis, ooterežiimis režiim, karteri soojenduse režiim ja väljalülitatud režiim, väljendatuna kilovattides;
- $SCOP_{on}$ on aktiivse režiimi hooajaline jõudlustegur. [7, lk 47–55]

3.4.4 SCOP_{on} arvutus

SCOP_{on} aktiivse režiimi hooajaline jõudlustegur, kus pole arvestatud sulatustsüklitega. SCOP_{on} määratakse vastavalt Valemile 6.

$$SCOP_{on} = \frac{\sum_{j=1}^n h_j [P_h(T_j)]}{\sum_{j=1}^n h_j \left[\frac{P_h(T_j) - elbu(T_j)}{COP_{bin}(T_j)} + elbu(T_j) \right]} \quad (6)$$

kus:

- T_j on välisõhu temperatuur kuiva termomeetri järgi
- j on number;

- n on koguarv;
- $P_h(T_j)$ on hoone küttekoormus vastavalt temperatuurile T_j , väljendatuna kW;
- h_j on vastaval temperatuuril T_j tundide arv;
- $COP_{bin}(T_j)$ on ühiku COP väärtus vastavalt temperatuuril T_j ;
- $elbu(T_j)$ on elektrilise lisakütteseadme vajalik võimsus vastavalt temperatuuril T_j , väljendatuna kW. [7, lk 47–55]

3.5 Arvutusmeetod COP_{bin} väärtuste määramiseks osalise koormuse tingimustes

COP_{bin} on soojustegur osakoormuse tingimusel. COP_{bin} arvutatakse vastavalt Valemile 8.

$$COP_{bin} = COP_d \times \frac{CR}{Cd \times CR + (1 - Cd)} \quad (7)$$

kus:

- COP_d on COP vastavalt deklareeritud võimsusele samadel temperatuuritingimustel osakoormusega
- Cd on lagunemistegur;
- CR on võimsuse suhe. [7, lk 47–55]

3.6 Arvutusmetoodika astmelise ja muutuva võimsusega seadmetele

Soojuspumba katsetamisel tuleb enne mõõtmisi teha soojuspumba võimsuse kontroll, et määrata kindlaks deklareeritud võimsus ja soojustegurid seadme vajaliku küttekoormuse saavutamiseks. Kui see etapp võimaldab saavutada vajaliku küttekoormuse $\pm 10\%$ piires (nt vahemikus 9,9–8,1 kW, kui nõutav küttekoormus on 9 kW), eeldatakse, et:

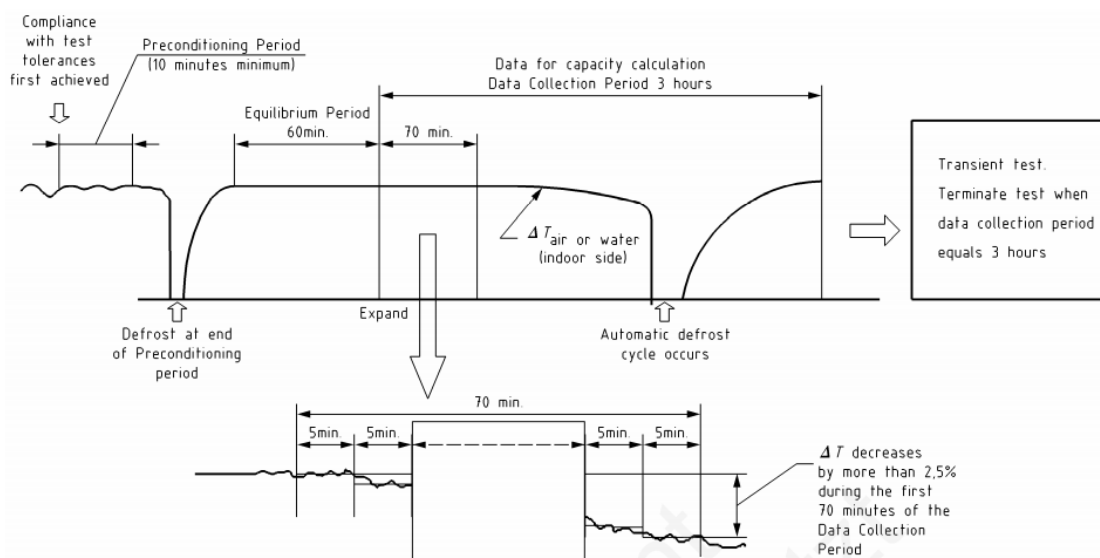
- T_{biv} ist kõrgema või sellega võrdse temperatuuri korral saavutatud sihtvõimsus ja mõõdetud COP_i võib kasutada COP_{bin} ina.

- T_{biv} ist madalamate temperatuuride korral ei saavutata sihtvõimsust. Mõõdetud võimsus ja vastav COP loetakse deklareeritud võimsuseks ja COPd-ks.

Kui selles etapis ei võimalda saavutada nõutavat küttekoormust $\pm 10\%$ piires, määratakse võimsus ja tegelik sisendvõimsus vastavalt osalisel koormusel sekundaarpoole vajaliku küttekoormuse temperatuuridele. Osakoormuse sisendvõimsus nõutaval kütte osakoormusel määratakse nende kahe etapi tulemuste lineaarse interpoleerimise teel. KOK määratakse nõutava küttesakoormuse jagamisel osakoormuse sisendvõimsusega. [7, lk 47–55]

3.7 Hindamine jäätumise ja sulatamise ajal

Reaalses elus õhk-vesi soojuspumpad lähevad sulatusrežiimi teatud õhutemperatuuri ja võimsuse kombinatsioonide korral. Sellega tuleb arvestada katsetades soojuspumpasid laboris. Katseperioodid peavad olema piisavalt pikad, et oleks võimalik hinnata, kas külmumine toimub soojusvaheti pinnal või mitte. Lisaks, et hoida all soojuspumba katsetamise kulud, on hindamisperioodid piiratud teatud pikkusega. [6]



Joonis 3.3 Hindamisperiood õhk-vesi soojuspumba katseperioodil [6]

Katseruumis testitav soojuspump töötab kuni standardis määratud katsetolerantside saavutamiseni vähemalt 1h, mida nimetatakse tasakaaluperioodiks. Pärast

tasakaalustusperioodi, andmete kogumise periood ei tohi olla lühem kui 70 min. Andmekogumise perioodi iga 5-minutilise intervalli kohta arvutatakse keskmine temperatuuride erinevus ΔT_i (τ). Keskmine temperatuur andmete kogumisperioodi esimese 5 minuti erinevust võrreldakse temperatuuri erinevusega viimase 5 minuti jooksul.

Kui sulatamine toimub enne andmete kogumise perioodi algust või kui erinevus 5-minutilise perioodi vahel 70-minutilise andmekogumise perioodi alguses ja lõpus ületab 2,5%, küttevõimsuse katset nimetatakse siirdekateks. Samuti kui soojuspump alustab sulatustsüklit tasakaaluperioodil või sellel ajal andmete kogumist, siis seda perioodi nimetatakse siirdekateks. Kui ülaltoodud tingimusi ei esine ja punktis sätestatud katsetolerantsid standardid on täidetud nii tasakaaluperioodil kui ka andmete kogumise perioodil, siis nimetatakse soojusmahtuvuse katset püsiseisundi katseks. Püsiseisundi testid lõpetatakse 70 minuti pärast andmete kogumist. Siirdekate puhul pikendatakse andmete kogumise perioodi 3 tunnini või kuni soojuspump lõpetab perioodi jooksul kolm täielikku tsüklit, olenevalt sellest, kumb toimub enne. Kui 3 tunni möödudes teeb soojuspump sulatamistsüklit, siis tsükkel lõpetatakse enne andmete kogumise lõpetamist. Täielik tsükkel koosneb kütteperioodist ja sulatusperioodist. Seega nii kütteperiood kui ka sulatusperiood sisaldub andmete hindamise perioodis. Integreeritud hindamisel kasutatud andmed valitakse soojuspumba küttevõimsus ja integreeritud sisendvõimsus sulatamise ajal sagedamini. [6]

3.8 Energiatõhususe määrase järgi arvutus

Soojuspumpsüsteemi arvutus põhineb soojusteguril, mis näitab mitu kWh soojusenergiat saadakse soojuspumbaga ühest kWh elektrienergiast.

Soojuspumbaga küttesüsteemi elektrienergia kasutus arvutatakse Valemiga 9.

$$E_{sp} = \frac{Q_{sp,küte}^{ruumid}}{SPF_{ruumid}} + \frac{Q_{sp,küte}^{soe\ vesi}}{SPF_{soe\ vesi}} + E_{lisaküte} \quad (9)$$

kus:

- E_{sp} on soojuspumbaga küttesüsteemi elektrienergiakasutus kWh;
- $Q_{ruumid\ sp,küte}$ on soojuspumbaga toodetud ruumide kütteenenergia kWh;

- $Q_{soe\ vesi\ sp,\ küte}$ on soojuspumbaga toodetud tarbevee soojendamise kütteenergia kWh;
- SPF_{ruumid} on soojuspumba aasta keskmine soojustegur ruumide kütmisel;
- $SPF_{soe\ vesi}$ on soojuspumba aasta keskmine soojustegur tarbevee soojendamisel;
- $E_{lisaküte}$ on elektriline lisaküte kWh.

Soojuspumba aasta keskmine soojustegur määratakse detailse tunnipõhise arvutusega, kasutades toote energiamärgise andmeid või kasutades määruuses toodud väärtusi. [8]

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 3.4 Soojuspumba aasta keskmine soojustegur [8]

Toote energiamärgise andmete alusel arvutatakse maasoojuspumba ja õhk-vesi soojuspumba aasta keskmine soojustegur Valemiga 10.

$$SPF = \frac{2,5\eta}{110}, \quad (10)$$

kus:

- SPF on soojuspumba aasta keskmine soojustegur SPF_{ruumid} või $SPF_{soe\ vesi}$;
- η on toote (soojuspumba) energiamärgisel toodud sesoonne primaarenergiale taandatud külma kliima kasutegur protsentides vastavalt η_s ruumide küttele või η_{hw} tarbevee soojendamisele;
- 2,5 on energiamärgise sesoonse kasuteguri arvutamisel kasutatud elektri primaarenergiategur. [8]

KIRJANDUSE ÜLEVAADE

Selleks, et mõista soojuspumba kasutamist külma kliimaga aladel hoonete kütmiseks ja sooja tarbevee tootmiseks ning mõista kliimatingimuste mõju COPile ja SCOPile on käesolevas magistritöös kasutatud kahte antud teemaga seotud põhjalikku kirjandusallikat [28][2]. Jevgeni Fadejeva, Raimo Simsoni, Jyrki Kesti ja Jarek Kurnitski teadusartiklis "*Measured and simulated energy performance of OLK NZEB with heat pump and energy piles in Hämeenlinna*". Teadusartikkel keskendub hoone energiakasutuse arvutamisele simulatsiooniprogrammiga IDA ICE, kus mudeli energiatõhusust uuritakse mõõdetud kui ka katselise võrdlusaasta kliimatingimustes. Lisaks hinnatakse soojuspumba SCOPi, kus võrreldakse tulemusi realselt mõõdetud aastaste soojusteguritega. Uurimusest selgus, et aastane SCOP tuli tunduvalt väiksem, kui oli oodatud, sest töötas pidevalt elektriline lisaküte.

Kaspar Tennokese, Teet-Andrus Kõiva, Alo Mikola ja Villu Varese teadusartiklis "*Maasoojuspumba ja õhk-vesi soojuspumba rakendamine külma kliima piirkonnas*". Teadusartikkel keskendub maasoojuspumba ja õhk-vesi soojuspumba aastaste energiasimulatsioonide tegemisele, kus aluseks on võetud 200 m² eramu, mille soojusvajadus on 9 kW ja keskmine soojavajadus sooja tarbevee tootmiseks on 1 kW. Uuringu tulemustes anti ülevaade mõlema soojuspumba arvutuslikest soojusteguritest küttele ja soojale tarbeveele. [29]

Sulatustsüklite mõju õhksoojuspumbale uuritakse Neil Hewitti ja M.J. Huang teadusartiklis. Töö autorid viisid läbi katsed vastavalt EN14511 katsestandardile, mille põhjal oli võimalik välja tuua parimad sulatamise tingimused, sulatamise tööaeg ja sulatustevahelised intervallid, mis soojuspumba jõudlusele kõige rohkem kasu annavad. [30]

Varasemates uurimistöodes on küll hinnatud tootja SCOPE mõõtmistega reaalses tingimustes, aga puudub ülevaade tootja deklareeritud väärtuste tõepärasusest, kui katsed on tehtud tootjaga samadel tingimustel.

Varasematest uurimused, mis uurivad soojuspumba omadusi, võib järeldada, et on märkimisväärne vahe tootja deklareeritud võimsuse ja realselt kasutuses oleval soojuspumbal. Keskmiselt võib oodatava ja tegeliku SCOPi erinevus olla umbes 40%. [2][31][32][33][34] Peamisteks SCOPi erinevuste põhjusteks võib lugeda, et eelduslikult ja arvutustes arvestatakse on ainult 3 kliimapiirkonnaga ja tehakse valed eeldused suhtelise õhuniiskuse määramisel. Lisaks ei pruugi kasutustemperatuur

peegelada tegelikkust ning tähelepanu ei pöörata aurusti ja kondensaatori vahelistele soojuskadudele.[2]

4 METOODIKA

Antud peatükis on kirjeldatud katsetatavad soojuspumbad, kliimakamber ja antakse ülevaade mõõtmisprotseduurist ning katsetingimustest. Lisaks on kirjeldatud IDA ICE simulatsiooniprogrammiga tehtud mudeli kalibreerimine ja arvutused ning on välja toodud mõõtmistulemused.

4.1 Katsetatavad soojuspumbad

Uurimise läbiviimiseks katsetati kahte tüüpi soojuspumpasid:

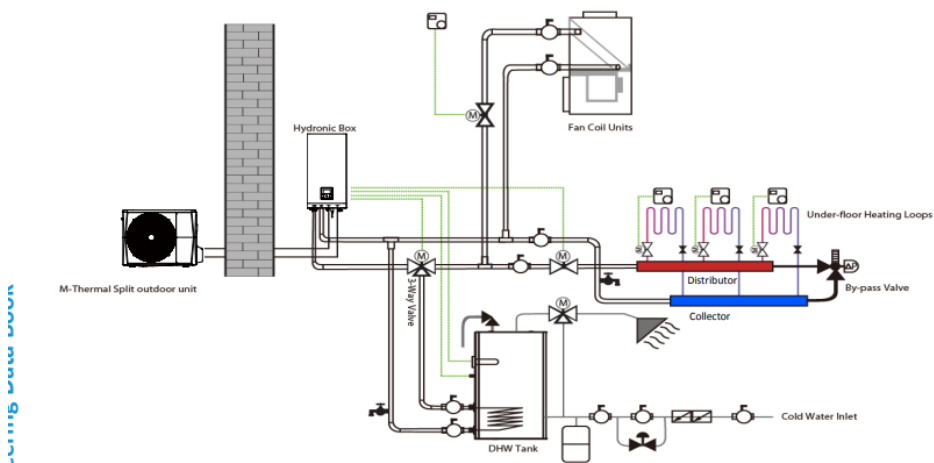
- split tüüpi soojuspump;
- mono tüüpi soojuspump.

Monoblokk tüüpi õhk-vesi soojuspumbas toimub soojusülekanne pumba välisosas. Seade väljub tehases hermeetiliselt suletud süsteemina, kus freooni torustik on juba eelnevalt kokku monteeritud. Vesi liigub soojuspumbast otse hoone küttesüsteemi. [9]

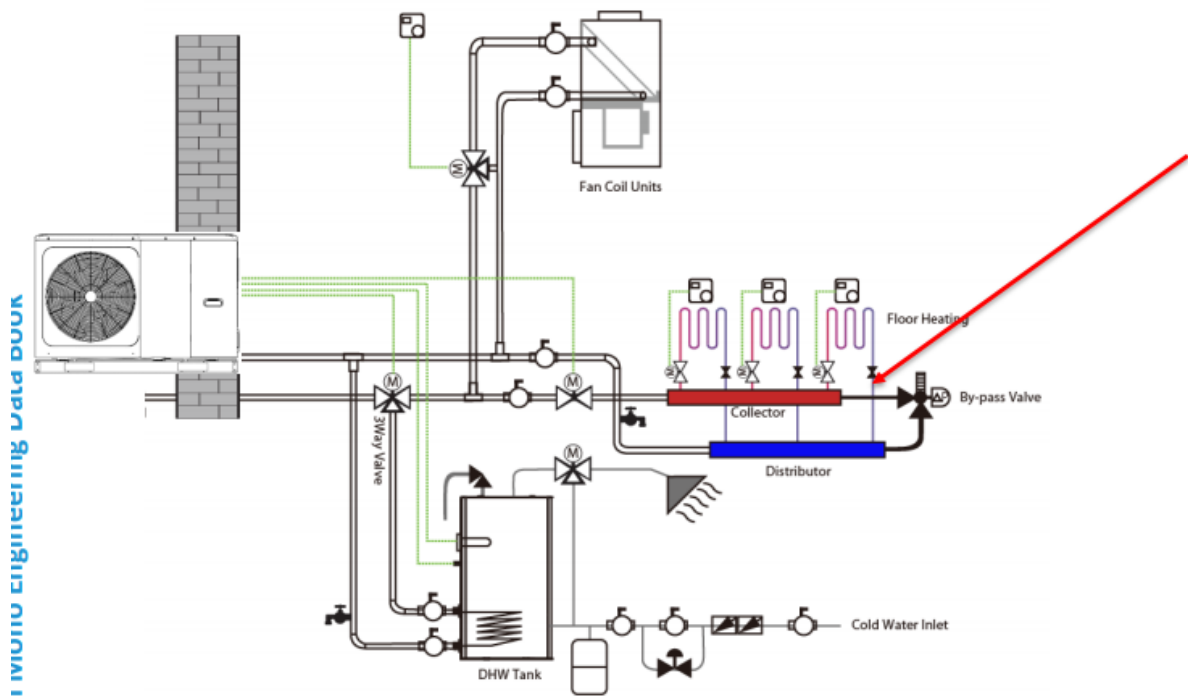
Split tüüpi õhk-vesi soojuspumbad tulevad tehases hermeetiliselt mittesuletud süsteemina see tähendab, et soojuspumpadel on 2 agregaat, sise- ja välisosa. Freoonitorud tuleb ühendada seadme sise- ja välisosa vahel. Split tüüpi soojuspumpade paigaldajal peab olema külmatehnika litsents, mis annab paigaldajale seadusliku loa freooni-torustiku ühendamiseks ja üleüldiseks freooni käsitlemiseks. [9]

Joonistel 4.1 ja 4.2 on välja toodud kahe katsetatava soojuspumba ehituslik erinevus, mis on ühendatud näitliku hoone kütte ja tarbevee süsteemiga.

Figure 1-1.1: System schematic



Joonis 4.1 Split tüüpi soojuspump [10]



Joonis 4.2. Monoblokk soojuspump [21]

4.2 Kliimakamber

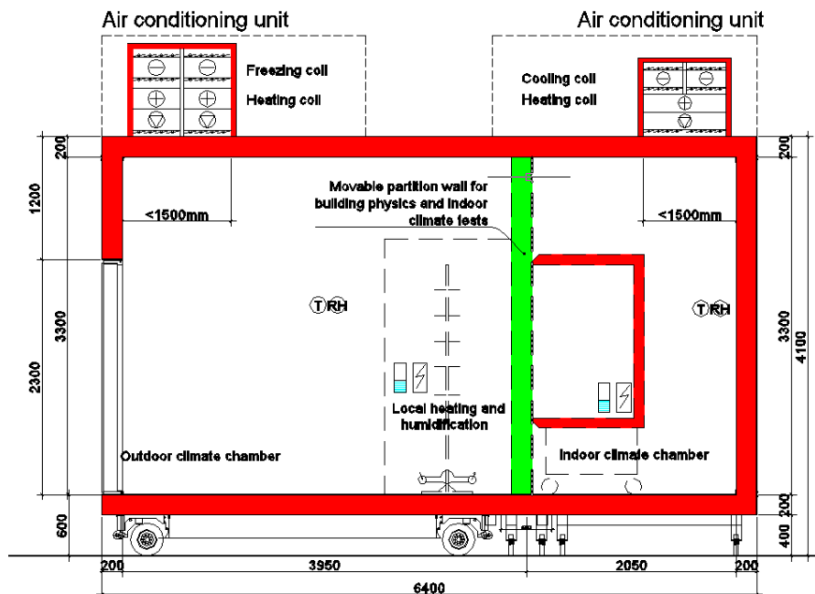
Soojuspumba katsed on läbi viidud Tallinna Tehnikaülikooli Ehituse Mäemajas asuvas kliimakambris. Kliimakamber koosneb kahest osast - sisekliima kambrist ja väliskliima kambrist. Mõlemas kambris osas saab määrata taoutuslikud sisekliima parameetrid ja väliskliima parameetrid.

Kliimakambri juhtimine toimub läbi arvuti. Protsessi käivitamiseks kasutaja sisestab katse andmed PC-st ja alustab katsega. See käivitab kohe külmagaagregadi kui seda pole varem juba käivitatud. Kui külmagaagregadi glükooliring on saavutanud temperatuuri $-35.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ antakse tööloa katse jaoks vajalike seadmete käivitamiseks. Katse käivitumisel pannakse kõik seadmed va. PID regulaatorid automaat režiimi. PID regulaatorite automaatne režiim toimib vastavalt vajadusele, ehk siis kui antud regulaator peab tegelema reguleerimisega. [11]

Väliskliimakambri temperatuuri on võimalik muuta ja hoida ühtlaselt vahemikus -25 kuni $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Reguleerimise täpsus on $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja temperatuuri püsivus on $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Suhtelist niiskust on võimalik hoida vahemikus: 20% kuni 80% ($t_{e} \geq +10\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 20\%$ kuni 99%); reguleerimise täpsus on 1% ja suhtelise niiskuse püsivus $\pm 2\%$ kuni $\pm 3\%$.

Sisekliimakambri temperatuuri on võimalik muuta ja hoida ühtlaselt vahemikus 0 °C kuni +50 °C. Reguleerimise täpsus 0,1 °C ja temperatuurpüsivus on ± 0,2 °C. Suhtelist niiskust on võimalik hoida vahemikus: 10 % kuni 80 %, reguleerimise täpsus 1 % ja suhtelise niiskuse püsivus ± 2 %. [11]

Joonisel 4.3 on näidatud klimakambri lõige, kus välisklimakambris juhiti õhu temperatuuri ja niiskussisaldust. Sisekliimakambris hoiti kõikide katsete puhul püsivat temperatuuri.



Joonis 4.3 Kliimakambri lõige [16]

4.3 Mõõteprotseduur

4.3.1 Tegevused enne mõõtmisi

Mõõtmiste läbiviimiseks paigaldati katsetatavad soojuspumbad Tallinna Tehnikaülikooli Ehituse Mäemajja ning valmistati ette mõõtmisteks. Selle käigus vaadati üle soojuspumba tehase seadistused ning paigaldati vajalikud andurid, logerid ja tehti modbusi ühendus mõõtmistuumuste arvutisse logimiseks.

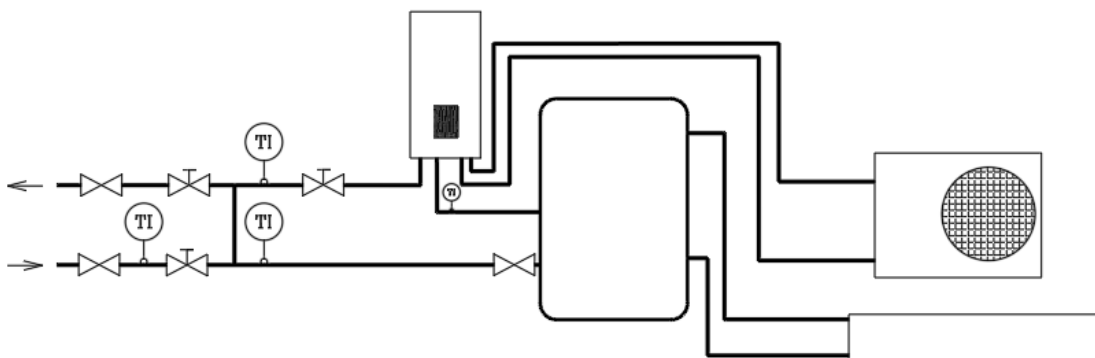
Modbusi ühendusega saadi järgnevad logimised:

- vee vooluhulk läbi soojuspumba;
- elektrivõrgu vahelduvvoolu pinge.

Andurite ja logeritega mõõdeti järgmisi näitajaid:

- võrguvee temperatuur;
- soojuspumpa siseneva vee temperatuur;
- soojuspumbast väljuva vee temperatuur;
- akumulatsioonipaaki siseneva vee temperatuur;
- pumba voolutugevus;
- sise- ja välisosa voolutugevus (monoblok tüüpi soojuspumbal mõõdeti ainult välisos)

Alloleval joonisel 4.4 on näidatud katse skeem, kus TI-ga on märgitud temperatuuri andurid.



Joonis 4.4. Katse skeem (autori joonis)

4.3.2 Tegevused mõõtmisel

Mõõtmiste läbiviimiseks tuli esialgu seadistada kliimakambri välisosa temperatuur ja niiskussisaldus. Oluline oli oodata ja vaadata, et kliimakamber saavutaks püsiva temperatuuri ning veenduda, et seadistused on õiged ja kliimakamber suudab hoida etteantud parameetreid.

Järgmisena seadistati soojuspumbast väljuva vee temperatuur vastavalt kliimakambri temperatuurile ja temperatuurigraafikule. Vastavad seaditused tehti soojuspumba juhtmoodulist. Soojuspumba õige võimsusväljastuse jaoks tuli seadistada soojuspumba tagasivoolu temperatuur segamissõlmes. Soojuspumpa sisenev vesi tuli kraanist ning vee temperatuuri muutmiseks kasutati kuulkraani. Eelnevalt tuli välja

arvutatada teoreetiline kraani vee temperatuur, mille juures soojuspump saavutab vastava osakoormuse juures deklareeritud võimsuse. Võimsust sai kontrollida koheselt soojuspumba juhtmoodulist. Soojuspumba võimsus võis erineda deklareeritud võimsusest $\pm 10\%$ piires.

Peale kõikide vajalike parameetrite seadistamist ja olukorra stabiliseerimisel, alustati mõõtmisandmete logimist. Ühe katse pikkuseks on 3 tundi või kuni soojuspump on teinud läbi 3 tervet tsüklit. Seejärel korratakse katset uutel tingimustel, vajadusel tehti korduskatsed.

4.3.3 Tegevused pärast mõõtmist

Peale mõõtmisi võeti välja mõõtmisandmed. Modbus ühendus loeb andmeid iga 5 sekundi tagant aga temperatuuri andurid ja ampertangid loevad tulemusi iga sekundi tagant, seetõttu tuli andmed ühtlustada. Seejärel tehti esmane töötlus ja analüüs ning vajadusel korrati mõõtmis valitud katsepunktides.

Igale mõõtmispunktile arvutati vastav energiatarve ja soojustegur. Tulemuis võrreldi tootjapoolsete deklareeritud väärtustega.

4.3.4 Katsetingimused

Katsed viidi läbi kahe erineva soojuspumbaga. Split tüüpi soojuspumba katsetati 45/40 ja 35/30 temperatuurirežiimil ning mono tüüpi soojuspumbaga tehti katsed 55/47 ja 35/30 temperatuurirežiimil. Antud temperatuurirežiimid vastavad EVS-EN 14825:2018 järgi *low*, *medium* ja *intermediate temperature application* temperatuuridele. Arvutuslik välisõhutemperatuur standardijärgsele külmale kliimale on -22 °C . Katselised pealevoolutemperatuurid kõrgematel välisõhutemperatuuridel on toodud tabelis 4.1

Välisõhutemperatuur °C	-22	-15	-7	+2	+7	+12
<i>Low</i> 35/30 pealevoolutemperatuur °C	35	32	30	27	25	24
<i>Intermediate</i> 45/40 pealevoolutemperatuur °C	45	41	38	33	30	26
<i>Medium</i> 55/47 pealevoolutemperatuur °C	55	49	44	37	32	28

Tabel 4.1 Pealevoolutemperatuuri graafikud

4.3.5 Katselised võimsused

Katsetes on võetud aluseks tootjapoolsed deklareeritud võimsused COPi arvutamiseks erinevatel osakoormustel. Näide tootja deklareeritud võimsustest ja COPidest on

toodud allpool Tabelis 4.2. Võimsusväljastust reguleeriti tagasivoolutemperatuuri reguleerimisega katsestendi segamissõlmes.

Tehnilised näitajad							
Mudel:				Välimine osa: MHA-V8W/D2N8-B Sisemine osa: HB-A100/CGN8-B			
Õhk-vesi soojuspump:				jah			
Vesi-vesi soojuspump:				ei			
Madalatemperatuuriline soojuspump:				ei			
Varustatud lisaküttega				ei			
Soojuspumbaga kombineeritud küte:				ei			
Deklareeritud kliimatingimus:				külmem			
Parameetrid on deklareeritud <i>medium</i> keskmisele temperatuuri tingimusele.							
Üksus	Sümbol	Väärtus	Ühik	Üksus	Sümbol	Väärtus	Ühik
Nimisoojusvõimsus	P_{rated}	5.8	kW		η_s	112.0	%
$T_j = -7^\circ\text{C}$	P_{dh}	3.86	kW	$T_j = -7^\circ\text{C}$	COP _d	2.48	-
$T_j = 2^\circ\text{C}$	P_{dh}	2.21	kW	$T_j = 2^\circ\text{C}$	COP _d	3.35	-
$T_j = 7^\circ\text{C}$	P_{dh}	1.44	kW	$T_j = 7^\circ\text{C}$	COP _d	4.11	-
$T_j = 12^\circ\text{C}$	P_{dh}	1.46	kW	$T_j = 12^\circ\text{C}$	COP _d	5.92	-
$T_j = \text{biv. temp}$	P_{dh}	4.71	kW	$T_j = \text{biv. temp}$	COP _d	1.90	-
$T_j = \text{tööpiir}$	P_{dh}	2.80	kW	$T_j = \text{tööpiir}$	COP _d	1.22	-
$T_j = -15^\circ\text{C}$	P_{dh}	-	kW	$T_j = -15^\circ\text{C}$	COP _d	-	-
Biv. temperatuur	T_{biv}	-15	°C	Tööpiir temperatuur	TOL	-22	°C
Intervall võimsus kütmisel	P_{cyc}	-	kW	Intervall võimsus kütmisel	COP _{cyc}	-	-
Degradatsioonikoefitsient(**)	C_{dh}	0.9	--	Küttevee tööpiiri temperatuur	W_{TOL}	51	°C
Energiaarve muudes režiimides peale aktiivse režiimi				Lisaküte			
Off režiim	P_{off}	0.014	kW	Nimisoojusvõimsus	P_{sup}	2.97	kW
Ootel režiim	P_{sb}	0.014	kW				
Termostaat väljas režiim	P_{to}	0.024	kW	Energiasisendi tüüp	Elektriline		
Karteri soojenduse režiim	P_{ck}	0.000	kW				
Teised üksused							
Võimsuse kontroll		Muutuv		Õhk-vesi soojuspump: nom. õhuvooluhulk, väljas	-	4300	m ³ /h
Helivõimsus, sees/väljas	L_{WA}	-	dB	Vesi-või maa-vesi soojuspump	-	-	m ³ /h
Iga-aastane energiatarbimine	Q_{HE}	4950	kWh				
Soojuspumbaga kombineeritud küttekeha:							
Deklareeritud koormusprofiil	-			Vee soojendamine energiatõhusus	η_{wh}	-	%
Päevane elektritarbimine	Q_{cle}	-	kWh	Päevane kütuse tarbimine	Q_{fuel}	-	kWh
Iga-aastane	AEC	-	kWh	Iga-aastane	AFC	-	GJ

elektritarbimine					kütuse tarbimine			
------------------	--	--	--	--	------------------	--	--	--

Tabel 4.2 Tootja deklareeritud SCOPi arvutuskäik split tüüpi soojuspumbale

4.3.6 Arvutulikud pealevoolu temperatuurid

Tabelites 4.3 – 4.6 on välja toodud arvutuslikud pealevoolu parameetrid madala, vahepealse ja keskmise temperatuurirežiimide juures mõlemale soojuspumbale. Katsete tegemisel hoiti kliimakambris püsivat välisõhu temperatuuri ja seetõttu seadistati iga katse juures eraldi pealevoolu temperatuur. Pealevoolu temperatuurid on saadud vastavalt standardile EVS-EN 14825:2018. Prated ehk võimsus satndardsete katsetingimuste korral arvutati igale punktile eraldi.

Tabelitest saab näha, et arvutuslik pealevoolu temperatuur on maksimaalne -22 °C juures ja välisõhutemperatuuri tõustes langeb ka pealevoolu temperatuur.

VÕT (°C)	-22	-15	-7	+2	+7	+12
Tpv (°C)	45	41	38	33	30	26
Prated (kW)	5.80	4.73	3.51	2.14	1.37	0.61

Tabel 4.3 Arvutuslik pealevoolutemperatuur 45/40 temperatuurirežiimis split

VÕT (°C)	-22	-15	-7	+2	+7	+12
Tpv (°C)	35	32	30	27	25	24
Prated (kW)	6.97	5.69	4.22	2.57	1.65	0.73

Tabel 4.4 Arvutuslik pealevoolutemperatuur 35/30 temperatuurirežiimis split ja mono

Mono 55/47

VÕT (°C)	-22	-15	-7	+2	+7	+12
Tpv (°C)	55	49	44	37	32	28
Prated (kW)	5.77	4.71	3.49	2.13	1.37	0.61

Tabel 4.6 Arvutuslik pealevoolutemperatuur 55/47 temperatuurirežiimis mono

4.3.7 Tootja katseandmed

Tootja katseprotokollid pole avalikud. Soojuspumba arvutuslikud tingimused ja standardid, mille järgi on seadmeid testitud, on välja toodud seadme tehnilises passis. Katsed on tehtud järgides standardeid EN14511:2013, EN14825:2013, EN50564:2011, EN12102:2011, (EU) No:811:2013, (EU)No:813:2013 ja OJ 2014/C 207/02:2014.

Nominaalvõimsused on arvatud järgmistel tingimustel:

- Aurustuv õhk 7°C, RH 85%, kondensaatori vee temperatuurid 35/30°C;
- aurustuv õhk 7°C, RH 85%, kondensaatori vee temperatuurid 40/45°C;
- kondenseeruv õhk 35°C. Aurustuv vesi 23/18°C;
- kondenseeruv õhk 35°C. Aurustuv vesi 12/7°C;
- 1m avatud ala ventilaatori poolel.

Kõik mõõtmised on läbi viidud tootja enda laboris Hiinas. [12]

4.4 Veaanalüüs

Kõikidel mõõtmistel ja arvutustel on tulemustes sees viga, mis on seotud katsete, mõõtevahenditega ja arvutustega. Antud magistritöö mõõtevahendite tehnilised andmed ja mõõtetäpsus on välja toodud Tabelis 4.7.

Mõõteseadme tüüp	Mõõtmeseadme nimi	Kasutus mõõtmisel	Mõõtepiirkond	Mõõtetäpsus
Split-core AC current Sensor	Loger	Andmete lugemiseks ja mõõtmiseks	-20°C ... 70°C; 0 ... 95% RH	± 0,2 C°, ± 1,5 % RH
TMCx-HD	Temperatuuriandurid	Vee temperatuurid	-40° ... 100°C	± 0,25 C°
HOBO 4-Channel Analog	Ampertangid - elektriarvesti	Sise-ja välisosa voolutugevuse	2-20A	±5,0% lugemine kaabliga

Data Logger 20A		mõõtmiseks.		(w/CABLE-4-20MA)
-----------------	--	-------------	--	------------------

Tabel 4.7 Katseseadmete tehnilised näitajad [18] [19] [20]

Antud katsetes esineb kahte liiki vigasid – vead, mis tulenevad otsesest mõõtmisest ja vead, mis tulenevad arvutustulemustest. Kui võttes arvesse ainult mõõteseadmetest tulenevad vead ja kõkide andurite ning logerite vead, siis maksimaalne viga jääb 5 % juurde.

4.5 Simulatsioonid

4.5.1 Soojuspumba mudeli kalibreerimine

Simulatsiooniprogrammiga IDA ICE viidi läbi õhk-vesi soojuspumba mudeldamine, kalibreerimine ja parameetrite optimeerimine. Soojuspumba mudeli kalibreerimise eesmärgiks on määrata katse tingimused ja soojuspumba parameetrid, mis vastaksid tootja andmetele, et kasutada võimalikult täpset soojuspumba mudelit hoone energiaarvutuste tegemiseks.

Alustuseks mudeldati õhk-vesi soojuspumbad. Seadme kalibreerimine on läbi viidud vastavalt standardile EVS - EN14511, tootja andmetele ja mõõdetud katsetulemustele. Mõõdetud katsetulemustest kasutati konkreetsete katsepunktide leitud vooluhulka ja sise-ning välisosa võimsusi.

Mudeli kalibreerimisel kasutati soojuspumba arvutamiseks standard katse tingimuste juures järgnevaid väärtusi:

- $T_{db\ air\ in} - T_{db\ air\ out} = 12,64\ ^\circ C$;
- $T_{air} - T_{evaporator} = 5,5\ ^\circ C$;
- *Min. evap. temperature* $-50\ ^\circ C$;
- SHR (*sensible/total cooling power*) $= 0,62$;
- *Fan pressure rise* $= 100\ Pa$;
- *Fan efficiency* $0,5$;
- $T_{condenser} + T_{water} = 8\ ^\circ C$;

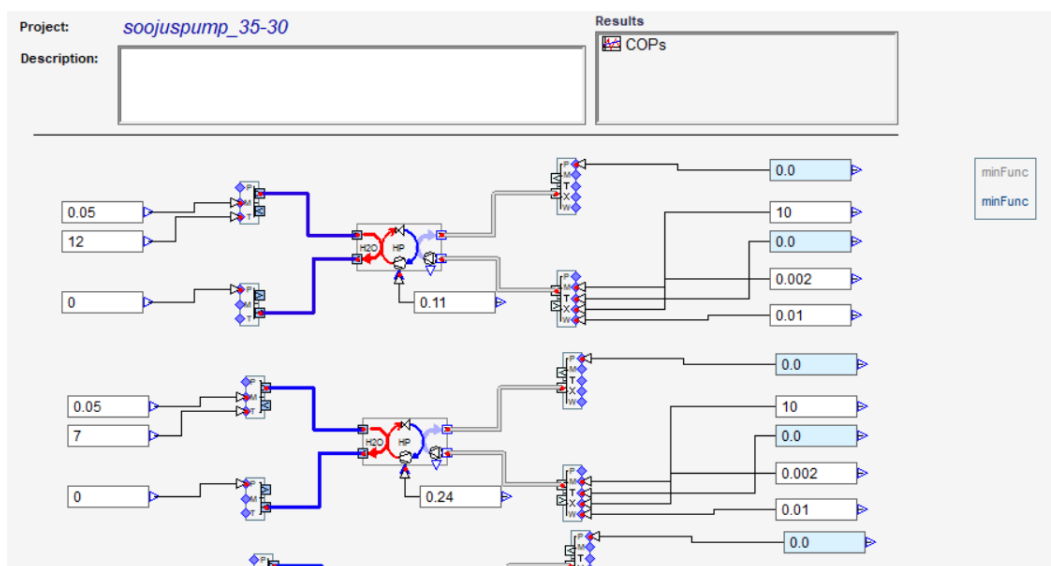
- *Max cond. temperature = 70 °C.*

Kõiki soojuspumba vajalikke parameetreid kalibreerimiseks ei ole võimalik leida tootja andmetest. Samuti töö autori tehtud katsetes ei mõõdetud kõiki vastavaid parameetreid. Kui täpseid andmeid puudusid, kasutati IDA ICE vaikeväärtusi.

Soojuspumba standard arvutuslikud tingimused on antud kuiva termomeetri +7 °C ja märja termomeetri +6 °C juures.

Joonisel 4.5 on näidatud mudeltatud soojuspumba mudel. Korruga ühes mudelis on 6 soojuspumpa, mis töötavad 30/35 °C temperatuurigraafiku juures. Kõik soojuspumbad on seadistatud kindla välisõhutemperatuuri juurde vastava osakoormusega tööle. Joonisel 4.8 esimene soojuspump töötab välisõhu temperatuuri +12 °C ja 11 % osakoormuse juures ja teine soojuspump välisõhu temperatuuri +7 °C ning 24 % osakoormuse juures. Osakoormused on välja arvatud vastavalt katseandmetele.

Soojuspumba mudeli vasakul vee poolele on sisestatud reaalsed vooluhulgad, mis on saadud mõõtmistulemustest ja paremale poolele on määratud õhu poole parameetrid, kus ventilaatori õhuvooluhulk on saadud tootja andmetest.



Joonis 4.8 Kalibreeritud soojuspumba mudel 30/35 temperatuurigraafiku juures (autori joonis)

4.5.2 Parameetrite optimeerimine

Soojuspumba parameetrite optimeerimiseks kasutati IDA ICE sisseehitatud rakendust „Parametic Runs”, kus minimaalse vea funktsiooni leidmiseks kasutati GenOpt tarkvara. Parameetrite optimeerimise põhieesmärgiks on leida kompressori väärtused, mis oleksid võimalikud lähedal tootja väärtustele.

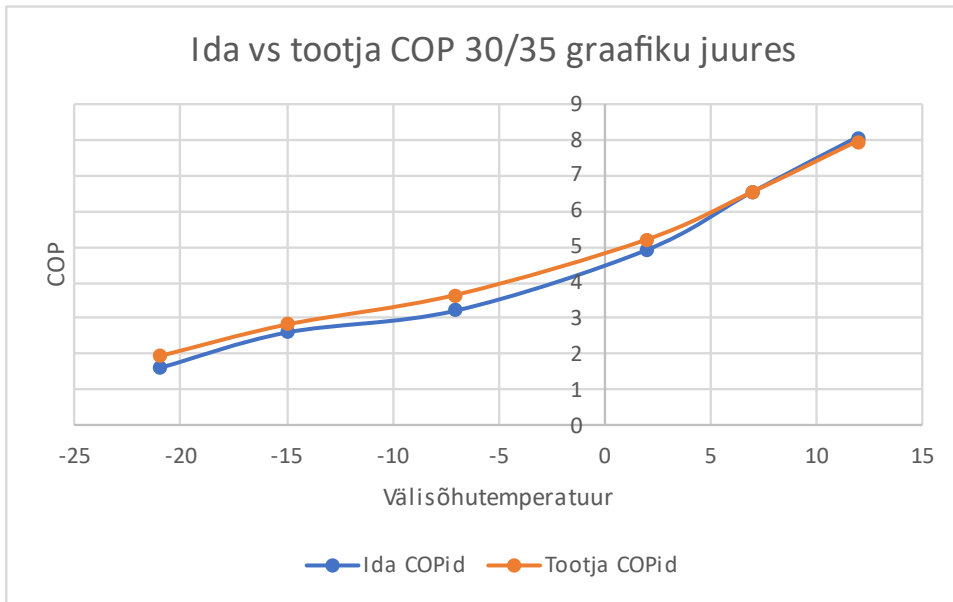
GenOpt on Java keeles kirjutatud programm, mis on välja töötatud parameetrite optimeerimise jaoks. Programm kasutab sisendiks ja väljundiks IDA ICE tekstifaili. Rakendus proovib automaatselt läbi erinevaid muutuja väärtuste kombinatsioone, et leida iga väärtuse jaoks minimaalne viga. Seejärel muudab GenOpt leitud madalaima veahinnangu kombinatsiooni sobivaks ning asendab soojuspumba mudelis uute minimaalsete vea väärtustega. [13]

Tabelis 4.4 ja 4.5 on välja toodud soojuspumba soojustegurid peale parameetrite optimeerimist.

Välisõhutemperatuur	30/35 graafiku juures COPid	Tootja poolt deklareeritud COP
+12°C	8,08	7,96
+7°C	6,53	6,53
+2°C	4,91	5,20
-7°C	3,22	3,66
-15°C	2,61	2,83
-22°C	1,61	1,95

Tabel 4.9 Ida tulemuste võrdlus tootja tulemustega 30/35 graafiku juures

Soojuspumba mudelis vee temperatuuride 30/35 juures on soojuspumba COPid suhteliselt sarnased. Kõige suurem erinevus on -7 °C juures, kus soojusteguri erinevus on 0,44 ehk 12 %. Tulemused on nähtavad graafiliselt joonisel 4.5.

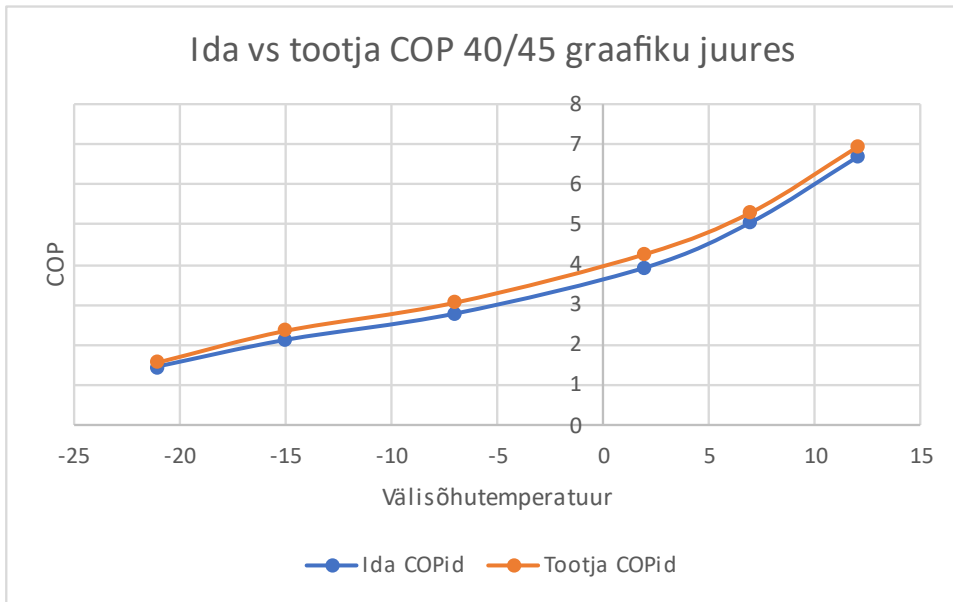


Joonis 4.5 Soojuspumba soojustegurite võrdlus simuleeritud ja deklareeritud tulemuste vahel

Vee temperatuurigraafiku 40/45 juures on kõik soojustegurid maksimaalselt 10 % erinevad tegelikest soojusteguritest.

Välisõhutamperatuur	40/45 graafiku juures COPid	Tootja poolt deklareeritud COP
+12°C	6,71	6,94
+7°C	5,08	5,32
+2°C	3,93	4,28
-7°C	2,78	3,07
-15°C	2,12	2,37
-22°C	1,45	2,59

Tabel 4.10 Ida tulemuste võrdlus tootja tulemustega 40/45 graafiku juures



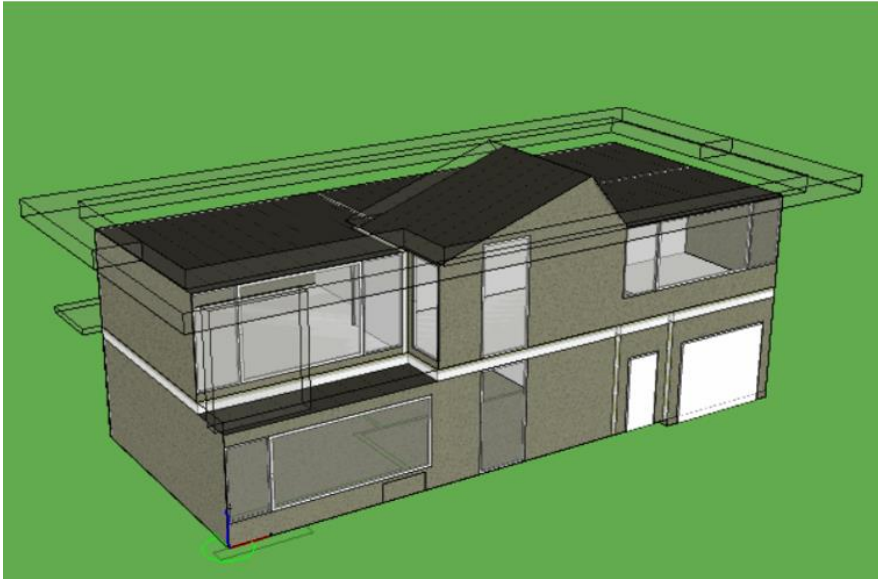
Joonis 4.6 Soojuspumba soojustegurite võrdlus simuleeritud ja deklareeritud tulemuste vahel

4.5.3 IDA ICE eramu mudel

IDA ICE on programm, mis võimaldab hinnata kogu hoone soojuslikku sisekliimat ja energiakasutust ning viia läbi detailseid dünaamilisi simulatsioone, võttes arvesse hoone tehnosüsteeme, väliseid koormuseid päikesest, maja siseselt tekkivaid vabakoormuseid ja väliskliima tingimusi. [17]

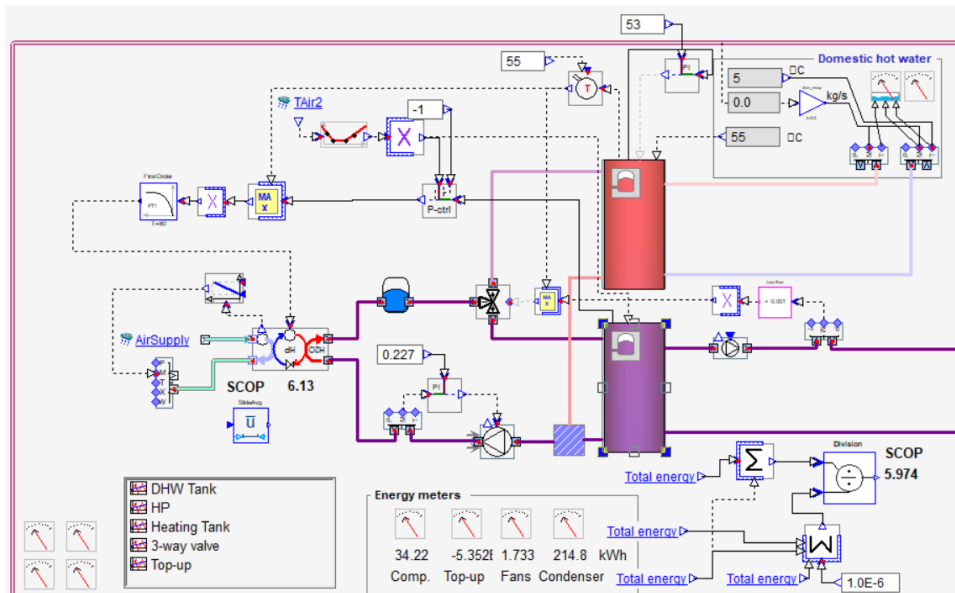
Magistritöö ühe osana viidi läbi hoone energiasimulatsioonid, kus hoone kütmine ja tarbevee soojendamise toimub õhk-vee soojuspumbaga. Maja mudeldamine antud lõputöös polnud eesmärk. Energiasimulatsioonide tegemiseks kasutati varem kalibreeritud soojuspumba mudelit.

Antud hoone on 2. korruseline ja 223,2 m². Maja kütmiseks kasutatakse õhk-vee soojuspumpa, mille juhtimine toimub küttegaafikuga. Majas on radiaatorküttesüsteem, ventilatsiooni õhu soojendamine toimub elektrikalorifeeriga. Sooja tarbevee kasutamine toimub vastavalt ajagraafikule, päevaseks tarbimiseks ühe inimese kohta on võetud 40 l/s. Tarbevee kütmine toimub vastavalt akumulatsioonipaagi seadeväärtusele. Kui akumulatsioonipaagis langeb vee temperatuur alla seadeväärtust, siis lülitab soojuspump ennast tarbevee kontuurile ning hakkab tarbevett soojendama. Kui vastav vee temperatuur on saavutatud, lülitub soojuspump ümber hoone küttesüsteemile.



Pilt 4.1 Eramu mudel

Hoone soojasõlme mudelisse lisatakse tootja andmetega soojuspump, mille täpsed kompressori parameetrid on eelnevalt välja arvutatud. Eramu mudelisse soojuspumba lisamise eesmärgiks on hinnata soojuspumba energiatarbimist ainult kütmiseks ja soojuspumba energiatarbimist koos tarbevee soojendamiseks.



Pilt 4.2 Eramu küttesüsteem

Peale simulatsioonide läbiviimist ei saavutatud ootuspäraseid tulemusi. Aastane soojustegur küttele ja tarbeveele ei tulnud reaalsed ning seepärast energiaarvutuste tulemusi magistritöös ei kajastata. Ühe põhjusena tulemuste ebausaldusväärsuses võib olla, et ei suudetud soojuspumba võimalikult täpselt kalibreerida ning leida õigeid

konstantseid parameetreid. Tootja ja IDA ICE soojustegurid saadi väga ligilähedaselt kokku aga kompressori ja kondensaatori võimsuseid ei suudetud parameetrite optimeerimisel paika saada.

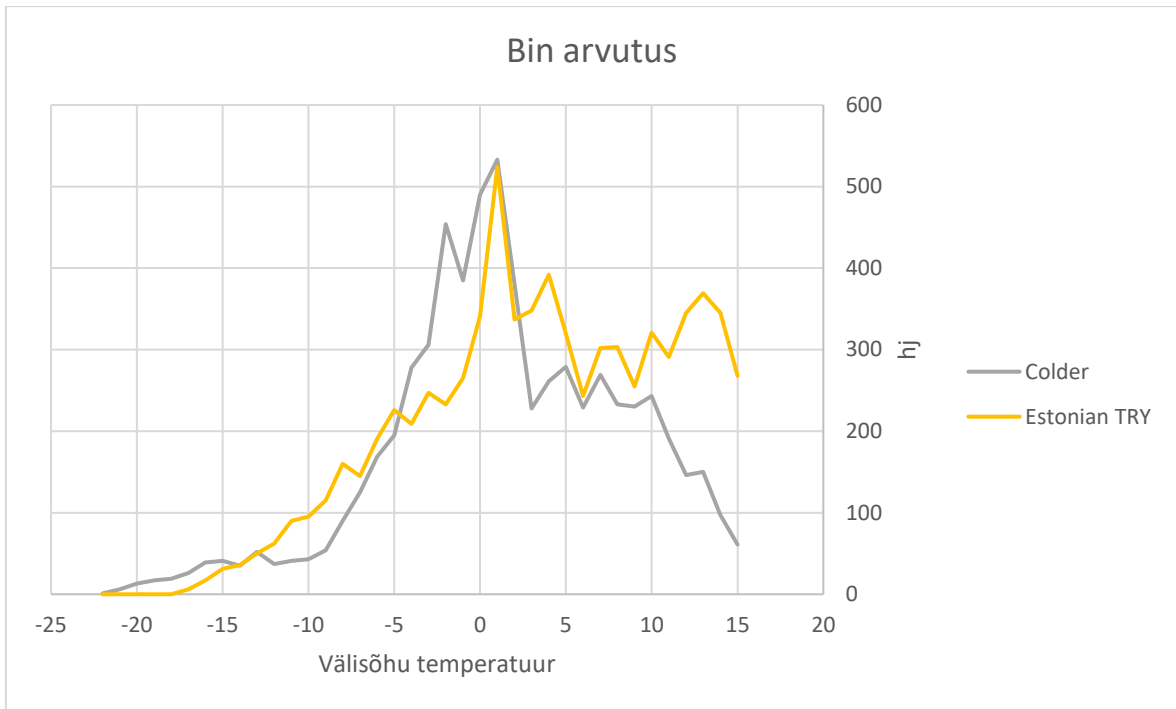
4.5.4 Eramu uus energiaarvutus

Hoone energiaarvutuste tegemiseks kasutati eelnevalt kalibreeritud eramu mudelit. Soojupumbaga soojussõlm asendati IDA ICE enda soojussõlmega. Seejärel viidi läbi aastane energiaarvutus, kus saadi aastased kütte võimsused ja sooja tarbevee võimsused iga tunni kohta. Mudeli kliimafailina kasutati Estonian TRY baasaastat. [14] Aastaste soojustegurite arvutamiseks kasutati excelit. Arvutuste tegemiseks kasutati autori arvutatud soojustegureid koos taustarbimisega ja ilma tausttarbimisega madala (35/30) ja keskmise (55/47) temperatuurirežiimi juures. Sooja tarbevee arvutuslikeks soojusteguriteks saadi tootja andmetest soojustegurid pealevoolutemperatuuri 60 °C juures.

Seejärel arvutati COPid küttele ja tarbeveele iga tunni kohta ning soojustegurite kaudu energiatarbimise. Kõige lõpuks saadi aastased soojustegurid küttele, tarbeveele ja kogu hoonele kokku.

4.6 Standardi järgse külma kliima ja Eesti baasaasta võrdlus

IDA ICE-ga energia arvutuste tegemiseks kasutati Estonian TRY baasaastat. Joonis 4.7 on välja toodud Eesti baasaasta kliimaandmed koos standardi järgse külma kliima andmetega. Graafikul on näidatud igale välisõhutemperatuurile vastav tundide arv, mis kulub kütmiseks. Selgitamaks välja Eesti baasaasta ja standardi külma kliima erinevuse, arvutati välja kraadpäevade arv. [22] Eesti baasaasta kraadpäevade arv on 3399 ja külma kliima kraadpäevade arv on 3634. Tulemustest selgub, et Eesti baasaasta kliima on külmem, sest aasta jooksul kulub kütteks rohkem tunde. Jooniselt 3,4 võib näha, et standardi järgse minimaalne välisõhutemperatuur on -21 °C aga Eesti baasaasta minimaalne temperatuur on -17 °C aga kõrgemate välisõhutemperatuuride juures on Eesti kliimal rohkem tunde kütteks.



Joonis 4.7 Bin arvutuse graafik

5 TULEMUSED

5.1 Split tüüpi soojuspumba arvutuslikud soojustegurid

Katsete tegemist alustati split tüüpi soojuspumbaga. Katsed viidi läbi ilma akumulatsioonipaagita. Peale madala ja vahepealse temperatuurirežiimi juures tehtud katseid kõikide välisõhu temperatuuride juures, lisati akumulatsioonipaak ning teostati kontrollmõõtmised. 40/45 graafiku juures tehti kontrollmõõtmine välisõhu temperatuuri +7 °C ja 30/35 temperatuurirežiimil tehti kontroll välisõhu temperatuuri +2 °C, +7 °C ja +12 °C juures. Need punktid said valitud selliselt, kus tootja deklareeritud COP erines suuresti deklareeritud väärtustest või seadme töö ei olnud stabiilne.

Tabelis 5.1 on välja toodud 35/30 temperatuurirežiimi juures spliti soojustegurid. Süsteemi ei oldud paigaldatud veel akumulatsioonipaaki.

Välisõhutemperatuur	Standardi järgi arvutatud COP	Tootja poolt deklareeritud COP	Erinevus	Erinevuse %
+12°C	2,52	7,96	5,44	68
+7°C	2,29	6,53	4,24	65
+2°C	3,62	5,20	1,58	30
-7°C	3,04	3,66	0,62	17
-15°C	2,31	2,83	0,52	18
-22°C	1,73	1,95	0,22	11

Tabel 5.1 35/30 temperatuurirežiimil arvutatud COP

Tabelis 5.2 on välja toodud 35/30 temperatuurirežiimi juures korduskatete tulemused koos akumulatsioonipaagiga.

Välisõhutemperatuur	Standardi	Tootja poolt	Erinevus	Erinevuse
----------------------------	------------------	---------------------	-----------------	------------------

	järgi arvutatud COP	deklareeritud COP		%
+12°C	5,71	7,96	2,25	28
+7°C	2,29	6,53	4,24	65
+2°C	3,94	5,20	1,26	24

Tabel 5.2 Korduskatsete 35/30 temperatuurirežiimi juures arvutatud soojustegur akumulatsioonipaagiga

Tabelis 5.3 on välja toodud 45/40 temperatuurirežiimis juures spliti soojustegurid.

Välisõhutemperatuur	Standardi järgi arvutatud COP	Tootja poolt deklareeritud COP	Erinevus	Erinevuse %
+12°C	3,06	6,94	3,88	56
+7°C	4,09	5,32	1,23	23
+2°C	2,40	4,28	1,88	44
-7°C	2,03	3,07	1,04	34
-15°C	1,91	2,37	0,46	19
-22°C	1,07	2,59	1,52	59

Tabel 5.3 45/40 temperatuurirežiimil arvutatud COP

Tabelis 5.4 on välja toodud 45/40 temperatuurirežiimi koos akumulatsioonipaagiga korduskatse soojustegur.

Välisõhutemperatuur	Standardi järgi arvutatud COP	Tootja poolt deklareeritud COP	Erinevus	Erinevuse %
----------------------------	--	---	-----------------	------------------------

+7°C	3,57	5,32	1,75	33
------	------	------	------	----

Tabel 5.4 Korduskatse koos akumulatsioonipaagiga 45/40 temperatuurirežiimi juures arvatud soojustegur

Peale akumulatsioonipaagi lisamist, muutus seadme töö ühtlasemaks. Ilma akumulatsioonipaagita langes soojuspumpa siseneva vee temperatuur väga kiiresti peale soojuspumba välja lülitumist. Lisades süsteemi akumulatsioonipaagi, jäid vee temperatuurid stabiilseks soojuspumba tsüklite vahel. Suuremat mõju paagi lisamine annab kõrgematel välisõhutemperatuuride juures, kus soojuspumba töö ei olnud püsiv ning seade tsükeldas sisse ja välja.

5.2 Mono tüüpi soojuspumba arvutuslikud soojustegurid

Mono tüüpi soojuspumba katsed viidi läbi 35/30 ja 55/47 temperatuurigraafikute juures. Kõik katsed on tehtud koos akumulatsioonipaagiga. Tabelis 5.4 on välja toodud 55/47 temperatuurirežiimi juures soojustegurid.

Välisõhutemperatuur	Standardi järgi arvatud COP	Tootja poolt deklareeritud COP	Erinevus	Erinevuse %
+12°C	3,13	5,92	2,79	47
+7°C	1,91	4,11	2,2	54
+2°C	1,87	3,35	1,48	44
-7°C	2,09	2,48	0,39	16
-15°C	1,50	1,90	0,4	21
-22°C	0,71	1,22	0,51	42

Tabel 5.5 55/47 temperatuurirežiimi juures arvatud soojustegur

55/47 temperatuurigraafiku juures on soojusteguri maksimaalne erinevus +7 °C juures 54 %. Madalamatel välisõhu temperatuuridel on soojuteguri erinevus väiksem.

Tabelis 5.6 on välja toodud 35/30 temperatuurirežiimi juures soojustegurid.

Välisõhutemperatuur	Standardi järgi arvatud COP	Tootja poolt deklareeritud COP	Erinevus	Erinevuse %
+12°C	2,85	7,96	5,11	64
+7°C	2,29	6,53	4,24	65
+2°C	3,31	5,20	1,89	36
-7°C	2,64	3,66	1,02	28
-15°C	2,39	2,83	0,44	16
-22°C	1,55	1,95	0,4	21

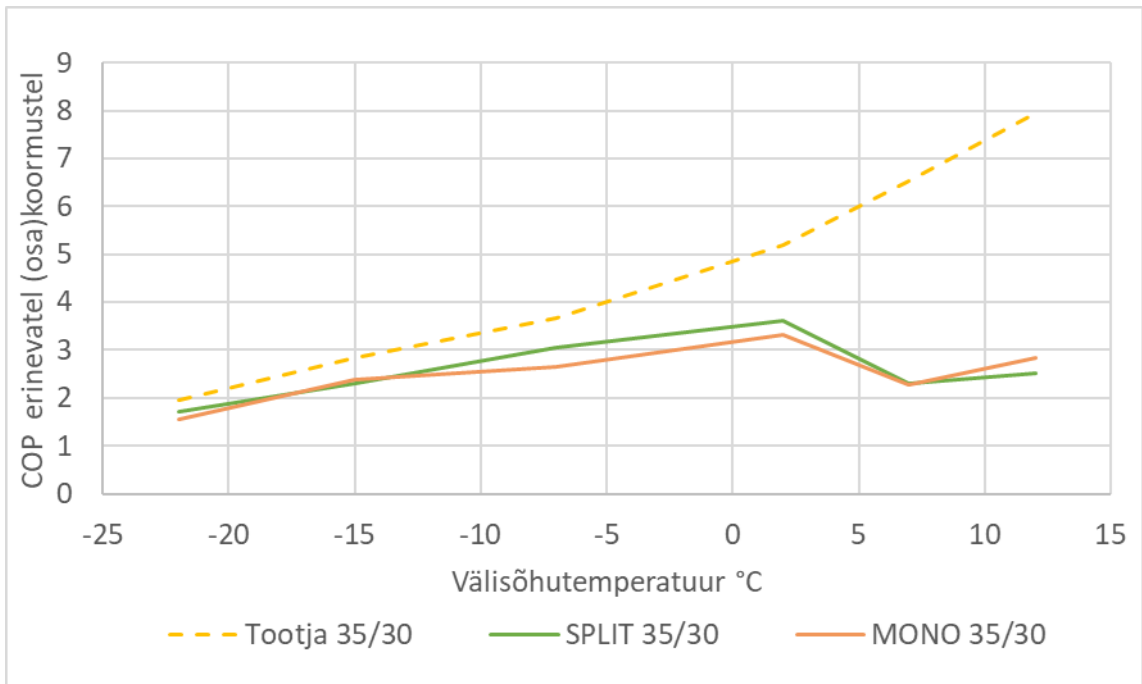
Tabel 5.6 35/30 temperatuurirežiimi juures arvatud soojustegur

Madala temperatuurilise graafiku puhul on maksimaalne erinevus 65 %. Arvatud ja tootja deklareeritud soojusteguri erinevus kasvab välisõhutemperatuuri tõustes.

5.3 Spliti ja mono tulemused graafiliselt

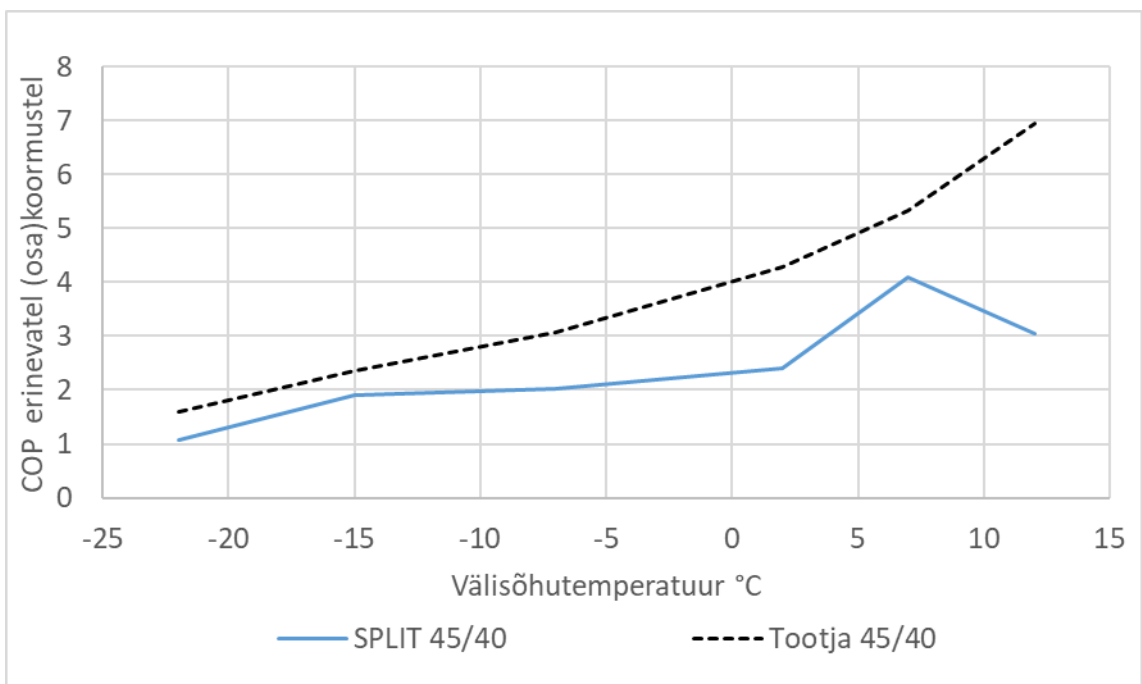
Joonistel 5.1-5.3 mono ja spliti tulemused koos tootja deklareeritud soojusteguritega graafiliselt. Mõlema soojuspumba puhul tuleb välja ühine joon. Mida kõrgem on välisõhutemperatuur, seda suurem on erinevus mõõdetud ja deklareeritud tulemuste vahel. Joonistelt on näha, et tootja soojustegurid tõusevad lineaarselt välistemperatuuri tõustes aga arvatud soojustegurid ei liigu tõusvas joones, vaid välisõhutemperatuuri +7 või +2 °C juures graafik langeb ja joonistelt ilmnevad korrapäratud jõnksud. Arvatud soojustegurite graafikut analüüsides võib öelda, et see on katsetava soojuspumba eripära ning korduskatsetega saadi alati samad tulemused.

Joonisel 5.1 on välja toodud 35/30 graafiku juures spliti ja mono tulemused koos tootja andmetega.



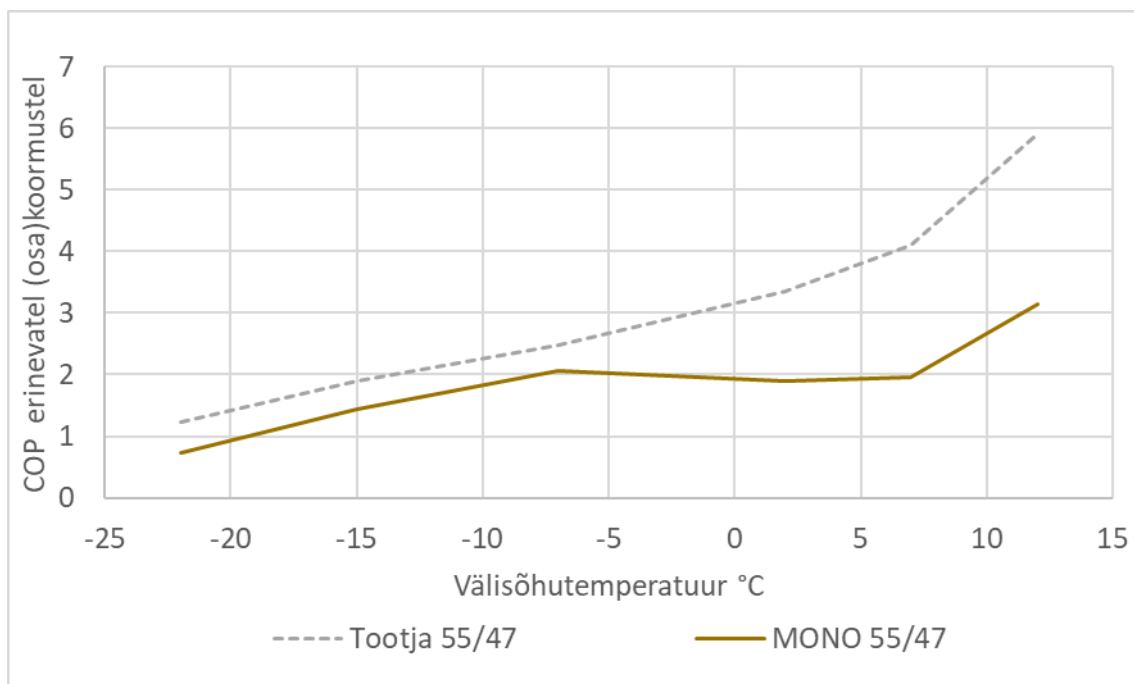
Joonis 5.1 35/30 temperatuurirežiim

Joonisel 5.2 on spliti ja tootja tulemused 45/40 graafiku juures.



Joonis 5.2 45/ 40 temperatuurirežiim

Joonisel 5.3 on välja toodud mono tüüpi soojuspumba tulemused koos tootja andmtega 55/47 graafiku juures.



Joonis 5.3 55/47 temperatuurirežiim

5.4 Soojustegurid ilma tausttarbeta

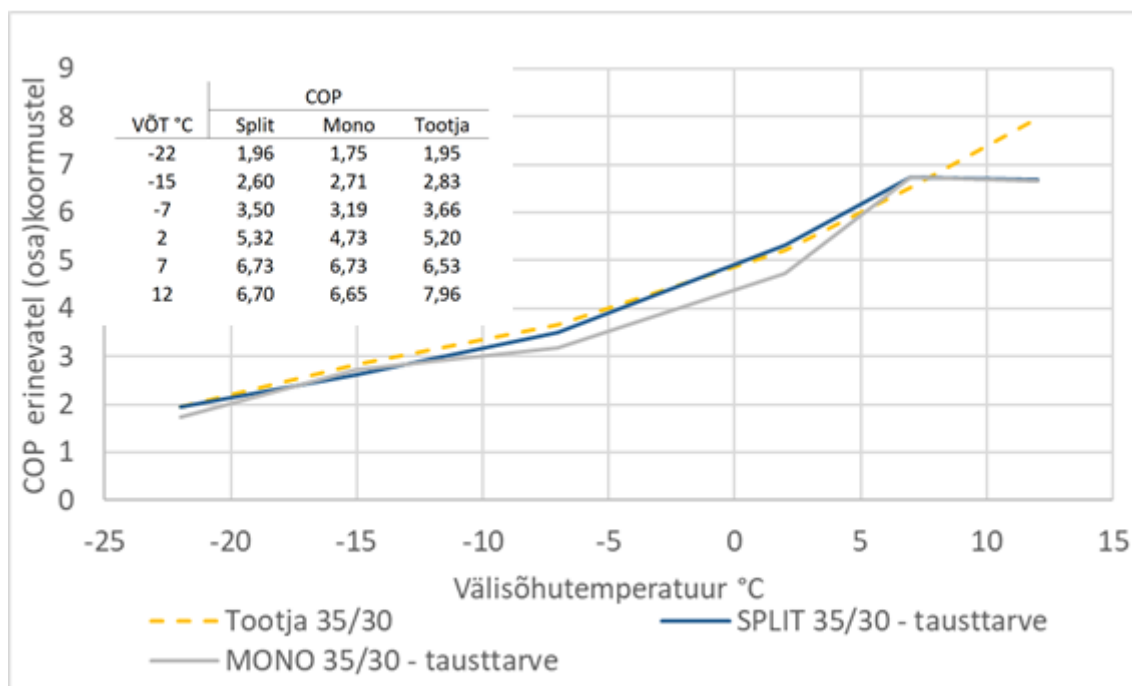
Soojuspumba mõõtmiste jooksul oli mõlema soojuspumba puhul püsiv elektritarbimine, mis oli vahemikus 0,8-0,9 A. Selleks, et näha, kui suurt mõju avaldab selline püsiv elektritarbimine soojustegurile, on soojuspumba elektritarbest lahutatud maha tausttarve 0,87 A.

Tabelis 5.7 on välja toodud spliti ja mono soojuspumba soojustegurid 35/30 temperatuuri juures ilma tausttarbeta.

VÕT °C	COP 35/30				
	Split	Mono	Tootja	Erinevus split %	Erinevus mono %
+12°C	1,96	1,75	1,95	0,5	10
+7°C	2,6	2,71	2,83	8	4
+2°C	3,5	3,19	3,66	4	13
-7°C	5,32	4,73	5,2	2	9
-15°C	6,73	6,73	6,53	3	3
-22°C	6,7	6,65	7,96	16	16

Tabel 5.7 COPid ilma tausttarbeta

35/30 temperatuurirežiimi juures mõlema soojuspumba soojustegurid tulid väga lähedale tootja deklareeritud andmetele.



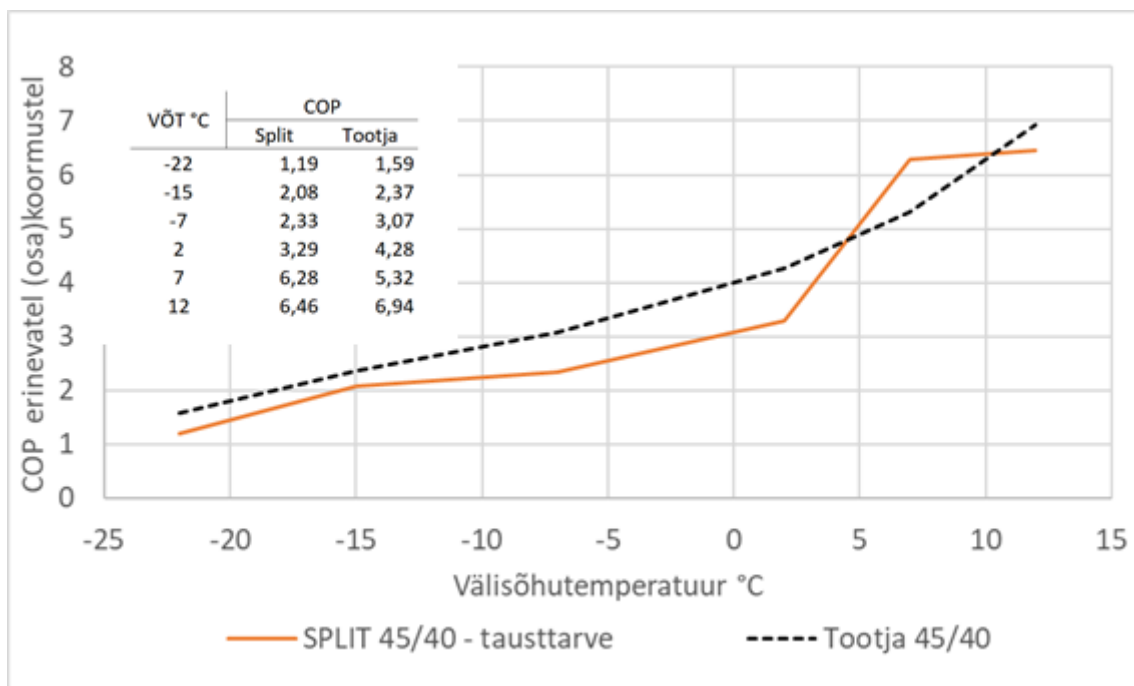
Joonis 5.4 35/30 temperatuurirežiim, tausttarve maha lahutatud

Tabelis 5.8 on välja toodud spliti soojustegurid 45/40 temperatuurirežiimi juures, kui tausttarve on maha lahutatud.

VÕT °C	COP 45/40		
	Split	Tootja	Erinevus split %
+12°C	1,19	1,59	25
+7°C	2,08	2,37	12
+2°C	2,33	3,07	24
-7°C	3,29	4,28	23
-15°C	6,28	5,32	18
-22°C	6,46	6,94	7

Tabel 5.8 45/40 temperatuurgraafiku juures soojustegurid ilma tausttarbeta

Jooniselt 5.5 võib lugeda, et soojustegurid läksid tootja andmetel lähemale aga päris hästi tulemused omavahel ei ühti. +7 °C juures on arvatatud soojustegur kõrgem tootja deklareeritud soojustegurist.



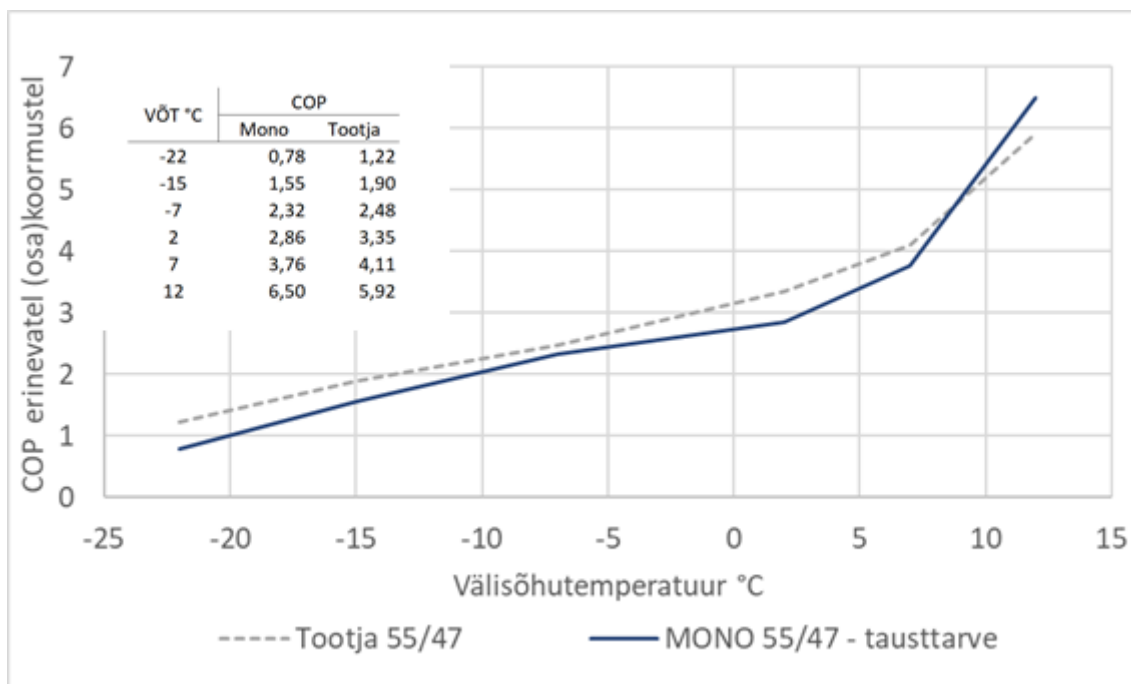
Joonis 5.5 45/40 temperatuurirežiim, tausttarve maha lahutatud

Tabelis 5.6 on välja toodud monoblok soojuspumba soojustegurid ilma tausttarbimiseta 55/47 temperatuurirežiimi juures.

VÕT °C	COP 55/47		
	Mono	Tootja	Erinevus mono %
+12°C	0,78	1,22	36
+7°C	1,55	1,9	18
+2°C	2,32	2,48	6
-7°C	2,86	3,35	15
-15°C	3,76	4,11	8,5
-22°C	6,5	5,92	10

Tabel 5.6 55/47 temperatuurgraafiku juures soojustegurid ilma tausttarbeta

Jooniselt 5.7 selgub, et tulemused tulevad väga lähedale tootja andmetega. +12 °C juures on arvatud soojustegur kõrgem tootja deklareeritud soojustegurist.

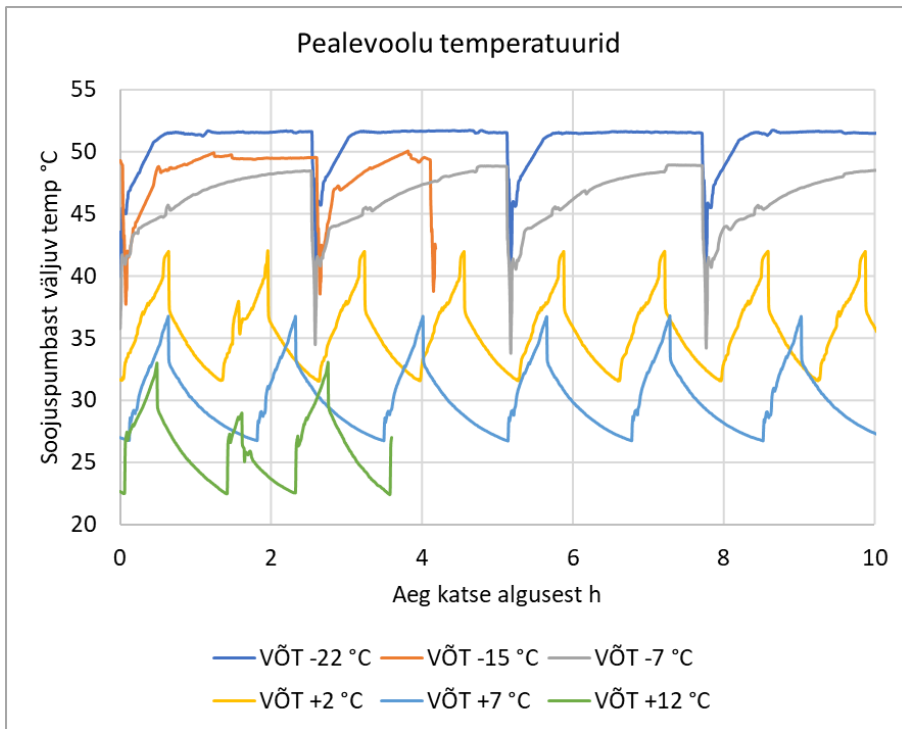


Joonis 5.7 55/47 temperatuurirežiim, tausttarve maha lahutatud

5.5 Katsete analüüs

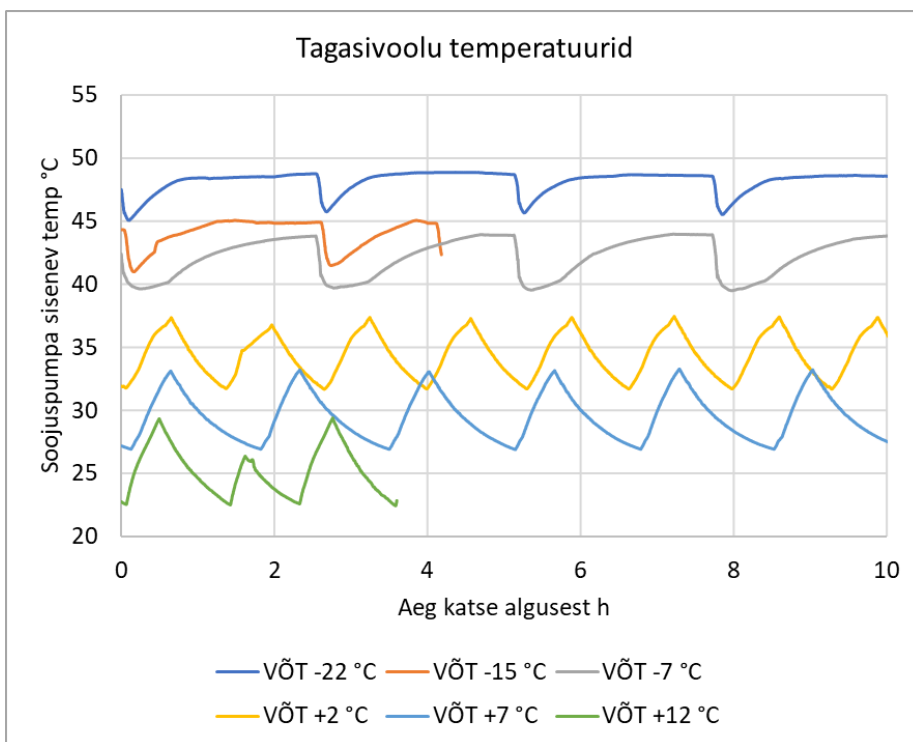
Joonistel 5.8 ja 5.9 on näidatud pealevoolu ja tagasivoolu graafikud erinevate temperatuurirežiimide juures. Jooniselt 5.8 võib välja lugeda, et välisõhutemperatuuril -22 °C ei võimaldanud soojuspumbal arvutuslikku pealevoolu temperatuuri 55 °C saavutada. Arvutuslik maksimaalne pealevoolu temperatuur oli 55/47 katse juures oli 51 °C, millega viidi läbi ka arvutused.

Välisõhutemperatuuride -22, -15 ning -7 °C juures töötas soojuspump pidevalt erinevate kompressori kiiruste juures. Sulatustsükli intervallid -22, -17 ja -7 °C juures on umbes 2 - 2,5h. Sulatustsükli pikkus on umbes 3 minutit. +2, +7 ja +12 °C juures on sulatustsükli intervalliks umbes 1 h. Pump töötas ON/OFF režiimil ja lülitas ennast välja kui soojuspumpa sisenev temperatuur jõudis seadmetemperatuurini. Kompressor lülitas ennast uuesti sisse, kui soojuspumpa sisenev temperatuur langes uuesti 5 kraadi alla seadmetemperatuuri.



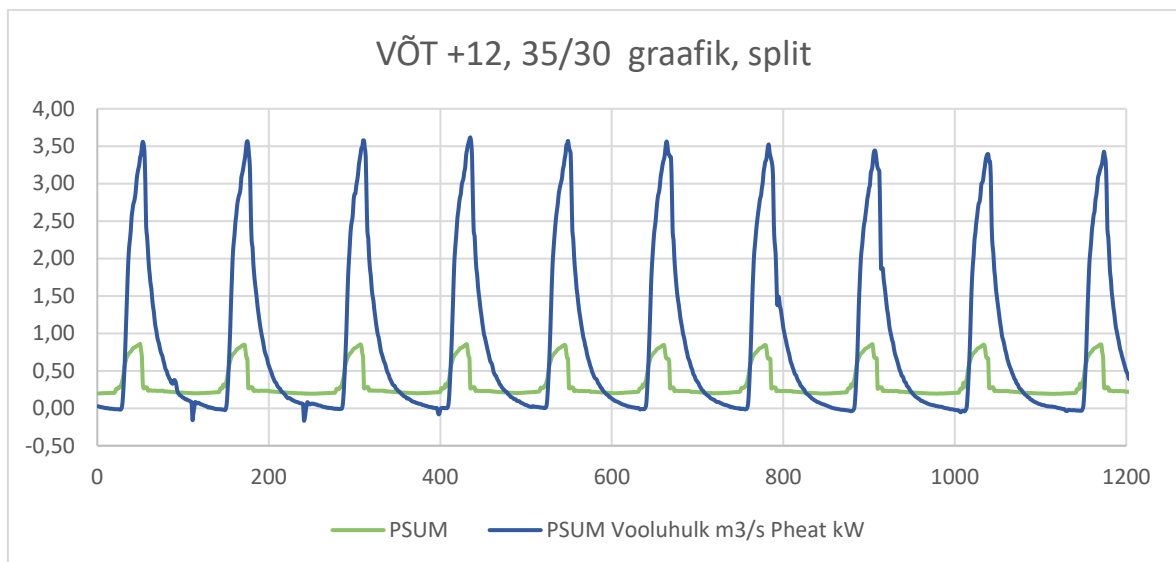
Joonis 5.8 Soojuspumbast väljuva vee temperatuurid 55/47 temperatuuri graafiku juures

Tagasivoolutemperatuur -22 °C juures on soojuspumba tsükli jooksul 47 °C nagu arvutuslikult ette antud ja soojuspumba sulatustsükli ajal langeb paar kraadi.



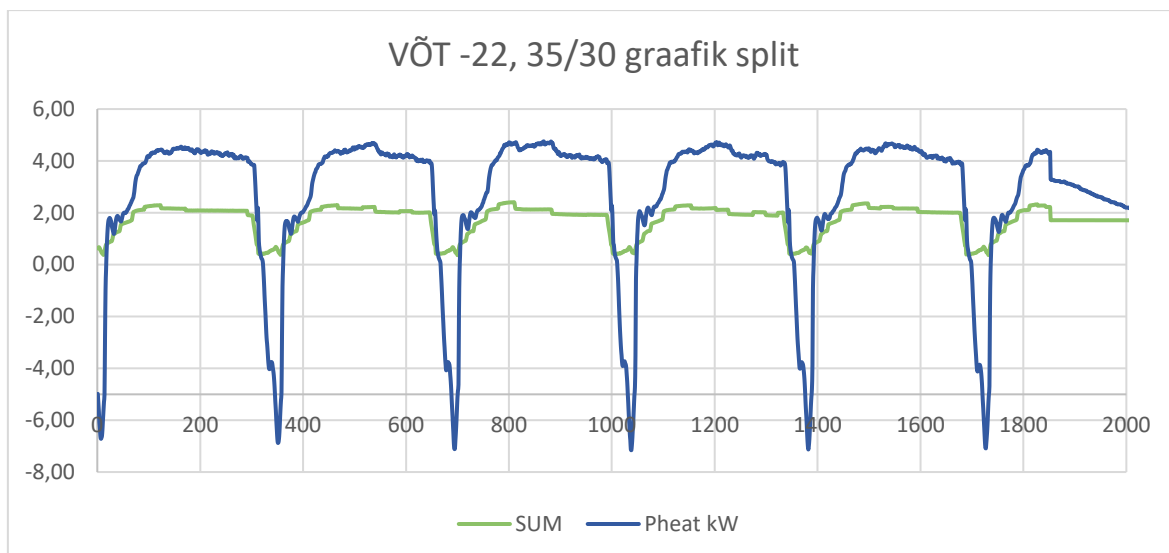
Joonis 5.9 tagasivoolu temperatuuri graafikud

Joonisel 5.10 ja 5.11 on detailsemalt välja toodud katsete tulemused. Rohelise joonega on näidatud summeeritud sise ja välisosa võimsus ning sinise joonega voluhulk. Joonisel 5.10 on näidatud välisõhutemperatuuri +12 °C 35/30 temperatuuri graafiku juures spliti võimsused ja voluhulgad ühe katse jooksul. Soojuspump muudab pidevalt kompressori kiirusi ning tsükeldab pidevalt sisse ja välja kõrgetel välisõhutemperatuuridel.



Joonis 5.10. VÕT +12 ja temperatuurigraafiku 35/30 spliti katsetulemused

Joonisel 5.11 on välja toodud -22 °C 35/30 temperatuuri graafiku juures spliti võimsused ja voluhulgad. Soojuspumba ühe tsükli pikkus on umbes 2,5 h ning seejärel läheb sulatusse 3 minutiks.



Joonis 5.11 VÕT -22 ja temperatuurigraafiku 35/30 spliti katsetulemused

5.6 Arvutuslikud sesoonsed soojustegurid

Sesoonsete soojustegurite arvutamiseks kasutati bin meetodit. Arvutused tehti külmale kliimale ja ka keskmisele kliimale. Eesti kliimale vastab standardi järgne külmem kliimatingimus, aga tulemuste paremaks ilmestamiseks tehti arvutused ka keskmisele kliimale. Tootja tulemustes on SCOP kajastatud hooajalise ruumide kütte efektiivsusega η_s protsentides, mis on antud "low temperature" 35/30 graafiku juures ja "medium temperature" 55/47 graafiku juures. Tootja SCOPid tuli autori poolt ise välja arvutada vastavalt standardile.

5.6.1 Spliti aastased soojustegurid

Järgnevad spliti aastased soojustegurid on arvutatud vastavalt standardile. Tabelis 5.8 on välja arvutatud sesoonsed soojustegurid külmale ja keskmisele kliimale 45/40 temperatuuri graafiku juures. Ühel juhul on SCOP arvutatud katseliselt mõõdetud soojusteguriga ja teisel juhul, kui soojustegurist on maha lahutatud tausttarbimine.

Kliima	Graafik	SCOP mõõtmistulemustest	η_s (tausttarbega) (%)	SCOP mõõtmistulemustest ilma tausttarbega	η_s (ilma tausttarbega) (%)
Külm	45/40	2,34	93,8	3,0	119,9
Keskmine	45/40	2,72	108,8	3,79	151,6

Tabel 5.8 SCOP tulemused 45/40 temperatuuri graafiku juures (SPLIT)

45/40 graafiku juures ei ole tootja esitanud SCOPe ja hooajalist ruumikütte efektiivsust. Selleks, et külma kliima andmeid võrrelda, arvutati SCOP ja kasutegur autori poolt välja arvutada bin arvutuse meetodil ja tulemus on esitatud tabelis 5.9.

Kliima	Graafik	SCOP tootja	η_s (%)
Külm	45/40	3,71	148,3

Tabel 5.9 Tootja SCOP 45/40 temperatuuri graafiku juures (SPLIT)

Tabelis 5.10 on esitatud spliti arvutuslikud SCOPid 35/30 temperatuurigraafiku juures ja tootja deklareeritud tulemused. Tootja on kajastanud oma tulemustes külmale kliimale ainult ruumikütte efektiivsuse kasutegurit ja SCOPid on autori poolt välja arvutatud. Aastased soojustegurid on väga ligilähedased, erinevus on 2%.

Graafik 35/30	Külm kliima	Keskmine kliima
SCOP mõõtmistulemustest	3,08	2,98
η_s (tausttarbega) (%)	123	119,2
SCOP mõõtmistulemustest ilma tausttarbeta	4,52	5,34
η_s (ilma taust-tarbega) (%)	180,9	213,6
SCOP tootja	4,59	5,14
η_s tootja (%)	183,6	205,6

Tabel 5.10 Tootja ja arvutuslikud SCOPid 35/30 graafiku juures (split)

5.6.2 Mono sesoonsed soojustegurid

Tabelis 5.11 on esitatud mono tüüpi soojuspumba SCOPid koos tootja andmetega 35/30 temperatuurigraafiku juures. Mono tüüpi soojuspumba SCOPide erinevus on umbes 10 %.

Graafik 35/30	Külm kliima	Keskmine kliima
SCOP mõõtmistulemustest	2,86	2,84
ηs (tausttarbega)	114,2	113,6
SCOP mõõtmistulemustest ilma tausttarbeta	4,17	4,95
ηs (ilma taust-tarbega)	166,8	197,9
SCOP tootja	4,59	5,14
ηs tootja	183,6	205,6

Tabel 5.11 Tootja ja arvutuslikud SCOPid 35/30 graafiku juures (mono)

Tabelis 5.12 on välja toodud 55/47 graafiku juures arvutuslikud SCOPid koos tootja SCOPidega. Erinevus tootja ja arvutusliku tulemuse vahel on 5 %.

Graafik 55/47	Külm kliima	Keskmine kliima
SCOP mõõtmistulemustest	1,96	2
ηs (tausttarbega)	78,4	80,1
SCOP mõõtmistulemustest ilma tausttarbeta	2,69	3,14
ηs (ilma taust-tarbega)	107,7	125,5
SCOP tootja	2,8	3,29
ηs tootja	112,1	131,6

Tabel 5.12 Tootja ja arvutuslikud SCOPid 55/47 graafiku juures (mono)

5.7 Energiatõhususe määruuse järgi arvutatud aastased soojustegurid

Aastane soojustegur (SPF) on võrreldav sesoonne soojusteguriga SCOP. Energiamärgise arvutamiseks kasutatakse tootja poolt antud η_s , mis on soojuspumba energiämärgisel toodud sesoonne primaarenergiale taandatud külma kliima kasutegur protsentides. Energiatõhususe määruuse järgi arvutati SPF-id vastavalt Valemile 10. Tulemused on välja toodud tabelis 5.13. SPF-i tarbeveele arvutada ei saa, sest tootja pole esitanud sooja tarbevee valmistamise kasutegurit.

Graafik	η_s (seasonal space heating energy efficiency)	SPF (küttele)
35/30 graafik (külm kliima)	183,6 %	4,17
55/47 graafik (külm kliima)	112,1 %	2,55

Tabel 5.13 Energiatõhususe määruuse järgi arvutatud SPF

Energiatõhususe määruuse valem erineb standardi valemist selle poolest, et määruus võtab arvesse ka ventilaatorite ja pumpade kasutatud energia koefitsenti. Seetõttu tulevad määruuse järgi tulemused natuke väiksemad, kui standardi tulemused. Sellegipoolest on tulemused ligilähedased ja võib öelda, et määruuse valemi kasutamine on põhjendatud.

5.8 Eramu energiaarvutuste tulemused

Eramu arvutustes arvutati SCOP keskmise ja madala temperatuurigraafiku juures. Tabelis 5.14 on välja toodud IDA ICE energiaarvutustega tulemusena arvutatud SCOPid küttele, tarbeveele ja kogu tarbimise SCOP.

Tarbevee SCOPi pole võimalik tootja andmetega võrrelda, sest selle kohta puudub info. SCOP on arvutatud selleks, et saaks hinnata aastast SCOPi reaalses majapidamises ja kogu hoone aastast tarbimist.

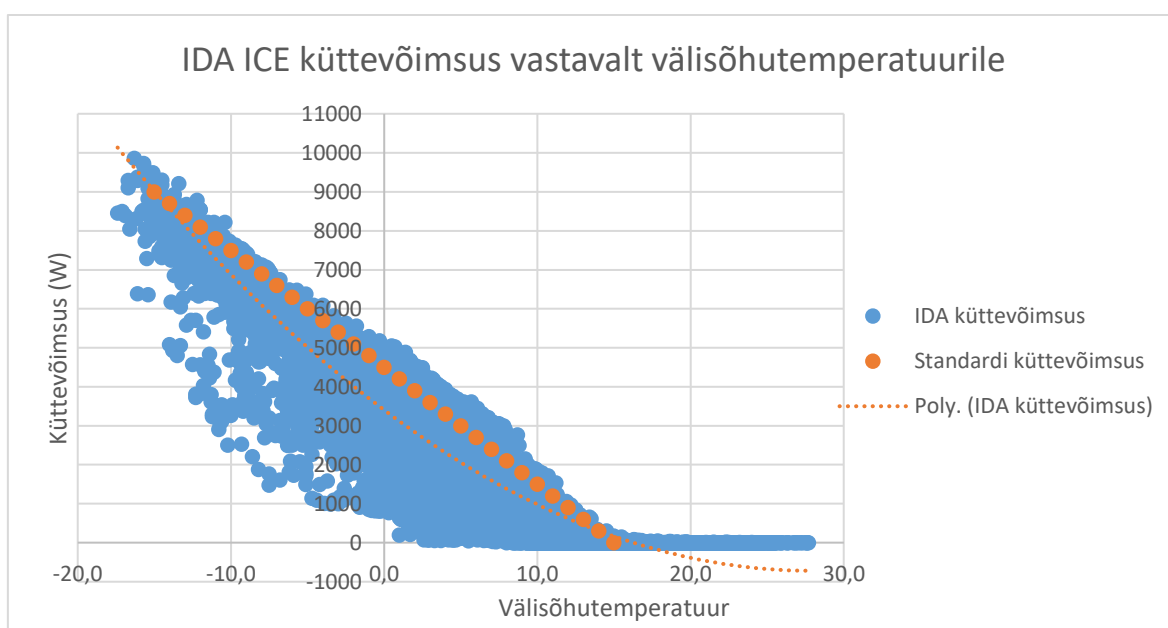
Temperatuurigraafik	SCOP kütte	SCOP kütte taust-tarbimiseta	SCOP tarbevee kütmine	SCOP	SCOP taust-tarbimiseta
35/30 split	3,05	4,25	2,45	2,92	3,75
35/30 mono	3,81	3,94	2,45	2,74	3,55
55/47	1,93	2,45	2,45	2,0	2,53

Tabel 5.14 Eramu arvutuse tulemused

Kui vaadelda ainult SCOPE küttele, siis erinevus standardi ja IDA tulemuste vahel on maksimaalselt 10 % ja IDA ning tootja erinevus on 13%.

IDA ICE tulemuste võrdluseks saab öelda, et SCOPid on madalamad kui standardi järgest arvutusest. Erinevus tulemuste vahel on 30 %. Standardi ja tootja SCOPide vahel on erinevus umbes 10 %.

Joonisel 5.12 on välja toodud kogu aasta IDA ICE küttevõimsused iga tunni kohta. Vastavalt eramu küttekoormusele on joonisel märgitud standardi järgi arvatud küttevõimsus, mis joonistub välja lineaarselt, sest standardi järgses arvutuses katsepunktide vahelised COPid interpoleeritakse. IDA küttevõimsuste ja standardi graafiku vaheline pindala on hoone vabasoojused nagu päike, inimesed, valgustus ja seadmed. Vabasoojused mõjutavad SCOPi negatiivses suunas.



Joonis 6.1 IDA ICE küttevõimsused koos standardi järgi arvatatud küttevõimsustega

Teise põhjusena võib välja tuua Eesti baasaasta ja standardi pakutud tüüpilise külma kliima erinevuse. Eesti baasaasta kraadpäevade arv on oluliselt suurem külmast kliimast ehk soojuspump peab aasta jooksul pikemalt töötama, et tagada ruumis vajalikud sisetemperatuurid.

6 TULEMUSTE ANALÜÜS

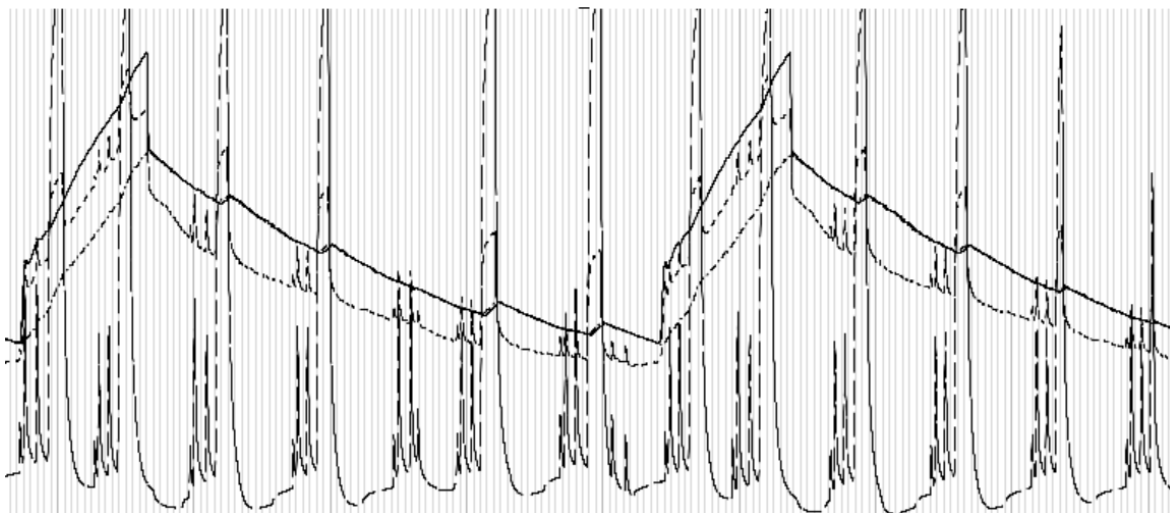
Madalatemperatuurilise 35/30 temperatuurigraafiku juures jääb spliti soojusteguri erinevus tootja deklareeritud soojustegurist 30 % juurde. +7 kraadi juures on erinevus lausa 65%. Arvestades maha tausttarbe, saab maksimaalseks erinevuseks 16,5%.

45/40 temperatuurirežiimi juures on spliti maksimaalseks soojusteguri erinevuseks tootjaga 59%. Lahutades maha tausttarbe jääb erinevus maksimaalselt 25% juurde.

35/30 temperatuurirežiimi juures on mono tüüpi soojuspumba erinevus maksimaalselt 65 % ja arvatades maha tausttarbe, jääb maksimaalseks erinevuseks 36%.

55/47 temperatuurirežiimi juures on mono tüüpi soojuspumba erinevus 54%, tausttarbe maha lahutades on erinevus deklareeritust 36 %.

Monobloki viimaste katsete puhul hakkas rolli mängima ka võrguvee temperatuur. Alumisel pildil on väljavõtte tulemustest graafiliselt, kus kõige alumine joon näitab võrguvee temperatuuri. Antud pilt on välisõhutemperatuuri +7°C juures. Võrguvee temperatuur kõigub 15 kraadist kuni 30 kraadini.



Pilt 6.1 Väljavõtte logerist, kus on näidatud soojuspumpa siseneva vee temperatuurid

Võrreldes standardi järgi arvatatud soojustegureid tootja andmetega, siis võib teha järeldused, et katselised tulemused on märgatavalt madalamad tootja deklareeritud tulemused. Ühe põhjusena võib välja tuua püsiva elektrivoolu mõlema soojuspumba puhul, mis on umbes 0,8-0,9 A. Elektritarve on ka siis, kui soojuspump ei ole töös.

Tegemist võib olla soojuspumba välisosa kesta põhjas oleva küttekaabli elektritarbega, millel puudub juhtautomaatika ning mille võimsus on pidevalt 200 W. Joonistel 5.4 – 5.7 on selline tausttarve maha lahutatud ning tulemused on ligilähedased tootja deklareeritud väärtustele. Kõrgematel temperatuuridel töötab soojuspumba kompressor väiksema osakoormusega, ja seetõttu mõjutab kütetenn COPi suuremal määral kui madalamate välisõhutemperatuuride puhul.



Pilt 6.2 Soojuspumba küttekaabel sulatusvannis (Pildi autor: juhendaja Karl-Villem Vösa)

Pildil 6.1 on näidatud soojuspumba küttekaabel sulatusvannis. Sulatuskaabli paigaldus ei ole korrektne ja ei välista välise soojusvaheti jäätumist. Antud olukorras ei ole küttekaablist kasu, vaid see peaks jooksma soojusvaheti alt vahetult läbi.

Soojustegurite arvutuste põhjal võib järeldada, et tootja ei ole oma arvutustes kajastanud kütetenni.

Soojuspunasid katsetades alustati split tüüpi seadmest ja süsteemi ei olnud lisatud veel akumulatsioonipaaki. Paak lisati spliti lisakatsete ajal. Monoblok seadme katsed tehti kõik akumulatsioonipaagiga. Paak hoidis pealevoolutemperatuuri kõrgena kogu soojuspumba väljalülitatud perioodi jooksul. Lisakatsete tegemise põhjuseks oli katseandmete analüüsi jooksul tekkinud arusaam, et tulemusi tuleks veelkord üle korrata. Akumulatsioonipaagiga tehtud katsete soojustegurite erinevus tootja omadest on väiksem kui ilma. Puhverpaagiga tehtud katsete tulemusi on raske täpselt võrrelda ilma puhverpaagita tulemustega, sest tulemusi on liiga vähe, mida võrrelda ning süsteemide vaheliste pealevoolu temperatuuride väikeste muutuste tõttu. Siiski võib öelda, et tööaeg pikeneb paagi kasutamise tõttu ja seetõttu on ka parem COP.

VAT +12°C juures oli soojuspumba töö pikkuseks umbes 5-6 minutit. Ideaalis võiks ühe tsükli pikkus olla pikem, et oleks püsivam katseperiood ja oleks parem COPI hinnata. Lisaks sooviks välja tuua, et -22 °C juures on soojuspumba COP <1, ehk kütmine elektritenniga otse oleks mõistlikum.

Aastaste soojustegurite võrdlemiseks kasutati standardi järgi tehtud arvutusi ja IDA ICE simulatsiooniprogrammiga tehtud arvutusi. SCOP erines maksimaalselt 30 %, mis tuleneb hoones olevatest vabasoojustest. Lisaks on arvutustes kasutatud Eesti baasaasta kraadpäevade arv suurem kui külmal kliimal.

Standardi ja tootja deklareeritud SCOPi võrreldes võib öelda, et maskimaalne erinevus tulemuste vahel tuli 10 %. Selline erinevus võib olla tingitud mõõtmiste vigadest või arvutuste vigadest. Nende tulemuste põhjal on tootja deklareeritud andmed tõepärased ning pole üritatud tulemustega manipuleerida. Küll aga saab öelda, et kütetennita SCOPide kajastamine on tarbija eksitamine, kui toote komplektis on kaabel juhtautomaatika, sest soojuspumba tehnilistes andmetes pole kajastatud tausttarmisega mõõtetulemusi. Ilma küttekaablita meie kliimas soojuspumbad töötada ei saa.

Tootja enda antud SCOPide kontrollimiseks tehti bin arvutuse meetodil kordusarvutus tootja andmetega. Selgus, et deklareeritud SCOPid on esitatud tootja andmetes õigesti.

Energiatõhususe määrase ja tootja tulemuste vahe on 10 %, sest määrase järgi tehtud arvutustes kajastatakse koefitsendiga 10 pumpade ja ventilaatorite energiatarvet. Määrase valem kasutamine on õigustatud ning annab reaalsed tulemused SCOPi hindamiseks.

KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö eesmärk oli analüüsida tootja poolt deklareeritud soojuspumba soojustegureid arvutuslike soojusteguritega ning võrrelda standardi järgseid arvutusi energiatõhususe määruise järgi arvutatud tulemustega. Eesmärgi saavutamiseks viidi läbi mõõtmised Tallinna Tehnikaülikooli Mäepealse maja kliimakambris vastavalt standarditele EVS-EN14511 ja EVS-EN14825. Selleks teostati katsed kahe erineva soojuspumbaga - split ja monoblokk tüüpi soojuspumbaga. Mõlema soojuspumbaga viidi läbi katsed välisõhutemperatuuride -21, -15, -7, +2, +7 ja +12 °C juures kahel erineval temperatuurigraafikul. Katsete tulemused analüüsiti ning arvutati välja soojustegurid ja sesoonsed soojustegurid ning võrreldi neid tootja andmetega.

Magistritöö osana viidi läbi eramu aastane energiaarvutus simulatsiooniprogrammiga IDA ICE. Energiaarvutuste põhjal arvutati välja aastased soojustegurid hoone küttele ja sooja tarbevee valmistamiseks. Tulemusi võrreldi standardi järgi arvutatud SCOPidega, et hinnata, kuidas mõjutavad hoones tekkivad vabasoojused tulemusi. Võrreldi standardi järgse külma kliima ja Eesti baasaasta järgi arvutatud SCOPE. Lõputöö ühe osana arvutati soojuspumba aastased soojustegurid vastavalt energiatõhususe määruisele, et hinnata lihtsustatud arvutusmetoodika tõepärasust standardi tulemustega.

Soojuspumba katsetest nähtus, et seadmetel on püsiv elektritarbimine 0,8-0,9 A. Tegemist oli soojuspumba välisosa kesta põhjas jooksva küttegaabli elektritarbega, millel puudus juhtautomaatika. Püsiv elektritarve mõjutab väga suurel määruale COPE ning kui selline püsiv umbes 200 W võimsus maha arvestada, siis tulid katselised soojustegurid väga lähedal tootja deklareeritud andmetele. Selle põhjal saab teha järelduse, et tootja ei ole oma andmetes kajastanud elektritenni kasutamist. Aastaste sesoonsete soojustegurite tulemused tulid ligilähedased tootja andmetele. Samuti saab öelda, et energiatõhususe määruise järgi arvutatud tulemused on võrreldavad tootja andmetega ning määruise valemi kasutamine on põhjendatud.

IDA ICE aastase energiaarvutuse põhjal arvutatud aastased soojustegurid on madalamad kui standardi järgi arvutatud tulemused. Üheks põhjuseks võib lugeda, et simulatsioonis kasutatud Eesti baasaasta kliima on soojem kui standardi järgne külm kliima ning hoones olevad vabasoojuseid mõjuvad SCOPile negatiivselt.

Ettepanekud edasisteks mõõtmisteks ja uuringuteks:

- Teha kontrollmõõtmised ilma küttegaablita.

- Teha välimõõtmised soojuspumbaga, et saada üldine pilt, muudest teguritest, mis võivad soojuspumba COPi mõjutada.

SUMMARY

The aim of this master's thesis was to analyze the heat factors of the heat pump declared by the manufacturer with the calculated heat factors and to compare the calculations according to the standard with the results calculated according to the energy efficiency regulation. To achieve this goal, measurements were performed in the climate chamber of the Mäepealse building of Tallinn University of Technology in accordance with the standards EVS-EN14511 and EVS-EN14825. For this purpose, experiments were performed with two different heat pumps - a split and a monoblock type heat pump. Both heat pumps were tested at ambient temperatures of -21, -15, -7, +2, +7 and +12 °C on two different temperature curves. The test results were analyzed and the heat and seasonal heat factors were calculated and compared with the manufacturer's data.

As part of the master's thesis, the annual energy calculation of a private house was performed with the simulation program IDA ICE. Based on the energy calculations, seasonal coefficients of performance for the heating of the building and the production of domestic hot water were calculated. The results were compared with SCOPs calculated according to the standard to assess how the free heat generated in the building affects the results. The SCOPs calculated according to the standard cold climate and the Estonian base year were compared. As part of the thesis, the annual heat factors of the heat pump were calculated according to the Energy Efficiency Regulation to assess the veracity of the simplified calculation methodology with standard results.

The tests of the heat pump showed that the devices have a constant electricity consumption of 0.8-0.9 A. This was the power consumption of the heating cable running at the bottom of the outer part of the heat pump, which did not have control automation. The COP was very much affected by the constant power consumption, and if this constant power of around 200 W was deducted, the experimental heat factors came very close to the data declared by the manufacturer. On this basis, it can be concluded that the manufacturer has not reflected the use of an electric pit in its data. The results of the annual seasonal heat factors were close to the manufacturer's data. It can also be said that the results calculated according to the Energy Efficiency Regulation are comparable with the manufacturer's data and the use of the Regulation formula is justified.

The annual heat factors calculated on the basis of the IDA ICE annual energy calculation are lower than the results calculated according to the standard. One of the reasons is that the Estonian base year climate used in the simulation is warmer than the standard cold climate and the free heat in the building has a negative effect on SCOP.

Suggestions for further measurements and studies:

- Perform control measurements without the heating cable.
- Take field measurements with the heat pump to get an overall picture of other factors that may affect the COP of the heat pump.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Eesti Soojuspumba Liit, „Soojuspumba tööpõhimõte“, [Online]
<http://www.soojuspumbaliit.ee/Soojuspumba-toopohimote>. Kasutatud: 1.aprill 2022
- [2] R.O'Hegarty, O.Kinnane, D.Lennon, S.Colclough. (2021). „Air-to-water heat pumps: Review and analysis of the performance gap between in-use and product rated performance“, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111887
- [3] Kliimamarket, „Soojuspumba tööpõhimõte“, [Online]
<https://kliimamarket.ee/soojuspumba-toopohimote> Kasutatud: 10.aprill 2022
- [4] Heinar Nurste, „Energiapoliitika ja soojuspumbad“, [Online]
<https://keskkonnatehnika.ee/energiapoliitika-ja-soojuspumbad/>. Kasutatud: 16.mai 2022
- [5] NIBE AB Sweden, „Kasutusjuhend NIBE F1345“, [Online]
https://www.kliimaseade.ee/wp-content/uploads/2013/12/F1345_kasutusjuhend.pdf, lk.15. Kasutatud: 2.mai 2022
- [6] Nordic Council of Ministers, „Nordsyn study on air-to-air heat pumps in humid Nordic climate“, [Online] <https://norden.diva-portal.org/smash/get/diva2:1312951/FULLTEXT01.pdf>. Kasutatud: 10.jaanuar 2022
- [7] „Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps, with electrically driven compressors, for space heating and cooling - Testing and rating at part load conditions and calculation of seasonal performance“, EVS-EN 14825:2018
- [8] Riigi Teataja, Hoone energiatõhususe arvutamise meetodika (kehtiv), [Online]
<https://www.riigiteataja.ee/akt/107072020012>. Kasutatud: 15.jaanuar 2022
- [9] Ait-Nord, „Mis vahe on monoblokk ja split tüüpi soojuspumbal?, [Online]
<https://ait-nord.ee/alpha-%20akadeemia/>. Kasutatud: 15.september 2021
- [10] Commercial Air Conditioner Division Midea Group, ' „M-Thermal A Series Split Manual“, juhend

[11] Tallinna Tehnikaülikooli Ehitusteaduskond, „Kliimakamber energiatõhusate hoonete piirdetarindite ehitusfüüsikalisteks uuringuteks ning hoonete energiatõhususe ja sisekliima uuringuteks“, juhend

[12] Commercial Air Conditioner Division Midea Group, M-Thermal Heat Pumps Mono/Split, juhend, [Online] https://ultrasale.ru/sites/default/files/manual_files/manual_14169.pdf. Kasutatud: 10.märts 2022

[13] Equa Simulation AB, Getting started with parametric-runs in IDA ICE, juhend

[14] T. Kalamees ja J. Kurnitski, „Estonian test reference year for energy calculations,“ Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Engineering, vol. 12, no. 1, pp. 40-58, 2006

[15] Bernd Klein, „Independent testing of heat pumps is needed for reliable COP“, [Online] <https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/independent-testing-of-heat-pumps-is-needed-for-reliable-cop>. Kasutatud: 13.märts 2022

[16] Targo Kalamees, „Õhupidavuse hindamine ja tõendamine/mõõtmise – kas peaks olema kohustuslik?“, [Online] <https://docplayer.ee/167872415-Kas-peaks-olema-kohustuslik.html>. Kasutatud: 1.veebruar 2022

[17] EQUA Simulation AB, IDA Indoor Climate and Energy (version 4.8 SP2, Expert Edition, 2020), [Online] <https://www.equa.se/en/ida-ice>. Kasutatud: 17. mai 2021

[18] Onset Computer Corporation, HOBO 4-Channel Analog Data Logger, [Online] <https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/ux120-006m/>. Kasutatud: 9.september 2021

[19] Onset Computer Corporation, Air/Water/Soil Temperature Sensor, [Online] <https://www.onsetcomp.com/products/sensors/tmcx-hd/>. Kasutatud: 9.september 2021

[20] Onset Computer Corporation, Split-core AC current Sensor, [Online] <https://www.onsetcomp.com/products/sensors/ctv-x/>. Kasutatud: 9.september 2021

[21] Commercial Air Conditioner Division Midea Group, "M thermal Mono Series Manual", juhend

[22] Loigu, E., Kõiv, T.-A. Eesti kraadpäevad, [Online]
https://energiatalgud.ee/sites/default/files/images_sala/9/93/Loigu%2C_E.%2C_K%2C_B5iv%2C_A._Eesti_kraadp%C3%A4evad.pdf. Kasutatud: 20.september 2021

[23] „Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps for space heating and cooling and process chillers, with electrically driven compressors“, EVS-EN 14511-1:2018, Eesti standardikeskus, Eesti, 2018

[24] „Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps with electrically driven compressors for space heating and cooling - Part 2: Test conditions“, EN 14511-2, Eesti standardikeskus, Eesti, 2013

[25] „Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps with electrically driven compressors for space heating and cooling - Part 3: Test methods“, EN 14511-3, Eesti standardikeskus, Eesti, 2013

[26] „Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps for space heating and cooling and process chillers, with electrically driven compressors - Part 4: Requirements“, EVS-EN 14511-4:2018, Eesti standardikeskus, Eesti, 2018

[27] J. Kurnitski, J. Kesti, R. Simson, J. Fadajev, "Measured and simulated energy performance of OLK NZEB with heat pump and energy piles in Hämeenlinna", [Online]
https://www.academia.edu/54901210/Measured_and_simulated_energy_performance_of_OLK_NZEB_with_heat_pump_and_energy_piles_in_H%C3%A4meenlinna.
Kasutatud: 13.märts 2022

[28] K. Tennokese, T.-A. Kõiv, A. Mikola, V. Vares, "The Application of the Ground Source and Air-to-Water Heat Pumps in Cold Climate Areas", [Online]
https://www.researchgate.net/publication/272876563_The_Application_of_the_Ground_Source_and_Air-to-Water_Heat_Pumps_in_Cold_Climate_Areas. Kasutatud: 13.märts 2022

[29] S. Huangab, W. Zuob, H. Lu, C. Lianga, X.Zhang, "Performance comparison of a heating tower heat pump and an air-source heat pump: A comprehensive modeling and simulation study", [Online]

https://www.colorado.edu/lab/sbs/sites/default/files/attached-files/j28_performance_comparison_of_a_heating_tower_heat_pump_and_an_air-source_heat_pump_a_comprehensive_modeling_and_simulation_study_0.pdf .
Kasutatud: 13.märts 2022

[30] N. Hewitt, M. JunHuang, "Defrost cycle performance for a circular shape evaporator air source heat pump", [Online] https://www.researchgate.net/publication/223210150_Defrost_cycle_performance_for_a_circular_shape_evaporator_air_source_heat_pump. Kasutatud: 13.märts 2022

[31] O Hegarty R, Kinnane O, Lennon D, Colclough S. The performance potential of domestic heat pumps in a temperate oceanic climate. In: Littlewood J, Howlett RJ, Jain LC, editors. Sustain. Energy build. 2020. Singapore: Springer; 2021. p. 29–41.

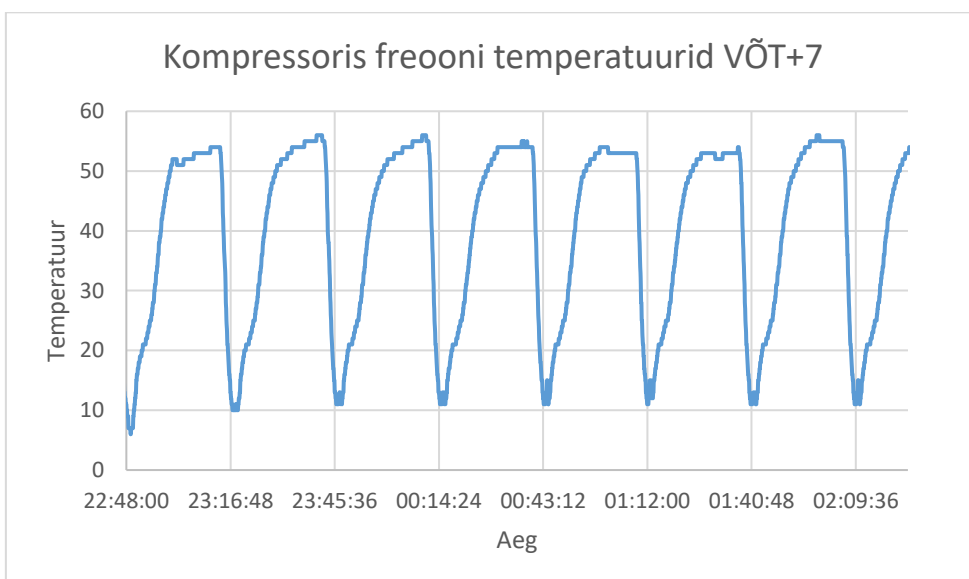
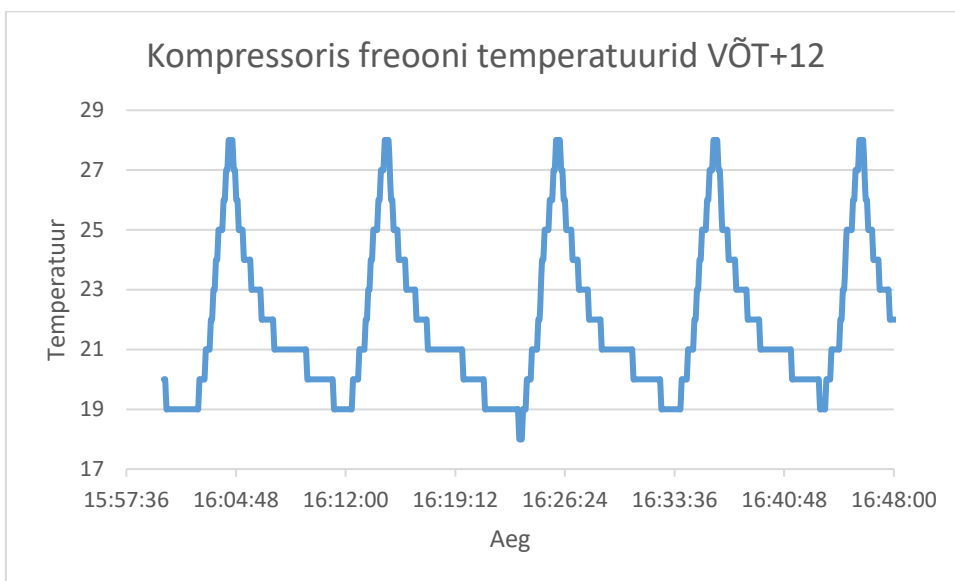
[32] Carroll P, Chesser M, Lyons P. Air Source Heat Pumps field studies: a systematic literature review. *Renew Sustain Energy Rev* 2020;134:110275. [Online] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120305621>. Kasutatud: 13.märts 2022

[33] Miara M, Gunther D, Kramer T, Oltersdorf T, Wapler J. Heat pump efficiency - analysis and evaluation of heat pump efficiency in real-life conditions. Freiburg, Germany: Fraunhofer - Institut für Solare Energiesysteme (ISE); 2011. [Online] <https://www.semanticscholar.org/paper/Heat-Pump-Efficiency-Analysis-and-Evaluation-of-in-Miara-Kramer/31ecdbfa6f8e5ba41935682366fe84480217d64f>. Kasutatud: 13.märts 2022

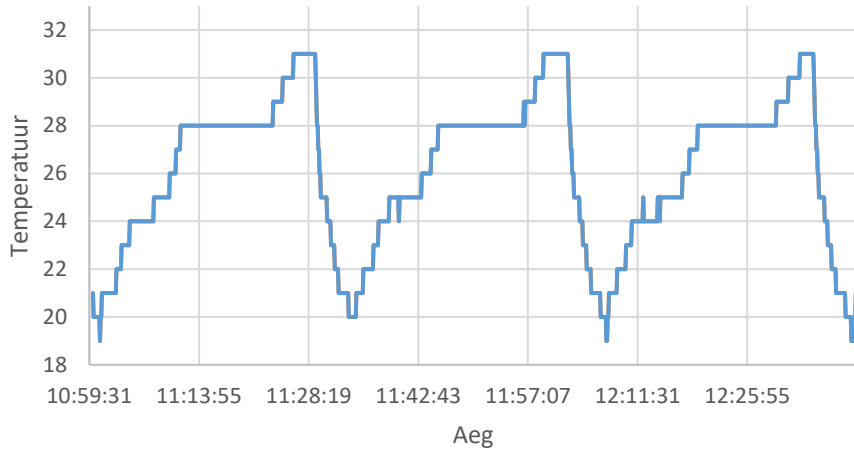
[34] Deng J, Wei Q, Liang M, He S, Zhang H. Does heat pumps perform energy efficiently as we expected: field tests and evaluations on various kinds of heat pump systems for space heating. *Energy Build* 2019;182:172–86. [Online] https://www.researchgate.net/publication/335995591_Air-to-air_heat_pump_review_of_recent_advances_and_future_potential. Kasutatud: 13.märts 2022

LISAD

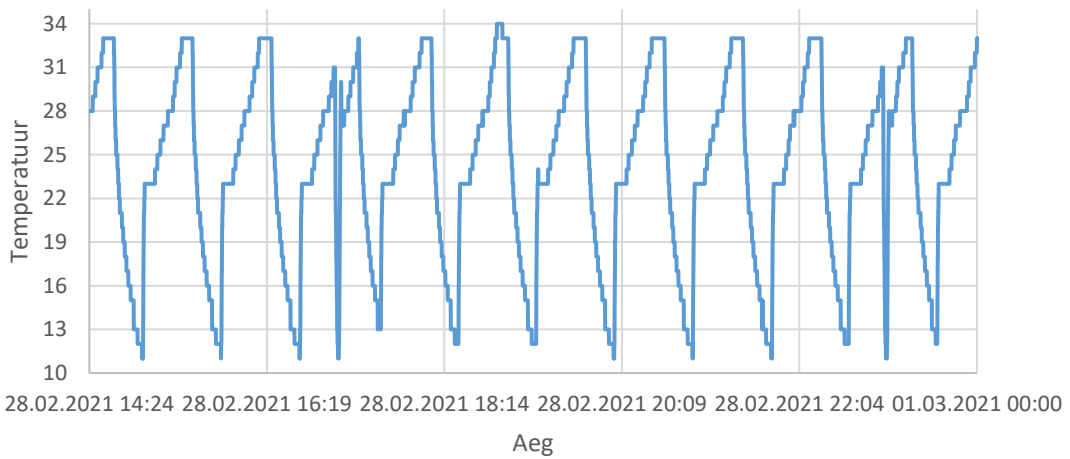
Lisa 1. Freoni temperatuurid.



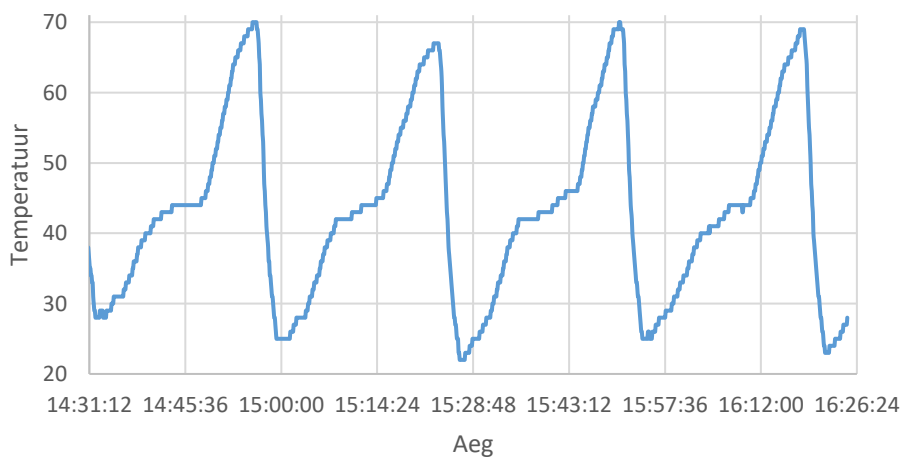
Kompressoris freooni temperatuurid VÕT+2

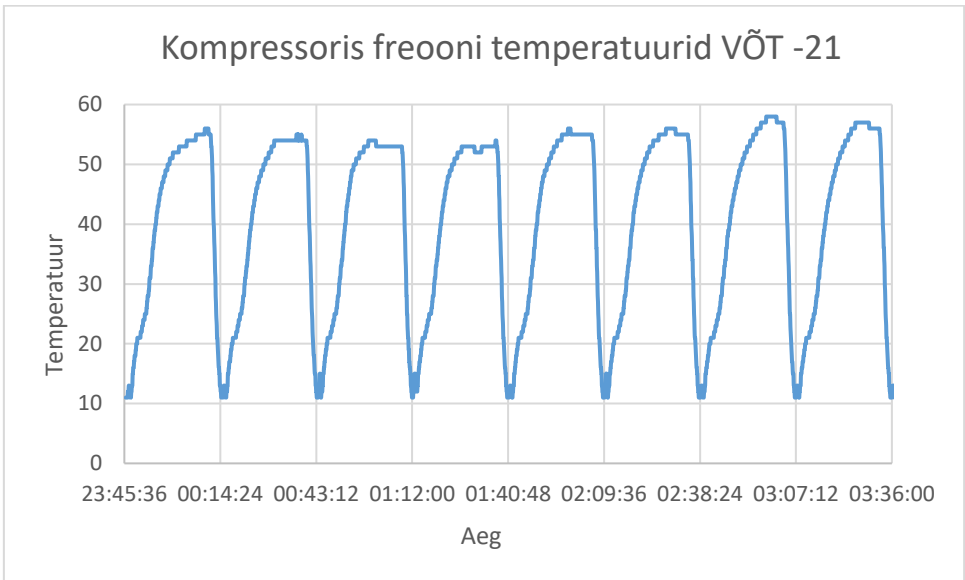
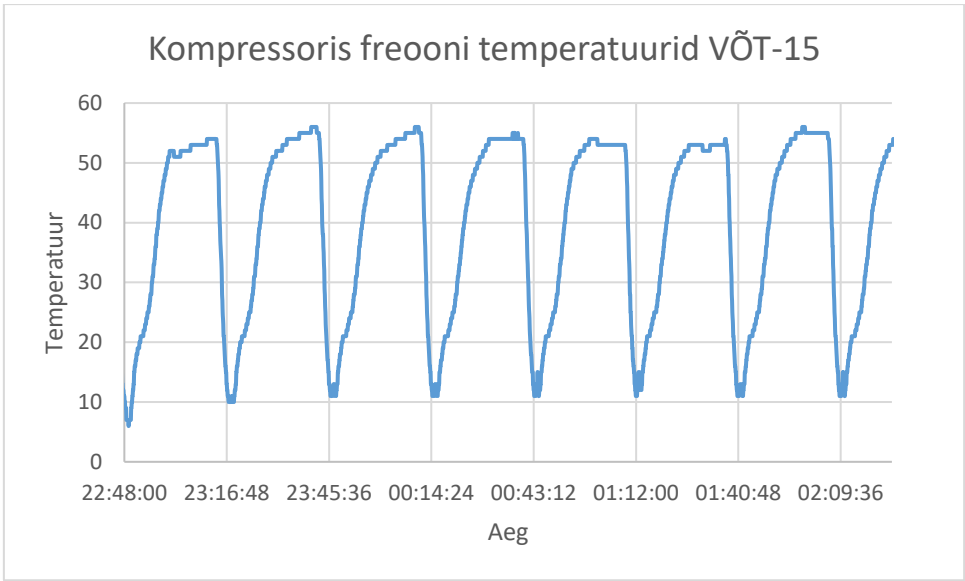


Kompressorist väljub freooni temperatuur VÕT+2 (lisakatse)



Kompressoris freooni temperatuurid VÕT-7



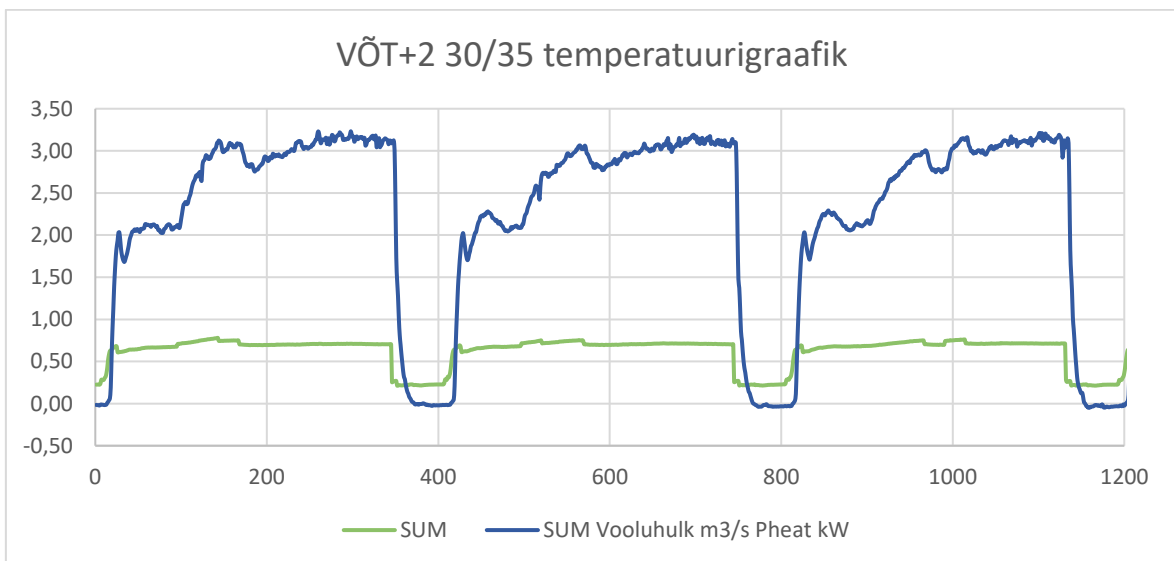
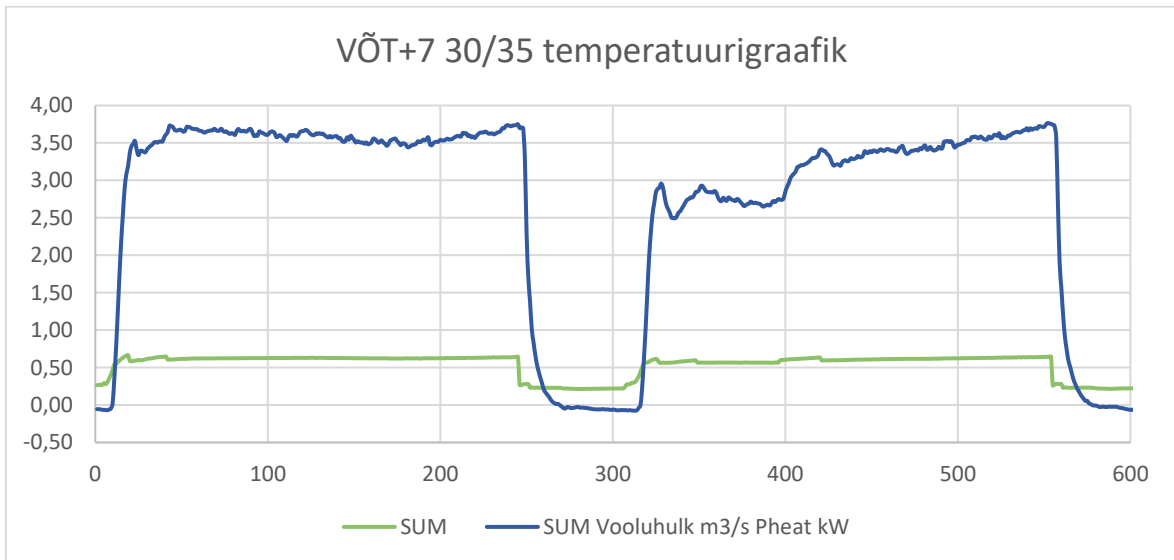
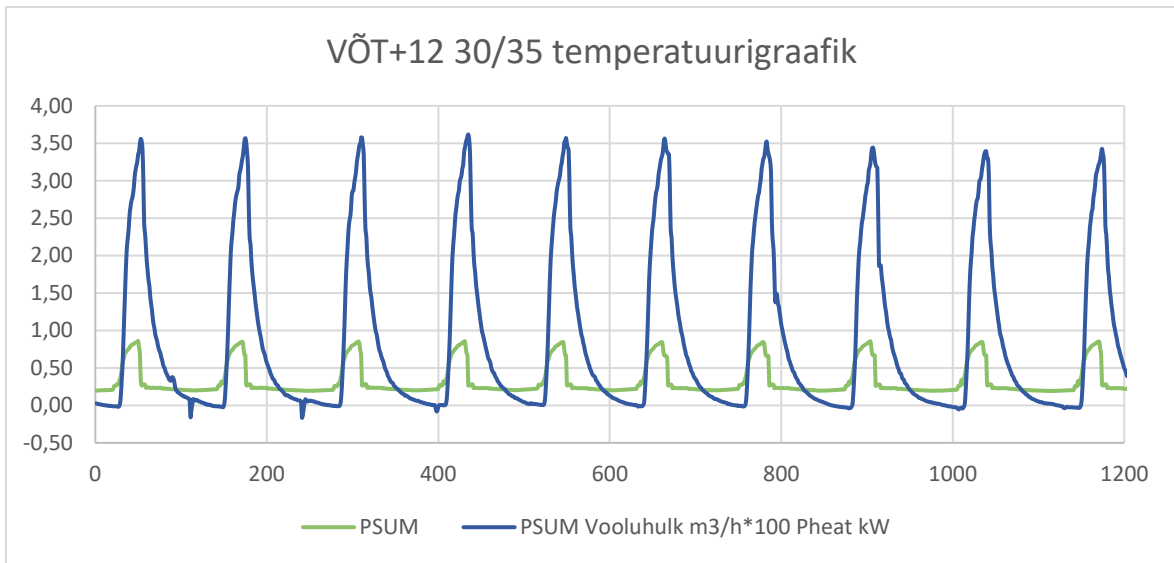


Lisa 2. Katse skeem

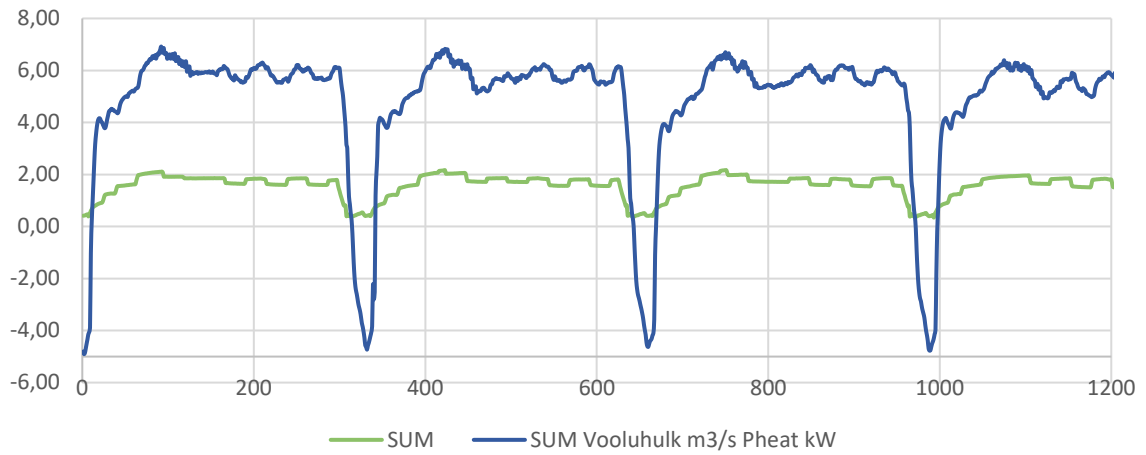




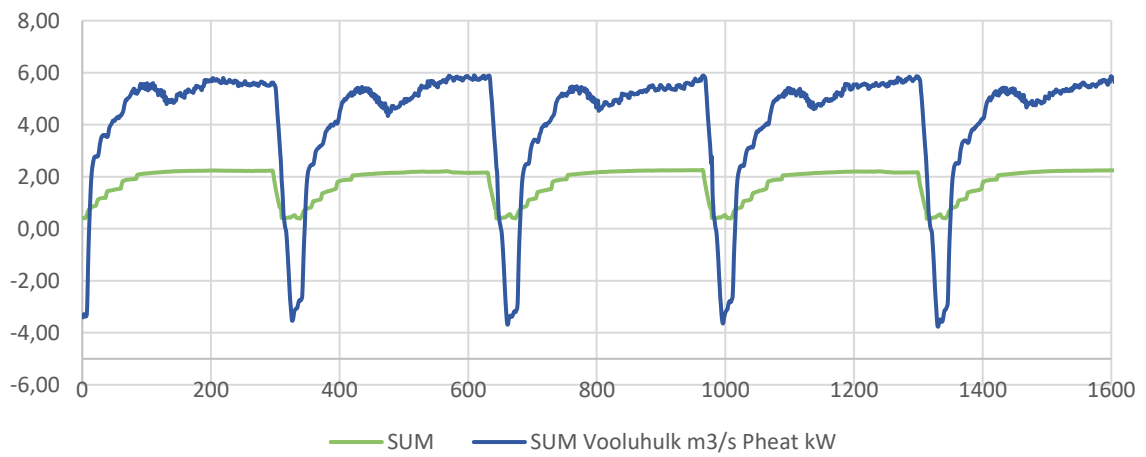
Lisa 3. 30/35 temperatuurigraafiku juures tulemused



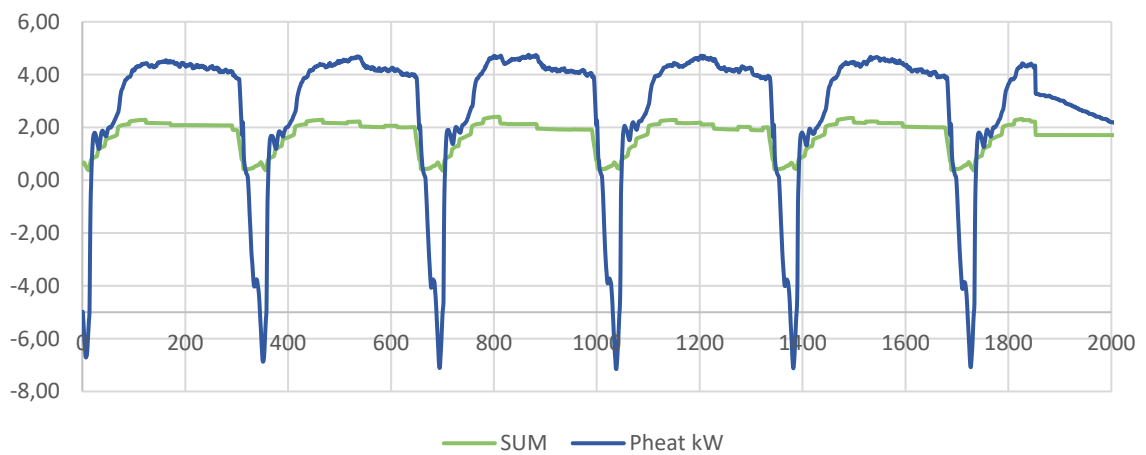
VÖT-7 30/35 temperatuurigraafik



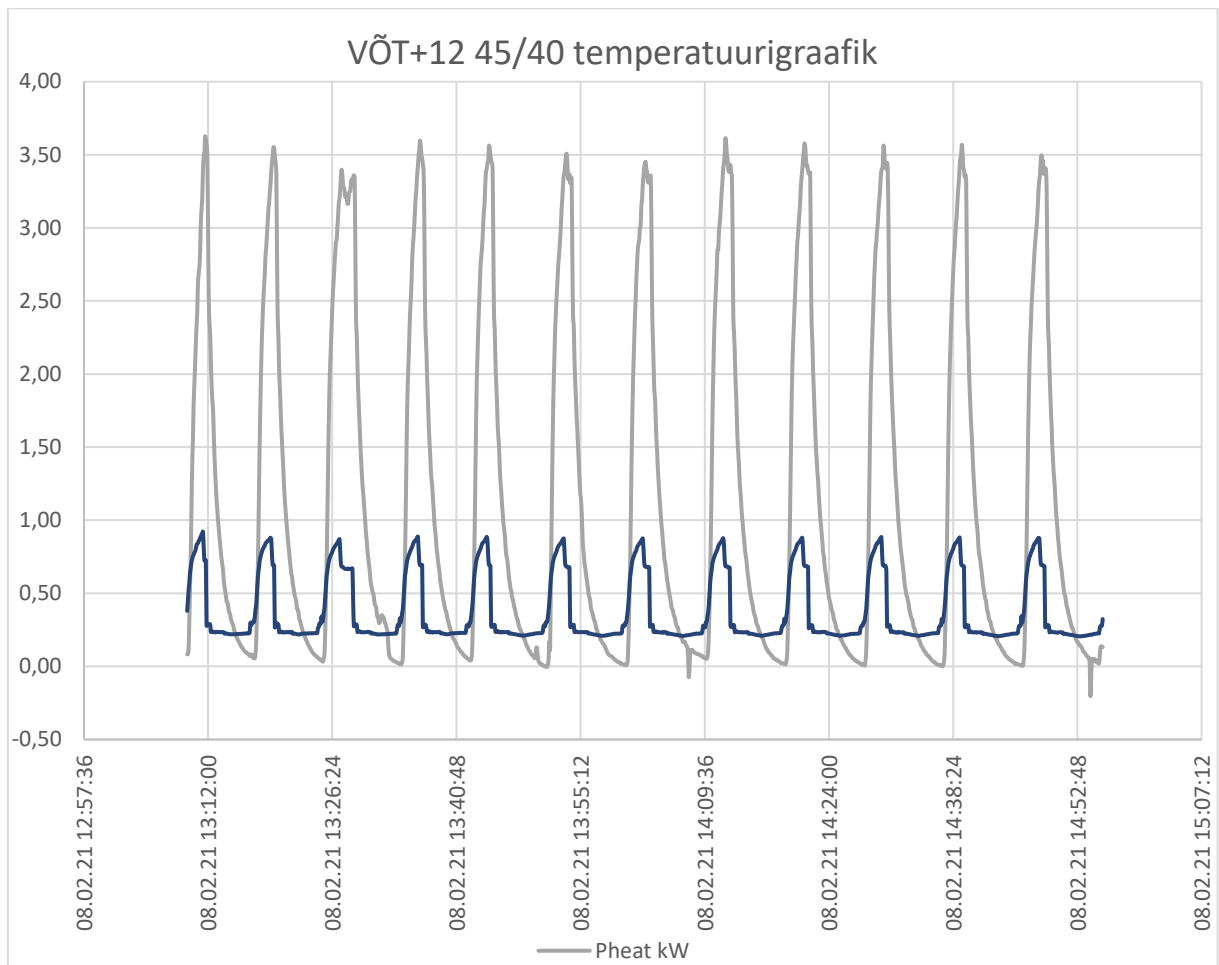
VÖT-15 30/35 temperatuurigraafik

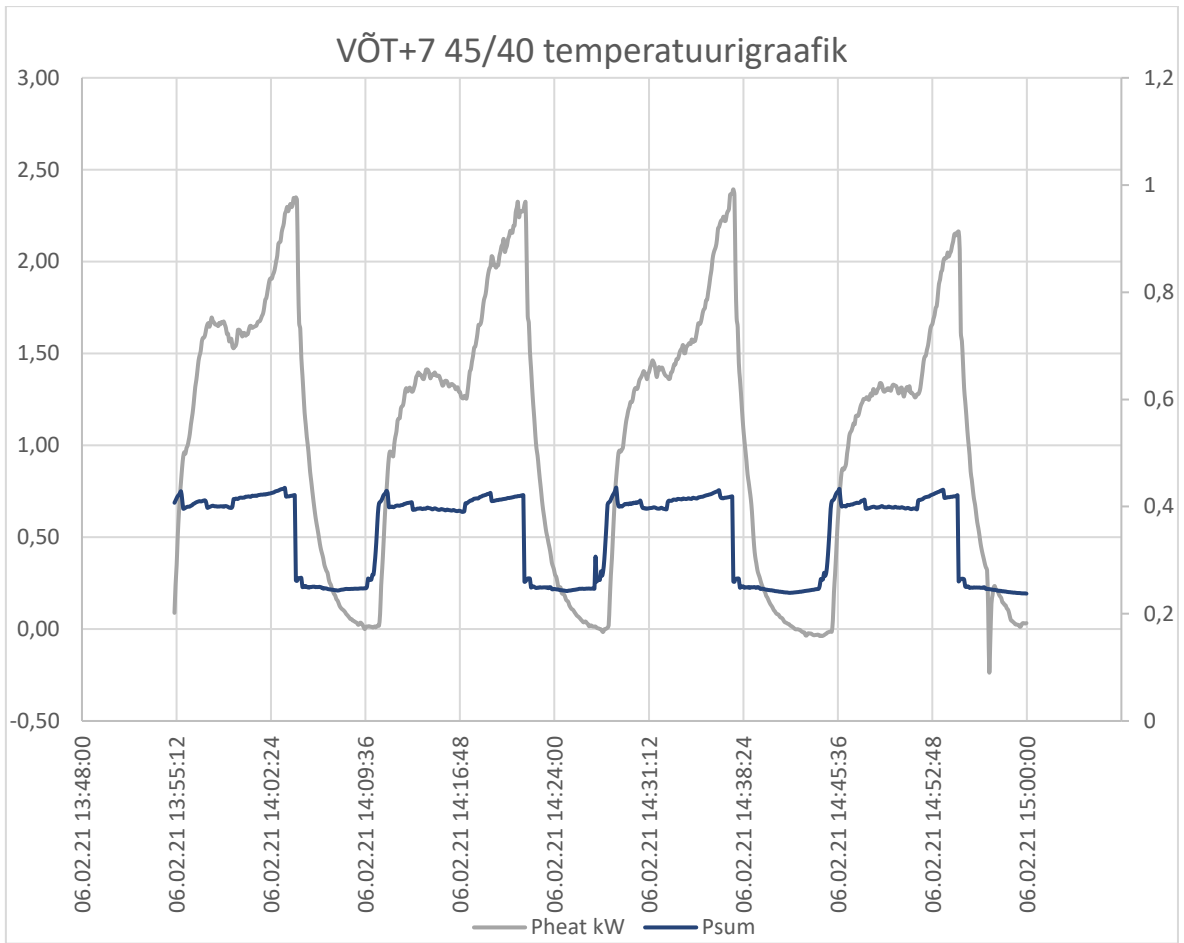


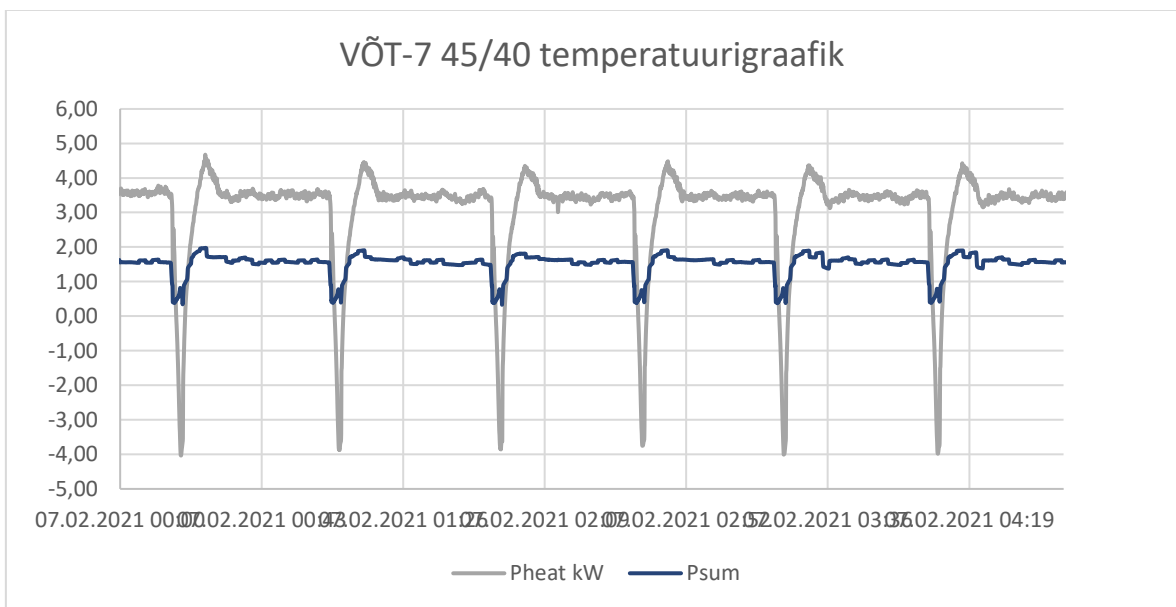
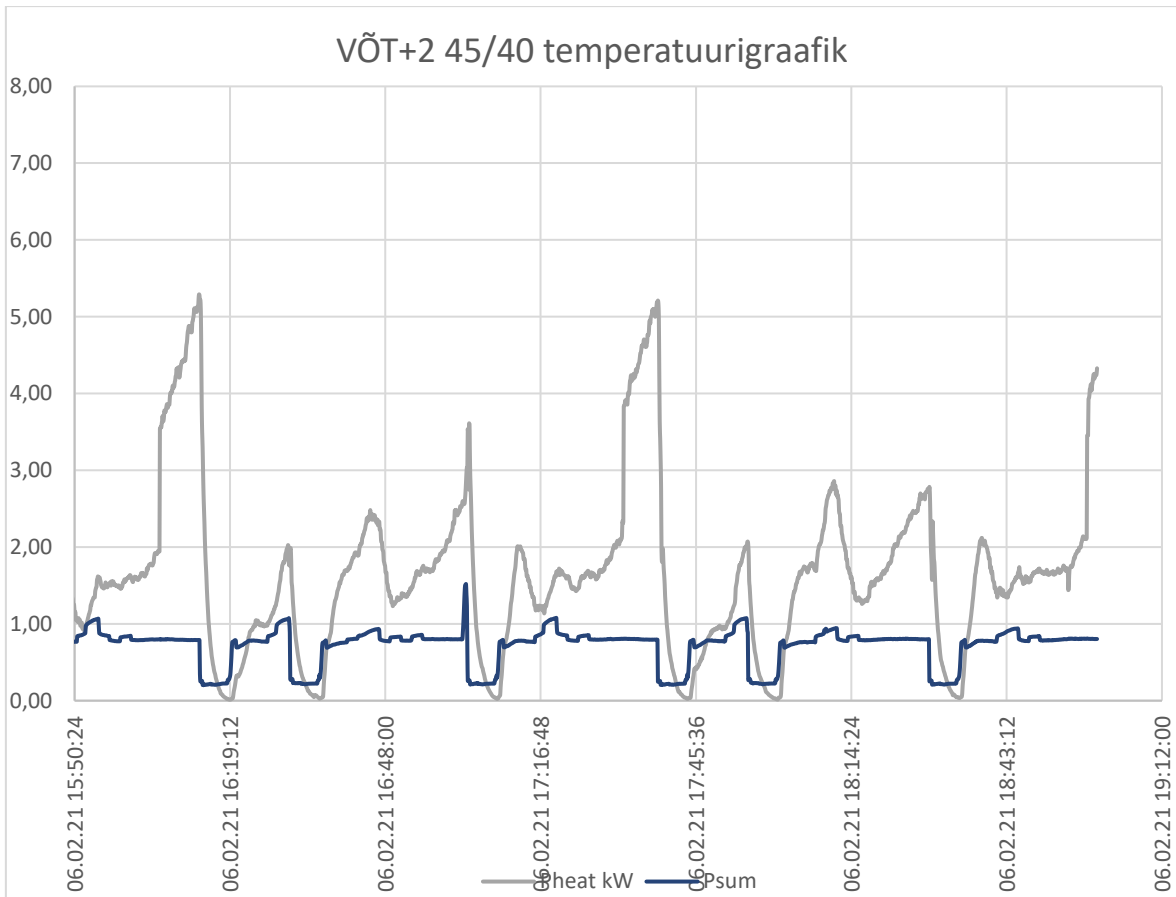
VÖT+21 30/35 temperatuurigraafik

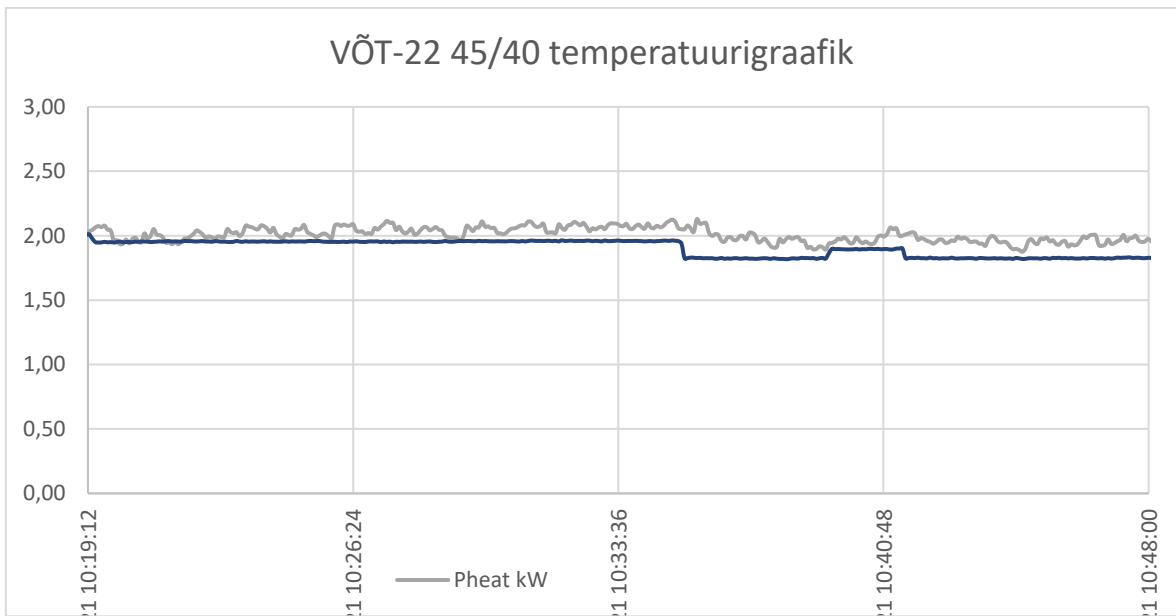
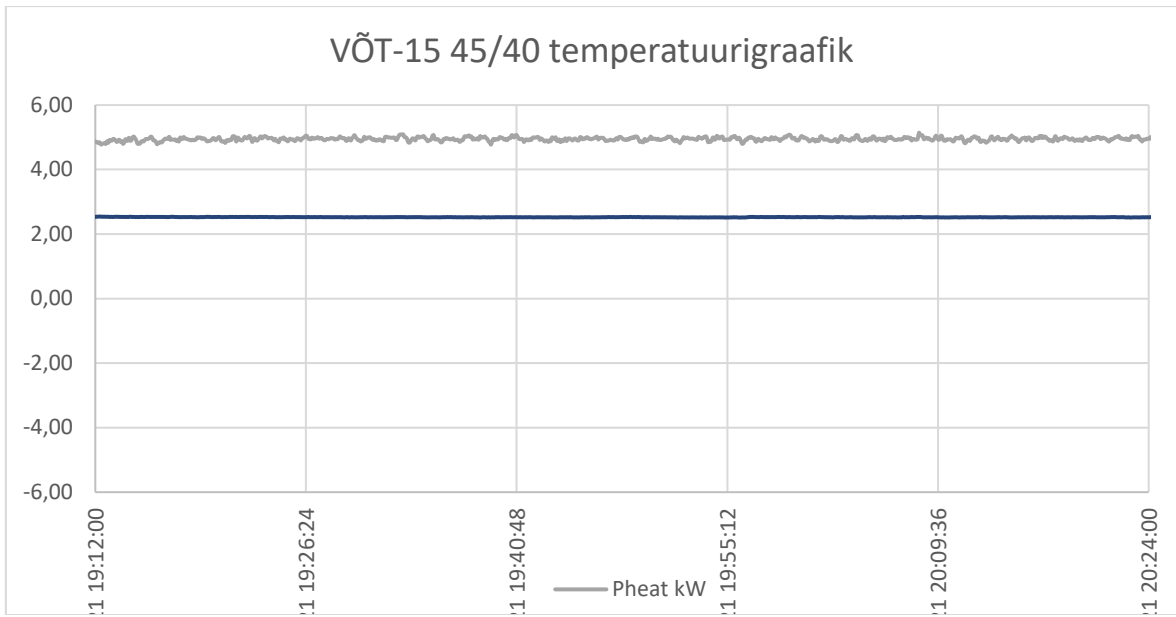


Lisa 4. Split 45/40 tulemused



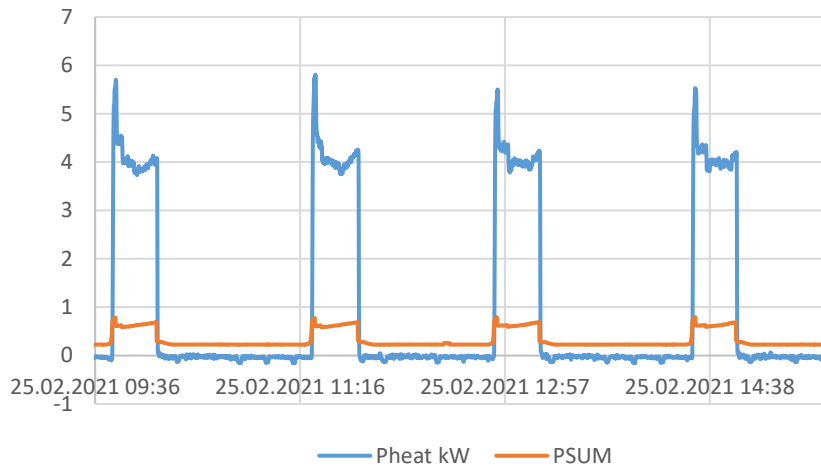




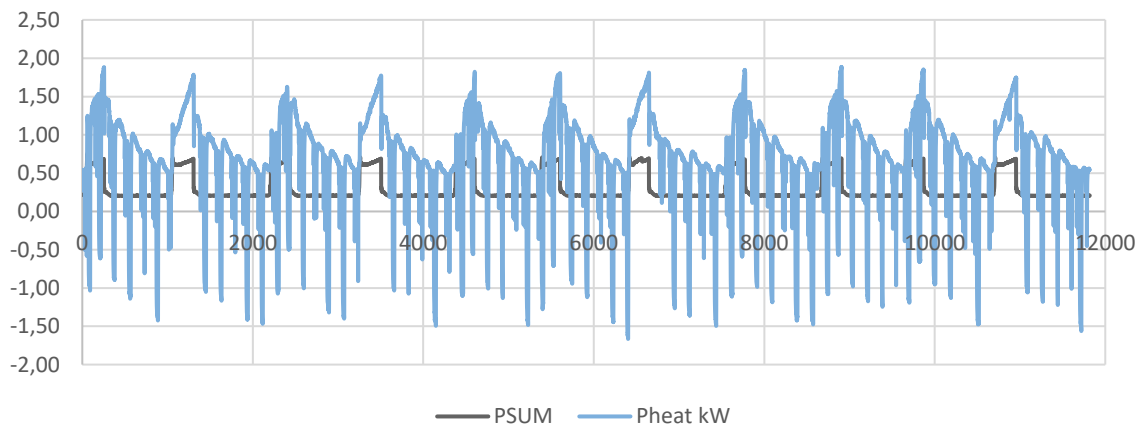


Lisa 6. Mono 30/35 tulemused

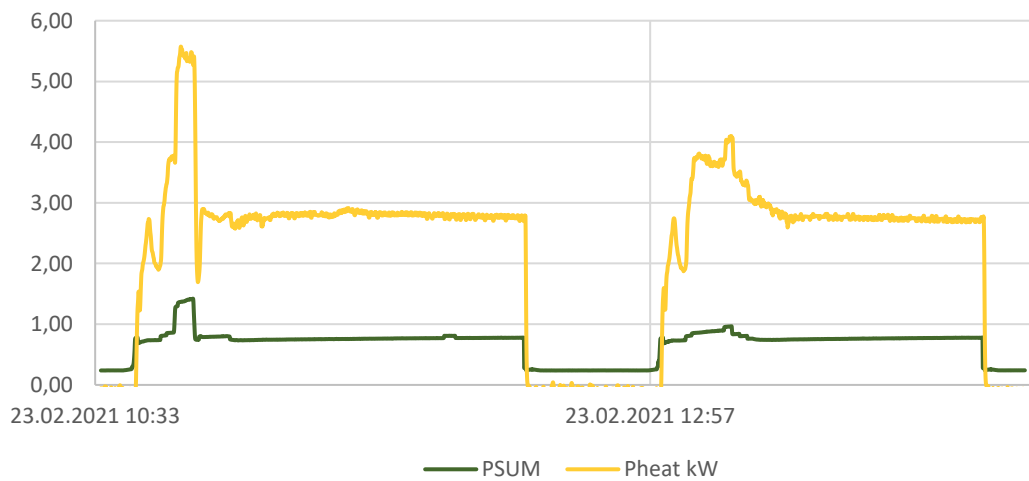
VÕT+12 30/35 temperatuurigrافیک (MONO)



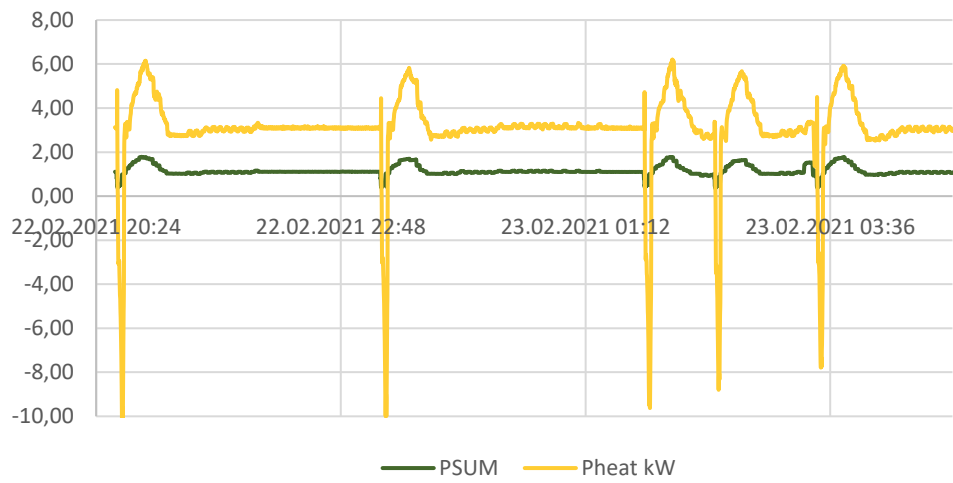
VÕT+7 30/35 temperatuurigrافیک (MONO)



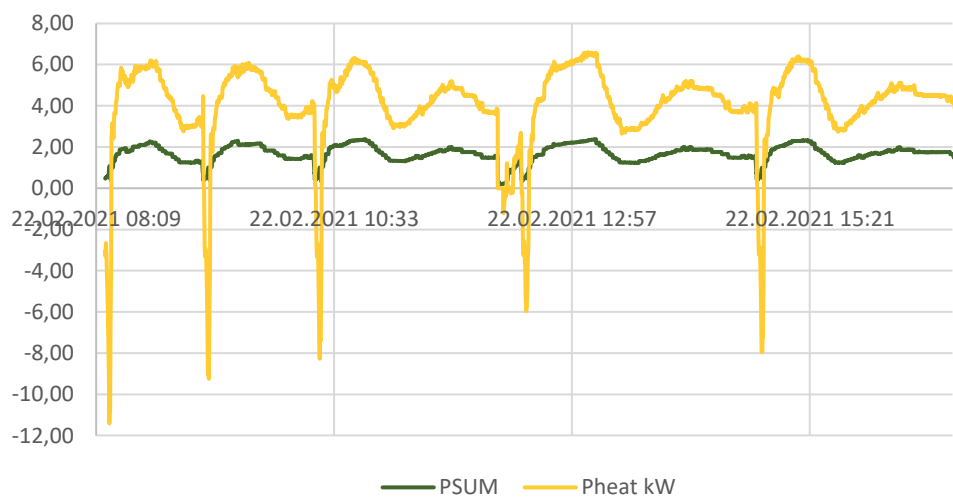
VÕT+2 30/35 temperatuurigrافیک (MONO)



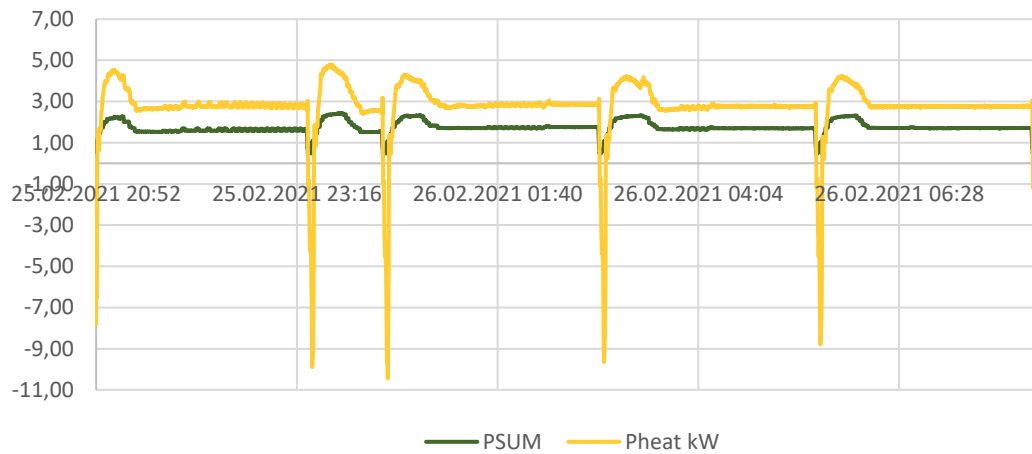
VÕT-7 30/35 temperatuurigraafik (MONO)



VÕT-15 30/35 temperatuurigraafik (MONO)

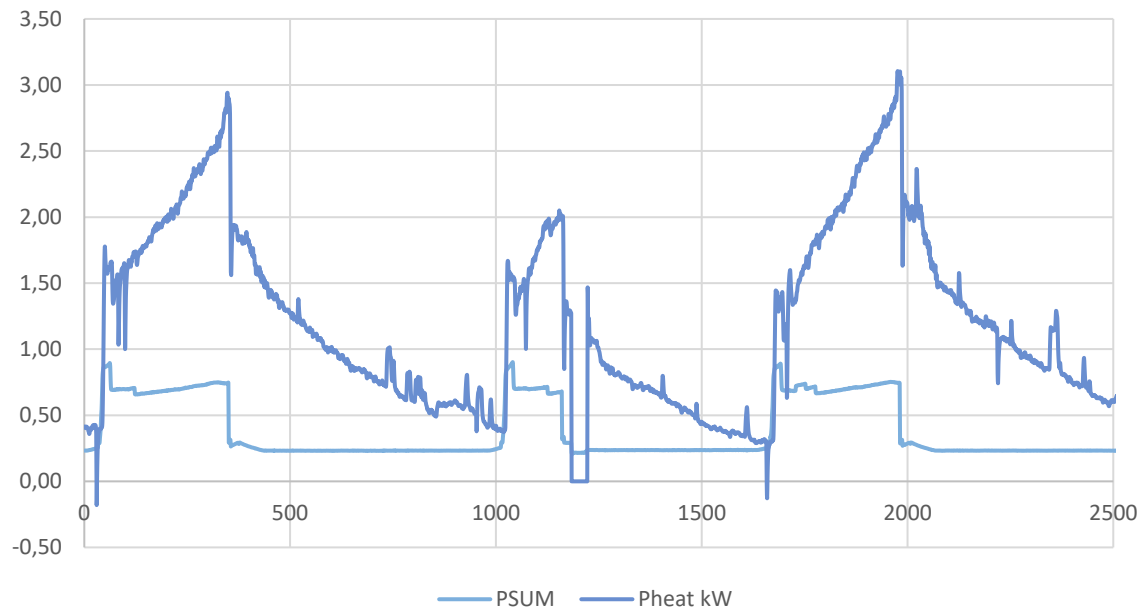


VÕT-21 30/35 temperatuurigraafik (MONO)

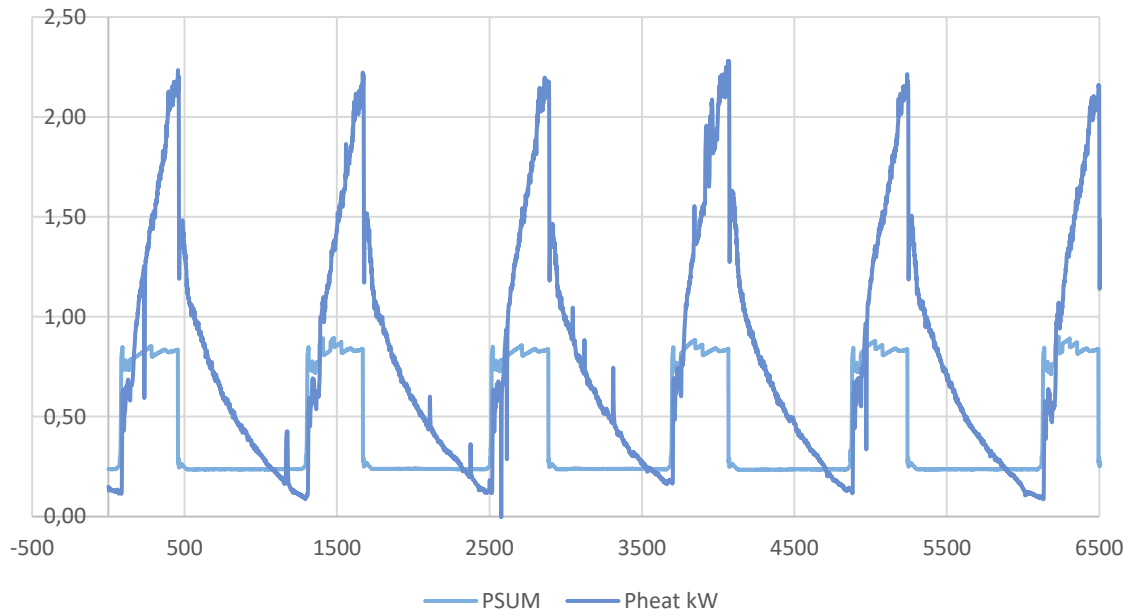


Lisa 6. Mono 55/47 katse tulemused

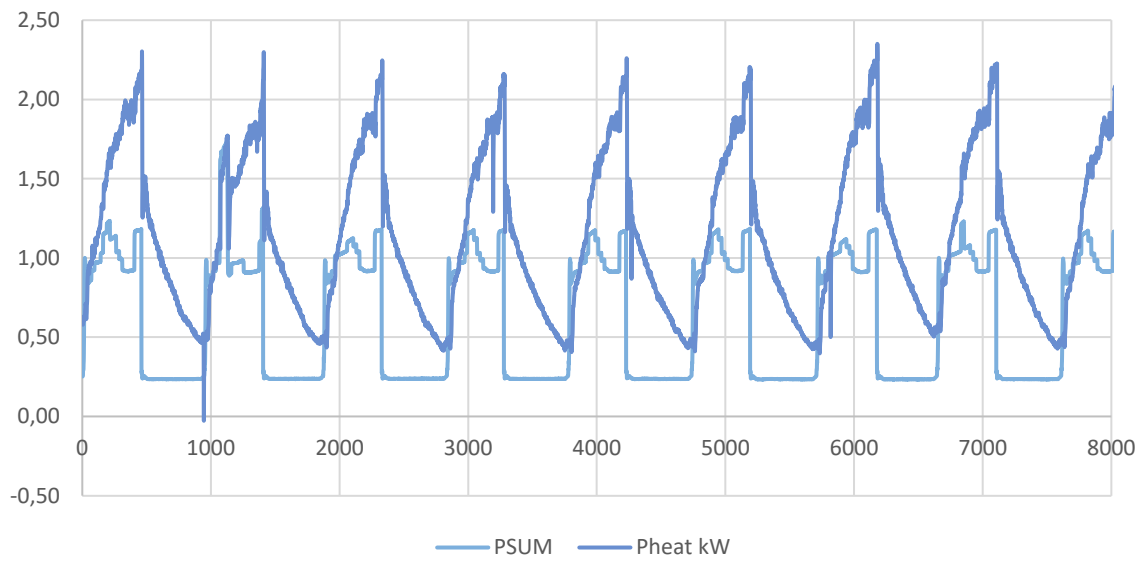
VÕT+12 55/47 temperatuurigraafik



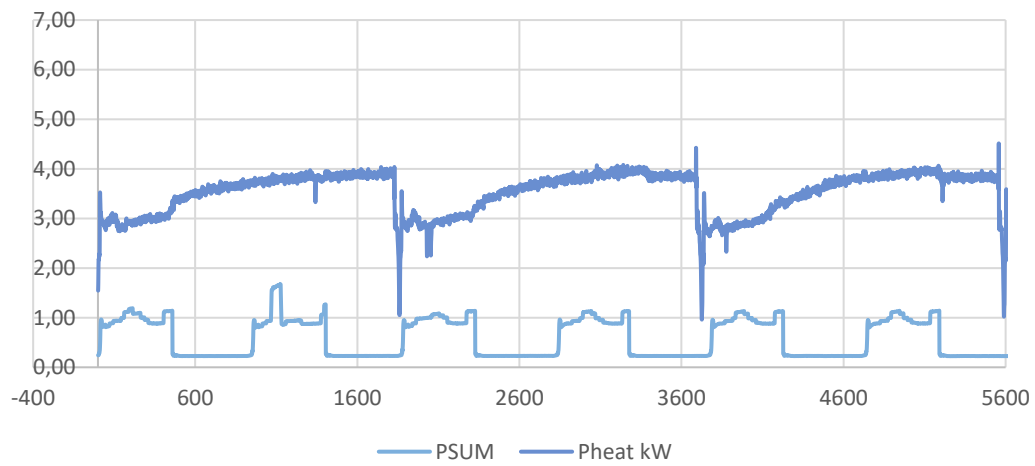
VÖT+7 55/47 temperatuurigraafik



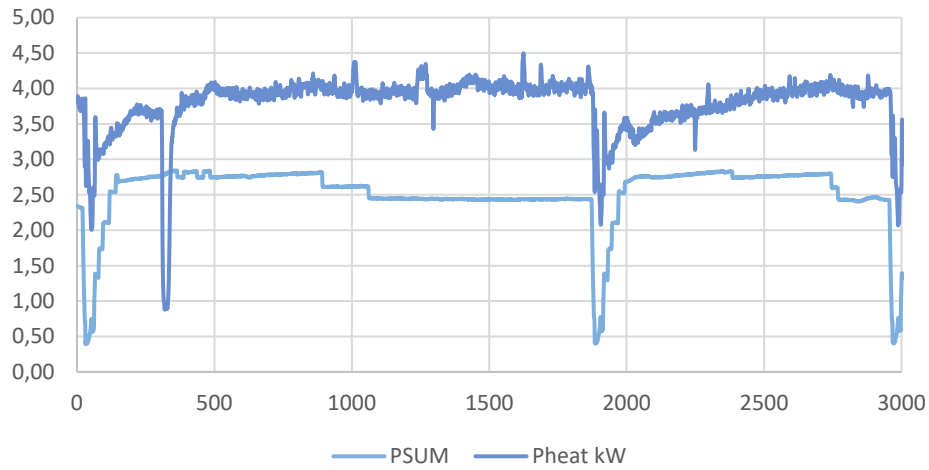
VÖT+2 55/47 temperatuurigraafik



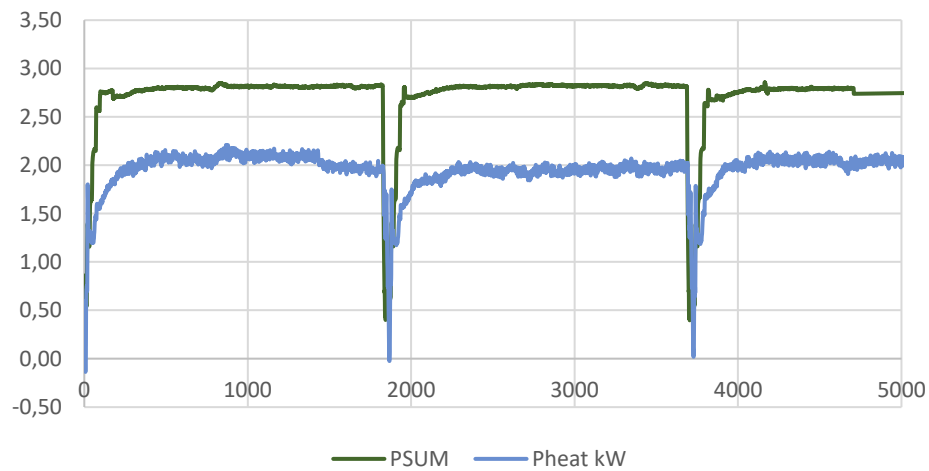
VÖT-7 55/47 temperatuurigraafik



VÖT-15 55/47 temperatuurigraafik



VÖT-21 55/47 temperatuurigraafik



Lisa 7. "Climate bin" Kliima bin arvude joonis erinevatele kliimatingimustele SCOPi arvutamiseks

