



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**HALLVEE SOOJUSTAGASTUSE KOHTSEADMETE
TEHNOLOOGIATE ÜLEVAADE
HORISONTAALPAIGALDUSEGA DUŠI
SOOJUSTAGASTI UURINGUGA**

**A REVIEW OF LOCALIZED GREY WATER HEAT
RECOVERY TECHNOLOGIES WITH A CASE STUDY OF A
HORIZONTAL SHOWER HEAT RECOVERY UNIT**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Karl Sachris

Üliõpilaskood: 144572 EAKI

Juhendaja: Kalle Kuusk, vanemteadur

Kaasjuhendaja: Karin Pachel, professor

Tallinn 2020

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.

25. mai 2020

Autor: Karl Sachris
/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

25 mai 2020

Juhendaja: Kalle Kuusk
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

25 mai 2020

Kaitsmiskomisjoni esimees
/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina _____ (autori nimi) (sünnikuupäev:)

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

_____ ,

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on

_____ ,

(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.

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

_____ (allkiri)

_____ (kuupäev)

Ehituse ja arhitektuuri Instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Karl Sachris, 144572 EAKI
Õppekava, peeriala: EAKI02/09 – Hoonete sisekliima ja veetehnika, veetehnika
Juhendaja(d): Vanemteadur, Kalle Kuusk, 6202402
Professor, uurimisrühma juht ja programmijuht
(keskkonnatehnika ja juhtimine), Karin Pachel, 6202504

Lõputöö teema:

Hallvee soojustagastuse kohtseadmete tehnoloogiate ülevaade horisontaalpaigaldusega duši soojustagasti uuringuga

A review of localized grey water heat recovery technologies with a case study of a horizontal shower heat recovery unit

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Soojustagastite tehnoloogiate toimimise terviklikuks mõistmiseks tekitada ülevaade soojavesüsteemide toimimisest ning duši tarbimisdünaamikast.
2. Anda ülevaade eksisteerivatest hallvee soojustagastuse tehnoloogiatest ning seonduvast teaduskirjandusest.
3. Viia läbi konkreetse tootega objekti- ja laborimõõtmised mitte-tasakaalustatud voolu tingimustes ning hinnata lahenduse tasuvust.
4. Vastavalt teaduskirjanduse analüüsile ning mõõtmistulemustele luua seisukoht hallvee soojustagastustehnoloogia kohtseadmete tasuvuse suhtes.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Objektimõõtmiste eksperimendi kavandamine ja paigaldamine	01.04.2019
2.	Alusmaterjalide kogumine töö teooriaosaks	01.09.2019
3.	Töö struktuuri koostamine	01.10.2019
4.	Laborimõõtmiste stendi kavandamine ning ehitamine	01.12.2019
5.	Töö teooriaosa mustandi koostamine	01.02.2019
6.	Töö praktilise osa koostamine (sh mõõteandmete töötlus)	01.04.2019
7.	Töö toimetamine, vormistamine, puuduste eemaldamine	11.05.2019

Töö keel: Eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: 25 mai 2020

Üliõpilane: Karl Sachris ".....".....201....a
/allkiri/

Juhendaja: Kalle Kuusk ".....".....201....a
/allkiri/

Kaasjuhendaja: Karin Pachel ".....".....201....a
/allkiri/

Programmijuht: ".....".....201....a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA	8
SISSEJUHATUS	9
1. SOOJAVEEVARUSTUSE TEOORIA	11
1.1 Hoonete soojaveevarustus	11
1.1.1 Hoonete soojaveevarustussüsteemide liigid ja veevõtuseadmed	11
1.1.2 Soojaveevarustusele esitatavad nõuded	12
1.2 Hoone soojaveevarustuse tarbimisprofiilid, vooluhulgad, mõjutavad faktorid	13
1.2.1 Soojaveetarbe profiil ja vooluhulgad	14
1.2.2 Hoone soojaveevarustuse energiakulu mõjutavad faktorid	15
1.3 Duši dünaamika	17
1.3.1 Duši tarbimisprofiilid ja vooluhulgad	18
1.3.2 Duši energiakulu ning majanduslik efekt	20
2 HALLVEE SOOJUSTAGASTUSTEHNOLOGIA	22
2.1 Kasutusvaldkonnad	22
2.1.1 Reoveekanaliseerimise tasand	23
2.1.2 Reoveepuhastusjaama tasand	24
2.2 Soojustagastustehnoloogia lahendused hoones	24
2.2.1 Tsentraalsed soojustagastid	24
2.2.2 Lokaalsed soojustagastid	26
2.2.3 Soojuspumpadega soojustagastuslahendused	27
2.3 Kohtsoojustagastid	28
2.3.1 Lokaalsete soojustagastite tüübid ja struktuur	29
2.3.2 Efektiivsust mõjutavad tegurid	32
2.3.3 Ühendusviisid	35
2.3.4 Arvutuslikud alused	37
2.3.5 Majanduslik tasuvus	41
3 MÕÕTMISED JA ANALÜÜS	46
3.1 Eksperimendis uuritav seade	46
3.1.1 Seadme kirjeldus	46
3.1.2 Sertifikaadid ning varasemad uuringud	47
3.2 Laboratoorsed mõõtmised	47
3.2.1 Eksperimendi kirjeldus ja eesmärgid	47
3.2.2 Eksperimendi mõõtmistulemused	50

3.3 Objektimõõtmised	54
3.3.1 Eksperimendi kirjeldus ja eesmärgid	54
3.3.2 Eksperimendi mõõtmistulemused	56
3.4 Mõõtmistulemuste kokkuvõtte ja analüüs.....	60
3.4.1 Majanduslik tasuvus	60
3.4.2 Objektimõõtmiste majanduslik tasuvus	64
3.4.3 Mõõtmiste kokkuvõte ja diskussioon	67
KOKKUVÕTE	69
SUMMARY.....	71
ALLIKAD	73
LISAD	77
Lisa 1 NPV 5,8 l/min, elekter.....	78
Lisa 2 NPV 9,2 l/min, elekter.....	79
Lisa 3 NPV 12,5 l/min, elekter	80
Lisa 4 NPV 5,8 l/min, kaugküte	81
Lisa 5 NPV 9,2 l/min, kaugküte	82
Lisa 6 NPV 12,5 l/min, kaugküte.....	83
Lisa 7 NPV 5,8 l/min, gaasküte.....	84
Lisa 8 NPV 9,2 l/min, gaasküte.....	85
Lisa 9 NPV 12,5 l/min, gaasküte	86

EESSÕNA

Lõputöö koostati Tallinna Tehnikaülikoolis. Initsiatiivi teema uurimiseks andis Renee Bahman (Savener OÜ), kel oli huvi koguda koostöös Eestis baseeruva sõltumatu osapoollega andmeid Zypho soojustagastite toimimise kohta mitte-tasakaalustatud voolu tingimustes. Karin Pachel organiseeris kohtumise Renee Bahmaniga ning aitas formuleerida lõputöö täpsema idee. Töö juhendajaks soostus olema Taltechi vanemteadur Kalle Kuusk.

Töö autor soovib tänada järgnevaid isikuid, kes aitasid nõu, juhendamise ning materjalidega tööd koostada:

- Karin Pachel, kes aitas mul leida lõputöö teema ning oli alati varmas vastama küsimustele.
- Kalle Kuusk, kes muutis plaanitud laborimõõtmiste skeemi ka realselt töötavaks lahenduseks ning aitas selle üles seada. Lisaks ka kogu nõu ja tagasiside eest, millega ta lõputöö autorit töö koostamisel aitas.
- Renee Bahman, kes algatas lõputöö teema, andis eksperimentides kasutatud soojustagastid ning vedas eest objektimõõtmiste üles seadmist.
- Jekaterina Viltšenko, kes aitas töödelda objektimõõtmiste toorandmeid.

Hallvesi, soojustagastus, soojusvaheti, energiatõhusus, magistritöö.

SISSEJUHATUS

Globaalse rahvastikukasvu, kliimasoojenemise ning odavalt ammutatavate ressursside hulga vähenemisel tõttu on tugevalt aktualiseerunud vajadus olemasolevaid ressursse säästlikumalt ning otstarbekamalt utiliseerida. Hoonetes tarbitakse 20,1 % globaalsest energiatoodangust, mis jääb energiakulu poolest alla vaid transpordile ning tööstusele. [1] Tulenevalt hoonetes tarbitava energia hulgast ning sellega seonduvast CO₂ ekvivalendist on nii Euroopa Liidus kui ka mujal maailmas hakatud just hoonete energiatõhusust käsitlema ühe viisina inimkonna ökoloogilise jalajälje vähendamiseks. Muuhulgas on Euroopa Liit esitanud strateegilise visiooni, mille eesmärgiks saavutada kliimaneutraalsus aastaks 2050. [2]

Otseselt ehitussektori kontekstis on hoonete energiatõhususe seisukohalt tähtsaim dokument Euroopa Parlamendi ja nõukogu direktiiv 2010/31/EL, milles on EL-i liikmesriikidele muuhulgas seatud nõue, et 2021. aasta 31. detsembriks peavad kõik uued hooned olema liginullenergiahooned. [3] Antud direktiivist tulenev energiatõhususe nõue on ettevõtlus- ja infotehnoloogiainistri määrusega nr 63 Hoone Energiatõhususe miinimumnõuded kohandatud ka Eesti seadusandlusesse. Nii võibki tarbevee soojendamise süsteemide tõhustamist vaadelda ühe viisina seadusandlusest tulenevaid nõudeid täita.

Hoonete energiatõhusust on viimastel kümnenditel aidanud tõsta väiksema soojusjuhtivusega tarindite kasutamine ning soojustagastusega ventilatsiooni üldlevinud lahenduseks saamine. Hetkel kulub olemasolevas elamufondis suurusjärgus 20% elamute energiatarbimisest just vee soojendamisele. [4] [5] Edusammude tõttu hoonete energiatõhusamaks muutmisel, on sooja vee osakaal tõusmas 50%-ni hoonete energiatarbimisest. [6] Seejuures kanaliseeritakse 85% vee soojendamiseks kulunud soojusest. [7] Soojustagasteid kasutades oleks võimalik rakendada märkimisväärset hulka kanaliseeritud energiast. Üheks rakenduseks oleks kasutada seda tarbevee eelsoojendamiseks, vähendades seeläbi nii energiale tehtavaid kulutusi kui sellest lähtuvat ökoloogilist jalajälge.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on anda ülevaade olemasolevatest hallvee (olmereovee, mis ei sisalda WC-st pärinevat vett [8] soojustagastuse tehnoloogiatest, rõhuga duši kohttagastitel, ning nendega seonduvatel teadustööl. Lõputöö autor viis läbi nii kohtmõõtmised objektidel kui ka laboratoorsed mõõtmised konkreetse tootega. Eksperimentaalse osa eesmärgiks on hinnata turul pakutava populaarse soojustagasti efektiivsust ning majanduslikku tasuvust mitte-tasakaalustatud voolu tingimustes,

luues ühtlasi kogutud mõõtmisandmete põhjal baasi tulevasteks analoogseteks uuringuteks.

1. SOOJAVEEVARUSTUSE TEOORIA

Asetamaks hallvee soojustagastustehnoloogia rakendamist laiemasse konteksti, on tarvis omada ülevaadet sooja vee tootmise tehnoloogiast ning tarbimise dünaamikast. Käesoleva peatükk annab ülevaate soojaveevarustusest ja sellele esitatavatest nõuetest. Pikemalt analüüsitakse duši veetarbimise dünaamikat.

1.1 Hoonete soojaveevarustus

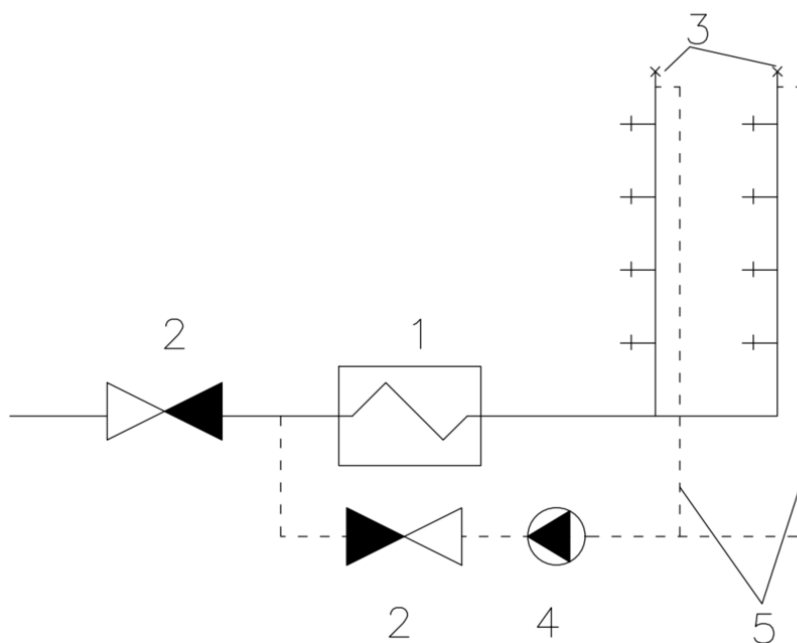
1.1.1 Hoonete soojaveevarustussüsteemide liigid ja veevõtuseadmed

Hoonete soojaveevarustus kujutab endast meetmete ja seadmete kogu, mille eesmärgiks on valmistada sooja vett kas tarbimiseks või tootmisprotsesside tarvis. Hoone sooja tarbevee süsteemid koosnevad veesojenduseadmetest, veevõtuseadmetest (erinevad sanitaartehtnilised seadmed) ning vee juhtimiseks mõeldud torustikust ning armatuurist. [5]

Sooja tarbeveesüsteeme saab jaotada vastavalt vee valmistamise kohale tsentraalseteks ning lokaalseteks. Neid on omakorda võimalik vastavalt kasutavale tehnoloogiale jaotada läbivoolupõhisteks kiirveesoojenditeks või akumulatsioonipaagiga mahtveesoojenditeks. [5]

Kohtsüsteemides toimub vee soojendamine lõpptarbivate läheduses, üldjuhul korteri või elamu vannitoas. Veesoojendi ning tarbija vaheline distant on kohtsüsteemides lühike, mille tõttu on soojuskadud süsteemis väiksed.

Tsentraalsetes süsteemides valmistatakse sooja tarbevett keskses asukohas, kas hoone soojussõlmes või katlamajas. Tsentraalseid süsteeme saab edasi liigitada vee jaotusviisi põhjal (alt- ja ülaltjaotusega süsteemid), ringlustorustiku olemasolust lähtuvalt tupik- ja ringlussüsteemideks ning avatud ja kinnisteks süsteemideks. [5]



Joonis 1.1 Soojaveevarustus tseentraalsüsteemid. 1- Veesoojendi; 2 – tagasilöögiklapp; 3- õhuärastusventiil; 4 – ringluspump; 5 - ringlustorustik

Veevõtuseadmeteks on kõik veevarustussüsteemiga ühendatud kraanid, segistid ning muud masinad. Seadmete poolt tarbitavat vee voluhulka iseloomustamiseks kasutatakse normvooluhulka, mis on dušide puhul nii külmale kui soojale veele 0,2 l/s. Hoone arvutuslik vooluhulk leitakse standardarvutustes normvooluhulkade abil tõenäosusjaotuse põhjal. [9]

1.1.2 Soojaveevarustusele esitatavad nõuded

Olenemata süsteemi tehnilisest struktuurist on selle eesmärgiks pakkuda tarbija või protsessi poolt nõutud parameetritega vett. Eesti kontekstis on toodud hoonete soojaveevarustusele esitatavad nõuded väljas standardis EVS 835. Lisaks on riigile kuuluva kinnisvara haldamise ja arendusega tegelev ettevõtte RKAS (Riigi Kinnisvara Aktiaselts) kehtestanud hoonete veevarustusele hulga lisanõudeid, mille on võtnud üle ka hulgaliselt tellijaid erasektorist.

Standardi EVS 835:2014 kohaselt peab hoone soojaveevarustus täitma hoone veevärgile esitatavad üld- ja ohutusnõuded, millele lisanduvad soojaveevarustusele rakenduvad lisanõuded. Soojaveevarustus peab teisisõnu tagama vajaliku vooluhulga, vajaliku rõhu ja mürataseme, seejuures ning vastama ehituslikele kvaliteedi ja

paigaldusnõuetele. Soojaveearustussüsteem tuleb projekteerida ja ehitada nii, et oleks tagatud vee kvaliteet, ette antud vooluhulk, kogus ja temperatuur. [9]

- Soojaveearustuse eripärast tulenevalt rakenduvad vee temperatuurirežiimile ja ooteajale mugavuslikest ja majanduslikest kaalutlustest erinõuded;
- Temperatuur tuleks hoida vahemikus 50-55 °C;
- Isikliku hügieeni seadmest väljuva vee temperatuur ei tohi ületada 65 °C;
- Minimaalne sooja vee temperatuur tarbijani jõudmisel ei tohi olla kehtvalt alla 50 °C;
- Veevõtuseadme maksimaalse avatuse korral peab vesi jõudma tarbijani vähemalt 30 sekundiga. Soovituslikult kuni 10 sekundiga, säästu ja mugavuse eesmärgil.

Kokkuvõtvalt sätestab EVS 835, et hoone veevarustus, kitsamalt ka soojaveearustus, peab olema korrektselt dimensioneeritud ja ehitatud viisil, mis tagaks optimaalsed eksploatatsioonikulud ning viiks miinimumini varaliste- või tervisekahjustuste riski. [9]

RKAS-i nõuded baseeruvad suuresti EVS 835-l, kuid neis on mõningad nõudmised detailsemalt formuleeritud kui standardis. Soojussõlmes toodetava tarbevee temperatuuriks on nähtud ette 55 °C, eraldi on nõutud soojaveeringlussüsteemi tasakaalustamist. [10] RKAS on sätestanud ka nõutud torisolatsiooni paksused, kui kasutada mineraalvilla. [11]

RKAS-i nõuete puhul on suuresti tegu täpsustuse ning kokkuvõttega teistest allikatest, kuid Eesti ehitussektoris tegutsedes, on tegu siiski kasuliku juhendmaterjaliga, mille järgmini on arvukates ehituslepingutes ka nõutud. Tulevikus võiksid need kätkeada ka näiteks hallvee soojustagastustehnoloogiat.

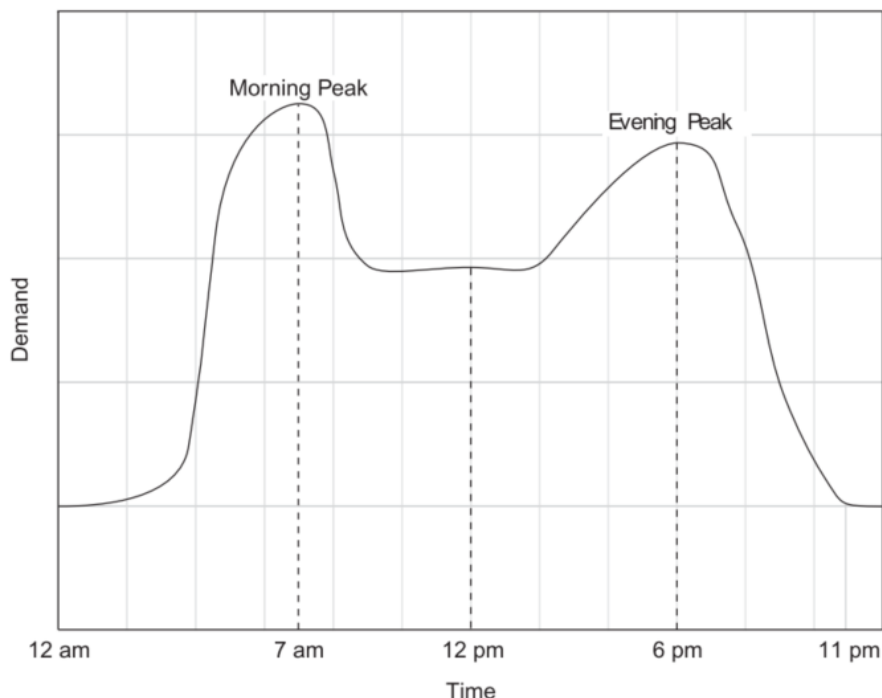
1.2 Hoone soojaveearustuse tarbimisprofiilid, vooluhulgad, mõjutavad faktorid

Soojusarvestite efektiivsuse (temperatuuri suhtarvu) ning tagastatava energiahulga leidmiseks piisab näiliselt vaid füüsikalistest teguritest nagu vooluhulgad ning temperatuurid. Lähtudes siiski vaid nendest füüsikalistest parameetritest, pole võimalik hinnata tehnoloogia kohaldamise otstarbekust reaalelulises kontekstis. Loomaks järeldusi erinevate soojustagastustehnoloogiate tasuvuse kohta, on tarvis lisaks teada

temporaalseid faktoreid nagu tarbimise tüüpilised kestused erinevatel veevõtuseadmetel (dušid, valamud jm), tarbimiste ajalisi profiile ja kasutamiste sagedust. Andmed tarbijate sotsio-ökonoomse staatuse, elukoha, soolise vm kuuluvuse kohta võimaldaksid teha üldistusi isikute tarbimisharjumustest, et luua terviklikum üldpilt erinevate indiviidide tarbimisharjumustest ning tulevikus valida personaliseeritud kaalutlustest lähtuvalt elukaare kontekstis kuluoptimaalseimat tehnoloogiat.

1.2.1 Soojaveetarbe profiil ja vooluhulgad

Mõtestamaks soojaveetarvet laiemas kontekstis, et mõista soojustagastite potentsiaali laiemas kasutuselevõtu korral, on vaja tarbimisandmeid nii üksikute seadmete, tüüpsete majapidamiste kui ka veevõrgu tasemelt. Munitsipaalvõrkude veetarvet iseloomustab veetarbimise varieeruvus ööpäeva vältel. Elurajoonidele on iseloomulik kahe tipuga tarbimisprofiil, mida iseloomustavad maksimumid hommikul ja õhtul, mis tulenevad vastavalt tööpäeva-eelsetest ja tööpäeva-järgsetest hügieenitoimingutest, toidu valmistamisest jm. (vt Joonis 1.2). [12] Sarnast ööpäevast tarbimisrežiimi täheldati ka sooja vee puhul 2003-2005 Tallinnas Mustamäel läbi viidud uuringus, milles vaadeldi tarbimist 23-s korterelamus. [5]



Joonis 1.2 Vee tarbimise tüüpiline profiil [12]

Lisaks vajadusele uurimisandmete laiemasse pilti asetada on soojavee tarbeprofiilidel ning seonduvatel vooluhulkadel (st inimeste kasutamisharjumustel) mõju seadmete, sealhulgas soojustagastite, efektiivsusele. [13] Vooluhulkasid ning kumulatiivset soojaveetarbimist on vajalik teada, et hinnata energiakulu ning soojustagastite rakendamisest tulenevat võimalikku energiasäästu. Tabelis 1.1 on toodud ööpäevane soojaveetarve inimese kohta erinevates riikides.

Tabel 1.1 Hoone soojaveetarbe energiakulu riigiti. *Andmed allikast [14], Eesti soojaveetarbimine 2005-2008 läbiviidud Eesti kortermajade soojaveetarbe uuringust [5]*

Riik	Soojaveetarbimine [l/in d]	Vee soojendamiseks kuluv energia [kWh/d]
Kanada	94	12,3
USA	40	5,22
Šveits	55	7,18
Soome	43	5,61
Inglismaa	20-39	3,85
Saksamaa	64	8,36
Prantsusmaa	69,6	9,1
Hispaania	30	3,92
Portugal	40	5,23
Eesti	32	4,18

1.2.2 Hoone soojaveevarustuse energiakulu mõjutavad faktorid

Sooja vee tootmine moodustab USA-s 18% ja Euroopa Liidus 14% eluhoonete energiatarbimisest. [14] ning suurusjärgus 20% hoone primaarenergia tarbimisest [15]. Sooja vee arvutuslik soojuskoormus on leitav valemiga (1) [5], milles on käesoleva töö stiililise ühtsuse huvides algallikaga võrreldes tähistusi muudetud. Lisaks soojendatava vee vooluhulgale on valemis muutujateks soojendatava vee temperatuur ning temperatuur, milleni vesi soojendatakse, teisisõnu temperatuuri muut. Ööpäevase sooja vee energiakulu saab leida valemiga (2).

$$\Phi_{SV} = \frac{\rho \cdot c_p \cdot q_{wh} \cdot (T_{wh} - T_{wc})}{1000} \quad (1)$$

$$C_{r,d} = \frac{C_h \cdot (T_{wh} - T_{wc})}{3,6 \cdot 10^6} = \frac{\rho \cdot c_p \cdot V_d \cdot (T_{wh} - T_{wc})}{3,6 \cdot 10^6} \quad (2)$$

Kus Φ_{wh} – Sooja tarbevee soojuskoormus [kW];

ρ – Vee tihedus [J/kgK];

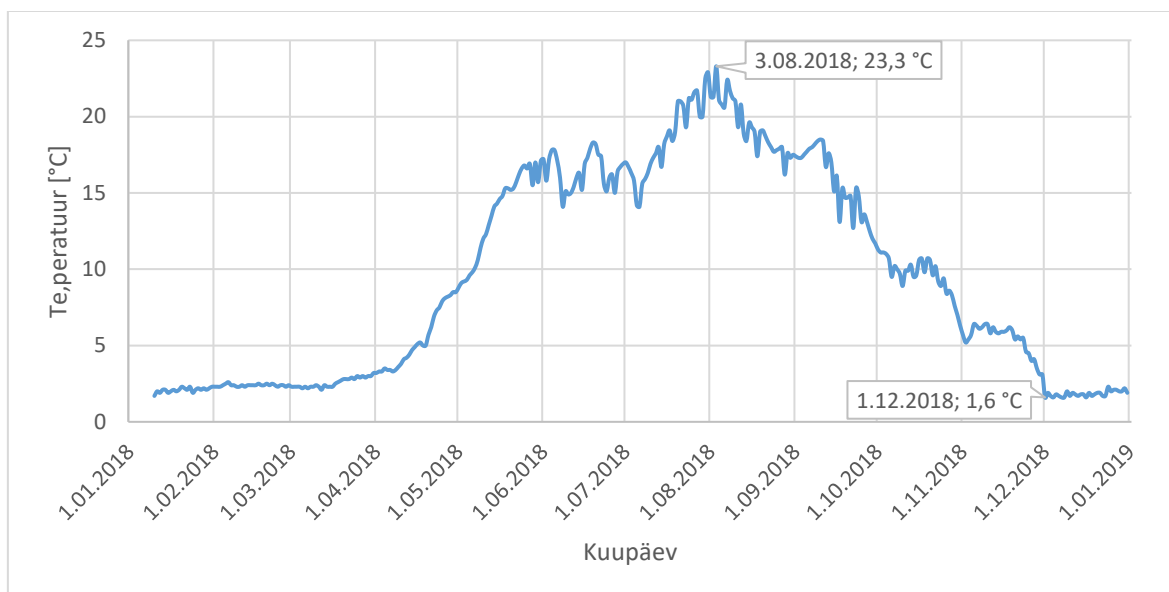
c_p – Soojendatava vee erisoojus [J/kgK];
 q_{wh} – Soojendatava vee vooluhulk [l/s];
 T_{wh} – Segistisse siseneva sooja vee (soojaveearustuse) temperatuur [°C];
 T_{wc} – Veevarustuse külma vee temperatuur [°C];
 $C_{r,d}$ – Perioodi vee soojendamise energiakulu [kWh]
 C_h – Vastava konfiguratsiooni segistisse siseneva sooja vee (soojaveearustuse) HCR [W/°C];
 c_p – soojendatava vee erisoojus [J/kgK];

Standard EVS annab hoone sooja vee temperatuuriks 55 °C [9], temperatuure vahemikus 55-60 °C on kasutatud eeldusena ka mitmetes sooja vee energiakulu käsitlevates uuringutes. [16] [17] [4] [18]. Antud töö kontekstis kasutatakse edaspidi arvutuste alusena 55 °C. Reaalsetes mõõtmistes on selgunud, et tihti on toodetava kui ka tarbimispunkti jõudva vee temperatuur madalam kui standardis soovitatav. Inglismaal läbiviidud uuring, mille käigus vaadeldi 125 majapidamise soojaveetarbimist, leiti keskmiseks sooja vee temperatuuriks tarbimispunktides 51,9 °C [18]. Analoogne uuring Kanadas, milles uuriti 125 majapidamist, sai keskmiseks temperatuuriks 51,8 °C. [19]

Soojendatava vee temperatuuri muutu mõjutab lisaks tarbeveesüsteemi siseneva vee temperatuurile ka hoonesse siseneva külma vee temperatuur. Erinevalt sooja tarbevee temperatuurist, mis kujutab endast stabiilset süsteemi seadistatud sihtväärtust, varieerub külma vee sisendtemperatuur olenevalt kliimatilistest tingimustest, aastaajast, torustike rajamissügavusest ning muudest analoogsetest faktoritest. Ühisveevärgi torustike puhul, eriti kui veeallikaks on pinnaveekogu, on veetemperatuur väljenduv sinusoidina, mille ekstreemumid asetuvad talve ja suvesse. Põhjavett utiliseeriva allika ning lühikeste jaotustorustike korral on aastaajast olenev varieeruvus vee temperatuuris väike. Lisaks võib vee temperatuur sisendis olla jaotusvõrgu temperatuurist kõrgem, kui vähese tarbimise korral on ühendustorustikus vesi seisnud. [20]

Standard EVS 835 annab külma vee temperatuuriks hoone sisendis 10 °C [9], mitmete teadustööde kokkuvõttena sündinud õpik „Hoonete Soojaveearustus“, annab vee temperatuuriks hoone sisendis 5...10 °C. Reaalsuses eksisteerib Tallinna kontekstis suurem veetemperatuuri varieeruvus, suvekuudel võib tõusta temperatuur veevärgis temperatuurini ligi 20 °C. Joonisel 1.3 on TalTechi Akadeemia tee 5 ühiselamu veesisendi veetemperatuurid 2018 lõikes välja toodud. Maksimaalseks temperatuuriks

oli 3. augustil 23,3 °C ning minimaalseks 1,6 °C 1. detsemberil. Aasta keskmine sisetemperatuur on 9,6 °C.



Joonis 1.3 Akadeemia tee 5 (TalTech ühiselamu) 2018. aasta sisetemperatuurid.

Reaalselt ei jõua kogu vee soojendamiseks kulunud energia tarbimispunkti, aktsepteeritavaks temperatuurilanguks teel soojusvahetist veevõtupunktis loetakse kuni 5 °C. [5] Vee transpordil toimub läbi toru seina soojusvahetus väliskeskkonnaga, mille intensiivsus sõltub vee ning väliskeskkonna temperatuuride erinevusest ning torustiku ning selle isolatsiooni materjalist ning paksusest. Tulenevalt jaotustorustike pikkusest ning vee tarbimisrežiimist, on energiakaod torustikus tähtis faktor, mida tuleb arvestada hoonete soojaveearustuse süsteemide projekteerimisel. [21] Töö praktilises osas läbiviidavates laborikatsetes ei arvesta sarnaselt teiste teadusuuringutega soojuskadusid, tulenevalt ühendustorustike lühikesest pikkusest. [22]

1.3 Duši dünaamika

Käesolev lõputöö uurib hallvee soojustagastite lahendusi eelkõige duši soojustagastite poolelt. Hindamaks tehnoloogia tasuvust laborivälises rakenduses, on vaja omada ülevaadet inimeste dušiharjumustest, neid mõjutavatest käitumuslikest ning tehnilistest faktoritest. Järgnev alapeatükk aitab luua alused lõputöö praktilise osa majandusarvutuste tarvis.

1.3.1 Duši tarbimisprofiilid ja vooluhulgad

Enamik soojast veest majapidamistes kulub hügieenitoimingute tarbeks. Inglismaal läbi viidud uuringu järgi kulub peaaegu 70 % hoone sooja vee mahust duši ning vannide käitamisel, sarnane uuring USA-s leidis, et dušid moodustavad 51 % majapidamiste soojavee tarbimisest ning Austraalias läbi viidud uuringute kohaselt vahemikus 31-42%. [23] [14] Teaduskirjanduses ja tehnilistes standardites leitavad kvantitatiivsed andmed varieeruvad tulenevalt duši veetarbimisega seonduvatest tehnoloogilistest ning antropogeensetest teguritest, mis toob kaasa varieeruvuse nii duši kestvuses, vooluhulkades kui sellega seonduvas energiakulus. [24] Siiski võib dušside puhul üldistatult rääkida majapidamise kontekstis suurtest vooluhulkadest ning võrdlemisi pika kestusega veetarbimisest, mille tõttu on need ideaalne koht rakendamaks vastuvoolu soojusvaheteid. [6]

USA-s läbiviidud uuringus, milles mõõdeti veetarbimist enam kui 1200's majapidamises, leiti keskmise duši kestus olevat 8,2 minutit, keskmiselt 1,5-2 dušiga päevas inimese kohta. [25] Hongkongis läbiviidud uuringu kohaselt oli keskmiseks duši kestvuseks 12 minutit, standardhälbega 1,6 minutit ning keskmise temperatuuriga 40,9 °C, aastasega keskmisega 1,4 duši päevas. [22]

Austraalias läbi viidud uuring seadis varaseamates uuringute tulemusi kahtluse alla, rõhutades käitumuslikest parameetritest tulenevaid erinevusi sooja vee tarbimisel duši kontekstis. Väljavõtte aasta jooksul toodud tulemuste keskmistest väärtustest on toodud välja tabelis 1.2. Siiski nähtub, et majapidamiste dušitemperatuuri aasta keskmiste mediaanväärtus on 40 °C ning keskmine duši kestus 10 min, mis on samas suurusjärgus mujal läbi viidud uuringutega. [26]

Belgia standard NEN7120:2011 annab soojusvahetite testimiseks duši vooluhulkadeks vastavalt dušisegisti disainile ja efektiivsusele 5,2 l/min, 9,2 l/min ja 12,5 l/min ning pikkuseks 8 min. Autor kasutab dušisegisti vooluhulgana edasises töös vaikeväärtusena 9,2 l/min. Töö eksperimentaalses osas testitakse seadet ka teiste standardi poolt soovitatud väärtustega, saavutamaks tulemuste võrreldavust varasemate uuringutega.

Tabel 1.2 Duši veevoolu andmed, erinevad allikad

	Allikas [27]	Allikas [26]	Allikas [17]	Allikas [7]	Allikas [28]	Allikas [29]
Duši kestus [min]	12	10	3,5-12		5,8-9	8
Sagedus [dušš/d]	1,4	1,4	-	-	0,7-1,3	-
Vooluhulk [l/s]	-	0,15	0,083-0,2	0,17-0,2	0,13-0,2	0,09; 0,15; 0,21
Temperatuur [°C]	40,9	40	42,4	28-40	40	40

Töö eelnevas alapunktis selgitas autor lühidalt torustikes toimuvate energiakadude põhjuseid. Loomaks terviklikku pilti duši all käimise dünaamikast, tuleb arvestada ka energiavahetust väliskeskkonnaga, mis toimub veega teel segistist äravoolu. Inglismaal enam kui 200 majapidamise dušiharjumusi analüüsinud raporti kohaselt oli duši veetemperatuuri langus korrelatsioonis vooluhulgaga, suuremate vooluhulkade puhul oli temperatuurilang väiksem. Teise uuringu kohaselt on mõõtmistulemuste kohaselt 1 kraad. [24] Vooluhulgal 8 l/s oli keskmiseks temperatuurilanguks 5,9 °C [28] L.T. Wong pakkus välja mõõtmistulemuste põhjal empiirilise valemi (3) duši vee temperatuurilangu määramiseks segistist langemisel, kuid tasub arvestada, et mõõtmised viidi läbi Hong-Kongi lähistroopilises kliimas. [22]

$$\Delta T = 3,6 \cdot 10^{-10} \cdot T_{mix}^{6,673} \cdot T_a^{-0,530} \quad (3)$$

Kus T_{mix} – Segist väljuva vee temperatuur [°C];

T_a – Õhutemperatuur [°C];

Uuringutes tulenevalt selgub, et duši kasutamise dünaamika näol on tegemist keerulise nähtusega, mis on tugevalt mõjutatud nii tehnoloogilistest kui käitumuslikest faktoritest. Erinevates uuringutes, milles on viidud läbi mõõtmisi aineses, on saadud hulgaliselt varieeruvaid tulemusi nii duši vooluhulkade, temperatuuride kui ka sageduste kohta. Antud töö eesmärgiks pole agregeerida olemasolevat teadustööde baasi, mis keskendub hoonete soojaveetarbimisele. Sellest tulenevalt valis töö autor energia- ja majandusarvutuste aluseks duši soojusvahetite testimist normeeriva Hollandi standardi NEN7120 poolt antud väärtused: 40 °C, 9,2 l/min ja duši pikkus 8

min. [29] Dušide päevaseks sageduseks sai valitud USA vee-ettevõtjate Liidu uuringust tulenev väärtus 1,5 duši päevas. [25]

1.3.2 Duši energiakulu ning majanduslik efekt

Duši jaoks vajaliku vee soojendamiseks kuluva energia hulk sõltub duši kestusest t , külma vee sisendtemperatuurist segistisse T_c , sooja vee sisendtemperatuurist segistisse T_h ning duši temperatuurist T_s ja segistist väljuvast massivooluhulgast m_s . Arvestamata soojuskadusid süsteemis, võib leida duši peale kuluva energia hulga valemiga (4) ja aastase energiakulu valemiga (5).

$$C_{rot} = \frac{p \cdot C_{h0,m} \cdot (T_{wh} - T_{wc})}{\mu \cdot 3,6 \cdot 10^6} = \frac{p \cdot c_{pw,0} \cdot m_{0,h} \cdot (T_{wh} - T_{wc})}{\mu \cdot 3,6 \cdot 10^6} \quad (4)$$

$$C_{rot} = \frac{365 \cdot D \cdot F \cdot p \cdot C_{h0,m} \cdot (T_{wh} - T_{wc})}{\mu \cdot 3,6 \cdot 10^6} = \frac{365 \cdot D \cdot m_{0,h} \cdot p \cdot c_{pw,0} \cdot (T_{wh} - T_{wc})}{\mu \cdot 3,6 \cdot 10^6} \quad (5)$$

Kus C_{rkt} – Primaarenergia kulu (elekter, gaas, võrgusoojus jm) [kWh];

D – Elanike arv [in];

F – Dušide keskmine arv elaniku kohta päevas [1/in];

p – Keskmine duši kestus [s];

$C_{hk,m}$ – Vastava konfiguratsiooni segistisse siseneva sooja vee soojusmahtuvuse määr [W/°C];

T_{wh} – Segistisse siseneva sooja vee (soojaveearustuse) temperatuur [°C];

T_{wc} – Veevarustuse külma vee temperatuur [°C];

$m_{k,h}$ – Vastava konfiguratsiooni segistisse siseneva sooja vee (soojaveearustuse) massivooluhulk [kg/s];

c_{pwK} – Konfiguratsioonis soojendatava vee erisoojus [J/kgK];

Segistisse siseneva energia hulk on võrdne segistist väljuva energia hulga. Segistist väljuva vee soojusenergia hulk väljendub selle temperatuuri ja vooluhulga kaudu. Lisaks teame külma ja sooja vee temperatuure, sellest lähtuvalt saame võrrandisüsteemi (6).

$$\begin{cases} m_c \cdot T_c + m_h \cdot T_h = (m_m) \cdot T_m \\ m_m = m_c + m_h \end{cases} \quad (6)$$

$$m_h = \frac{m_m \cdot C_{pm} \cdot T_m - m_m \cdot C_{pc} \cdot T_c}{T_h \cdot C_{ph} - T_c \cdot C_{pc}} \quad (7)$$

m_h – Segistist siseneva sooja vee massivooluhulk [kg/s];
 m_m – Segistist väljuva vee massivooluhulk [kg/s];
 m_c – Segistisse siseneva külma vee massivooluhulk [kg/s];
 C_{pm} – Segistist väljuva vee erisoojus [J/(kg K)];
 C_{ph} – Segistisse siseneva sooja vee erisoojus [J/(kg K)];
 C_{pc} – Segistist siseneva külma vee erisoojus [J/(kg K)];
 T_m – Segistist väljuva vee temperatuur [°C];
 T_h – Segististisse siseneva sooja vee temperatuur [°C];
 T_c – Segististisse siseneva külma vee temperatuur [°C];

Rakendades tuletatud valemeid 4; 6 ja 7, kasutades tabelis 1.3 toodud sisendväärtusi, saame ühele duši maksumuseks 0,57 €. Aastaseks kuluks inimese kohta 207 €.

Tabel 1.3 Duši energiakulu arvutamise algandmed

D [in]	F [1/in]	p [s]	Tw _h [°C]	Tw _c [°C]	m _m [kg/s]	T _m [°]	N	C _e [€]
1	1,5	600	55	10	9,2	40	0,85	0,15

Autor teadustab, et süsteemi energiatõhususe ja selle keskkonnamõju efektiivseks võrdlemiseks alternatiividega on vajalik arvestada süsteemi primaarenergia kuluga ning laiemalt ka primaarenergia allikaga, st fossiilkütuste või taastuvenergia tarvitamisega. Teades säästetava primaarenergia hulka, on võimalik soojusvaheti kasutamisest tulenev CO₂ hulk võrreldavalt kvantifitseerida. Tagastatud soojuse kasutamisega ei kaasne primaarenergia tootmise ning selle sekundaarenergiaks muundamise protsessiga seonduvad kaod. [30]

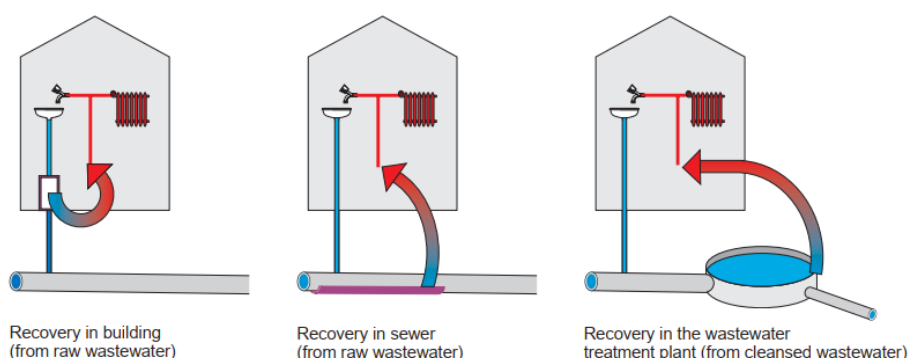
2 HALLVEE SOOJUSTAGASTUSTEHNOLOOGIA

Varasemalt on töös viidatud sooja vee valmistamise ulatuslikule energeetilisele kulule – 2013 seisuga kulus 16% hoonete küttevõimsusest sooja vee valmistamiseks, tarindite struktuuri täiustumise ning energiasäästlikumate KVJ tehnoloogiate rakendamise tõttu tõuseb tulevikus sooja vee osakaal bilansis veelgi. [31] Kanaliseeritav vesi sisaldab endas 80-90% veesoojendis lisatud soojusenergiast. [32] Kasutades erinevaid hallvee soojustagastuslahendusi, on võimalik rakendatavatest tehnoloogilistest lahendustest ning tarbimisprofiilide spetsiifikast olenevalt saada kätte praktilises rakenduses 20-50% kasutatud energiast. [33] Seeläbi on võimalik tõsta hoonete energiatõhusust, vähendada ekspluatatsioonikulusid ning vähendada CO₂ emissiooni.

Järgnev peatüki eesmärgiks on anda ülevaade erinevatest eksisteerivatele hallvee soojustagastuslahendustest ning teemakohasest teadustööst. Põhiline fookus on lokaalsetel duši soojustagastitel, loomaks teoreetilist baasi antud töö praktilises osas läbiviidavate katsete võrreldavuseks teiste asjakohaste teadustöödega.

2.1 Kasutusvaldkonnad

Hallvees soojuse kasutamist on võimalik jagada laialt kolmele skaalale: hoone tase, reoveekollektori tase ning reoveepuhastusjaama (RVP) tase. Valitud kohad mõjutavad nii kasutatavat tehnoloogiat kui ka veest ammutatava energia hulka ning kõige ratsionaalsemat rakendusala. [34]



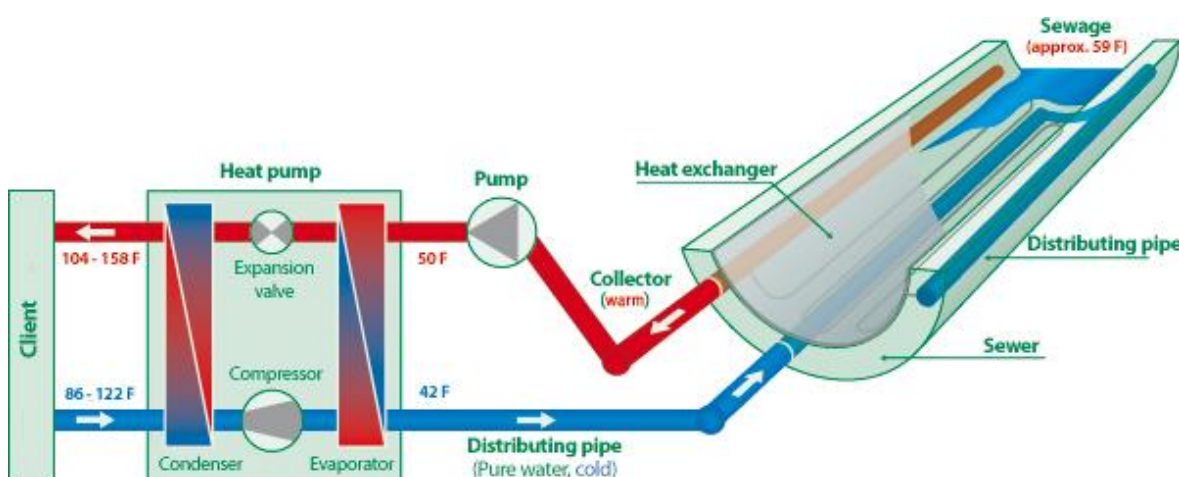
Joonis 2.1 reovee jääksoojuse kasutamise tasandid [34]

2.1.1 Reoveekanaliseerimise tasand

Reoveekollektoreid iseloomustavad suured vooluhulgad, mis võib suuremate kollektorite puhul küünida sadatesse liitritesse sekundis ning temperatuurid jäävad üldiselt vahemikku 15-30 °C. [30] Kanalisatsioonisüsteemides esineb vee tarbimisega analoogne päevane profiil, mille tipud jäävad hommikusse ning õhtusse ning minimaalse vooluhulgaga periood öisesse aega, kuid infiltratsioonivee olemasolu tõttu on kurv mõnevõrra ühtlasem. Ühisvoolsete kanalisatsioonisüsteemide puhul kaasnevad sademetega kuni kümnekordselt keskmist ületavad vooluhulgad. [34]

Kanalisatsioonitasandil reoveest soojust eraldamisega tekib potentsiaalne huvide konflikt reoveepuhastusjaama haldajaga. Bioloogilised puhastusprotsessid nõuavad toimimiseks minimaalset temperatuuri. Liigne soojusenergia eraldamine süsteemist võib tekitada olukorra, milles biopuhastusprotsessi toimimiseks peab hilisemalt vee temperatuuri kergitama, muutes seeläbi soojustagastusprotsessi kumulatiivselt kahjulikuks. [34] See-eest üks uuring leidis, et reoveesüsteem jõuab tasakaalupunkti tulenevalt õhu ja pinnasetemperatuurist, soojusvahetus töö kaasa suure temperatuuri languse, kuid ca kilomeetriga temperatuur normaliseerus. [35] Antud lahenduse toimivus vajab ühiskanalisatsiooni haldaja kooskõlastust ning ulatuslikku planeerimist.

Tüüpiline kanalisatsioonitoru soojusvaheti kujutab endast plaatsoojusvahetit kanali põhjas, mis kannab üle energiat vahesoojusandjale, mida kasutab soojuspump allikana. Turul eksisteerib nii kanalisatsioonitorusse integreeritud lahendusi kui ka olemasolevatesse kanalisatsioonikollektoritesse paigaldatavaid süsteeme.



Joonis 2.2 Reoveekanaliseerimise soojustagasti tööpõhimõte [36]

2.1.2 Reoveepuhastusjaama tasand

Reovee temperatuuri liigne alandamine mõjub pärssivalt bioloogilise puhastuse protseduurile. Võimalusena energeetilist potentsiaali utiliseerida, ohustamata bioloogilise puhastuse mehhanisme, on kasutada soojusallikana reoveepuhastusjaama läbinud vett, mille vooluhulgad ja temperatuur on stabiilsed aastaringelt. Berni veepuhastusjaam Šveitsis kasutab 1400 kW võimsusega soojusvahetite süsteemi. [34]

Eestis kasutatakse reoveepuhastusprotsessi läbinud vee soojuslikku potentsiaali Haapsalu reoveepuhastusjaamas, milles on viimase settebasseini vett kasutatud soojusallikana jaama hoonete teenindamiseks. [37]

2.2 Soojustagastustehnoloogia lahendused hoones

Hoone tasandil võib soojustagastustehnoloogiad lugeda laialt kolme tüüpi: tsentraalsed kogumispaagiga soojustagastid, lokaalsed (vastuvoolutüüpi) soojustagastid ning soojustagastite lahendused, mis kasutavad süsteemi efektiivsuse tõstmiseks soojuspumpasid. [30]

2.2.1 Tsentraalsed soojustagastid

Tsentraalsed soojustagastid on tehnoloogiliselt üks lihtsamaid ja enim uuritud lahendusi hoone hallvee soojusutagastustehnoloogiate hulgast. Süsteemid koosnevad üldjuhul tsentraalsest hallvee kogumismahutist, millest juhitakse läbi külma vee torustik. Sobiva temperatuurikarakteristika tõttu, on hallvee kogumispaake kasutatud ka soojusallikana soojuspumpadele. [38] Eksisteerib ka kogumispaagita lahendusi, kuid neid on rakendatud üldjuhul suuremates hoonetes, kus on suur tõenäosus hallvee ja külma vee üheaegseks vooluks läbi soojustagasti. [39]

Üheks varasemaks näiteks tsentraalsete hallvee soojustagastite kasutamisel on 1975. I.E. Smithi poolt avaldatud artikkel, milles saavutati 30% kokkuhoid vee soojendamisele kuluvale energiale. Hallvee äravoolu mahutist kontrollitakse vastavalt temperatuurierinevusele külma vee paagi ning reovee paagi vahel, kui temperatuuride erinevus väheneb alla seadesuuruse 3 °C, avaneb äravooluventiil. [40]

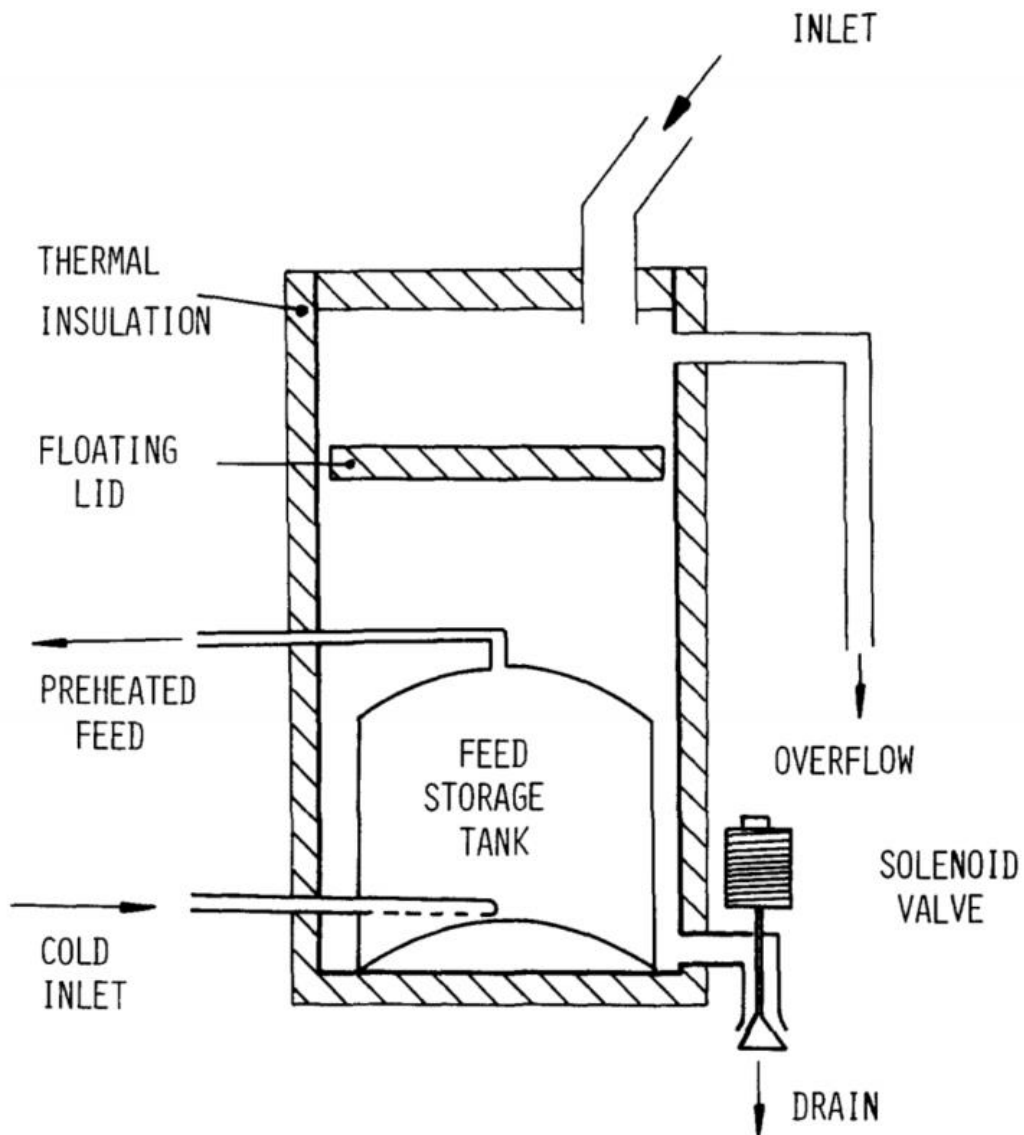


Fig. 1.

Joonis 2.3 Varajane näide tsentraalsest soojusvahetist. [40]

Sarnast lahendust Smithi omaga analüüsis ka Kanadas läbi viidud uuring, küll erinevusega, et külma vee kogumispak oli asendatud paaki paigaldatud spiraalse kogumistoruga, suurendamaks soojusülekande pinda vee massiühiku kohta. Uuringus ehitati testsoojusvaheti, millelt kogutud mõõtmisandmeid kasutati kalibratsiooniks mudelis, mis aitas edasiselt optimeerida süsteemi disaini lähtuvalt parameetritest nagu mahuti suurus, soojustuse paksus, külma vee torustiku pikkus, vooluhulgad jm. Potentsiaalseks kokkuhoiuks, vastavalt reaalse majapidamise tarbimismustritele, saadi 42 % aastasesest sooja vee valmistamisest kuluvast energiast. [41]

Hallvee soojustagastite puhul tuuakse tihti välja kaks võimalikku murekohta - Olmevee saastumine kokkupuutel reoveega lekete tõttu ning soojusvahetite ummistumine

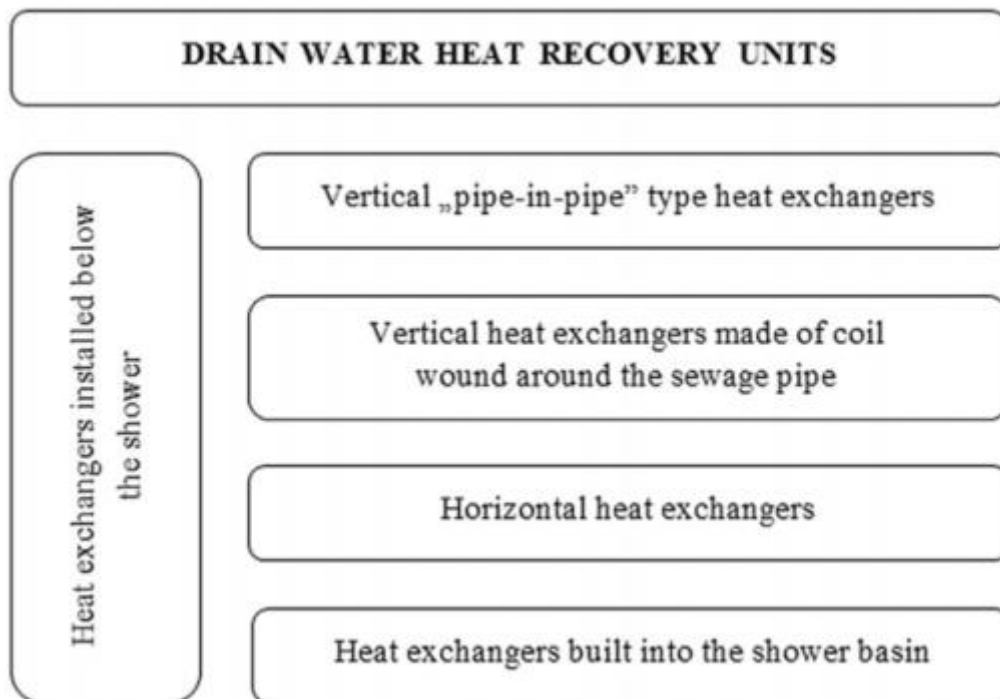
reovees sisalduvate saasteainete tõttu. Sellest lähtuvalt on soovituslik kasutada kahekordse seinaga lahendusi (nt polümeeriga kaetud vasktoru) [30] Tarbeveesüsteemi saastumise ohtu vähendab siiski nüanss, et veetorustikus on süsteemi normaalse toimimise korral kõrgem rõhk kui reovee poolt avaldatav vedelikusammas mahutis, seega toimuksid ka lekked puhtast veest reovette. [40]

Tsentraalsete süsteemide puhul avaldub eriti tugevalt ka oht süsteemi efektiivsuse languks lähtuvalt sette kogunemisest paakidesse ning torude ummistumisest. Šveitsis koostatud raporti kohaselt on probleemistik on varieeruv, olenevalt objektidest ning vee tarbimise režiimist võivad vajada soojustagastussüsteemid vaid minimaalselt hooldust, kuid on ka ehitatud süsteeme, mille eksploatatsioon on sagedaste tehniliste rikete tõttu muutunud ebaaktsepeeritavalt kalliks. [34]

2.2.2 Lokaalsed soojustagastid

Lokaalsete soojustagastitena on käesoleva lõputöö kontekstis mõeldud soojustagasteid, mis kasutavad standardses paigalduses vee eelsoojendamiseks ühe sanitaarseadme poolt toodetud hallveevoogu. Erinevalt kogumispaagiga tsentraalsetest soojusvahetitest, nõuavad kohtsoojustagastid olme- ja reovee üheaegset voolu (kas paralleelselt või vastuvoolus), et saaks toimuda arvestatav soojusülekanne. [32]

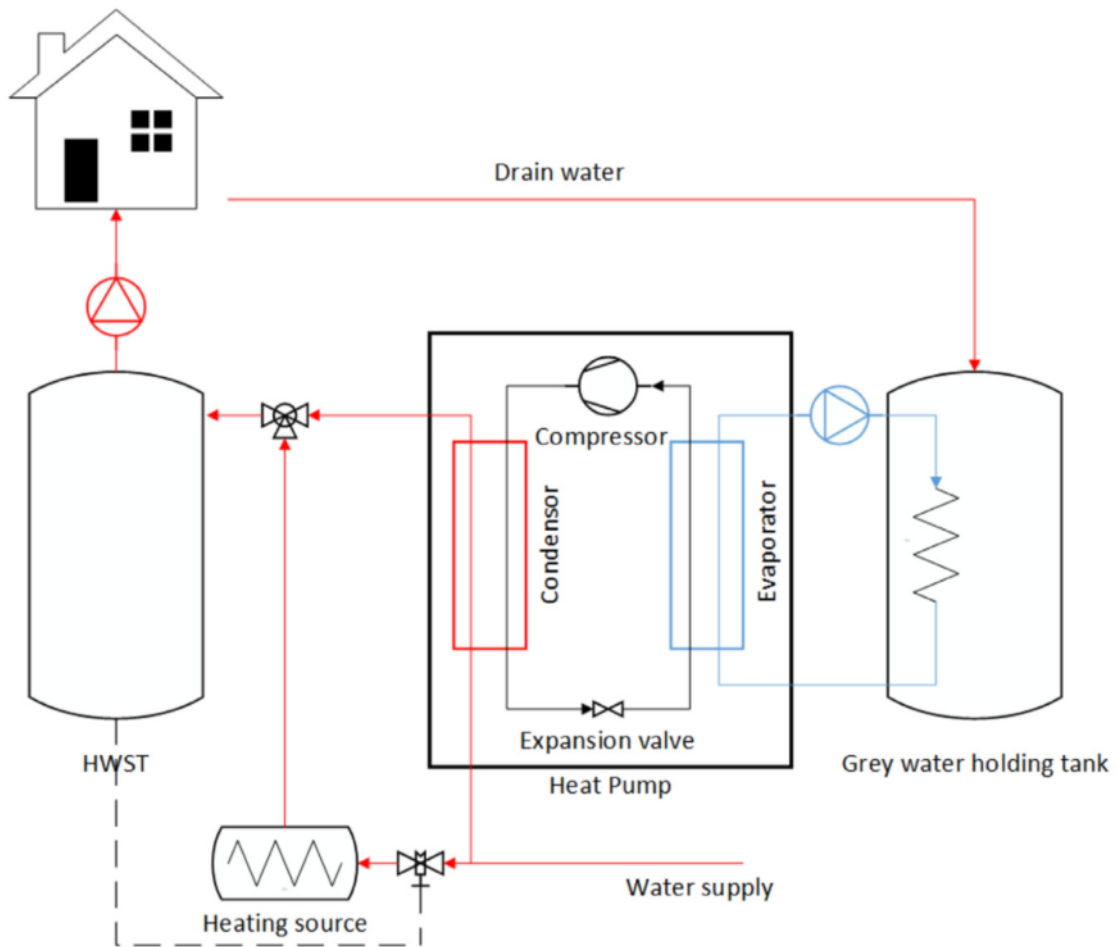
Sarnaselt muude soojusvahetitega, töötavad need vedelike temperatuuride erinevuse põhjal, kuid vastavalt paigaldusviisist ning tööpõhimõttest võib neid omakorda klassifitseerida. Vastavalt paigaldusele eristatakse horisontaalseid ja vertikaalseid soojustagasteid. Tööpõhimõttest tulenevalt jagunevad soojustagastid omakorda plaatsoojusvahetiteks, toru-torus tüüpi soojusvahetiteks ning spiraalstruktuuriga soojusvahetiteks. [42] Kohtsoojusvahetitele keskendutakse pikemalt peatükis 2.3.



Joonis 2.4 Lokaalsete soojustagastite tüübid [42]

2.2.3 Soojuspumpadega soojustagastuslahendused

Soojuspumbad on seadmed, mille abil on võimalik liigutada, rakendades välist tööd, soojusenergiat madalama temperatuuriga regioonist kõrgema temperatuuriga regiooni, vastupidiselt loomulikule soojusülekandele. [43] Soojuspumpade kasutamine võimaldab utiliseerida suuremat hulka soojusenergiat kui tavalised soojusvahetid, seejuures võimaldades kasutada reovees sisalduvat energiat näiteks ka ruumide kütteks. [44]



Joonis 2.5 Näide soojuspumbaga varustatud sooja vee valmistamise süsteemist [44]

2.3 Kohtsoojustagastid

Kohtsoojustagastid vajavad toimimiseks üheaegset külma vee ja kanalisatsioonivee voolamist, et saaks toimuda soojusülekanne peale- ja äravoolu vahel. Varasemalt on lõputões toodud välja, et dušid on üks peamisi sooja olmevee tarbijaid hoones. Sellest tulenevalt on valdav enamik turul pakutatavatest kohtsoojustagastitest suunatud duššide hallveest soojusenergia eraldamisele.

Jaotis annab ülevaate erinevatest kohtsoojustagastite tüüpidest ja nende karakteristikat mõjutavatest teguritest. Samuti tutvustatakse soojustagastitega seonduvaid arvutuslike aluseid ning majandusliku tasuvuse määramise põhimõtteid, mis on tarvilikud laboratoorsete- ja objektimõõtmiste tulemuste analüüsimiseks.

2.3.1 Lokaalsete soojustagastite tüübid ja struktuur

Lokaalseid soojustagasteid võib liigitada erinevatel viisidel, kuid erialases (teadus)kirjanduses eristatakse plaatsoojusvaheteid, toru-torus tüüpi soojusvaheteid ning horisontaalsed ja vertikaalsed soojusvahetid, milles on külmaveetoru mähisena ümber toru.

Kõige levinumaks hallvee soojusvahetite lahenduseks on soojusvaheti, milles on spiraalne veetoru mähisena paigaldatud ümber kanalisatsioonitoru või selle sisse. Nii veetoru kui ka kanalisatsioonitorustik soojusvahetis on enamasti valmistatud vasest, tulenevalt selle materjali suurest soojuseri juhtivusest. [45] Eristamiseks muudest lahendustest, on käesolevas töös edaspidi nimetatud neid spiraalsoojusvahetiteks. Soojusvaheteid on turul saada nii vertikaalse kui ka horisontaalse paigalduse jaoks. Käesolevas lõputöö praktilises osas uuritakse horisontaalse duši soojustagasti Zyphe toimivust ning selle kasutamise majanduslikku tasuvust.

Vertikaalsed hallvee soojustagastid on turul levinumad kui horisontaalsed ning nende kohta eksisteerib ka suurem teaduskirjanduslik baas. Tulenevalt vabavoolu hüdraulikast vertikaalsetes torudes (täpsemalt jaotises 2.3.2), on võimalik saavutada horisontaalpaigaldusega soojusvahetitega võrreldes kõrgemat efektiivsust. See-eest nõuavad vertikaalsed soojustagasti suuremat paigaldusruumi, mida on keeruline tagada, eriti renoveeritavates hoonetes.

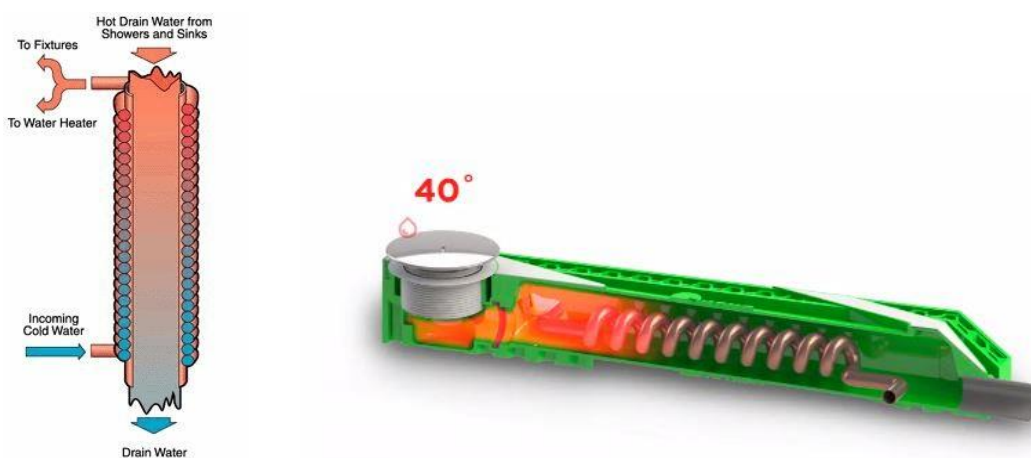
Kanadas läbiviidud uuringus testiti viite vertikaalset spiraalsoojustagastit, tasakaalustatud konfiguratsioonis, saavutati kasutegureid vahemikus 0,46-0,56. [46] Hilisemas jätkuuringus kinnitati tulemusi testides kaheksat erinevat vertikaalset soojustagastit ning loodi majandusliku kokkuhoiu kalkulaator. [47] Inglismaal ehitatud spordikompleksis kasutati eelpool viidatud Kanada töödes kasutatud soojusvahetit (konkreetset toodet poldud täpsustatud), mis teenindas segisti külma vee poolt soojendades kahte kuni kuute duši. Ökoloogiline tasuvus antud konfiguratsioonis (CO₂ ekvivalendi osas) saavutati ca 2 aastaga. Majanduslik tasuvus leiti olenevalt energiahindadest olevat 2-10 aastat. [48]

Inglismaal läbi viidud uuringus analüüsiti elukaarekulusid ning soojusvahetite paigaldamise tasuvust spordikompleksis, milles paigaldati vertikaalsed soojustagastid hoone duširuumidesse mitte-tasakaalustatud konfiguratsioonis (vt jaotis 2.3.3. ühendusviis C). Üks vertikaalne soojustagasti oli paigaldatud 5 duši kombineeritud äravoolule. Ökoloogilise jalajälje poolest saavutasid soojustagastid tasuvuse vähem kui kahe aastaga. Uuringu kohaselt majanduslikku tasuvust 10-e aastase perioodiga testobjektile ei saavutatud, tulenevalt madalast energiahinnast, mida rakendati vee

soojendamisele. Töö autorid leidsid analüüsist, et kõrgemate energiahindade korral on lahendus ka majanduslikult tasuv. [48]

Horisontaalsete soojustagastite eelis on väiksem ruumivajadus vertikaalsuunas (vertikaalsetel üldiselt 1-1,2 m), mis muudab nende paigaldamise mugavamaks. [27] Neid on võimalik betoneerida kas põranda pealevalusse või paigaldada näiteks dušikabiinide alla, selle tõttu on need näiteks ka hõlpsamini rakendatav variant renoveeritavates hoonetes, kus soovitakse tõsta energiatõhusust.

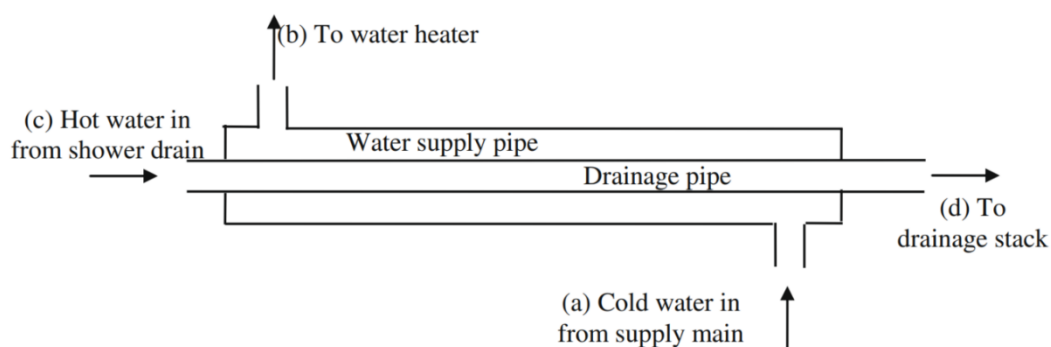
Rzezovi Tehnikaülikoolis läbiviidud uuring testis kahte sarnase struktuuriga horisontaalse soojusvaheti prototüüpi, erinevusega et ühes oli rakendatud reovee voolutakisteid, mille eesmärk oli suurenda reovee kokkupuuteaega külma veega. Voolutakistiteta soojusvaheti efektiivsus tasakaalustatud voolu tingimustes vooluhulgal 7,0 l/min reovee pealevoolu temperatuuriga 38 °C ja külma vee pealevoolu temperatuuriga 10 °C, saavutati efektiivsus 13%. [49] Voolutakistitega paigaldusele saavutati efektiivsus 25,5%. Kasutatud soojusvaheti Käesolevas lõputöös uuritav soojusvaheti Zyphe on vastavalt reovee vooluhulgale sertifitseeritud sõltumatu organisatsiooni KIWA poolt, vastavalt Belgia standardile NEN 7120:2011, efektiivsusele 23,6 % vooluhulgal 9,2 l/s. [50]



Joonis 2.6 Vertikaalne ja horisontaalne spiraalsoojusvaheti [46] [51]

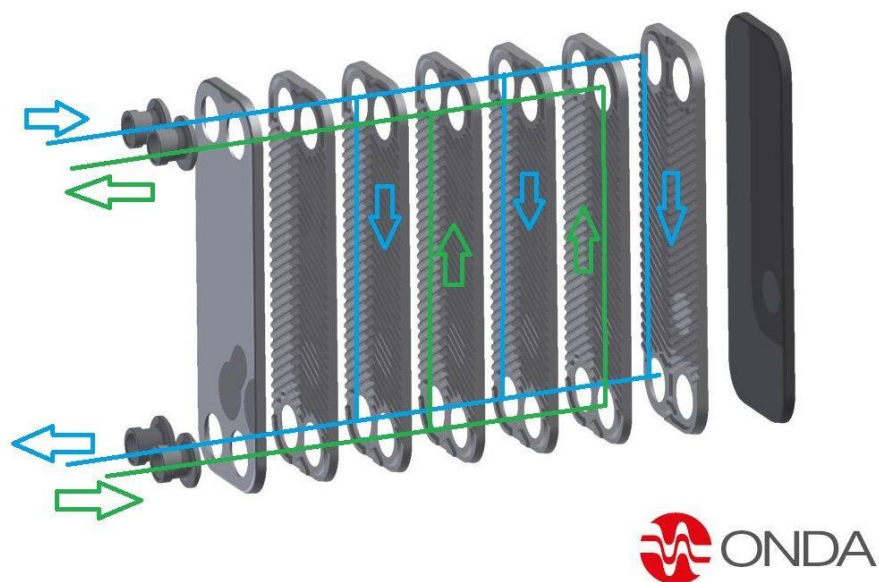
Toru-torus soojusvahetites on tsentraalse reoveetoru ümber teine toru, nende vahelises kihis voolab külm vesi. Sarnaselt spiraalsoojusvahetitega, on ka need suurema kasuteguriga, kui paigaldada vertikaalselt. Ühe erijuhuna uuriti horisontaalset soojusvahetit, milles oli paigaldatud veetoru horisontaalse duši reovee äravoolutoru põhja, olenevalt vooluhulgast saavutati hallvee sisendtemperatuuril 37 °C efektiivsus vahemikus 23,0-26,5 %. [27] Hongkongis läbiviidud uuringus uuriti 1 m pikkust

soojusvahetit, De100 PVC veetoru sees kulges De40 vasest kanalisatsioonitoru, saavutati efektiivsuseks 15 %. [22]



Joonis 2.7 Horisontaalse toru-torus soojusvaheti skeem [22]

Soojusliku efektiivsuse poolest on parimad plaatsoojusvahetid, tulenevalt väga suurest kontaktpinnast vedelike vahel. [52] Reovee soojustagastuse kontekstis laialdast kasutust leidnud probleemidega ummistumise tõttu eksploatatsiooni käigus [30] Plaatsoojusvahetid koosnevad jadamisi ühendatud metallplaatidest. Plaatide vahemikus olevates tühimikes voolab voolavad vaheldumisi ning vastassuunas (joonis 2.8). Üldjuhul on stantsitud plaatidesse muster, et suurendada soojusvaheti eripinda, seeläbi tõhustades soojusvahetuse efektiivsust.



Joonis 2.8 Plaatsoojusvaheti tööpõhimõte [53]

2.3.2 Efektiivsus mõjutavad tegurid

Soojusvaheti efektiivsus katsetingimustel on defineeritud kui selle reaalse soojusülekanne võimsus jagatuna selle maksimaalse teoreetilise soojusülekannevõimusega samadel tingimustel. Soojusenergia ülekande kiirust mõjutab rida tegureid, mille võib jaotada kahte gruppi: soojustagasti füüsikalistest omadustest olenevad ning veetarbimisest olenevad tegurid. Soojustagasti omadused on kasutatud materjalid ning nende omadused (soojuserijuhtivused, torude seinte paksused, süsteemi paigutus, soojusülekanne toimumise pindala jm). [54]

Fourieri seadusest on teada, et soojusvool läbi pinna on võrdeline pinna soojusläbivuse, pindala ning temperatuuride erinevusega pinna kummalgi poolel. (vt valem 8). Sellest lähtub, et teoreetiliselt peaks soojusvaheti konduktiivset soojusvoolu, ning seeläbi ka efektiivsus mõjutama järgnevad faktorid [55]:

- Soojusläbivus tarindil külma vee ja reovee vahel. Sõltub kasutatud materjalide soojuserijuhtivustest ning paksustest. Soojusvool kasvab soojusläbivuse kasvuga, kasutades parema soojuserijuhtivusega materjale või vähendades isoleerivate kihtide paksust.
- Soojusülekanne pindala näitab kui suur on kokkupuutepind külma ja sooja vedeliku voogude vahel. Soojusvool kasvab suurendades pindala, mis tähendab üldjuhul soojusvaheti pikkuse suurendamist. Sel põhjusel on ka külmaveetorud hallvee soojusvahetites üldjuhul spiraalsed.
- Temperatuuride vahe näitab osakeste keskmise kineetilise energia erinevust külmal veel ja reoveel. Soojusvoolu soojusvahetis saab tõsta vähendades külma vee pealevoolu temperatuuri ning tõstes duši äravoolu temperatuuri.

$$Q = U \cdot A \cdot (T_1 - T_2) \quad (8)$$

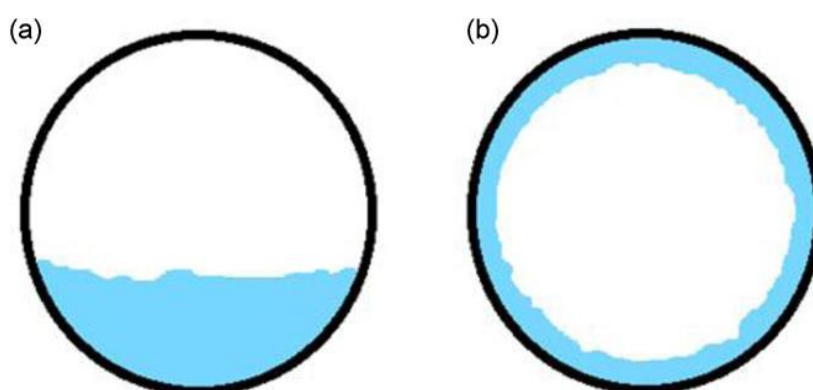
Kus Q – Soojusvool [W];

U – Soojusläbivus [W/(m²K)];

A – Soojusülekanne pindala [m²];

T_1, T_2 – Temperatuurid pinna välispiiretel [K]

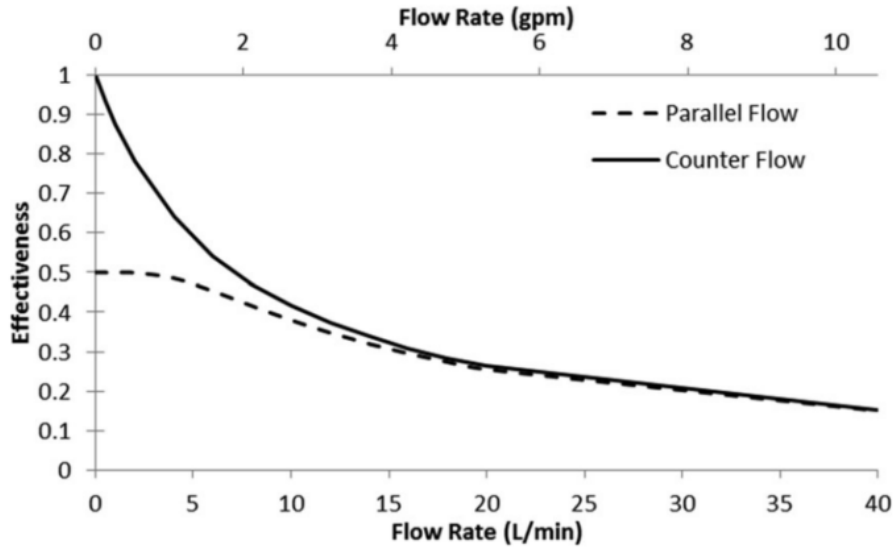
Vertikaalsed kanalisatsioonitorud on üldjuhul sihilikult üledimensioneeritud vooluhulkade suhtes, mis neis esinevad. Toru diameetri suhtes vähene vooluhulk moodustab pindpinevuse toimel õhukese kihi vertikaalse torulõigu seinale. Toru seina kattuvus vedelikuga tähendab suurt kokkupuutepinda soojusvaheti seinaga, millega kaasneb efektiivne soojusvahetus ja soojusvaheti suur kasutegur. [46] Kaldenurga muutmine vertikaali suhtes väiksemaks, toob kaasa duši vooluhulkadel kaasa soojusvaheti kasuteguri langemise voolavas veekihti tekkivate ebaühtluste tekkimise tõttu. [33] Horisontaalsetes torulõikudes ja soojusvahetites on seevastu täidetud vaid osa torust, mis tähendab väiksemat märgpiiret. See efekt on illustreeritud joonisel 2.9. [27]



Joonis 2.9 Tüüpiline ristlõige reovee voolust horisontaalses torus (a) ja vertikaalses torus (b) [27]

Kanada valitsuseagentuuri Natural Resources Canada haldusalasse jääb riigi looduslike ressursside jätkusuutliku majandamise koordineerimine, sealhulgas hoonete energiatõhususega seonduva regulatsiooni koostamine. [56] Nende poolt tellitud uuringuteseeria põhjal loodi kalkulaator vertikaalsete soojusvahetite majandusliku tasuvuse hindamiseks. Sisendparameetriteks on duši temperatuur, duši pikkus ja sagedus, duši vooluhulk (olenevalt segisti tüübist), veesoojendi liik, soojusvaheti efektiivsusfunktsioon ning ühendusviis ja külma vee sisendtemperatuur. [47]

Vooluhulkade suurendes väheneb soojusvaheti kasutegur. [27] [22] [45] Põhjuseks on on lühem kontaktaeg külmal veel soojusvahetis – voolukiirus on võrdeline vooluhulga kasvuga. [57] Vastuvoolu konfiguratsioonis läheneb soojusvaheti efektiivsus arvule 1 voolu lähenedes nullile, paralleelse voolu puhul läheneb efektiivsuss 0,5'le (täpsemalt jaotises 2.3.4). [45]. Väikestel vooluhulkadel on praktilises rakenduses vertikaalsete soojusvahetite kasutegur ebastabiilne soojusvaheti seina ebaühtlase märgumise tõttu ning ei asetu üheselt tüüpsele vooluhulk-efektiivsus polünoomsele kõverale [57] (vt ka joonis 2.10).



Joonis 2.10 Paralleelse soojusvaheti teoreetiline efektiivsuskõver $C_p = 4200 \text{ J/kgK}$ ja $UA = 500 \text{ W/K}$ korral [45]

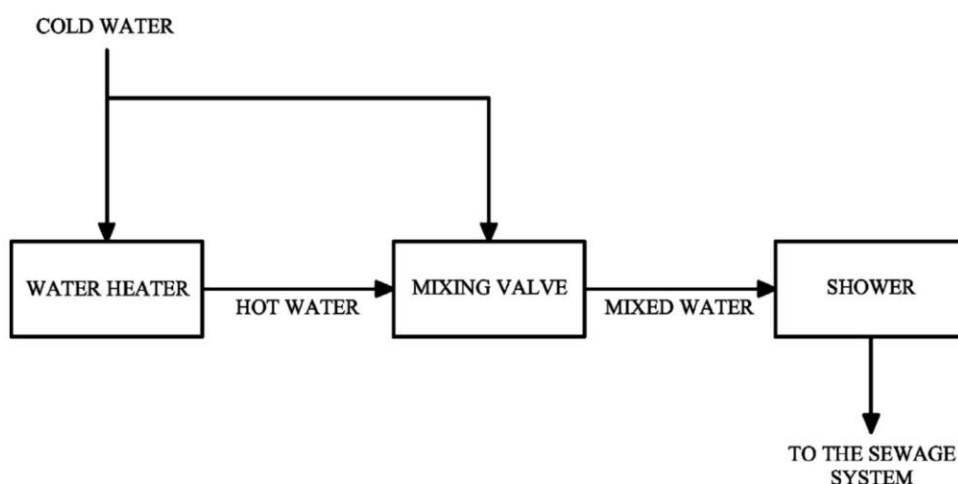
Kuna ülekantava soojuse hulk on sõltuvuses külma ja sooja vee kokkupuuteajast soojusvahetis, on võimalik kasutegurit kasvatada suurendades kontaktaega. Üheks võimaluseks on vähendada külma vee voolukiirust torudes, kasutades suurema diameetriga pealevoolutoru. Teiseks võimaluseks on paigaldada reovee äravoolutorusse voolutõkestid, mis vähendavad reovee voolukiirust. Poolas testiti horisontaalset soojustagastit voolutõkestitega ning ilma, kasutegurid erinesid 13% võrra. [49] Horisontaalsete soojustagastites mõjutab vee voolukiirust ka toru kaldenurk horisontaali suhtes – suurem kaldenurk tähendab suuremat voolukiirust, kuid eksperimentaalsed mõõtmised on leidnud selle faktori mõju olevat marginaalse. [22] [49]

Temperatuuride vahe külma vee pealevoolul ning reovee äravoolu vahel vahel omab tugevat efekti soojusvaheti efektiivsel toimimisel. Mida kõrgem on temperatuuride dušivee äravoolul ning külma vee pealevoolul, seda intensiivsemalt toimub soojusvool vedelike vahel läbi soojusvaheti, seejuures tõuseb ka soojusvool kui tõsta nii külma kui ka sooja vee temperatuuri võrdse temperatuuri võrra. Protsess pole üle soojusvaheti pikkuse lineaarne, sest soojusvahetit läbides temperatuuride vahe väheneb. Reovesi kannab soojusenergiat üle külmale veele. [58]

2.3.3 Ühendusviisid

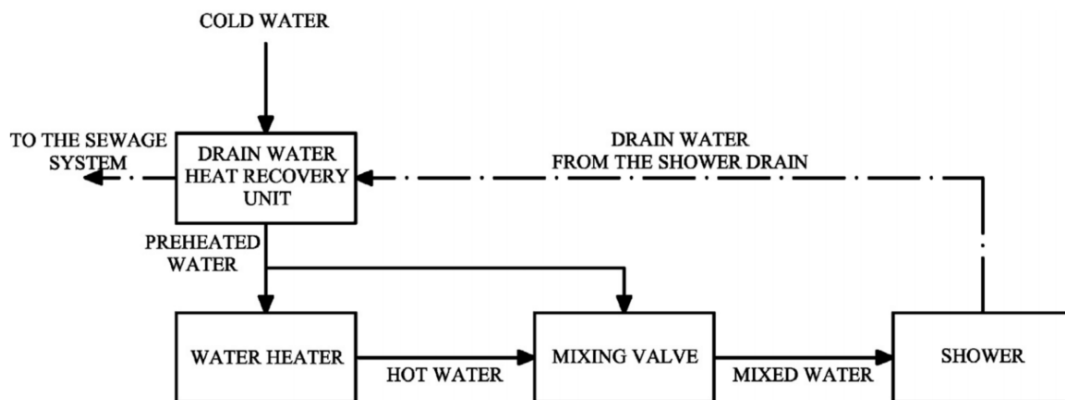
Tavalises hoone veevõrgis jaguneb veemöödusõlme järel veevarustus külma- ja soojaveesüsteemideks. Külma vesi jõuab mööda torustikku otse tarbijani, soe vesi läbib vahepealse sammuna veesoojendusseadme (soojusvaheti soojussõlmes, elektriboiler vm). Sanitaarseadmes, näiteks dušisegistis, segatakse külm ja soe vesi, et saavutada soovitud sisendtemperatuur.

Hallvee soojustagastite eesmärgiks on eelsoojendada külma vett, et vähendada süsteemi energiatarbimist, soojustagasti on vaja ühendada viisil, et sanitaarseadme poolt tarbitav külm vesi voolaks sellest läbi. Tagastatava soojuse hulk on otseses sõltuvuses viisist, milles on soojusvaheti süsteem on skemaatiliselt struktureeritud. Eksisteerib kolm soojustagasti ühendusviisi, mis on toodud välja joonistel 2.12; 2.13 ja 2.14. [17] [31] [42]



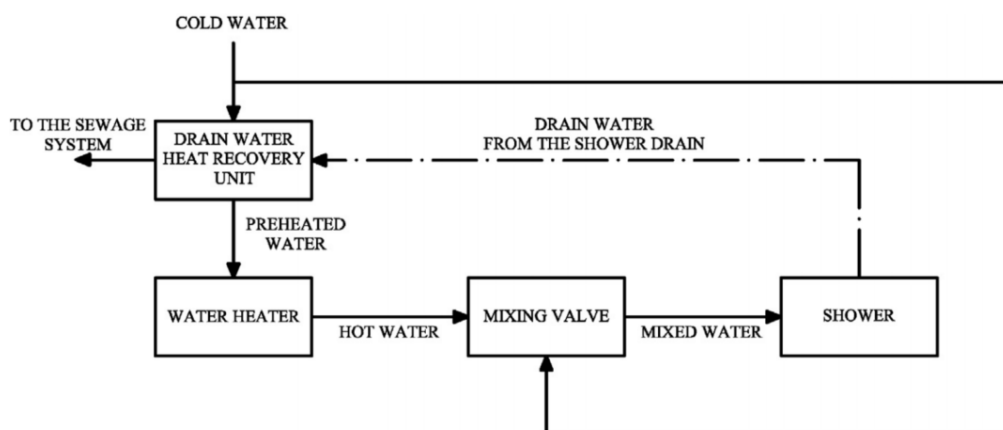
Joonis 2.11 Soojustagastita ühendusviis [17]

Ühendusviisis A (joonis 2.11) voolab külm vesi läbi soojusvaheti nii veesoojendisse kui ka segisti külma vee poolele. Külma vee vooluhulk ning reovee vooluhulk läbi soojusvaheti on võrdsed, st süsteem on tasakaalus, ning külma vee temperatuuri tõus on võrdne (mitte arvestades soojuskadusid) reovee temperatuuri langusega. [17] Ühendusviis on tagastatava soojuse hulga poolest variantidest parim, ent pole rakendatav situatsioonides, kus veesoojendi on tarbijast kaugel. Näiteks kortermajades, kus toimub sooja vee valmistamine tsentraalselt, ei oleks süsteem otstarbekas suure rajatavate torude mahu ning neis toimuvate soojuskadude tõttu. Nii Kanada standard B55.1-15 kui ka Belgia standard Belgia standard NEN 7120:2011, mis annavad eeskirjad hallvee soojustagastite testimiseks, nõuavad tasakaalustatud voolu kasutamist. [59] [29]



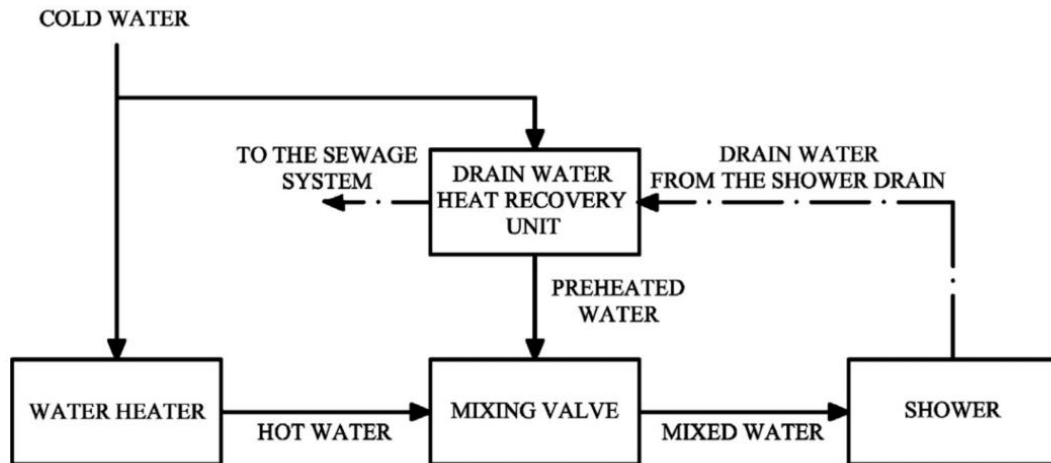
Joonis 2.12 Ühendusviis A [17]

Ühendusviisis B (joonis 2.13) voolab külm vesi läbi soojusvaheti ainult veesoojendisse. Kuna segisti külmaveepoolele minev torustik ei läbi soojusvahetit, on külma vee vooluhulk läbi soojustagasti väiksem kui reovee vooluhulk. Seetõttu on küll külma vee temperatuuritõus soojustagastis suurem kui tasakaalustatud voolu korral, kuid kumulatiivne tagastatud energia hulk väiksem. [17] Ühendusviisile B annab standard NEN 7120:2011 parandusteguri 0,75 teisendamaks energiasäästu võrreldavaks ühendusviisiga A. [29]



Joonis 2.13 Ühendusviis B [17]

Ühendusviisis C (joonis 2.14) voolab külm vesi segisti külma vee poolele ja veesoojendil on eraldi ühendus. Sarnaselt ühendusviisiga C, pole külma vee ja reovee vooluhulgad tasakaalustatud. Ühendusskeemi C on kasutatud käesoleva lõputöö laborimõõtmiste ja objektimõõtmistes. Ühendusviisile B annab standard NEN 7120:2011 parandusteguri 0,75 teisendamaks energiasäästu võrreldavaks ühendusviisiga A. [29]



Joonis 2.14 Ühendusviis C [17]

2.3.4 Arvutuslikud alused

Soojusvahetite efektiivsuse iseloomustamiseks kasutatakse valdavalt NTU (*Number of Transfer Units*) meetodit. NTU meetodis on efektiivsus ε defineeritud toimuva soojusvoo q ja katsetingimuste maksimaalse soojusvoo q_{\max} suhtena. Efektiivsus on väljendatud valemis (9). [54]

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{\max}} \quad (9)$$

Kus ε – Soojusvaheti efektiivsus [];

q – Soojusvahetis toimuv soojusülekanne ajaühikus (soojusvoog) [W];

q_{\max} – Maksimaalne võimalik soojusülekanne ajaühikus [W];

Edasised võrrandid toimivad eeldusel, et soojuskaod soojusvahetist on marginaalsed. Soojusvahetis toimuvat soojusülekannet võib arvutada nii vedeliku pealevoolu kui ka tagasivoolu vooluhulkade põhjal, hallvee soojustagastite puhul teisisõnu nii eelsoojendatava külma vee kui kanaliseeritava hallvee vooluhulkade põhjal.

$$q = C_c(T_{c,o} - T_{c,i}) = m_c c_{p,c}(T_{c,o} - T_{c,i}) = C_h(T_{h,i} - T_{h,o}) = m_h c_{p,c}(T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (10)$$

Kus q – Soojusülekanne ajaühikus [W];

C_c – Külma vee (eelsoojendatava) soojusmahtuvuse määr [W/°C];

$T_{c,o}$ – Külma vee (eelsoojendatava) temperatuur soojusvahetist väljudes [°C];

$T_{c,i}$ – Külma vee (eelsoojendatava) temperatuur soojusvahetisse sisenedes [°C];
 m_c – Külma vee (eelsoojendatava) massvooluhulk [kg/s];
 $c_{p,c}$ – Külma vee (eelsoojendatava) erisoojus [J/kg°C];
 C_h – Sooja vee (hallvee) soojusmahtuvuse määr [W/°C];
 $T_{h,i}$ – Sooja vee (hallvee) temperatuur soojusvahetisse sisenedes [°C];
 $T_{h,o}$ – Sooja vee (hallvee) temperatuur soojusvahetist väljudes [°C];
 m_h – Sooja vee (hallvee) massvooluhulk [kg/s];
 $c_{p,h}$ – Sooja vee (hal) erisoojus [J/kg°C];

Soojusvaheti efektiivsus sõltub alati sisendparameetritest (sisend- ja väljundtemperatuurid vedelikel, soojusülekanne pindala jm.) Maksimalne termodünaamiliselt võimalik soojusülekanne toimub juhul kui madalama soojusmahtuvuse määrga vedelik, mis ühtib hallvee soojusvahetites madalama vooluhulgaga vedelikuga, saavutab maksimaalse temperatuurierinevuse. Vastuvoolulokorras on tegemist sooja vee ning külma vee sisendtemperatuuride vahega. [54]

$$q_{max} = C_{min}(T_{h,i} - T_{c,i}) = (m c_p)_{min}(T_{h,i} - T_{c,i}) \quad (11)$$

Kus q_{max} – Maksimaalne võimalik soojusülekanne ajaühikus [W];
 C_{min} – Väiksem soojusmahtuvuse määr [W/°C];
 $T_{h,i}$ – Sooja vee (hallvee) temperatuur soojusvahetisse sisenedes [°C];
 $T_{c,i}$ – Külma vee (eelsoojendatava) temperatuur soojusvahetisse sisenedes [°C];
 C_{min} – Väiksem soojusmahtuvuse määr [W/°C];

Kokkuvõtvalt võib süsteemi efektiivsuse väljendada valemiga (12).

$$\varepsilon = \frac{C_c(T_{c,o} - T_{c,i})}{C_{min}(T_{h,i} - T_{c,i})} = \frac{C_h(T_{h,i} - T_{h,o})}{C_{min}(T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (12)$$

Kus q – Soojusvaheti efektiivsus [];
 C_{min} – Väiksema soojusmahtuvuse määr [W/°C];
 $T_{h,o}$ – Sooja vee (hallvee) temperatuur soojusvahetist väljudes [°C];
 $T_{c,i}$ – Külma vee (eelsoojendatava) temperatuur soojusvahetisse sisenedes [°C];

Kuna hallvee soojusvahetite eesmärgiks on soojusülekanne soojalt hallveelt eelsoojendatavale külmale veele, arvutatakse soojusvaheti efektiivsust pealevoolu (külma vee) temperatuuride põhjal. Juhul kui süsteem on tasakaalus $C_c = C_h = C_{min}$,

taanduvad soojusmahtuvuse määrad välja ning soojustagasti efektiivsust saab väljendada valemiga (13). Sama valem kehtib ka juhul kui tegu pole tasakaalus süsteemiga, kuid kanaliseeritava vee vooluhulk ületab soojustagastit läbivat külma vee vooluhulka.

$$\varepsilon = \frac{(T_{c,o} - T_{c,i})}{(T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (13)$$

Kus q – Soojusvaheti efektiivsus [];

C_{\min} – Väiksema soojusmahtuvuse määr [W/°C];

$T_{h,o}$ – Sooja vee (hallvee) temperatuur soojusvahetist väljudes [°C];

$T_{c,i}$ – Külma vee (eelsoojendatava) temperatuur soojusvahetisse sisenedes [°C];

Tsentraliseeritud süsteemides võib harvadel juhtudel, nagu pesumasinate või vannide tühjenemisel, tulla ette olukordi, kus külma vee vooluhulk ületab hallvee vooluhulga. Sel juhul on soojustagasti efektiivsus väljendatav valemiga (13). Külma ja sooja vee tihedused ja soojuserijuhtivused võib süsteemis esinevatel temperatuuridel lugeda võrdseks. Hallvee kohtsoojustagastite töös on sellised situatsioonid ebastandardised ning edaspidi lähtutakse töös eeldusest, et süsteemi tasakaalustamata konfiguratsioonis on veevarustussüsteemi poolne külma vee vooluhulk väiksem kui kanaliseeritava hallvee vooluhulk. [58]

$$\varepsilon = \frac{C_c(T_{c,o} - T_{c,i})}{C_h(T_{h,i} - T_{c,i})} = \frac{m_c c_{p,c}(T_{c,o} - T_{c,i})}{m_h c_{h,c}(T_{h,i} - T_{c,i})} = \frac{m_c \rho_c c_{p,c}(T_{c,o} - T_{c,i})}{m_h \rho_h c_{h,c}(T_{h,i} - T_{c,i})} = \frac{V_c(T_{c,o} - T_{c,i})}{V_h(T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (14)$$

Kus q – Soojusvaheti efektiivsus [];

C_{\min} – Väiksema soojusmahtuvuse määr [W/°C];

$T_{h,o}$ – Sooja vee (hallvee) temperatuur soojusvahetist väljudes [°C];

$T_{c,i}$ – Külma vee (eelsoojendatava) temperatuur soojusvahetisse sisenedes [°C];

Valemis 14 on toodud välja, et soojusvoog soojustagastis sõltub nii soojustagasti materjalist kui ka soojusülekanne pindalast, teisisõnu vedelike kokkupuutepinnast. Sidumaks soojustagasti efektiivsust ning soojusülekanne soojustagasti geomeetriaga, on defineeritud NTU mõiste. Tuleb rõhutada, et NTU ja efektiivsus on omavahel funktsioonina seotud mõisted, seega mõlemad sõltuvad katsetingimustest.

$$NTU = \frac{UA}{C_{min}} \quad (15)$$

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{(-NTU(1 + \frac{C_{min}}{C_{max}}))}}{1 - e^{(-NTU(1 + \frac{C_{min}}{C_{max}}))}} \quad (16)$$

- Kus q – Soojusvaheti efektiivsus [];
 C_{min} – Väiksema soojusmahtuvuse määr [W/°C];
 $T_{h,o}$ – Sooja vee (hallvee) temperatuur soojusvahetist väljudes [°C];
 $T_{c,i}$ – Külma vee (eelsoojendatava) temperatuur soojusvahetisse sisenedes [°C];

Jagades soojusvaheti soojusülekanne ajaühikus vee soojendamiseks kulunud energia hulgaga ajaühiku kohta, on võimalik leida lõputöö kontekstis defineeritud energiasäästutegur S_1 , mis väljendab mitte-tasakaalus voolukonfiguratsioonis ühendatud soojustagasti poolt tagastatava energia hulka ilma soojustagastita ühendusviisi suhtes. Tähtis eeldus, et võrrand töötaks, on ignoreerida soojuskadusid torustikus, soojusvahetis ning vee langemisel dušiootsikust, st võrrand vaatleb soojustagastit eraldatuna laiemast süsteemist.

$$S_1 = \frac{q}{q_w} = \frac{C_c(T_{c,o} - T_{c,i})}{C_h(T_{h,i} - T_{c,i})} = \frac{m_c c_{p,c}(T_{c,o} - T_{c,i})}{m_h c_{p,h}(T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (17)$$

- Kus S_1 – Energiasäästutegur [];
 q – Soojusvahetis toimuv soojusülekanne ajaühikus (soojusvoog) [W];
 $T_{c,o}$ – Külma vee (eelsoojendatava) temperatuur soojusvahetist väljudes [°C];
 $T_{c,i}$ – Külma vee (eelsoojendatava) temperatuur soojusvahetisse sisenedes [°C];
 $T_{h,i}$ – Sooja vee (hallvee) temperatuur soojusvahetisse sisenedes [°C];
 $T_{c,i}$ – Külma vee (eelsoojendatava) temperatuur soojusvahetisse sisenedes [°C];
 C_c – Külma vee (eelsoojendatava) soojusmahtuvuse määr [W/°C];
 C_h – Sooja vee (hallvee) soojusmahtuvuse määr [W/°C];

Tasakaalustatud voolu tingimustes, kus $C_c=C_h$, taanduvad nimetatud tegurid välja ning energiasäästutegur ühtib soojusvaheti efektiivsusega.

$$S_1 = \varepsilon = \frac{(T_{c,o} - T_{c,i})}{(T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (18)$$

Kanada standard B55.1-15 *Test method for measuring efficiency and pressure loss of drain water heat recovery units* [59] kui ka Belgia standard NEN 7120:2011 *Energy performance of buildings - Determination method* [29] sätestavad tulemuste

võrreldavuse nimel nimel katsetamiseks kindlad temperatuurid, vooluhulgad ning tingimuse, et süsteem peab olema tasakaalus. Tasakaalustatud süsteemide puhul ühtib soojusvaheti efektiivsus energiasäästuteguriga, ent mitte-tasakaalus konfiguratsioonis on soojustagasti efektiivsus kõrgem kui energiasäästutegur.

Belgia standard NEN 7120:2011 annab empiirilise teguri, millega korrutades on võimalik muuta andmed võrreldavaks soojustagastite erinevates konfiguratsioonides. Waterloo Ülikoolis läbiviidud uuring tuletas empiirilised valemid, mille abil on võimalik täpselt teisendada standardi B55.1-15 testitud soojustagastite efektiivsus mitte-tasakaalustatud voolutingimustele. [60]

Käesoleva lõputöö praktilises pooles uuritakse horisontaalset kohtsoojustagastit, mis on tasakaalustama konfiguratsioonis (vt peatükk 2.3.3 ühendusviis C). Külma vee vooluhulk süsteemis on kasutatavas ühendusviisis väiksem kui soojusvahetit läbi hallvee vooluhulk, mille tõttu on e-NTU meetodi kohane efektiivsus kõrgem kui tasakaalus voolu korral samadel temperatuuridel. [22] Mitte-tasakaalustatud konfiguratsioonis testitud soojustagastite puhul tuleb seega alati arvestada, et nominaalne efektiivsus on küll suurem kui tasakaalustatud süsteemi puhul, kuid reaalne energiasääst on väiksem.

2.3.5 Majanduslik tasuvus

Soojustagastite rakendamine on võimalus vähendada hoonete energiatarvet ja sellega kaasnevat ökoloogilist jalajälge. Tarbija jaoks on tehnoloogia kasutusele võtmisel selle rahaline tasuvus primaarne. Õigesti toimiv soojusvaheti, mis kannab energiat üle kanaliseeritava hallvee voolult külmale veele, aitab säästa energiat, ent soojusvahetit valides tuleb olenevalt paigaldusviisist ning tarbimisrežiimist hinnata, kas soojusvaheti kasuliku eluea jooksul seadme rakendamisest saavutatud rahaline võit ületab seadme paigaldamisest lähtuva alginvesteeringu ning eksploatatsioonikulud. Majandusliku tasuvuse meetodika osas on põhimahus lähtunud Rzeszowi Ülikoolis läbiviidud ulatuslikele uuringutele hallvee soojustagastite majandusliku tasuvuse kohta [17] [42], milles pakutud valemeid, notatsiooni ja põhimõtteid on teiste viidatud allikate abil

Soojusvaheti tasuvust arvutatakse käesoleva lõputöö kontekstis Nüüdispuhasväärtus (NPV) meetodiga, mille abil on võimalik määrata rahavoogude väärtus perioodi jooksul. Juhul kui $NPV > 0$, on investeering sätestatud ajaperioodi vältel tasuv; kui $NPV < 0$, ei ole investeering tasuv; $NPV = 0$ korral ei ole investeering kasumlik ega kahjumlik ning otsus

soojustagasti paigaldamiseks tuleks teha rõhuga mitterahalistel kaalutlustel nagu süsteemi arendatavus ja töökindlus jm. [17]

Valem (19) arvestab negatiivse rahavoona alginvesteeringut. Positiivse rahavoona arvestatakse aastase perioodi jooksul kulutatud primaarenergia hulka soojusvahetita konfiguratsioonis ER_0 (vt peatükk 2.3.3. ühendusviis 0), millest on lahutatud soojusvahetiga primaarenergia konfiguratsiooni energiahulk ER_t , teisisõnu aastane energiasääst. Soojusenergia ühikhind C_{et} väljendab primaarenergia kWh hinda vaadeldaval aastal t . Diskontomäärana r arvestatakse aastast inflatsiooni.

$$NPV = \sum_{t=0}^t \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (19)$$

$$CF_t = -INV_t + S_t \quad (20)$$

$$S_t = (ES_t) \cdot C_{et} = (CR_{rot} - CR_t) \cdot C_{et} \quad (21)$$

Kus NPV – Nüüdispuhasväärtus [€];
 CF_t – Rahavoog aastal t [€];
 r – Diskontomäär [];
 INV – Alginvesteering [€];
 S_t – Soojusvaheti kasutamisest tulenev kokkuhoid aastal t [€];
 ES_t – Primaarenergia sääst aastal soojusvaheti kasutamise tõttu [kWh];
 ER_{rot} – Primaarenergia tarbimine soojusvahetita aastal t [kWh];
 ER_t – Primaarenergia tarbimine soojusvahetita aastal t [kWh];
 C_{et} – Primaarenergia kWh hind aastal t [€/kWh];

Kasutades NPV meetodit on võimalik leida diskontotasuvusaeg DPP, mis väljendab aega, mille jooksul energia kokkuhoiust saavutatud sääst võrdsustub alginvesteeringuga, st $NPV=0$. [42]

$$DPP = Y + \frac{|NPV_Y|}{CF_{(Y+1)}} \quad (22)$$

Kus DPP – Diskontotasuvusaeg [a];
 Y – Täisaastate arv enne kapitalimahu taastumist [a];
 NPV – Nüüdispuhasväärtus aastal Y [€];
 $CF_{(Y+1)}$ – Diskonteeritud Rahavoog aastal $Y+1$ [€];

Samadel külma- ja sooja vee sisendtemperatuuridel ja segisti vooluhulgal, on soojusvaheti efektiivsus ning sellest tulenevalt aastane energiakulu erinevad. Jaotises 2.3.3 on toodud välja soojustagasti ühendusviisid 0, A, B ja C.

$$C_{r0t} = \frac{365 \cdot D \cdot F \cdot p \cdot C_{h0,m} \cdot (T_{wh} - T_{wc})}{\mu \cdot 3,6 \cdot 10^6} = \frac{365 \cdot D \cdot F \cdot m_{0,h} \cdot p \cdot c_{pw,0} \cdot (T_{wh} - T_{wc})}{\mu \cdot 3,6 \cdot 10^6} \quad (23)$$

$$C_{rAt} = \frac{365 \cdot D \cdot F \cdot p \cdot C_{hA,m} \cdot (T_{wh} - T_{wpA})}{\mu \cdot 3,6 \cdot 10^6} = \frac{365 \cdot D \cdot F \cdot m_{A,h} \cdot p \cdot c_{pw,A} \cdot (T_{wh} - T_{wpA})}{\mu \cdot 3,6 \cdot 10^6} \quad (24)$$

$$C_{rBt} = \frac{365 \cdot D \cdot F \cdot p \cdot C_{hB,m} \cdot (T_{wh} - T_{wpB})}{\mu \cdot 3,6 \cdot 10^6} = \frac{365 \cdot D \cdot F \cdot m_{B,h} \cdot p \cdot c_{pw,B} \cdot (T_{wh} - T_{wpB})}{\mu \cdot 3,6 \cdot 10^6} \quad (25)$$

$$C_{rCt} = \frac{365 \cdot D \cdot F \cdot p \cdot C_{hC,m} \cdot (T_{wh} - T_{wc})}{\mu \cdot 3,6 \cdot 10^6} = \frac{365 \cdot D \cdot F \cdot m_{C,h} \cdot p \cdot c_{pw,C} \cdot (T_{wh} - T_{wc})}{\mu \cdot 3,6 \cdot 10^6} \quad (26)$$

Kus C_{rkt} – Primaarenergia kulu (elekter, gaas, võrgusoojus jm) [kWh];

D – Elanike arv [in];

F – Dušide keskmine arv elaniku kohta päevas [1/in];

p – Keskmine duši kestus [s];

$C_{hk,m}$ – Vastava konfiguratsiooni segistisse siseneva sooja vee (soojaveearustuse) soojusmahtuvuse määr [W/°C];

T_{wh} – Segistisse siseneva sooja vee (soojaveearustuse) temperatuur [°C];

T_{wc} – Veevarustue külma vee temperatuur [°C];

T_{wpk} – Vastava konfiguratsiooni eelsoojendatud vee temperatuur [°C];

$m_{k,h}$ – Vastava konfiguratsiooni segistisse siseneva sooja vee (soojaveearustuse) massvooluhulk [kg/s];

c_{pwk} – Konfiguratsioonis soojendatava vee erisoojus [J/kgK];

Lähtuvalt termodünaamika esimest seadusest tulenevalt energiabilansist peab külma vee vool segistis saama võrdse hulga soojusenergiat kui sooja vee vool loovutab, et summaarne vool segistist saavutaks seadesuurus. Sellest lähtuvalt on võimalik avaldada kõikide ühendusviiside jaoks veesoojendit läbiva vee massvooluhulgad. [17]

$$\begin{cases} m_{0h} \cdot c_{p0h} \cdot (T_{wh} - T_{wm}) = m_{0c} \cdot c_{p0c} \cdot (T_{wm} - T_{wc}) \\ m_{wm} = m_{0c} + m_{0h} \end{cases} \quad (27)$$

$$\begin{cases} m_{0h} = \frac{m_{wm} \cdot c_{p0c} \cdot (T_{wm} - T_{wc})}{c_{p0h} \cdot (T_{wh} - T_{wm}) + c_{p0c} \cdot (T_{wm} - T_{wc})} \\ m_{0c} = m_{wm} - m_{0h} \end{cases} \quad (28)$$

$$\begin{cases} m_{Ah} = \frac{m_{wm} \cdot c_{pAc} \cdot (T_{wm} - T_{wp1})}{c_{pAh} \cdot (T_{wh} - T_{wm}) + c_{pAc} \cdot (T_{wm} - T_{p1})} \\ m_{Ac} = m_{wm} - m_{Ah} \end{cases} \quad (29)$$

$$\begin{cases} m_{Bh} = \frac{m_{wm} \cdot c_{pBc} \cdot (T_{wm} - T_{wc})}{c_{pBh} \cdot (T_{wh} - T_{wm}) + c_{pBc} \cdot (T_{wm} - T_{wc})} \\ m_{Bc} = m_{wm} - m_{Bh} \end{cases} \quad (30)$$

$$\begin{cases} m_{Ch} = \frac{m_{wm} \cdot c_{pCc} \cdot (T_{wm} - T_{wp3})}{c_{pCh} \cdot (T_{wh} - T_{wm}) + c_{pCc} \cdot (T_{wm} - T_{wp3})} \\ m_{Cc} = m_{wm} - m_{Ch} \end{cases} \quad (31)$$

- Kus m_{wm} – Segisti massivooluhulk [kg/s];
 m_{kh} – Vastava konfiguratsiooni segistisse siseneva sooja vee (soojaveearustuse) massivooluhulk [kg/s];
 m_{kc} – Vastava konfiguratsiooni segistisse külma vee poolele siseneva vee massivooluhulk [kg/s];
 T_{wh} – Segistisse siseneva sooja vee (soojaveearustuse) temperatuur [°C];
 T_{wc} – Veevarustuse külma vee temperatuur [°C];
 T_{wpK} – Vastava konfiguratsiooni eelsoojendatud vee temperatuur [°C];
 c_{pwK} – Konfiguratsioonis soojendatava vee erisoojus [J/kgK];

Teades soojustagasti soojusülekanne ajaühiku kohta (vt valem 9 jaotis 2.3.4), on võimalik leida arvutuslikult soojustagastist väljuva eelsoojendatud külma vee temperatuur.

$$T_{wpA} = \frac{q_A}{m_{heA} \cdot c_{prA}} + T_{wc} \quad (32)$$

$$T_{wpB} = \frac{q_B}{m_{heB} \cdot c_{prB}} + T_{wc} \quad (33)$$

$$T_{wpC} = \frac{q_C}{m_{he} \cdot c_{prC}} + T_{wc} \quad (34)$$

- Kus T_{wpK} – Vastava konfiguratsiooni eelsoojendatud vee temperatuur [°C];
 m_{heK} – Vastava konfiguratsiooni soojustagastit läbiva külma vee massivooluhulk [kg/s];
 T_{wc} – Veevarustuse külma vee temperatuur [°C];
 c_{prK} – Konfiguratsioonis soojendatava vee erisoojus [J/kgK];

Alternatiivne viis leida aastane aastane energiasääst, on teades süsteemi energiasäästutegurit, tasakaalustatud süsteemi puhul selle efektiivust, korrutada soojusvahetita konfiguratsiooni energiakulu läbi energiasäästuteguriga.

$$ES_t = \frac{365 \cdot D \cdot p \cdot r \cdot C_{h0,m} \cdot (T_{wh} - T_{wc})}{\mu \cdot 3,6 \cdot 10^6} \cdot S_1 \quad (35)$$

- Kus ES_t – Primaarenergia aastane sääst (elekter, gaas, võrgusoojus jm) [kWh];
 D – Elanike arv [in];
 r – Dušide keskmine arv elaniku kohta päevas [1/in];
 p – Keskmine duši kestus [s];
 $C_{hk,m}$ – Vastava konfiguratsiooni segistisse siseneva sooja vee (soojaveearustuse) soojusmahtuvuse määr [W/°C];
 T_{wh} – Segistisse siseneva sooja vee (soojaveearustuse) temperatuur [°C];
 T_{wc} – Veevarustuse külma vee temperatuur [°C];
 T_{wpk} – Vastava konfiguratsiooni eelsoojendatud vee temperatuur [°C];
 $m_{k,h}$ – Vastava konfiguratsiooni segistisse siseneva sooja vee (soojaveearustuse) massvooluhulk [kg/s];
 c_{pwk} – Konfiguratsioonis soojendatava vee erisoojus [J/kgK];

Kuigi NPV ja seeläbi ka DPP sõltuvad energia kokkuhoiust, seega suurem kogus kanaliseeritavat vett kõrgemal temperatuuril toob kaasa diskontotasuvusmäära lühenemise. Sellest hoolimata, nii ökoloogilise kui majandusliku poole pealt on tarbijale tasuvam vähendada veekulu. [61]

Töö praktilises osas teen arvutuste lihtsustamiseks järgnevad eeldused:

- Vee erisoojus on temperatuurist olenemata 4,18 kJ/(kgK);
- Vee tihedus on temperatuurist sõltumata 1000 kg/m³;
- Soojusvahetis ning torustikes ei toimu soojuskadusid;
- Efektiivsuse arvutused tehakse stabiliseerunud (*steady-state*) olekus olevale süsteemile;
- Segistis väljuv vooluhulk on igal hetkel võrdne kanaliseeritava vee vooluhulgaga;
- Külma vee sisendtemperatuur on loetud aasta vältel konstantseks väärtuseks 10 °C. Akadeemia tee 5 2018. aasta keskmine sisendtemperatuur oli 9,6 °C.

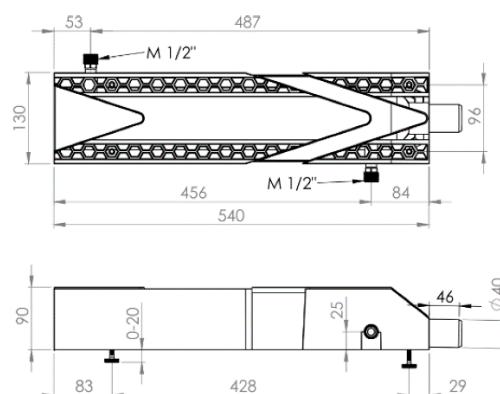
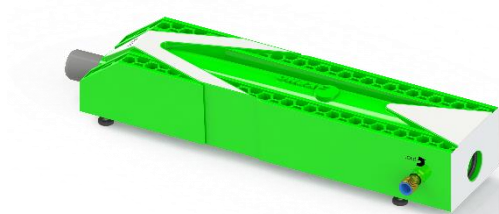
3 MÕÕTMISED JA ANALÜÜS

Lõputöö praktilises katsetati horisontaalse paigaldusega kohtsoojustagasti Zypho IZI mitte-tasakaalustatud voolu tingimustest (vt jaotis 2.3.3 ühendusviis C). Viidi läbi laborimõõtmised ning objektimõõtmised Tallinnas asuvas sotsiaalmajutusüksuses. Mõõtmiste eesmärgiks oli koguda andmeid, hindamaks kohtsoojustagasti majanduslikku tasuvust renoveeritavate süsteemide levinud konfiguratsioonis.

3.1 Eksperimendis uuritav seade

3.1.1 Seadme kirjeldus

Uuritavaks seadmeks on Portugali ettevõtte EIDT SA poolt arendatud ning toodetak horisontaalpaigalduseks mõeldud soojustagasti Zypho IZI.



Joonis 3.1 Horisontaalne kohtsoojustagasti Zypho IZI [62]

Soojusvaheti koosneb ABS korpusest, mida läbib De40 PVC kanalisatsioonitoru. Kanalisatsioonitoru sisepinnale on paigutatud spiraalselt topeltseinaga vasest veetoru, mille kaudu toimub soojusvahetus. Aeglustamaks voolu ning pikendamaks hallvee ja külma vee kokkupuuteaega, on soojusvahetisse paigaldatud polümeerist voolutakistid. Tootja spetsifikatsioonide kohaselt on sertifitseeritud efektiivuse saavutamiseks tarvis ühendada külma vee torustik vastuvoolselt. Eksperimendis uuritud mudelit on võimalik paigaldada dušinurga alla või betoneerida põrandasse. [63]

3.1.2 Sertifikaadid ning varasemad uuringud

Tasakaalustatud voolu tingimustes on sõltumatu sertifitseerimisorganisatsioon KIWA, vastavalt standardis NEN 7120:2011 välja toodud meetodikale, sertifitseerinud käesolevas lõputöös uuritava soojustagasti tabelis 3.1 välja toodud efektiivustele. Teaduskirjanduse järgi oodatavalt, omavad KIWA pöördvõrdelist seost soojustagastit läbiva vee vooluhulgaga. Sertifitseerimisprotsessi mõõtmised viidi läbi tasakaalustatud voolu olukorras, seega ühtivad tabelis 3.1 väljatoodud efektiivsused energiasäästuteguriga (vt jaotis 2.3.4).

Tabel 3.1 Soojustagasti Zypho KIWA poolt sertifitseeritud efektiivsused

Vooluhulk [l/min]	5,8	9,2	12,5
Efektiivsus [%]	36,6	31,6	27,9

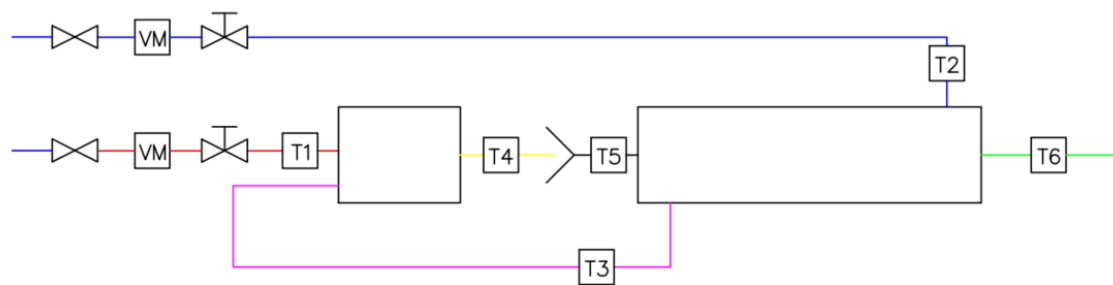
3.2 Laboratoorsed mõõtmised

3.2.1 Eksperimendi kirjeldus ja eesmärgid

Laboratoorsete mõõtmiste tarvis seadis lõputöö autor juhendaja kaasabil üles katseendi, mille abil koguda andmeid soojustagasti töö kohta mitte-tasakaalustatud voolutingimustel. Konfiguratsioon vastab alajaotises 2.3.3 kirjeldatud ühendusviisile C, kus soojusvaheti eelsoojendatud vesi on ühendatud segisti külma vee sisendisse.

- Määrata soojustagasti efektiivsus vooluhulkadel 5,8 l/min; 9,2 l/min ja 12,5 l/min;
- Uurida temperatuuride ja vooluhulkade dünaamikat duši simuleeriva protsessi vältel;
- Koguda andmeid majandusliku tasuvuse hindamiseks mitte-tasakaalustatud konfiguratsiooni tingimustes;

Külm vesi hoone veevärgist on ühendatud läbi veemõõtja VM1 ja STAD tasakaalustusventiili soojusvahetisse, millest see on juhitud edasi termostaatsegistisse, mis hoiab segistist väljuva vee temperatuuri ja voolhulga ühtlase. Soe vesi hoone veevarustusest on juhitud läbi veemõõtja ning tasakaalustusventiili termostaatsegisti vastavasse poolde. Veetorustikuna kasutati De16 komposiitorustikku, mis isoleeriti väliskeskkonnaga soojusvahetuse aeglustamiseks vahtpolüstereen torusisolatsiooniga. Laborikatse on näidatud piltidel 3.1 ja 3.2.



— Külm vesi

— Soe vesi

— SV läbinud vesi

— Vesi segistist

— SV läbinud hallvesi

⊗ Sulgarmatuur

⊗ Tasakaalustusventiil

VM Veemõõtja

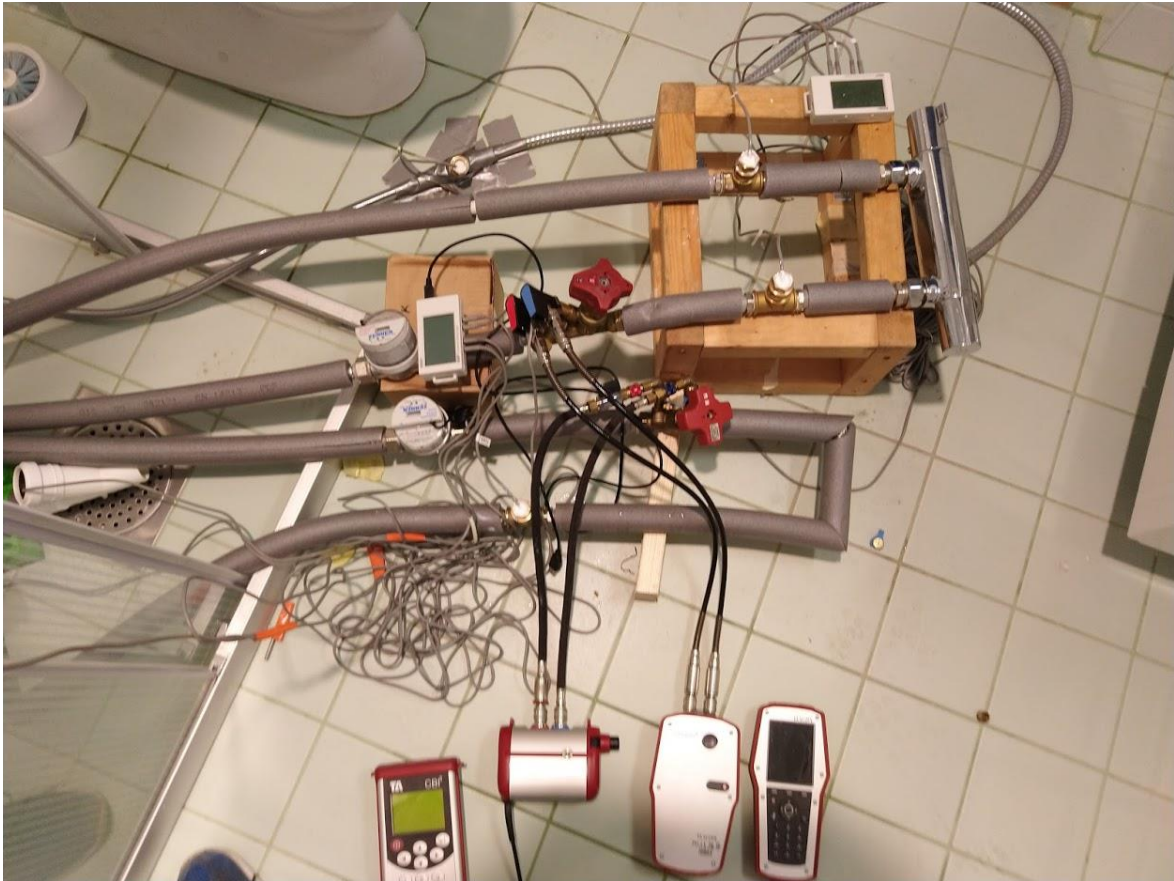
T Termoandur

T1 – Soe vesi segistisse; T2 – Külm vesi soojustagastisse; T3 – Külm vesi pärast soojustagastit;
 T4 – Segisti vee temperatuur; T5 – Soojusvahetisse siseneva vee temperatuur;
 T6 – Soojusvahetist väljuva vee temperatuur

Joonis 3.2 Laborimõõtmiste stendi ühendusskeem



PILT 3.1 Laborimõõtmiste katsepartuur



PILT 3.2 Laborimõõtmiste katsepartuur ja vooluhulgamõõtmjad

Vee vooluhulga mõõtmiseks kasutati nii külma kui sooja vee torustikul täiesti avatud STAD-15 tasakaalusutusventiile, millelt oli võimalik lugeda TA-Scope mõõtmisseadmega ventiili diferentsiaalrõhku, mille mõõteseade teisendab ventiili K_v väärtuse põhjal vooluhulgaks.

K_v väärtus väljendab vooluhulka, mis näitab vooluhulka m^3/h , ventiili rõhulangu 1 bar korral ning on määratav valemiga (36). Kuigi tootja annab K_v väärtused ventiili erinevatele positsioonidele, oli tarvilik mõõteandmete täpsuse tagamiseks K_v väärtusi kontrollida. Ventiilide täpsuse kontrollimiseks ning nende K_v väärtuse kalibreerimiseks kasutati veearvesteid Zenner Minomess ETW-M mõõtetäpsusega 0,1 l, mida kasutades sai erinevatel vooluhulkadel iteratiivselt valideeritud ning täpsustatud K_v , leides 10 minutilise stabiilse voolu keskmised väärtused ning jagades see perioodi keskmise rõhulanguga ventiilis. Vooluhulga reguleerimiseks kasutati tüüpilist termostaatilist dušisegistit, mis võimaldas eraldi reguleerida vee vooluhulka.

$$K_v = \frac{Q}{\sqrt{\Delta P}} \quad (36)$$

Kus K_v – K_v arv [];
 Q – Vooluhulk [m³/h];
 ΔP – Rõhulang ventiilis [bar];

Temperatuuride määramiseks kasutati 4-kanalii analoog-andmeloggereid HOBO UX120-006M koos TMCx-HD täpsusega 0,002° 25 °C juures. Katses kasutati 7-t sensorit, millega määrati külma vee sisendtemperatuur (T2), eelsoojendatud vee temperatuur (T3), sooja vee sisendtemperatuur (T1), segisti väljundtemperatuur (T4), soojusvahetisse siseneva hallvee temperatuur (T5), soojusvahetist väljuva hallvee temperatuur (T6). Temperatuuriandurid veetorustikul asetsevad termopastaga täidetud anduripesades (vt pilt 22), kanalisatsioonis (soojusvahetis) fikseeriti andurid äravoolutoru põhja külge.

3.2.2 Eksperimendi mõõtmistulemused

Katse käigus mõõdeti temperatuure ning vooluhulkasid süsteemis vooluhulkadel 5,8 l/min; 9,2 l/min ning 12,5 l/min. Vooluhulgad said valitud ühtima KIWA poolt läbi viidud Belgia standardil NEN7120:2011 baseeruvate mõõtmistega võrreldavuse tagamiseks. Efektiivsused ning energiasäästutegur on leitud vastavalt jaotises 2.3.4 kirjeldatud protseduurile. Soojustagasti efektiivsus arvutati vastavalt valemile (11) ja energiasäästutegur vastavalt valemile (17). Efektiivsui mõõdeti *steady-state* tingimustes, mis tähendab, et temperatuurid ja vooluhulgad süsteemis olid stabiliseerunud

Mõõtmistulemused (vt tabel 3.2 ja tabel 3.3) ühtisid teaduskirjanduse poolt seatud eeldusega, et vooluhulga suurendes väheneb soojusvaheti efektiivsus ning tagastatava energia osakaal duši vee soojendamise tarbeks kulutatava energia hulga. Põhjuseks on soojusvahetit läbivate vastassuunaliste vedelikuvoolude suurem voolukiirus ning sellest tulenev lühem kontaktaeg (vt jaotis 2.3.2).

Mõõtmistulemused kinnitasid ka hüpoteesi soojustagasti efektiivsus on mitte-tasakaalustatud voolu tingimustes kõrgem kui tasakaalustatud konfiguratsioonis. KIWA mõõtmistes (vt tabel 3.1). Vooluhulgal 5,8 l/min on soojustagasti tasakaalustatud voolu tingimustes sertifitseeritud efektiivsusele 36,6 %, lõputöö mõõtmistes saavutati efektiivsus 0,54 ehk 54 %; vooluhulgal 9,2 l/min vastavalt 31,6 % ja 48 % ja vooluhulgal 12,5 l/min vastavalt 27,9 % ja 47 %. Erinevus efektiivsustes on tingitud madalamast külma vee vooluhulgast läbi soojustagasti võrreldes tasakaalustatud

ühendusviisiga, see vähendab maksimaalset võimalikku ülekantava soojusenergia hulka (vt jaotis 2.3.4). Vooluhulkade erinevus tingib laugema temperatuurigradiendi, mille tõttu soojustagasti ulatuses toimub soojusvahetus intensiivsemalt. Lisaks on külma vee vool läbi soojustagasti aeglasem, mis tähendab madalamat voolukiirust ning pikemat kokkupuuteaega. Efektiivsuse erinevus on selgitatav kirjeldatud faktorite koosmõjust.

Tabel 3.2 Efektiivsuse väärtused laborimõõtmistest

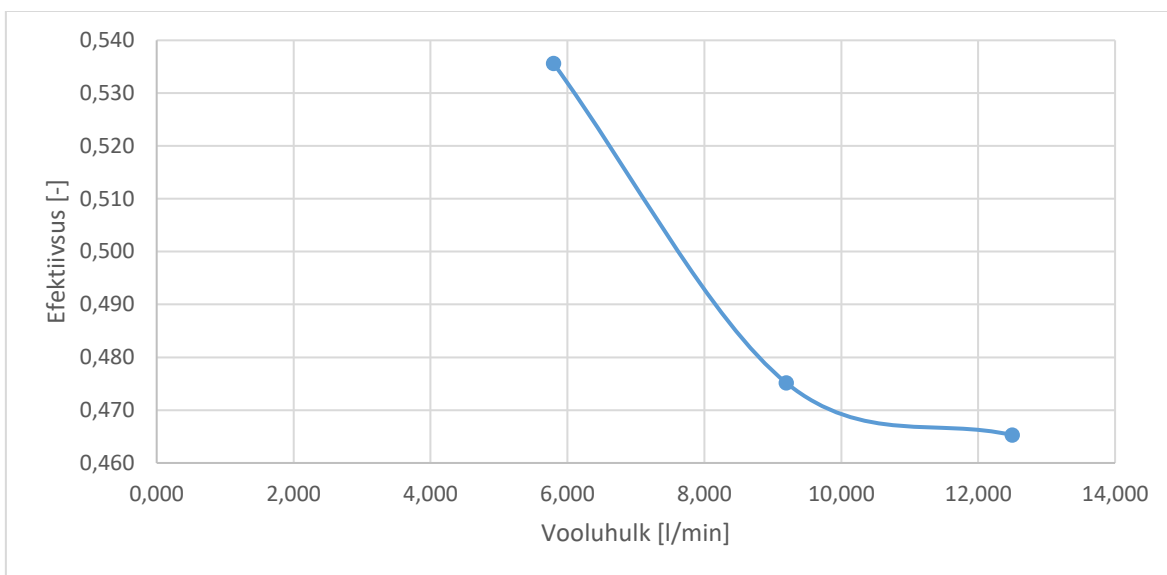
Mõõtmine	Vooluhulk		
	5,8 l/min	9,2 l/min	12,5 l/min
15.02.2020_set1	0,56	0,48	0,48
16.02.2020_set2	0,53	0,48	
15.03.2020_set1	0,52	0,47	0,47
15.03.2020_set2	0,53	0,46	0,50
28.03.2020_set1	0,49	0,46	0,46
28.03.2020_set2	0,54	0,48	0,46
30.04.2020_set1	0,55	0,48	0,44
30.04.2020_set2	0,55	0,49	0,44
30.04.2020_set3	0,55	0,48	0,47
Keskmine	0,54	0,48	0,47

Tabel 3.3 Energiasäästuteguri väärtused laborimõõtmistest

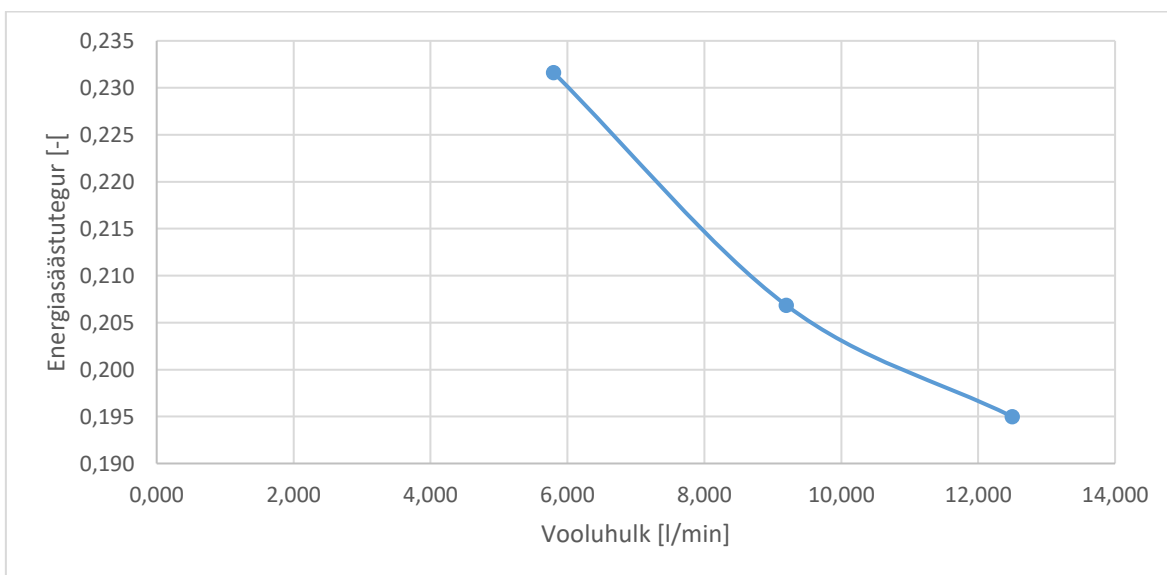
Mõõtmine	Vooluhulk		
	5,8 l/min	9,2 l/min	12,5 l/min
15.02.2020_set1	0,24	0,22	0,20
16.02.2020_set2	0,22	0,21	
15.03.2020_set1	0,21	0,20	0,20
15.03.2020_set2	0,22	0,20	0,21
28.03.2020_set1	0,22	0,20	0,19
28.03.2020_set2	0,24	0,20	0,19
30.04.2020_set1	0,25	0,21	0,19
30.04.2020_set2	0,24	0,20	0,19
30.04.2020_set3	0,24	0,22	0,19
Keskmine	0,23	0,21	0,19

Tabelitest 3.2 ja 3.3 ning nende põhjal koostatud graafikutest (joonis 3.3 ja joonis 3.4), joonistub välja efektiivsuse ning energiasäästuteguri graafikute sarnasus. Tasakaalustatud voolu tingimustes oleks graafikud soojuskadudeta ideaalsüsteemis identsed (vt jaotis 2.3.4). Efektiivsus ning energiasäästutegur korreleeruvad mõõtmistulemustes tugevalt, kuid ei ühti. Põhjuseks on, et efektiivsus sai arvatud temperatuuride põhjal soojustagasti sisendis ning väljundis. Energiasäästuteguri

leidmiseks sai kasutatud segisti temperatuuri, sest vastavalt valemile (18), peab suurus S_1 arvestama duši energiakulu ilma soojusvahetita.



Joonis 3.3 Efektiivsuse sõltuvus vooluhulgast

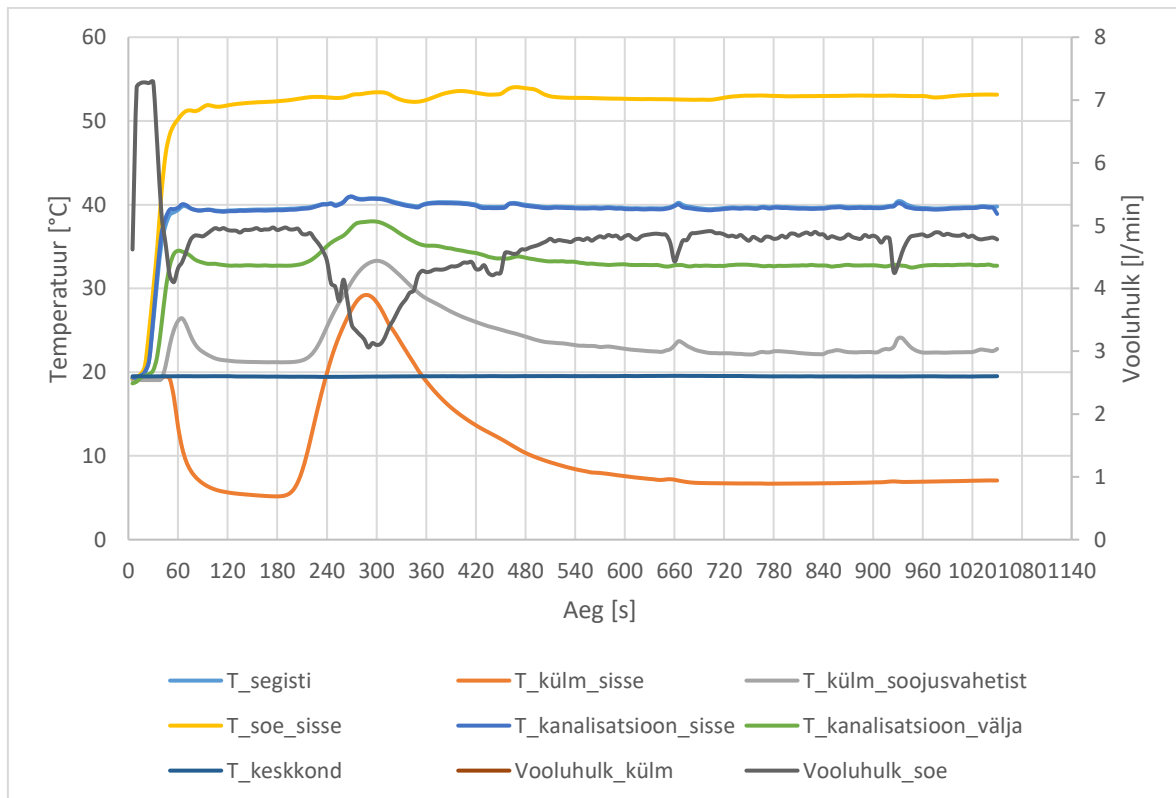


Joonis 3.4 Energiasäästutegur sõltuvus vooluhulgast

Joonis 3.5 näitab temperatuuride ning vooluhulkade dünaamikat süsteemi stabiliseerumise eel. Katse läbiviimise eel ei olnud vähemalt 24 h vältel hoones vett kasutatud, seega temperatuuriandurid ning vesi torustikes, olid võrdsed ümbritseva keskkonna temperatuuriga. Temperatuuri seadesuuruseks segistil sai määratud 40°C ning vooluhulgaks 9,2 l/min.

Pärast kraani avamist hakkas külma vee temperatuur langema, sest hoonesisestes torustikes soojenenud vesi voolas välja ning saavutas ca minutiga miinimumilähedase temperatuurini, mis peaks ühtima välisvõrgu veetemperatuuriga. Katse kolmandal minutil tõusis külma vee temperatuur anomaalselt enne uuesti stabiliseerumist, tegemist oli laborihoone veevarustuse eripäraga, sest antud anomaalia esines kõigis mõõtmistes, kuid puudus Paagi tn objektimõõtmistes ning teaduskirjanduses välja toodud sarnastes katsetes.

Segisti saavutas seadetemperatuuri 45 sekundiga ning segistisse voolav soe vesi saavutas stabiilse temperatuuri ca 60 sekundiga. Ootuspäraselt kasvas külma vee temperatuur soojustagastit läbides rohkem, kui hallvee temperatuur langes, lähtuvalt vooluhulkade erinevusest. Kui jätta välja külma vee sisendtemperatuuri anomaalia, võib süsteemi temperatuurid ning vooluhulgad stabiliseerunuks lugeda 90 sekundiga.



Joonis 3.5 Temperatuuri ja vooluhulga dünaamika soojusvahetis duši vältel

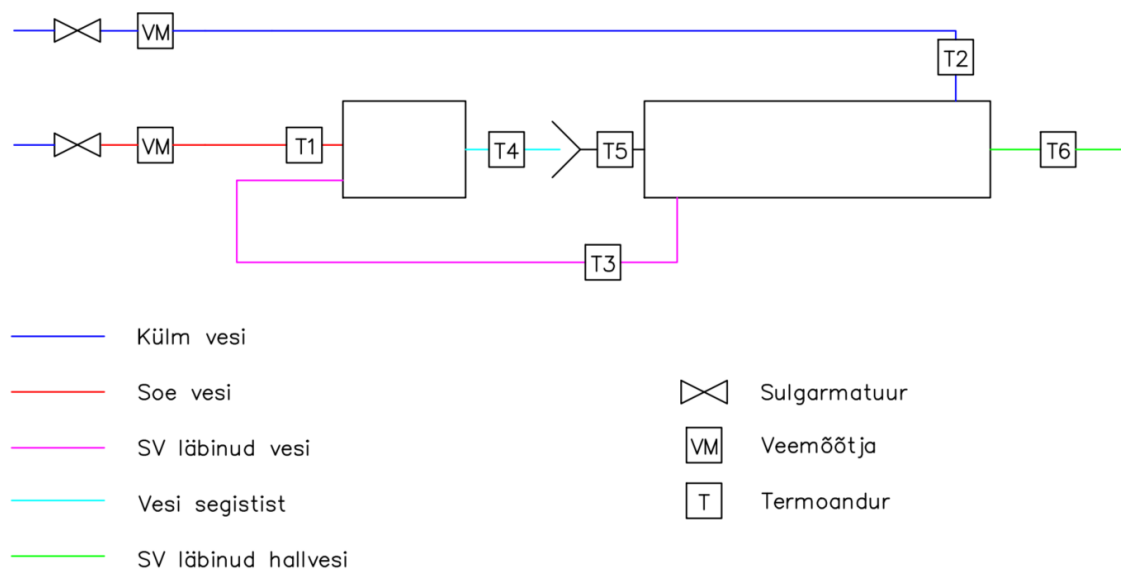
3.3 Objektimõõtmised

3.3.1 Eksperimendi kirjeldus ja eesmärgid

Kohtmõõtmised viidi läbi aadressil Paagi 8 asuvas Tallinna linna haldusesse kuuluvas sotsiaalmajutusüksuses. 2019 aasta aprillis, sanruumide renoveerimise käigus, paigaldati 2-te tehnoruumi kohtsoojustagastit Zypho koos lõputöö autori poolt ette nähtud vajalike anduriühendustega. Andurid ühendati Agatark OÜ poolt projekteeritud hooneautomaatikablokki, mis edastas andmed kaugligipääsetavas andmebaasi.

- Hinnata soojustagasti efektiivsust reaalse kasutamise kontekstis.
- Uurida temperatuuride ja vooluhulkade dünaamikat reaalsete kasutajate tegevusest tulenevate mõõteandmete põhjal.
- Koguda andmeid majandusliku tasuvuse hindamiseks mitte-tasakaalustatud konfiguratsiooni tingimustes reaaleluliste mõõtmisandmete põhjal.

Objektimõõtmised toimusid rehabiliteerimisteenust pakkuvas sotsiaalmajas, kus duširuumid olid korruse peale ühiskasutatavad maksimaalselt 10 inimese poolt. Tulenevalt objekti funktsiooni eripärast, ei ühti veetarbimine tüüpsele kahe tipuga režiimiga (vt joonis 1.3), vaid jaotub ühtlaselt päeva peale. Veetarbimist on täpsemalt kirjeldatud jaotises 3.3.2.



Joonis 3.6 Dušš 1 ja Dušš 2 ühendusskeem

Külm vesi hoone veevärgist on ühendatud läbi veemõõtja VM soojusvahetisse, millest see on juhitud edasi termostaatsegistisse, mis hoiab segistist väljuva vee temperatuuri ja voolhulga ühtlase. Soe vesi hoone veevarustusest on juhitud läbi veemõõtja ning tasakaalustusventiili termostaatsegisti vastavasse poolde. Veetorustikuna kasutati De16 komposiittorustikku, objektil ei isoleeritud ühendustorusid paigaldusruumi vähesuse tõttu. Sooja vett toodetakse soojussõlmes kaugkütte põhjal.

Vooluhulkade hindamiseks kasutati impulsslugemiga vooluhulgamõõtjureid mõõtmistäpsusega 0,1 l. Eksituse tõttu sai hangitud veemõõtjad, mis edastasid impulsslugemi 10 l järel, mille tõttu polnud vooluhulkade andmeid võimalik lõputöö eesmärkide poolest kasulikult analüüsida. Siiski oli võimalik koguda hulgaliselt andmeid duši tarbimisrežiimide, temperatuuride ning dünaamika kohta.

Katses kasutati analoogselt laborimõõtmistega 7-t sensorit. Määrati külma vee sisendtemperatuur (T2), eelsoojendatud vee temperatuur (T3), sooja vee sisendtemperatuur (T1), segisti väljundtemperatuur (T4), soojusvahetisse siseneva hallvee temperatuur (T5), soojusvahetist väljuva hallvee temperatuur (T6). Sensorid talletasid lugemi 0,01 °C muutuse juures.



PILT 3.3 Dušinurk ja soojustagasti dušinurga all Paagi tn 8 objektil

3.3.2 Eksperimendi mõõtmistulemused

Mõõtmistulemusi koguti vahemikus 1.05.2019-01.01.2020. Perioodi vältel koguti kahe dušinurga (Edaspidi Dušš 1 ja Dušš 2) temperatuuri ja kumulatiivse vooluhulga kohta andmeid, mille põhjal on võimalik hinnata hoone kasutajate tarbimisrežiimi ning laborimõõtmiste tulemustega kombineerides soojustagasti majandusliku tasuvust.

Olenevalt dušist ning andurist, tekkis iga anduri kohta olenevalt dušist suurusjärgus 50000-70000 andmepunkti, mis tegi ühe duši kohta ca 50000. Andmete efektiivsema analüüsimise jaoks interpoleeriti andmed ühtse 10-sekundilise sammu peale Pythoni scripti abil. Vastupidiselt loodetule, muutis töötlus andmemassiivi keerulisemalt hallatavamaks. Otstarbekamaks osutus interpoleerimata andmeid töödelda Excelis.

Dušikordade arv sai leitud temperatuuriandurite lokaalsete ekstreemumite põhjal. Vältimaks valepositiivseid tulemusi andurite võimalikest juhuslikest mõõtevigadest, sai määratud tingimused andurite piirtemperatuuride kohta ning lisatingimus, et ekstreemum peab olema vastavalt maksimaalne või minimaalne temperatuur seadistavas mõõtepiirkonnas (antud juhul 50 rida). Mõõtmistulemuste kindluse tõstmiseks määrati ekstreemumite hulk kolme erineva anduriga duši kohta.

Mõõtmistulemustest selgub, et Dušš 1-te kasutati mõõtmisperioodi vältel keskmiselt 3,8 korda päevas ning Dušš 2-te keskmiselt 2,5 korda päevas, erinevus tuleb eeldatavasti dušikabiinide ruumilisest paigutusest. Keskmiseks veekuluks duši kasutuskorra kohta tuli Dušš 1-l 94,5 l ning Dušš 2-l 101,9 l (vt tabel 3.4). Tabelis 3.4 välja toodud veekuludele baseerudes, eeldades vooluhulka 9,2 l/min, on dušikorra pikkuseks vastavalt 9,2 min ja 11,1 min, mis jääb töö teooriaosas (vt tabel 1.2) välja toodud kestusse vahemikku ning ühtib objektimõõtmiste andmete kvalitatiivse analüüsi tulemustega.

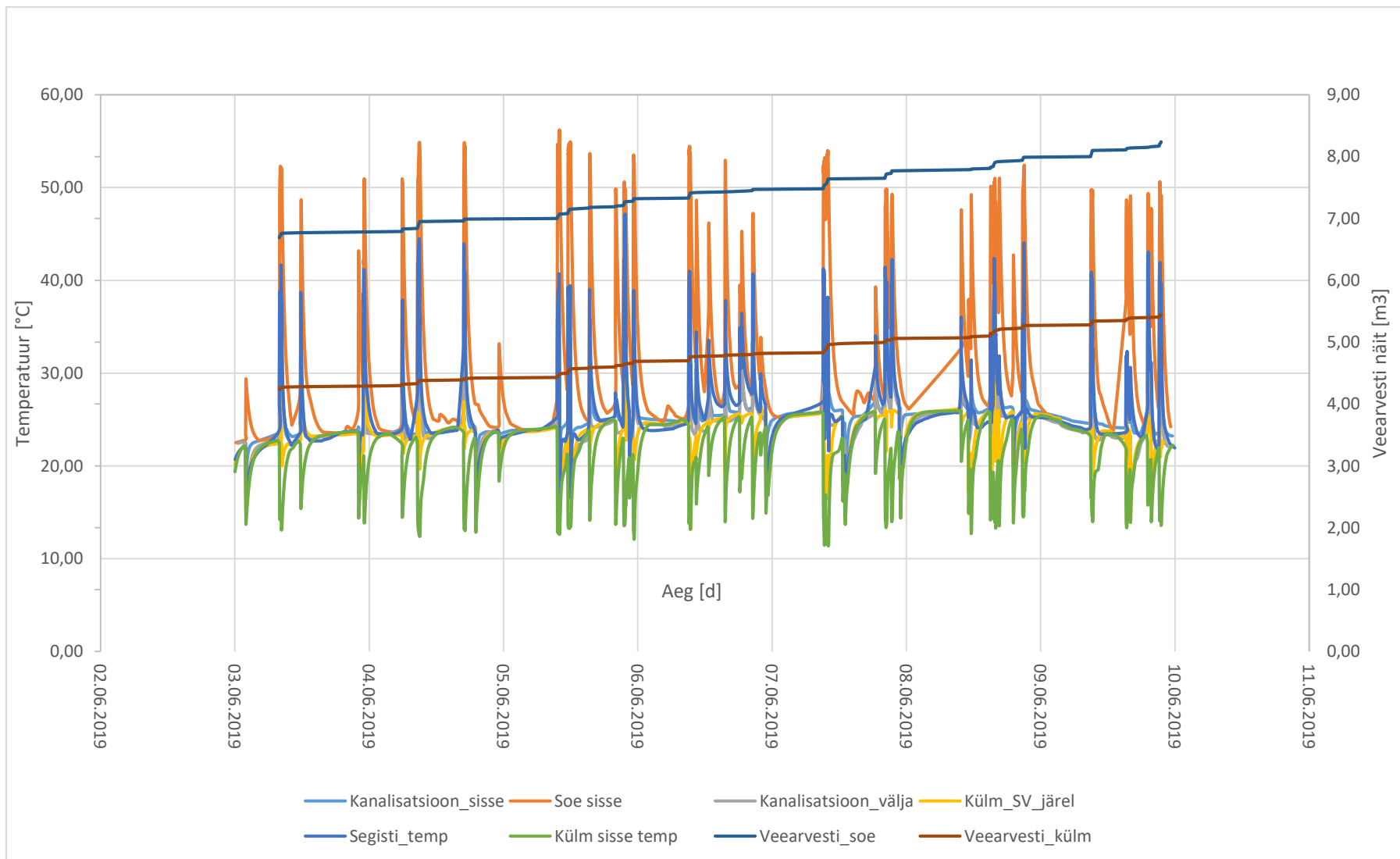
Tabel 3.4 Duššide veetarbimine

	Dušikordade arv	Külma vee kogus [l]	Sooja vee kogus [l]	Kumulatiivne veekogus [l]	Veekulu dušikorra peale [l]
Dušš 1	800	31640	43960	75600	94,50
Dušš 2	525	23270	30240	53510	101,92

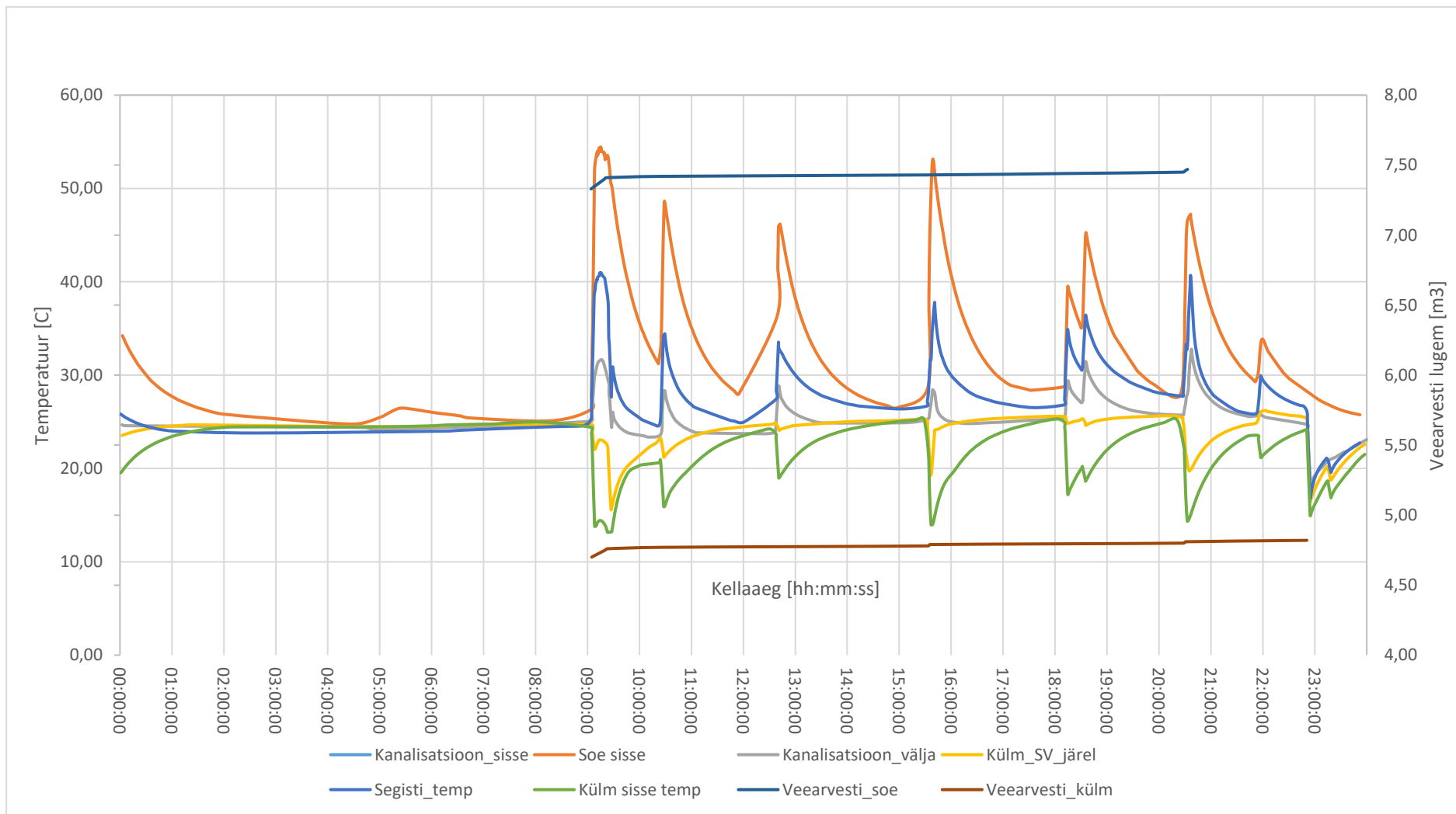
Joonisel 3.7 on kujutatud ühe tüüpse nädala (3.06.2019-9.06.2019) temperatuuride ning veekulu graafikut. Duši kasutamisel tõusevad järsult temperatuurid segistis ning sooja vee ühendustorul. Langus toimub külma vee sisendil soojusvahetisse ning

väljundil sellest. Analoogselt jaotis 3.2.2 kirjeldatuga võib näha, kuidas duši lõppedes ühtlustub vee temperatuur torudes väliskeskkonna temperatuuriga. Päevasel ajal, mil toimub rohkem veetarbimist, ei jõua temperatuurid kasutamiskordade vahel väliskeskkonnaga ühtlustuda.

Joonisel 3.8 on kujutatud 6.06.2019 temperatuuride graafik, et illustreerida selgemalt temperatuuride dünaamikat. Sel graafikul on selgemini näha, kuidas soojustagasti külma vee väljundi temperatuur on kõrgem kui külma vee sisendi; kanalisatsioonil vastupidiselt on väljundi temperatuur madalam kui sisendil, nagu süsteemi tööpõhimõtte ette näeb.



Joonis 3.7 Dušš 1 tüüpse nädala veetarbimise dünaamika



Joonis 3.8 Dušš 1 tüüpse päeva veetarbimise dünaamika (6.06.2019)

3.4 Mõõtmistulemuste kokkuvõtte ja analüüs

3.4.1 Majanduslik tasuvus

Laborimõõtmiste üheks eesmärgiks oli määrata soojustagasti efektiivsus ning energiasäästutegur erinevatel vooluhulkadel, loomaks koos töö teooriaosas agregeeritud andmetega raamistik, et viia käesolevas töös läbi arvutused majandusliku tasuvuse hindamiseks. Uuritava seadme garantiiajaks on 10 aastat, kuid NPV arvutused said teostatud 15-aastase perioodi kohta. Stsenaariumites, kus diskontotasuvusaeg ületas 15 aastat, on käesoleva töö raames loetud mittetasuvaks. Arvutused on viidud läbi energia lõpphindadega, mis hõlmavad endas makse, võrgukuludid jm.

Majandusarvutusteks kasutati jaotises 2.3.5 kirjeldatud nüüdispuhasväärtuse (NPV) meetodit ning leiti diskontotasuvusaeg. Majandusliku tasuvuse arvutused viidi läbi stsenaariumitele, kus sooja vee tootmiseks kasutati vastavalt elektri, kaugkütet või gaasi. Iga energiakandja puhul leiti tasuvus 1-4 tarbijaga (elanikuga), võimaldamaks hinnata tasuvust erinevate leibkonna suuruste puhul. Tabelis 3.5 on toodud majandusliku tasuvuse arvutamise algandmed. Seadme hind ei kätke endas objektispetsiifilisi paigalduskulusid nagu torustike, liitmike, tööjõu jm maksumus, mis võivad alginvesteeringut tõsta. Tabelites 3.6; 3.7 ja 3.8 diskontotasuvusajad erinevatele energiakandjatele ja kasutajate hulgale.

Tabel 3.5 Lähteandmed majandusarvutusteks

	Elekter	Keskküte	Gaas
Diskontomäär, %			4
Seadme hind, € (ei sisalda paigalduskulusid)			293,00
Päevade arv aastas, d			365,25
Dušikordade arv kasutaja kohta päevas, 1/in			1,5
Keskmine pesukorra kestus, s			600
Külma vee sisendtemperatuur, °C			10
Sooja vee sisendtemperatuur, °C			55
Segisti vee temperatuur, °C			40
Soojusallika kasutegur	1	0,85	0,85
Energia hind aastal 1	0,120	0,060	0,046
Energia aastane hinnatõus, %			2,5

Tabel 3.6 DPP, elekter

Vooluhulk [l/min]	Tarbijate arv			
	1	2	3	4
5,8	10,7	5,1	3,4	2,5
9,2	7,2	3,5	2,3	1,7
12,5	5,8	2,8	1,9	1,4

Tabel 3.7 DPP, kaugküte

Vooluhulk [l/min]	Tarbijate arv			
	1	2	3	4
5,8	-	8,9	5,8	4,3
9,2	12,7	6,0	4,0	3,0
12,5	10,1	4,9	3,2	2,4

Tabel 3.8 DPP, gaas

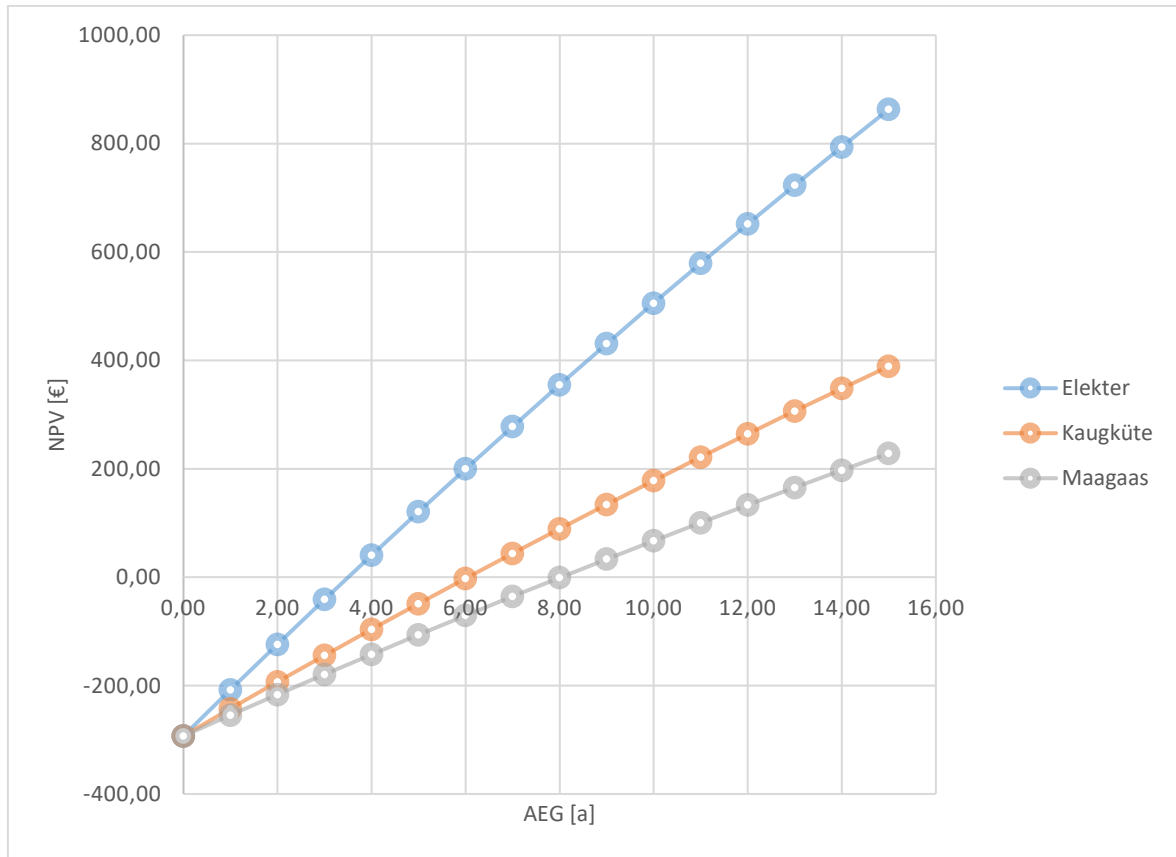
Vooluhulk [l/min]	Tarbijate arv			
	1	2	3	4
5,8	-	11,9	7,7	5,7
9,2	-	8,0	5,2	3,9
12,5	13,6	6,5	4,2	3,2

Ootuspäraselt on diskontotasuvusaeg pöörvõrdelises seoses energia hinnaga. Seega on 2020 II kvartali Eesti hinnataset arvestades tasuvusaeg kõige madalam elektrit kasutades, kõige kõrgem aga gaasküttega. Tarbijate arvu ja vooluhulga suurenemine tähendavad diskontotasuvusaja vähenemist – rohkem tarbijaid, kes kasutavad suuremat kogust vett, säästavad soojustagasti abil rohkem energiat ning raha. Kõige tasuvamaks stsenaariumiks kujuneb seega 12,5 l/min nelja tarbijaga, kus diskontotasuvusajaks on kõigest 1,4 aastat. Soojustagasti ei osutu 15-aastase perioodi vältel tasuvaks ühe kasutajaga stsenaariumites tabelis 3.7 (kaugküte DPP) ja tabelis 3.9 (gaaskütte DPP) näidatud juhtudel.

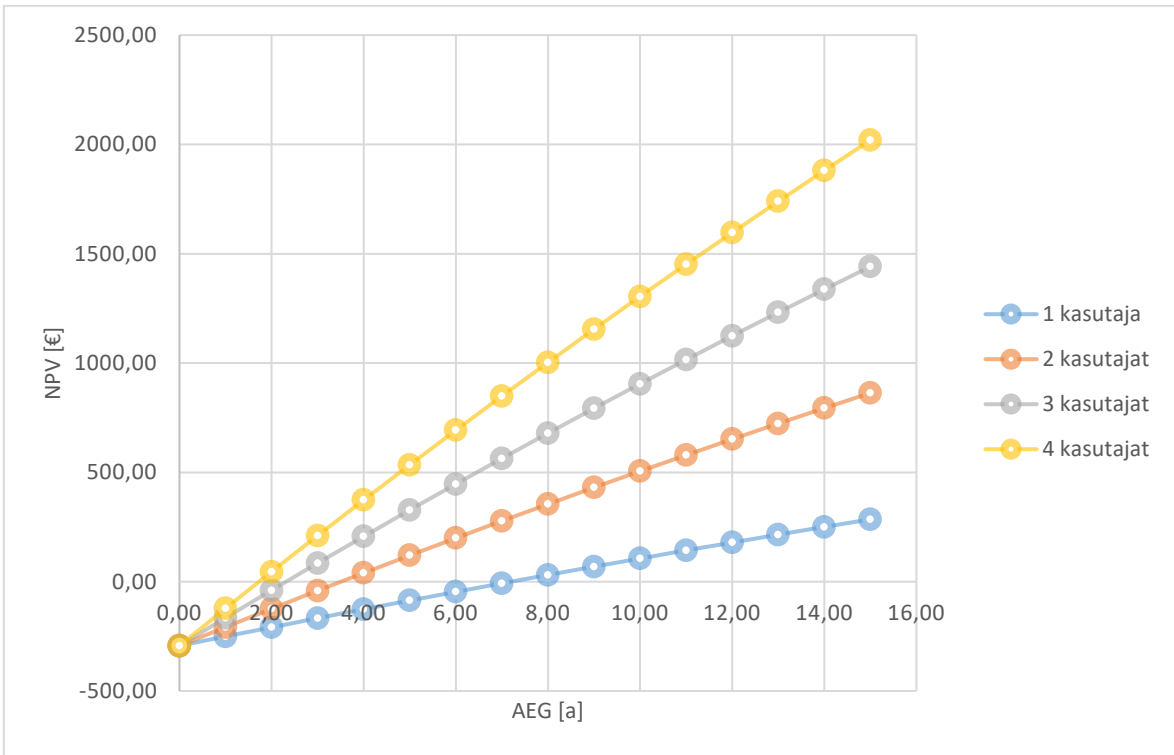
Joonisel 3.9 on kujutatud NPV erinevatele energiakandjatele kahe kasutajaga stsenaariumis vooluhulgal 9,2 l/min. Selgelt võib lugeda välja, et soojustagasti on kõige tasuvam elektrit kui kõige kallimat energiakandjat kasutades. Joonised 3.10-3.13 näitavad NPV-d erinevate tarbijate arvu juures vooluhulgal 9,2 l/min. Olenemata utiliseeritavast energiallikast, toob suurem kasutajate arv kaasa kiirema tasuvuse. Detailsed tasuvusarvutused on näidatud lõputöö lisades.

Laborimõõtmiste tulemuste põhjal läbiviidud tasuvusarvuste põhjal võib järeldada, et enam kui ühe tarbijaga olukordades, on olenemata kasutatavast energiallikast

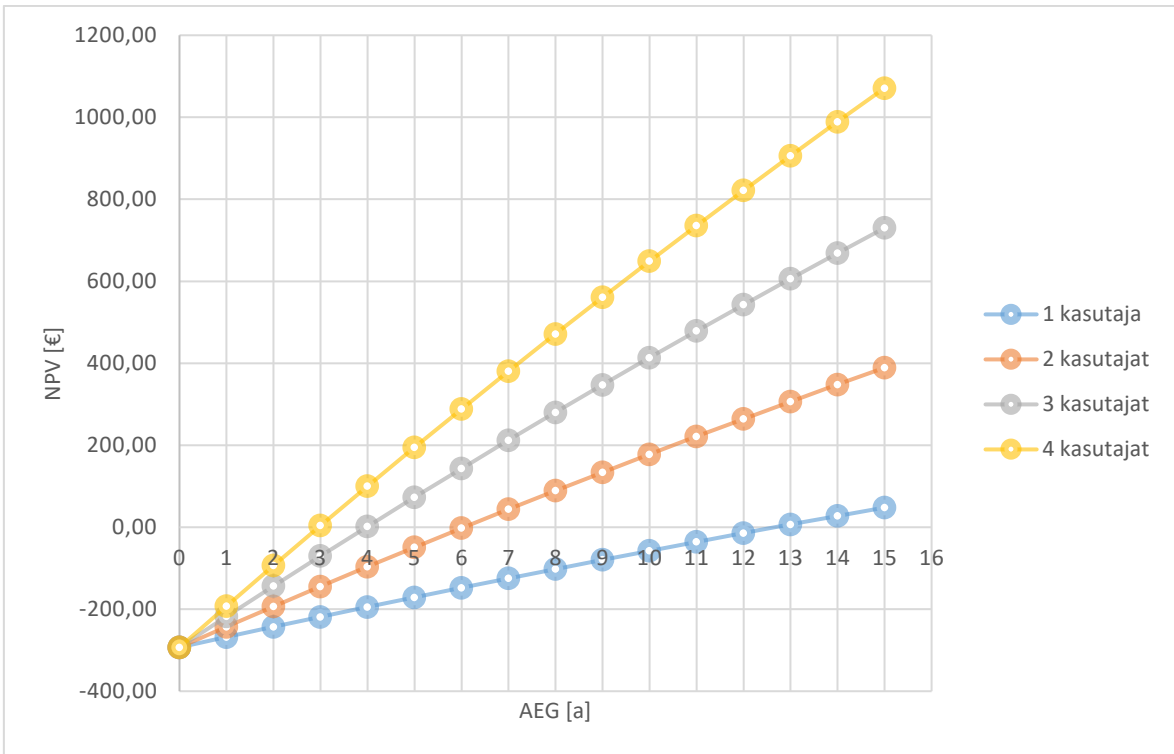
soojustagasti Zyphe IZI kasutamine majanduslikult tasuv. Vooluhulgal 9,2 l/min, vähemalt kahe tarbijaga, on olenemata energiallikast soojustagasti tasuvusaeg lühem seadme garantiiajast. Töö autor loeb seadme kasutamise tasuvaks, kui diskontotasuvusaeg on vähem kui 15 aastat. Referentsolukorras töö raames on 2 tarbija ja kaugküttega stsenaarium.



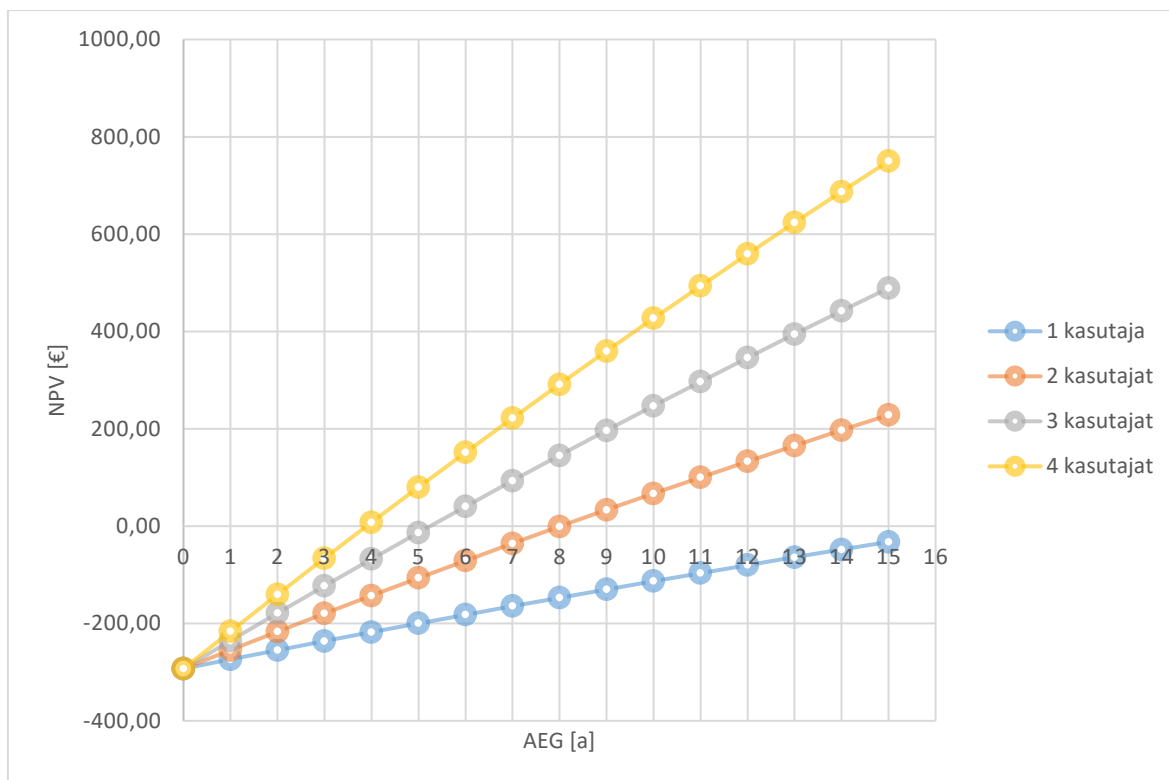
Joonis 3.9 NPV vooluhulgal 9,2 l/min 2 tarbijaga erinevatel energiakandjatel



Joonis 3.10 NPV vooluhulgal 9,2 l/min erinevate kasutajate arvuga elektrikütel



Joonis 3.11 NPV vooluhulgal 9,2 l/min erinevate kasutajate arvuga kaugkütel



Joonis 3.12 NPV vooluhulgal 9,2 l/min erinevate kasutajate arvuga gaaskütel

3.4.2 Objektimõõtmiste majanduslik tasuvus

Tabelis 3.4 (jaotis 3.3.1) on toodud välja perioodi 01.05.2019-31.12.2019 tarbitud kumulatiivsed veekogused ning pesukordade arv Dušile 1 ja Dušile 2. Andmetest on võimalik ekstrapoleerida, eeldades ühtlast tarbimist aasta vältel, veekogused aasta peale ning leiad sooja vee valmistamiseks kulutatud energia hulk mõlemale dušile. Lähtuvalt energia hinnast, on võimalik arvutada nüüdispuhasväärtused ning diskontotasuvusaeg. Soojustagasti hinnaks on 293 €, mis sisaldab ka käibemaksu. Soojustagasti hinnale lisanduvad paigaldusega seotud kulud nagu torud, liitmikud, armatuur ning lisatöö.

Aastane energiakulu dušil on arvutatav valemiga (37). Valemis (38) on konstant 365/244 vajalik mõõdetud perioodi energiakulu ekstrapoleerimiseks aastasele perioodile. 244 on päevade arv vahemikus 01.05.2019-31.12.2019 ning 365 päevade arv aastas. Nüüdispuhasväärtuse ning diskontotasuvusaja leidmine toimub vastavalt jaotises 2.3.5 kirjeldatud meetodikale. Tulemused on toodud tabelites 3.11; 3.12 ja 3.13. Arvutuste puhul kasutati vooluhulgale 9,2 l/min vastavast efektiivsust. Arvutuslikud lähteandmed on leitavad tabelist 3.10. Seadme hind ei kätke endas objektispetsiifilisi paigalduskulusid nagu torustik, liitmikud jm.

$$ES_t = C_{r0t} - C_{rHXt} \quad (37)$$

$$C_{rHXt} = \frac{365 \cdot V \cdot \rho \cdot c_{pw,c} \cdot (T_{wh} - T_{wc})}{244 \cdot \mu \cdot 3,6 \cdot 10^6} \quad (38)$$

$$C_{r0t} = \frac{C_{rHXt}}{(1 - S_1)} \quad (39)$$

- Kus E_{st} – Primaarenergia aastane sääst (elekter, gaas, võrgusoojus jm) [kWh];
 C_{r0t} – Vee soojendamiseks kuluva energia hulk aastas soojusvahetita [kWh];
 C_{rHXt} – Vee soojendamiseks kuluva energia hulk aastas soojusvahetiga [kWh];
 V – Sooja vee kogus aastas [m^3];
 V – Sooja vee kogus aastas [m^3];
 ρ – Vee tihedus [kg/m^3];
 T_{wh} – Segistisse siseneva sooja vee (soojaveearustuse) temperatuur [$^{\circ}C$];
 T_{wc} – Veevarustue külma vee temperatuur [$^{\circ}C$];
 c_{pwK} – Konfiguratsioonis soojendatava vee erisoojus [J/kgK];
 S_1 – Energiasäästutegur [J/kgK];

Tabel 3.9 Objektimõõtmiste majandusarvutuse algandmed

Diskontomäär, %	4
Seadme hind, € (ei sisalda paigalduskulusid)	293,00
Päevade arv aastas, d	365,25
Soojusallika kasutegur	0,85
Energia hind aastal 1, €/kWh	0,060
Energia aastane hinnatõus, %	2,5
Energiasäästutegur	0,21

Tabel 3.10 Dušš 1 soojustagasti NPV arvutustabel

Aasta	Energia hind [€/kWh]	Kulu [€]	Tulu [€]	NPV aastal [€]	NPV sum
0	0,060	293,00	0,00	-293,00	-293,00
1	0,060		111,29	107,01	-185,99
2	0,062		114,07	105,47	-80,52
3	0,063		116,93	103,95	23,43
4	0,065		119,85	102,45	125,88
5	0,066		122,85	100,97	226,85

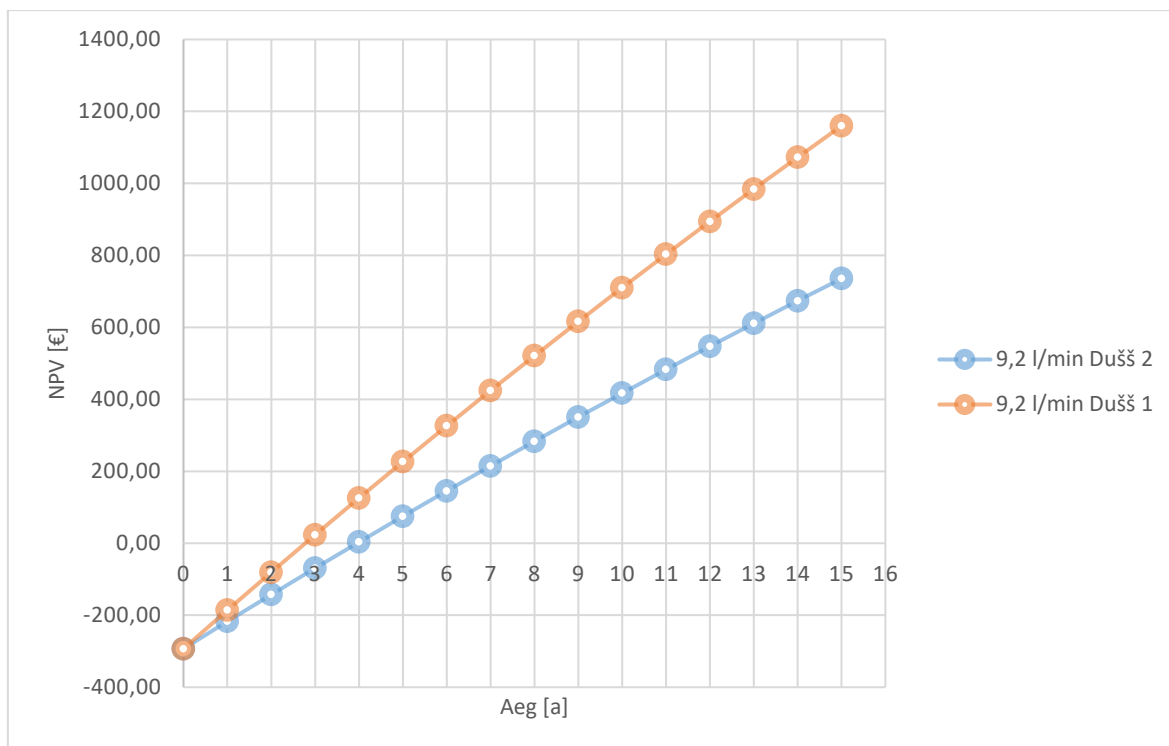
6	0,068		125,92	99,51	326,36
7	0,070		129,07	98,08	424,44
8	0,072		132,29	96,66	521,10
9	0,073		135,60	95,27	616,37
10	0,075		138,99	93,90	710,27
11	0,077		142,46	92,54	802,81
12	0,079		146,03	91,21	894,02
13	0,081		149,68	89,89	983,91
14	0,083		153,42	88,59	1072,50
15	0,085		157,25	87,32	1159,82

Tabel 3.11 Dušš 2 soojustagasti NPV arvutustabel

Aasta	Energia hind	Kulu	Tulu	NPV aastal	NPV sum
0	0,060	293,00	0	-293,00	-293,00
1	0,060		78,77321	75,74	-217,26
2	0,062		80,74254	74,65	-142,61
3	0,063		82,7611	73,57	-69,03
4	0,065		84,83013	72,51	3,48
5	0,066		86,95088	71,47	74,95
6	0,068		89,12465	70,44	145,39
7	0,070		91,35277	69,42	214,81
8	0,072		93,63659	68,42	283,23
9	0,073		95,9775	67,43	350,66
10	0,075		98,37694	66,46	417,12
11	0,077		100,8364	65,50	482,62
12	0,079		103,3573	64,56	547,18
13	0,081		105,9412	63,63	610,80
14	0,083		108,5897	62,71	673,51
15	0,085		111,3045	61,80	735,31

Tabel 3.12 Dušš 1 ja Dušš 2 soojustagastite diskontotasuvusajad

Vooluhulk [l/min]	Diskontotasuvusaeg [a]	
	Dušš 1	Dušš 2
9,2	2,8	4,0



Joonis 3.13 Dušš 1 ja Dušš 2 soojustagastite NPV

Tulemustest nähtub, et Dušš 1 puhul on diskontotasuvusajaks 2,8 aastat ning Dušš 2 puhul 4,0 aastat. Seadme 15-aastase elutsükli põhjal teeb see Dušš 1 puhul investeeringu nüüdispuhasväärtuseks 1152,82 €, Dušš 2 puhul 728,31 €. Arvestades seadme garantiiaega 10 aastat ning arvutatud diskontotasuvusmäärasid, tuleb lugeda testobjektile soojustagastite rakendamist majanduslikult tasuvaks.

3.4.3 Mõõtmiste kokkuvõte ja diskussioon

Töö mõõtmiste osas oli prioriteediks uuritud soojustagasti Zynho IZI majandusliku tasuvuse väljaselgitamine. Selle tarvis sai leitud nüüdispuhasväärtused laborimõõtmiste tulemuste põhjal elektri-, gaas- ja kaugküttele vooluhulkadel 5,8 l/min; 9,2 l/min ja 12,5 l/min ühe kuni nelja tarbijaga seadme kohta. Tulemustest selgus, et uuritud soojustagasti on tasuv vähem kui 15 aasta jooksul peaaegu kõigil vooluhulkadel ning energiaallikate juures (vt jaotis 3.4.1).

Mõõtmistulemused ühtisid töö teooriaosas välja toodud varasemate teadustööde tulemustega. Soojustagastit läbivate vooluhulkade ja efektiivsuse vahel oli ka mitte-tasakaalustatud tingimustes pöördvõrdeline seos. Soojustagasti on efektiivsem madalamatel vooluhulkadel, kuid energiasääst on madalamatel vooluhulkadel seevastu

suurem, sest soojendatava vee hulk on madalam. Samuti vähendab tagastava energia hulka pesukorra kestuste vähendamine, kuid suurendab kumulatiivset energiasäästu.

Käesoleva lõputöö laborimõõtmiste andmetöötluses käsitleti soojusvahetit ning duši isoleeritud süsteemina, millest ei toimu soojuskadusid väliskeskkonda. Reaalses protsessis kaotab dušisegistist langev vesi energiat väliskeskkonda ja vee temperatuur alaneb (vt jaotis 1.3.1). Samuti ei uuritud duši segisti vee temperatuuri ega külma vee sisendtemperatuuri mõju soojustagasti efektiivsusele. Mainitud parameetrite mõju võiks tulevastest teadustöödes uurida.

Töös uuritud lahendus võimaldab vähendada tüüpsetel vooluhulkadel energiatarbimist mitte-tasakaalustatud ühendusviisis ca 20%. Tootja turundusmaterjalidel välja toodud suuremad efektiivsused väljendavad energiasäästu tasakaalustatud voolu tingimustes. Uuritud soojustagastite rakendamine aitaks saavutada märkimisväärset majanduslikku võitu keskmise kuni kõrge kasutustihedusega objektidel. Diskontotasuvusaeg ületas 15 aastat vaid odavaid energiaallikaid ning madala vooluhulgaga duši kasutades.

Töö autor soovib rõhutada, et kõige lühema diskontotasuvusajaga lahendus ei tähenda kõige madalamaid eksploatatsioonikulusid. Kõrgema energiahinnaga väheneb soojustagasti tasuvusaeg, kuid kumulatiivne energiamaksumus on siiski suurem kui kasutades odavamaid energiaallikaid või veesäästlikumaid lahendusi. Soojustagastite rakendamine on moodus hallveega kanaliseeritavat energiakogust vähendada. Keskkonnasäästlikkuse seisukohalt tuleks vaadata planeeritavaid lahendusi terviklikult ning eelistada variante, mis vähendavad primaarenergia kulu ning võimaldavad vee säästlikumat kasutamist. Soojustagastite tööd oleks tarvis edaspidi uurida laiemalt hoonete energiatõhususe kontekstist.

KOKKUVÕTE

Lõputöö teooriaosa oli jagatud kaheks. Esimeses pooles anti ülevaade soojaveearustuse tööpõhimõtetest hoone tasemel ja sellele esitavatest nõuetest. Lõputöö autor pööras erilist rõhku duši veetarbimise uurimisele läbi olemasoleva teaduskirjanduse. Töö teooriaosa teise poole eesmärgiks oli anda üldine ülevaade hallvee soojustagastuse tehnoloogiate jaotusest ning teha detailsem kokkuvõte kohtsoojustagastitega seonduvatest uuringutest. Teooriaosa lõi aluse lõputöö eksperimentaalse poole katsete koostamiseks, läbiviimiseks, töötlemiseks ning mõtestamiseks.

Hallvee soojustagastid võimaldavad kasutada kanaliseeritavas vees sisalduvat soojusenergiat külma vee eelsoojendamiseks. Hallvee soojustagastite efektiivsust mõjutavad paljud tegurid, mis on omavahel keerulistes seostes, kuid tähtsamad neist on külma vee pealevoolu temperatuur, kasutatava sooja vee (segisti) temperatuur ning soojustagastit läbiva vee vooluhulk. Külma vee madalam sisendtemperatuur tähendab soojusvaheti efektiivsemat toimimist. Vooluhulga suurenedes väheneb soojustagasti efektiivsus, kuid soojusvaheti kasutamisest tulenev majanduslik sääst suureneb.

Kohtsoojustagastid jaotuvad vastavalt paigaldusviisile horisontaalseteks ja vertikaalseteks. Vertikaalsed on efektiivsemad (võimaldavad tagastada rohkem soojusenergiat), ent nõuavad palju paigaldusruumi kõrguslikus mõõtmes. Horisontaalsed kohtsoojustagastid on madalama efektiivsusega, kuid väiksema ruumivajaduse tõttu on neid lihtsam paigaldada, mis muudab need paljudes olukordades eelistatumaks lahenduseks.

Töö eksperimentaalses osas uuriti soojustagasti Zypho IZI toimimist laborimõõtmistel ning objektil reaalseste inimeste poolt. Laborimõõtmistes uuriti soojustagasti toimivust kontrollitud tingimustes ning leiti seonduvad efektiivsused ja energiasäästutegurid. Objektimõõtmistel koguti 7-kuulise perioodi vältel andmeid, mille põhjal leiti soojustagastite diskontotasuvusajad.

Töös uuritud soojustagasti Zypho IZI efektiivsuseks vooluhulgal 9,2 l/min mitte-tasakaalustatud leiti olevat 0,48. Energiasäästuteguriks 0,21, mis tähendab 21% energia kokkuhoidu võrreldes soojustagastita süsteemiga. Mainitud vooluhulgal on uuritud soojustagasti tasakaalustatud voolu tingimustel varasemalt sertifitseeritud efektiivsusele 31,6 %, mis ühtib ka saavutatava energiasäästuga. Tasakaalustatud vooluga süsteemis on soojustagasti efektiivsus ekvivalentne energiasäästuteguriga.

Vooluhulgal 9,2 l/min on võimalik saavutada soojustagasti tasuvus vähem kui kümne aastaga, kui vett sojendatakse elektri, gaasi või keskküttega. Tüüpilise 2-liikmelise kaugkütet kasutava leibkonna jaoks saavutab toode tasuvuse 6 aastaga. Läbiviidud objektimõõtmistel leiti soojustagasti tasuvusajaks olevat 2,8-4,0 aastat. Testitud soojustagasti garantiiajaks on 10 aastat.

Olemasoleva teaduskirjanduse ja läbiviidud katsete tulemuste põhjal võib väita, et hallvee soojustagastid on perspektiivikas tehnoloogia energia säästmiseks ja ökoloogilise jalajälje vähendamiseks. Töös sooritatud mõõtmiste tulemused näitavad, et tehnoloogia on majanduslikult tasuv, arvestades kehtivaid energiahindasid ning nende eeldatavat tõusu tulevikus. Lõputöö autor loodab, et töö käigus agregeeritud teooria ning läbiviidud katsete mõõtmistulemused on abiks tulevaste hallvee soojustagastite uuringute koostamisel. Edaspidi oleks tarvis uurida hallvee soojustagastite hoonete energiatõhususe tähenduses laiemalt.

SUMMARY

The theoretical of the thesis is divided into two parts. The first part gives a general overview of the working principles and the requirements for hot water systems in dwellings. Emphasis is put on the scientific literature concerning shower water consumption. The aim of the second part of the theoretical half of the thesis, is to give an overview of grey water heat recovery technologies and the corresponding scientific literature. The theoretical part of the thesis is basis for the experiments and the accompanying analysis of the results.

Grey water heat recovery technologies permit the usage of the heat contained in drain water for pre-heating of cold water. The effectiveness of grey water heat exchangers if influenced by a variety of factors in complex interlocking relations. The most important factors are the temperature to which the water is heated to, the temperature of the cold water, which is heated, the temperature of the mixed water, and the flow rate passing through the heat exchanger. Lower cold water inlet temperature means higher effectiveness and vice versa. The flowrates are inversely proportional to effectiveness of the heat exchanger. Even-though the effectiveness is lower at higher flow rates, financial analysis conducted in this study has shown that the expected savings are higher.

Localized grey water heat recovery units can be divided to horizontal and vertical units, according to the chosen way for the installation. Vertical heat exchangers have generally higher effectiveness but are cumbersome and have a high spatial demand. Horizontal units need less space in the vertical measurement but are slightly less effective. Regardless of the lower effectiveness, horizontal shower heat recovery units are often the preferred solution due to easier installation.

In the experimental part of the thesis, a horizontal shower heat recovery unit Zypko IZI was studied and tested in a laboratory setting and in a real-world usage scenario. Laboratory setting allowed for testing for effectiveness and energy savings in a controlled environment. In-situ measurements were carried out during a seven-month period (1.05.2019 - 31.12.2019) in a social housing unit situated in Tallinn, the data gathered was used to find the discounted payback periods of the tested heat recovery units.

Zypko IZI, the studied heat recovery unit, was measured to have effectiveness of 0,48 at flow rate of 9,2 l/min in unbalanced flow installation, which translates to 21% savings

in energy compared to a system without the heat recovery unit. The heat recovery is certified for effectiveness of 31,6 % at 9,2 l/min in balanced flow conditions. In balanced configuration, the energy savings percentage of the heat recovery unit is equal to its effectiveness.

At a flow rate of 9,2 l/min, it's possible to attain discounted payback period of under 10 years when using either electricity, natural gas or district heating to produce hot water. A typical family of two people can expect a discounted payback period of 6 years for the device when using district heating. In-situ experiment found the discounted payback period of the unit to be 2,8-4,0 years.

According to existing scientific literature and the results of the experiments done in this thesis, one can claim that grey water heat exchangers are a promising technology for lowering energy use and the ecological footprint. The results of the experiments carried out in this work, show that the technology studied is economically viable considering the current energy prices and their future trend upwards. The results of this thesis hopefully are a help to future researches studying the technology. Grey water heat recovery technologies and their economic viability should be researched in a wider context of energy efficiency of buildings in the future.

ALLIKAD

- [1] U.S. Energy Information Administration, „International Energy Outlook 2016 With Projections to 2040,” U.S. Energy Information Administration, Washington, DC, 2016.
- [2] Euroopa Komisjon, *Saavutagem kliimaneutraalsus aastaks 2050*, Luxembourg: Euroopa Liidu Väljannete Talitus, 2019.
- [3] Euroopa Liidu parlament ja nõukogu, *Euroopa Liidu ja Parlamendi Direktiiv 2010/31/EL hoonete energiatõhususe kohta*, 2010.
- [4] E. Skai, I. Beausoleil-Morrison ja A. Laperrière, „Representative hot water draw profiles at high temporal resolution for simulating the performance of solar thermal systems,” *Solar Energy*, nr 111, pp. 43-52, 2015.
- [5] T.-A. Kõiv ja A. Toode, *Hoonete Soojaveevarustus*, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2010.
- [6] J. Frijns, J. Hofman ja M. Nederlof, „The potential of (waste)water as energy carrier,” *Energy Conversion and Management*, kd. 65, pp. 357-363, 2013.
- [7] S. J. Kenway, R. Scheidegger ja H.-P. Bader, „Dynamic simulation of showers to understand water-related energy in households,” *Energy and Buildings*, 2018.
- [8] Eesti Standardikeskus, *EVS 846:2013*, Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2013.
- [9] Eesti Standardikeskus, *EVS 835:2014*, Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2014.
- [10] Riigi Kinnisvara aktsiaselts, *Soojusvarustus ja küte*, Tallinn: Riigi Kinnisvara Aktsiaselts, 2020.
- [11] Riigi Kinnisvara Aktsiaselts, *Tehnilised nõuded mitmeeluhoonetele Osa 7 - Veevarustus*, Tallinn: RKAS, 2017.
- [12] „Time-varying demands,” %1 *Advanced water distribution modeling and management*, Waterbury, Haestad Press, 2003, pp. 155-156.
- [13] E. Fuentes, D. Schaefer ja J. Salom, „On the impact of realistic domestic hot water demand profiles on thermal storage stratification and energy efficiency,” %1 *Proceedings of the 99 Eurotherm Seminar*, Lleida, 2014.
- [14] E. Fuentes, L. Arce ja J. Salom, „A review of domestic hot water consumption profiles for application in systems and buildings energy performance analysis,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, nr 81, pp. 1530-1547, 2018.
- [15] R. Yao ja K. Steemers, „A method of formulating energy load profile for domestic buildings in the UK,” *Energy Build*, nr 37, pp. 663-671, 2005.
- [16] S. Edwards, I. Beusoleil-Morrison ja A. Laperrière, „Representative hot water draw profiles at high temporal resolution for simulating the performance of solar thermal systems,” *Solar Energy*, nr 111, pp. 43-52, 2015.
- [17] D. Sly ja s. Kordana, „Financial analysis of the implementation of a Drain Water Heat Recovery unit in residential housing,” *Energy and Buildings*, nr 71, pp. 1-11, 2014.
- [18] Department for Environment, Food and Rural Affairs (UK), „Measurement of Domestic Hot Water consumption in dwellings,” Defra, 2008.
- [19] D. George, N. S. Pearre ja L. G. Swan, „High resolution measured domestic hot water consumption of Canadian homes,” *Energy and Buildings*, nr 109, pp. 304-315, 2015.
- [20] J. Burch ja C. Christensen, „Towards development of an algorithm for mains water temperature,” %1 *Intersolar 2007 Conference*, 2007.
- [21] C.-L. Cheng, M.-C. Lee ja Y.-H. Lin, „Empirical prediction method of transmission heat loss in hot water plumbing,” *Energy and buildings*, kd. 38, pp. 1220-1229, 2006.

- [22] L. Wong, K. Mui ja G. Y., „Shower water heat recovery in high-rise residential buildings of Hong Kong,” *Applied Energy*, nr 87, pp. 703-709, 2010.
- [23] „Revealing the determinants of shower water end use consumption: enabling better targeted urban water conservation strategies,” *Journal of Cleaner Production*, kd. 60, pp. 129-146, 2013.
- [24] S. J. Kenway, R. Scheidegger ja H.-P. Bader, „Dynamic simulation of showers to understand water-related energy in households,” *Energy & Buildings*, kd. 192, pp. 45-62, 2019.
- [25] American Waterworks Association Research Foundation, „Residential end uses of water,” AWWA, Denver, 1999.
- [26] A. N. Binks, S. J. Kenway, Lant ja P. A., „The effect of water demand management in showers on household energy use,” *Journal of Cleaner Production*, kd. 157, pp. 177-189, 2017.
- [27] A. McNabola ja K. Shields, „Efficient drain water heat recovery in horizontal domestic shower drains,” *Energy and Buildings*, nr 59, pp. 44-49, 2013.
- [28] R. Critchley ja D. Phipps, „Water and Energy Efficient Showers: Project Report,” United Utilities and Liverpool John Moores University, Liverpool, 2007.
- [29] Energieprestatie van gebouwen, *NEN 7120:2011 Energy performance of buildings - Determination method*, NEN, 2011.
- [30] A. R. Mazhard, S. Liu ja A. Shujka, „A Key review of Non-Industrial Greywater Heat Harnessing,” *Energies*, kd. 11, nr 386, 2018.
- [31] A. Bertrand ja R. M. F. Aggoune, „In-building waster water heat recovery: An urban-scale method for the characterisation of water streams and the assesment of energy savings and costs,” *Applied Energy*, nr 192, pp. 110-125, 2017.
- [32] A. Cooperman, J. Dieckmann ja J. Brodrick, „Drain water heat recovery,” *ASHRAE Journal*, nr November, pp. 58-62, 2011.
- [33] R. Manouchehri, C. J. Banister ja M. R. Collins, „systems, Impact of small tilt angles on the performance of falling film drain water heat recovery,” *Energy and Buildings*, nr 102, pp. 181-186, 2015.
- [34] F. Schmid, „Sewage water: Interesting heat source for heat pumps and chillers,” Swiss Energy Agency for Infrastructure Plants, Zürich, 2008.
- [35] M. Abdel-Aal, R. Smits, K. D. G. Mohamed, A. Schellart ja S. Tait, „Modelling the viability of heat recovery from combined sewers,” *Water Science & Technology*, nr 70.2, pp. 297-307, 2014.
- [36] Rabtherm Energy Systems, Rabtherm Energy Systems, 28 02 2020. [Vörgumaterjal]. Available: <http://www.rabtherm.com/en/produkte.html>. [Kasutatud 28 02 2020].
- [37] M. Kiil, *Reo- ja hallvee soojusvahetuse analüüs koht- ja keskseadmete näitel*, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2017.
- [38] A. Kahraman ja A. Celebi, „Investigation of the Performance of a Heat Pump Using Waste water as a heat source,” *Energies*, nr 2, 2009.
- [39] J. L. Vavrin, „A quntitative study of the Viability of Grewater Heat Recovery,” Construction Engineering Research Laboratory, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Champaign, IL, 2011.
- [40] I. E. Smith, „Recovery and utilisation of heat from domestic waste water,” *Applied Energy*, kd. 1, nr 3, pp. 205-214, 1975.
- [41] G. Proskiw ja R. Sinha, „Design and analysis of a residential greywater heat recovery system,” Department of Natural Resources Canada, Ottawa, 2003.
- [42] S. Kordana, D. Slsy ja J. Dziopak, „Rationalization of water and energy consumption in shower systems of single-family dwelling houses,” *Journal of Cleaner production*, nr 82, pp. 58-69, 2014.

- [43] W. Grassi, *Heat Pumps: Fundamentals and applications*, Cham: Springer Nature, 2018.
- [44] J. Spriet ja A. McNabola, „Decentralized drain water heat recovery: A probabilistic method for prediction of wastewater and heating system interaction,” *Energy & Buildings*, nr 183, pp. 684-696, 2019.
- [45] M. R. Collins, G. W. E. Vand decker ja J. Murray, „Characteristic effectiveness curves for falling-film drain water heat recovery systems.,” *HVAC&R Research*, nr 16, pp. 649-662, 2013.
- [46] C. Zaloum, J. Gusdorf ja A. Parekh, „Performance Evaluation of Drain Water Heat Recovery Technology at the Canadian Centre of Housing Technology,” *Sustainable Buildings and Communities Sustainable Buildings and Communities*, Ottwata, 2007.
- [47] C. Zaloum, M. Lafrance ja J. Gusdorf, „Drain Water Heat Recovery Characterization and Modeling,” *Sustainable Buildings and Communities natural Resources Canada*, Ottawa, 2007.
- [48] K. Ip, K. She ja A. Kemi, „Life-cycle impacts of shower water waste heat recovery: case study of an installation at a university sport facility in the UK,” *Environmental Science and Pollution Research*, kd. 25, nr 11, 2017.
- [49] K. Pochwat, S. Kordana, M. Starzec ja D. Slys, „Comparison of two prototype near-horizontal Drain water heat recovery units on the basis of effectiveness,” *Energy*, nr 173, pp. 1196-1207, 2019.
- [50] KIWA, „Declaration regarding the efficiency of a shower heat recovery unit; Report number 170100251,” KIWA, Apeldoorn, 2017.
- [51] Savener OÜ, [Vörgumaterjal]. Available: <https://savener.ee/toode/zypho-izi/>. [Kasutatud 12 05 2020].
- [52] T. E. Tamayo, E. J. D. Chicaiza, M. P. C. Gonzales, C. L. V. Ferruzola ja S. G. P. Landeta, „Heat transfer coefficients and efficiency loss in plate heat exchanger during the ammonia liquor cooling process,” *International Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, kd. 1, pp. 55-60, 2016.
- [53] Onda, [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.onda-it.com/eng/news/how-a-plate-heat-exchanger-works/plate-heat-exchanger-working-principle>. [Kasutatud 20 03 2020].
- [54] T. L. Bergman ja A. S. Savine, „Heat Exchanger analysis: The effectiveness-NTU method,” *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Hoboken, John Wiley & Sons, inc, 2017, pp. 662-670.
- [55] T. L. Bergman ja A. S. Lavigne, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* Eight edition, Hoboken: Wiley & Sons, Inc, 2017.
- [56] Natural resources Canada, „Energy efficiency,” [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.nrcan.gc.ca/energy-efficiency/10832>. [Kasutatud 22 Märts 2020].
- [57] I. Beentjes, R. Manouchehri ja M. R. Collins, „An investigation of drain side wetting on the performance of falling film drain water heat recovery systems,” *Energy and buildings*, nr 82, pp. 660-667, 2014.
- [58] R. Manouchehri ja M. R. Collins, „An experimental analysis of the impact of temperature on falling film drain water heat recovery system effectiveness,” *Energy & Buildings*, nr 130, pp. 1-7, 2016.
- [59] CSA Group, *TCSA B55.1:15 (R2019) Test method for measuring efficiency and pressure loss of drain water heat recovery units*, Toronto: CSA Group, 2019.
- [60] R. Manouchehri ja M. R. Collins, „An experimental analysis of the impact of unequal flow in falling film drain water heat recovery system performance,” *Energy and Buildings*, nr 165, pp. 150-159, 2018.

- [61] M. Chris, „Waste Water Heat Recovery Systems (Instantaneous Shower): Waste Water Heat Recovery Systems (Instantaneous Shower),” Building Energy Performance Assessment support, 2013.
- [62] „Savener.ee,” 11 04 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://savener.ee/toode/zypho-izi/>. [Kasutatud 11 04 2020].
- [63] EDIT SA, *Zypho IZI Installation manual*.
- [64] A. Burlcau, Sosoi, Gavril ja S. Vixitiu, „Energy efficient heat pipe heat exchanger for waste heat recovery in buildings,” *Procedia Manufacturing*, nr 22, pp. 714-721, 2018.
- [65] M. Ramadan, T. Lemenand ja M. Khaled, „Recovering heat from hot drain water - Experimental evaluation, parametric analysis and new calculation procedure,” *Energy and Buildings*, nr 128, pp. 575-582, 2016.
- [66] C. Seybold ja M. F. Brunk, „In-House waste water heat recovery,” *Rehva Journal*, pp. 18-21, December 2013.

LISAD

Lisa 1 NPV 5,8 l/min, elekter

Lisa 1 NPV 5,8 l/min, elekter

Aasta	Energia hind	Kulu				Tulu				NPV aastal				NPV sum			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
0	0,120	293,00	293,00	293,00	293,00	0	0	0	0	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00
1	0,120					30,58	61,16	91,74	122,32	29,40	58,81	88,21	117,61	-263,60	-234,19	-204,79	-175,39
2	0,123					31,34	62,69	94,03	125,38	28,98	57,96	86,94	115,92	-234,62	-176,24	-117,85	-59,47
3	0,126					32,13	64,25	96,38	128,51	28,56	57,12	85,68	114,24	-206,06	-119,11	-32,17	54,77
4	0,129					32,93	65,86	98,79	131,72	28,15	56,30	84,45	112,60	-177,91	-62,81	52,28	167,37
5	0,132					33,75	67,51	101,26	135,02	27,74	55,49	83,23	110,97	-150,16	-7,33	135,51	278,34
6	0,136					34,60	69,20	103,79	138,39	27,34	54,69	82,03	109,37	-122,82	47,36	217,54	387,72
7	0,139					35,46	70,93	106,39	141,85	26,95	53,90	80,85	107,80	-95,87	101,26	298,38	495,51
8	0,143					36,35	72,70	109,05	145,40	26,56	53,12	79,68	106,24	-69,31	154,38	378,06	601,75
9	0,146					37,26	74,52	111,77	149,03	26,18	52,35	78,53	104,71	-43,13	206,73	456,60	706,46
10	0,150					38,19	76,38	114,57	152,76	25,80	51,60	77,40	103,20	-17,34	258,33	533,99	809,66
11	0,154					39,14	78,29	117,43	156,58	25,43	50,85	76,28	101,71	8,09	309,18	610,28	911,37
12	0,157					40,12	80,25	120,37	160,49	25,06	50,12	75,18	100,24	33,15	359,31	685,46	1011,61
13	0,161					41,13	82,25	123,38	164,50	24,70	49,40	74,10	98,80	57,85	408,70	759,56	1110,41
14	0,165					42,15	84,31	126,46	168,62	24,34	48,69	73,03	97,37	82,19	457,39	832,58	1207,78
15	0,170					43,21	86,42	129,62	172,83	23,99	47,98	71,98	95,97	106,19	505,37	904,56	1303,75

Lisa 2 NPV 9,2 l/min, elekter

Lisa 2 NPV 9,2 l/min, elekter

Aasta	Energia hind €/kWh	Kulu, €				Tulu, €				NPV aastal, €				NPV sum, €			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
0,00	0,120	293,000	293,000	293,000	293,000	0,00	0,00	0,00	0,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00
1,00	0,120					44,29	88,57	132,86	177,15	42,58	85,17	127,75	170,34	-250,42	-207,83	-165,25	-122,66
2,00	0,123					45,39	90,79	136,18	181,58	41,97	83,94	125,91	167,88	-208,45	-123,89	-39,34	45,22
3,00	0,126					46,53	93,06	139,59	186,12	41,36	82,73	124,09	165,46	-167,08	-41,16	84,76	210,67
4,00	0,129					47,69	95,39	143,08	190,77	40,77	81,54	122,30	163,07	-126,31	40,37	207,06	373,75
5,00	0,132					48,89	97,77	146,66	195,54	40,18	80,36	120,54	160,72	-86,13	120,73	327,60	534,47
6,00	0,136					50,11	100,21	150,32	200,43	39,60	79,20	118,80	158,40	-46,53	199,93	446,40	692,87
7,00	0,139					51,36	102,72	154,08	205,44	39,03	78,06	117,09	156,12	-7,50	277,99	563,49	848,98
8,00	0,143					52,64	105,29	157,93	210,58	38,47	76,93	115,40	153,87	30,96	354,92	678,89	1002,85
9,00	0,146					53,96	107,92	161,88	215,84	37,91	75,82	113,73	151,65	68,87	430,75	792,62	1154,49
10,00	0,150					55,31	110,62	165,93	221,24	37,36	74,73	112,09	149,46	106,24	505,48	904,72	1303,95
11,00	0,154					56,69	113,38	170,07	226,77	36,83	73,65	110,48	147,30	143,06	579,13	1015,19	1451,26
12,00	0,157					58,11	116,22	174,33	232,44	36,29	72,59	108,88	145,18	179,36	651,72	1124,08	1596,44
13,00	0,161					59,56	119,12	178,68	238,25	35,77	71,54	107,31	143,08	215,13	723,26	1231,39	1739,52
14,00	0,165					61,05	122,10	183,15	244,20	35,26	70,51	105,77	141,02	250,39	793,77	1337,16	1880,54
15,00	0,170					62,58	125,15	187,73	250,31	34,75	69,49	104,24	138,99	285,13	863,26	1441,40	2019,53

Lisa 3 NPV 12,5 l/min, elekter

Lisa 3 NPV 12,5 l/min, elekter

Aasta	Energia hind, €/kWh	Kulu, €				Tulu, €				NPV aastal, €				NPV sum, €			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
0	0,120	293,00	293,00	293,00	293,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00
1	0,120					54,44	108,88	163,33	217,77	52,35	104,70	157,05	209,39	-240,65	-188,30	-135,95	-83,61
2	0,123					55,80	111,61	167,41	223,21	51,59	103,19	154,78	206,37	-189,06	-85,12	18,83	122,77
3	0,126					57,20	114,40	171,60	228,79	50,85	101,70	152,55	203,40	-138,21	16,58	171,37	326,16
4	0,129					58,63	117,26	175,89	234,51	50,12	100,23	150,35	200,46	-88,09	116,81	321,72	526,63
5	0,132					60,09	120,19	180,28	240,38	49,39	98,79	148,18	197,57	-38,70	215,60	469,90	724,20
6	0,136					61,60	123,19	184,79	246,39	48,68	97,36	146,04	194,72	9,98	312,96	615,94	918,92
7	0,139					63,14	126,27	189,41	252,55	47,98	95,96	143,94	191,91	57,96	408,92	759,88	1110,84
8	0,143					64,71	129,43	194,14	258,86	47,29	94,57	141,86	189,15	105,25	503,49	901,74	1299,98
9	0,146					66,33	132,67	199,00	265,33	46,60	93,21	139,81	186,42	151,85	596,70	1041,55	1486,40
10	0,150					67,99	135,98	203,97	271,96	45,93	91,86	137,80	183,73	197,78	688,56	1179,35	1670,13
11	0,154					69,69	139,38	209,07	278,76	45,27	90,54	135,81	181,08	243,05	779,10	1315,16	1851,21
12	0,157					71,43	142,87	214,30	285,73	44,62	89,23	133,85	178,47	287,67	868,34	1449,01	2029,68
13	0,161					73,22	146,44	219,66	292,88	43,97	87,95	131,92	175,89	331,64	956,28	1580,93	2205,57
14	0,165					75,05	150,10	225,15	300,20	43,34	86,68	130,02	173,36	374,98	1042,96	1710,94	2378,93
15	0,170					76,93	153,85	230,78	307,70	42,71	85,43	128,14	170,86	417,70	1128,39	1839,09	2549,78

Lisa 4 NPV 5,8 l/min, kaugküte

Lisa 4 NPV 5,8 l/min, kaugküte

Aasta	Energia hind, €/kWh	Kulu, €				Tulu, €				NPV aastal, €				NPV sum, €			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
0	0,060	293,00	293,00	293,00	293,00	0	0	0	0	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00
1	0,060					18,04	36,08	54,11	72,15	17,34	34,69	52,03	69,38	-275,66	-258,31	-240,97	-223,62
2	0,062					18,49	36,98	55,47	73,96	17,09	34,19	51,28	68,38	-258,56	-224,12	-189,68	-155,24
3	0,063					18,95	37,90	56,85	75,81	16,85	33,70	50,54	67,39	-241,71	-190,43	-139,14	-87,85
4	0,065					19,43	38,85	58,28	77,70	16,60	33,21	49,81	66,42	-225,11	-157,22	-89,33	-21,43
5	0,066					19,91	39,82	59,73	79,64	16,37	32,73	49,10	65,46	-208,74	-124,49	-40,23	44,03
6	0,068					20,41	40,82	61,23	81,63	16,13	32,26	48,39	64,52	-192,61	-92,23	8,16	108,54
7	0,070					20,92	41,84	62,76	83,68	15,90	31,79	47,69	63,59	-176,72	-60,44	55,85	172,13
8	0,072					21,44	42,88	64,33	85,77	15,67	31,33	47,00	62,67	-161,05	-29,10	102,85	234,80
9	0,073					21,98	43,96	65,93	87,91	15,44	30,88	46,32	61,77	-145,61	1,78	149,17	296,56
10	0,075					22,53	45,05	67,58	90,11	15,22	30,44	45,66	60,87	-130,39	32,22	194,83	357,44
11	0,077					23,09	46,18	69,27	92,36	15,00	30,00	45,00	60,00	-115,39	62,22	239,83	417,44
12	0,079					23,67	47,34	71,00	94,67	14,78	29,57	44,35	59,13	-100,61	91,78	284,17	476,57
13	0,081					24,26	48,52	72,78	97,04	14,57	29,14	43,71	58,28	-86,04	120,92	327,88	534,84
14	0,083					24,87	49,73	74,60	99,46	14,36	28,72	43,08	57,44	-71,68	149,64	370,96	592,28
15	0,085					25,49	50,98	76,46	101,95	14,15	28,30	42,46	56,61	-57,53	177,95	413,42	648,89

Lisa 5 NPV 9,2 l/min, kaugküte

Lisa 5 NPV 9,2 l/min, kaugküte

Aasta	Energia hind, €/kWh	Kulu, €				Tulu, €				NPV aastal, €				NPV sum, €			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
0,00	0,120	293,000	293,000	293,000	293,000	0,00	0,00	0,00	0,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00
1,00	0,120					44,29	88,57	132,86	177,15	42,58	85,17	127,75	170,34	-250,42	-207,83	-165,25	-122,66
2,00	0,123					45,39	90,79	136,18	181,58	41,97	83,94	125,91	167,88	-208,45	-123,89	-39,34	45,22
3,00	0,126					46,53	93,06	139,59	186,12	41,36	82,73	124,09	165,46	-167,08	-41,16	84,76	210,67
4,00	0,129					47,69	95,39	143,08	190,77	40,77	81,54	122,30	163,07	-126,31	40,37	207,06	373,75
5,00	0,132					48,89	97,77	146,66	195,54	40,18	80,36	120,54	160,72	-86,13	120,73	327,60	534,47
6,00	0,136					50,11	100,21	150,32	200,43	39,60	79,20	118,80	158,40	-46,53	199,93	446,40	692,87
7,00	0,139					51,36	102,72	154,08	205,44	39,03	78,06	117,09	156,12	-7,50	277,99	563,49	848,98
8,00	0,143					52,64	105,29	157,93	210,58	38,47	76,93	115,40	153,87	30,96	354,92	678,89	1002,85
9,00	0,146					53,96	107,92	161,88	215,84	37,91	75,82	113,73	151,65	68,87	430,75	792,62	1154,49
10,00	0,150					55,31	110,62	165,93	221,24	37,36	74,73	112,09	149,46	106,24	505,48	904,72	1303,95
11,00	0,154					56,69	113,38	170,07	226,77	36,83	73,65	110,48	147,30	143,06	579,13	1015,19	1451,26
12,00	0,157					58,11	116,22	174,33	232,44	36,29	72,59	108,88	145,18	179,36	651,72	1124,08	1596,44
13,00	0,161					59,56	119,12	178,68	238,25	35,77	71,54	107,31	143,08	215,13	723,26	1231,39	1739,52
14,00	0,165					61,05	122,10	183,15	244,20	35,26	70,51	105,77	141,02	250,39	793,77	1337,16	1880,54
15,00	0,170					62,58	125,15	187,73	250,31	34,75	69,49	104,24	138,99	285,13	863,26	1441,40	2019,53

Lisa 6 NPV 12,5 l/min, kaugküte

Lisa 6 NPV 12,5 l/min, kaugküte

Aasta	Energia hind, €/kWh	Kulu, €				Tulu, €				NPV aastal, €				NPV sum, €			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
0	0,120	293,00	293,00	293,00	293,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00
1	0,120					54,44	108,88	163,33	217,77	52,35	104,70	157,05	209,39	-240,65	-188,30	-135,95	-83,61
2	0,123					55,80	111,61	167,41	223,21	51,59	103,19	154,78	206,37	-189,06	-85,12	18,83	122,77
3	0,126					57,20	114,40	171,60	228,79	50,85	101,70	152,55	203,40	-138,21	16,58	171,37	326,16
4	0,129					58,63	117,26	175,89	234,51	50,12	100,23	150,35	200,46	-88,09	116,81	321,72	526,63
5	0,132					60,09	120,19	180,28	240,38	49,39	98,79	148,18	197,57	-38,70	215,60	469,90	724,20
6	0,136					61,60	123,19	184,79	246,39	48,68	97,36	146,04	194,72	9,98	312,96	615,94	918,92
7	0,139					63,14	126,27	189,41	252,55	47,98	95,96	143,94	191,91	57,96	408,92	759,88	1110,84
8	0,143					64,71	129,43	194,14	258,86	47,29	94,57	141,86	189,15	105,25	503,49	901,74	1299,98
9	0,146					66,33	132,67	199,00	265,33	46,60	93,21	139,81	186,42	151,85	596,70	1041,55	1486,40
10	0,150					67,99	135,98	203,97	271,96	45,93	91,86	137,80	183,73	197,78	688,56	1179,35	1670,13
11	0,154					69,69	139,38	209,07	278,76	45,27	90,54	135,81	181,08	243,05	779,10	1315,16	1851,21
12	0,157					71,43	142,87	214,30	285,73	44,62	89,23	133,85	178,47	287,67	868,34	1449,01	2029,68
13	0,161					73,22	146,44	219,66	292,88	43,97	87,95	131,92	175,89	331,64	956,28	1580,93	2205,57
14	0,165					75,05	150,10	225,15	300,20	43,34	86,68	130,02	173,36	374,98	1042,96	1710,94	2378,93
15	0,170					76,93	153,85	230,78	307,70	42,71	85,43	128,14	170,86	417,70	1128,39	1839,09	2549,78

Lisa 7 NPV 5,8 l/min, gaasküte

Lisa 7 NPV 5,8 l/min, gaasküte

Aasta	Energia hind, €/kWh	Kulu, €				Tulu, €				NPV aastal, €				NPV sum, €			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
0	0,046	293,00	293,00	293,00	293,00	0	0	0	0	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00
1	0,046					13,79	27,58	41,37	55,16	13,26	26,52	39,78	53,04	-279,74	-266,48	-253,22	-239,96
2	0,047					14,14	28,27	42,41	56,54	13,07	26,14	39,21	52,28	-266,67	-240,34	-214,01	-187,68
3	0,048					14,49	28,98	43,47	57,96	12,88	25,76	38,64	51,52	-253,79	-214,58	-175,37	-136,16
4	0,050					14,85	29,70	44,55	59,40	12,69	25,39	38,08	50,78	-241,10	-189,19	-137,29	-85,38
5	0,051					15,22	30,44	45,67	60,89	12,51	25,02	37,54	50,05	-228,58	-164,17	-99,75	-35,33
6	0,052					15,60	31,21	46,81	62,41	12,33	24,66	36,99	49,32	-216,25	-139,50	-62,76	13,99
7	0,053					15,99	31,99	47,98	63,97	12,15	24,31	36,46	48,61	-204,10	-115,20	-26,30	62,60
8	0,055					16,39	32,79	49,18	65,57	11,98	23,96	35,93	47,91	-192,12	-91,24	9,64	110,52
9	0,056					16,80	33,61	50,41	67,21	11,81	23,61	35,42	47,22	-180,32	-67,63	45,05	157,74
10	0,057					17,22	34,45	51,67	68,89	11,64	23,27	34,91	46,54	-168,68	-44,36	79,96	204,28
11	0,059					17,65	35,31	52,96	70,61	11,47	22,93	34,40	45,87	-157,21	-21,43	114,36	250,15
12	0,060					18,09	36,19	54,28	72,38	11,30	22,60	33,91	45,21	-145,91	1,18	148,27	295,35
13	0,062					18,55	37,09	55,64	74,19	11,14	22,28	33,42	44,56	-134,77	23,45	181,68	339,91
14	0,063					19,01	38,02	57,03	76,04	10,98	21,96	32,93	43,91	-123,79	45,41	214,62	383,82
15	0,065					19,49	38,97	58,46	77,94	10,82	21,64	32,46	43,28	-112,97	67,05	247,08	427,10

Lisa 8 NPV 9,2 l/min, gaasküte

Lisa 8 NPV 9,2 l/min, gaasküte

Aasta	Energia hind, €/kWh	Kulu, €				Tulu, €				NPV aastal, €				NPV sum, €			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
0	0,046	293,00	293,00	293,00	293,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00
1	0,046					19,97	39,95	59,92	79,89	19,20	38,41	57,61	76,82	-273,80	-254,59	-235,39	-216,18
2	0,047					20,47	40,94	61,42	81,89	18,93	37,86	56,78	75,71	-254,87	-216,74	-178,60	-140,47
3	0,048					20,98	41,97	62,95	83,94	18,65	37,31	55,96	74,62	-236,21	-179,43	-122,64	-65,85
4	0,050					21,51	43,02	64,53	86,03	18,39	36,77	55,16	73,54	-217,83	-142,66	-67,48	7,69
5	0,051					22,05	44,09	66,14	88,18	18,12	36,24	54,36	72,48	-199,71	-106,41	-13,12	80,17
6	0,052					22,60	45,19	67,79	90,39	17,86	35,72	53,58	71,44	-181,85	-70,70	40,45	151,61
7	0,053					23,16	46,32	69,49	92,65	17,60	35,20	52,80	70,41	-164,25	-35,49	93,26	222,01
8	0,055					23,74	47,48	71,22	94,97	17,35	34,70	52,04	69,39	-146,90	-0,80	145,30	291,40
9	0,056					24,33	48,67	73,00	97,34	17,10	34,19	51,29	68,39	-129,80	33,40	196,59	359,79
10	0,057					24,94	49,89	74,83	99,77	16,85	33,70	50,55	67,40	-112,95	67,10	247,15	427,19
11	0,059					25,57	51,13	76,70	102,27	16,61	33,22	49,82	66,43	-96,34	100,31	296,97	493,63
12	0,060					26,21	52,41	78,62	104,82	16,37	32,74	49,10	65,47	-79,98	133,05	346,07	559,10
13	0,062					26,86	53,72	80,58	107,44	16,13	32,26	48,40	64,53	-63,84	165,31	394,47	623,63
14	0,063					27,53	55,07	82,60	110,13	15,90	31,80	47,70	63,60	-47,94	197,11	442,17	687,22
15	0,065					28,22	56,44	84,66	112,88	15,67	31,34	47,01	62,68	-32,27	228,45	489,18	749,90

Lisa 9 NPV 12,5 l/min, gaasküte

Lisa 9 NPV 12,5 l/min, gaasküte

Aasta	Energia hind, €/kWh	Kulu, €				Tulu, €				NPV aastal, €				NPV sum, €			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
0	0,046	293,00	293,00	293,00	293,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00	-293,00
1	0,046					24,55	49,10	73,66	98,21	23,61	47,22	70,82	94,43	-269,39	-245,78	-222,18	-198,57
2	0,047					25,17	50,33	75,50	100,66	23,27	46,54	69,80	93,07	-246,12	-199,25	-152,37	-105,50
3	0,048					25,80	51,59	77,39	103,18	22,93	45,86	68,80	91,73	-223,19	-153,38	-83,58	-13,77
4	0,050					26,44	52,88	79,32	105,76	22,60	45,20	67,80	90,41	-200,59	-108,18	-15,77	76,64
5	0,051					27,10	54,20	81,30	108,41	22,28	44,55	66,83	89,10	-178,32	-63,63	51,05	165,74
6	0,052					27,78	55,56	83,34	111,12	21,95	43,91	65,86	87,82	-156,36	-19,72	116,91	253,55
7	0,053					28,47	56,95	85,42	113,89	21,64	43,27	64,91	86,55	-134,72	23,55	181,83	340,10
8	0,055					29,19	58,37	87,56	116,74	21,33	42,65	63,98	85,30	-113,40	66,20	245,80	425,40
9	0,056					29,91	59,83	89,74	119,66	21,02	42,04	63,05	84,07	-92,38	108,24	308,86	509,47
10	0,057					30,66	61,33	91,99	122,65	20,71	41,43	62,14	82,86	-71,67	149,67	371,00	592,33
11	0,059					31,43	62,86	94,29	125,72	20,42	40,83	61,25	81,66	-51,25	190,50	432,25	674,00
12	0,060					32,21	64,43	96,64	128,86	20,12	40,24	60,36	80,49	-31,13	230,74	492,61	754,48
13	0,062					33,02	66,04	99,06	132,08	19,83	39,66	59,49	79,32	-11,30	270,40	552,10	833,81
14	0,063					33,85	67,69	101,54	135,38	19,55	39,09	58,64	78,18	8,25	309,49	610,74	911,99
15	0,065					34,69	69,38	104,08	138,77	19,26	38,53	57,79	77,05	27,51	348,02	668,53	989,04