



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND  
Ehituse ja arhitektuuri instituut

***PÕRANDKÜTTEGA SOOJUSPUMPSÜSTEEMI  
JUHTIMINE ELEKTRIVÕRGU  
TASAKAALUSTAMISEKS NING SELLE MÕJU  
ENERGIAKASUTUSELE JA SOOJUSLIKULE  
MUGAVUSELE***

**CONTROL OF HEAT PUMP SYSTEM WITH UNDERFLOOR  
HEATING FOR POWER GRID BALANCING AND ITS  
EFFECT ON ENERGY USE AND INDOOR CLIMATE**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Mihkel Pugri

Üliõpilaskood EAKI165164

Juhendaja: Tuule Mall Kull, nooremteadur  
Martin Thalfeldt, professor

Tallinn 2021

# AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

17. mai 2021

Autor: Mihkel Pugri

*/allkirjastatud digitaalselt/*

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

17. mai 2021

Juhendaja: Tuule Mall Kull

*/allkirjastatud digitaalselt/*

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

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

Mina, Mihkel Pugri (sünnikuupäev: 31.05.1997)

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

Põrandküttega soojuspumpsüsteemi juhtimine elektrivõrgu tasakaalustamiseks ning selle mõju energiakasutusele ja soojuslikule mugavusele

*(lõputöö pealkiri)*

mille juhendajad on Tuule Mall Kull, Martin Thalfeldt.

*(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.

---

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

*/allkirjastatud digitaalselt/*

17.05.2021 *(kuupäev)*

# Ehituse ja arhitektuuri instituut

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Mihkel Pugri, 165164EAKI (nimi, üliõpilaskood)  
Õppekava, peeriala: EAKI02/15 Hoonete sisekliima ja veetehnika (kood ja nimetus)  
**Juhendaja(d):** Nooremteadur, Tuule Mall Kull (amet, nimi, telefon)  
Professor, Martin Thalfeldt (amet, nimi, telefon)

### Lõputöö teema:

(eesti keeles) *Põrandküttega soojuspumpsüsteemi juhtimine elektrivõrgu tasakaalustamiseks ning selle mõju energiakasutusele ja soojuslikule mugavusele*

(inglise keeles) Control of heat pump system with underfloor heating for power grid balancing and its effect on energy use and indoor climate

### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Teha ülevaade hetkeolukorrast hoone soojusliku massiga elektrivõrgu tasakaalustamise teoorias ja praktikas
2. Erinevate soojuspumba juhtimisloogikate võrdlus Taltech liginullenergia testhoones, hinnates reaktsiooniga hoonet energiasalvestina kasutamisel võrgu tootmise ja tarbimise tasakaalustamiseks
3. Mõõtmistele ja simulatsioonidele tuginedes hinnata soojuspumbaga põrandküttesüsteemi potentsiaali elektrienergia tarbimise ja tootmise tasakaalustamiseks.

### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Tutvuda teemaga uurides kirjandust, kirjutada tehtud töödest ülevaade	02.11.20
2.	Panna paika mõõtmiste plaan ja meetodika ning seadistamine	28.11.20
3.	Mõõtmiste läbiviimine ja dokumenteerimine 28.11-28.12	28.12.20
4.	Esmase kirjanduse- ja valdkonna ülevaate esitamine	08.03.21
5.	Simulatsioonimudeli koostamine ja kalibreerimine paralleelselt mõõtmistega, dokumenteerimine	15.03.21
6.	Esialgset simulatsioonid IDA ICE tarkvaras ja analüüs	29.03.21
7.	Esmaste simulatsioonide lõpule viimine, graafikute vormistamine ning postri ettevalmistamine 75% ülevaatuseks	02.04.21
8.	Põhjalikud simulatsioonid ja analüüs	29.04.21

9.	Töö graafikute ja teksti parandamine ja viimistlemine	10.05.21
10.	Töö viimane versioon juhendajale, töö lõpetamine, printimine	17.05.21

**Töö keel:** eesti keel      **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 17.mai 2021. a

**Üliõpilane:** Mihkel Pugri      /allkirjastatud digitaalselt/  
/allkiri/      17.mai 2021. a

**Juhendaja:** Tuule Mall Kull      /allkirjastatud digitaalselt/  
/allkiri/      17.mai 2021. a

**Juhendaja:** Martin Thalfeldt      /allkirjastatud digitaalselt/  
/allkiri/      17.mai 2021. a

**Konsultant:** ..... ".....".....201....a  
/allkiri/

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

*Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel*

# SISUKORD

EESSÕNA .....	8
SISSEJUHATUS .....	9
1. TEOREETILISED ALUSED .....	11
1.1 Elektrienergia.....	11
1.1.1 Elektrivõrgu stabiilsus .....	11
1.1.2 Tarkvõrgud ja tarbija poole paindlikkus.....	13
1.2 Sisekliima .....	14
1.2.1 Sisekliima klassid .....	14
1.2.2 Hoone soojuskaod ja soojuslik käitumine .....	14
1.3 Hoonete küte.....	16
1.3.1 Põrandküte .....	17
1.4 Soojuspumbad .....	17
1.4.1 Soojuspumba tööpõhimõte .....	18
2. KIRJANDUSE ÜLEVAADE.....	20
3. METOODIKA .....	23
3.1 Katseteks kasutatav hoone.....	23
3.1.1 Testhoone ruum 9 .....	23
3.1.2 Tehnosüsteemid .....	24
3.2 Süsteemi seadistamine .....	24
3.3 Mõõtmised.....	25
3.3.1 Sisekliima mõõtmised.....	25
3.3.2 Soojuspumba katsed .....	27
3.4 Simulatsioonid .....	30
3.4.1 IDA ICE simulatsiooni tarkvara .....	30
3.4.2 Kalibreerimine .....	30
3.4.3 Simulatsioonide ettevalmistamine .....	31
4. MUDELI KALIBREERIMINE.....	36
5. TULEMUSED .....	43
5.1 Tarbimise nihutamise mõju simulatsioonide alusel.....	43
5.1.1 Üle- ja alakütmise mõju sisekliimale ja küttevõimsusele.....	43
5.1.2 Erinevate juhtimisalgoritmide mõju päevastele energiakasutustele.....	45

5.1.3 Hoone energiapaindlikkuse potentsiaali rakendamise mõju aastasele energiavajadusele ja hoone soojusmahtuvuse mõju .....	50
5.2 Ventiilide avamisaja mõju soojuspumba juhtimisele .....	52
KOKKUVÕTE .....	57
SUMMARY .....	59
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	61
LISAD .....	66

## EESSÕNA

Idee käesoleva uurimuse teema valikuks tõstatasid elektritootjad, kelle jaoks huvi hoonetest ning tehnosüsteemidest energiapaindlikkuse vastu järjest kasvab. Magistritöö raames tehti katsed TalTech liginullenergia testhoones, kus viidi läbi mõõtmised iseloomustamiseks soojuspumbaga põrandküttesüsteemi reageerimiskiirust elektrivõrgu märguannetele. Lisaks sellele katsetati testhoones küttesüsteemis muutuste tegemise mõju siseõhu temperatuuridele ning kalibreeriti mõõtetulemustega IDA ICE simulatsioonitarkvaras hoone mudel. Kalibreeritud mudeliga viidi läbi erinevate juhtimisalgoritmidega simulatsioonid, et näha hoone energiapaindlikkuse potentsiaali rakendamise mõju küttevõimsusele-, energiale ning soojuslikule sisekliimale. Hoone mudeli kalibreerimisel olid suureks abiks juhendajad nooremteadur Tuule Mall Kull ja professor Martin Thalfeldt. Täna ka doktorant-nooremteadur Karl- Villem Võsa ta panuse eest erisuguste IDA ICE tarkvaraga seotud probleemide lahendamisel. Mõned võtmesõnad, mis käesoleva magistritöö kokku võtavad on: tarbija poole paindlikkus, põrandküte, IDA ICE, õhk-vesi soojuspump ning vahamootoritega ajamid.



## SISSEJUHATUS

Tänapäeval on energeetika valdkonnas selgelt suund taastuenergiaallikate suunas, mille tulemusel vähendatakse CO<sub>2</sub> õhkupaiskamist ja sõltuvust fossiilkütustest. Taastuenergia levikut tõstes on hakatud tootma elektrienergiat ka hajutatult lokaalsete päikesepaneelidega, näiteks eramute katustel, millega püütakse suurendada hoone energiatõhusust või saavutada teatud energiamärgist. Roheenergia osatähtsuse suurenemine elektrienergia tootmises põhjustab elektrienergia ettenägematu ajalisi muutusi tootmise mahtudes. Selleks, et elektrivõrk korrektselt toimiks peavad aga tootmine ja tarbimine olema samad. Juhul kui tootmine on liiga suur, peavad rakenduma energiasalvestid või nagu ka kirjanduses on välja pakutud [1], [2] rakendama tarbija poole energiakasutuse paindlikkust, vastasel korral ei suudeta tagada elektrivõrgus vajalikku vahelduvvoolu sagedust ja tekib avariide tekkimise oht. Tarbija poole paindlikkuse allikateks võivad olla muuhulgas elektriautod, küttesüsteem hoone konstruktsioonidesse soojusenergia salvestamiseks, valgustus ning koduseadmed. Üha laieneva soojuspumpade ja pörandkütte levikuga on muutumas aktuaalseks hoonete küttesüsteemiga elektrivõrgu tasakaalustamine.

Käesolevas uurimustöös uuritakse tarbija poole majandamise potentsiaali hoone küttesüsteemiga konstruktsioonidesse soojuse salvestamiseks. Katsete käigus kasutatakse ära inverteriga soojuspumba võimalust reguleerida soojusväljastust manuaalselt. TalTech liginullenergia testhoones tehtavates katsetes imiteeritakse elektrienergia tootmise järsku suurenemist ning püütakse tarbija poolt soojuspumba abil panna lühikese, 30-minutilise intervalli jooksul tarbima võimalikult suurt hulka energiat, sellega tasakaalustamaks elektrivõrku just tarbija poolelt. Sarnase ideega katseid on varasemalt ka tehtud [3], kuid autorile teadaolevalt ei ole uuritud soojuspumba soojusväljastuse tõstmise kiirust koostöös pörandkütte vahamootoriga ajamite avanemise kiirusega. Katsete tulemusena oodatakse, et oleks võimalik elektrivõrgu signaalide alusel soojuspumbaga konstruktsioonide aktiveerimist lahterdada energiasalvesti liigina [4], arvestades, et energiasalvestite liigitamine sõltub eelkõige salvesti reageerimisajast võrgu märguannetele.

Teisalt kuulub elektrivõrgu tasakaalustamise potentsiaali hindamise alla tarbija poole energiapaindlikkus ehk võime muuta ajaliselt tarbimise hetke. Nii on võimalik elektrivõrgu rohkem koormatud hetkedel lülitada soojuspump välja ja vähem koormatud hetkedel, näiteks öösel, selle võrra üle kütta, et säiliks hoones aktsepteeritav sisekliima. Sellise juhtimise mõju sisekliimale uuritakse käesoleva magistritöö käigus testhoones tehtud jahtumise ja üleskütmise katsete abil. Nendega määratakse

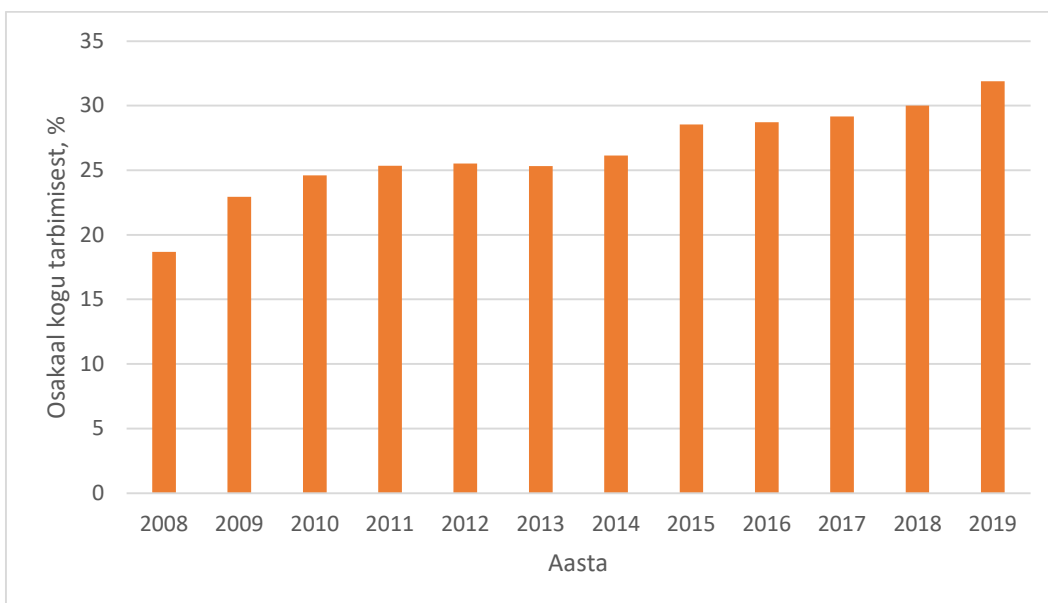
eelnimetatud protsesside kiirus. Kasutades mõõtmistest saadud andmeid kalibreeritakse simulatsioonitarkvaras IDA ICE testhoone ühe ruumi mudel, millega on võimalik simuleerida ja analüüsida tarbija poole energiapaindlikkust. Lisaks tehakse kindlaks aastase küttekulu suurenemine tarbija poole energiakasutuse profiili muutmisest ning hoone konstruktsioonide soojusmahtuvuse mõju elektritarbija poole majandamise potentsiaalile.

# 1. TEOREETILISED ALUSED

## 1.1 Elektrienergia

Energia, eriti elektrienergia on meie maailmas kesksel kohal, aga fossiilkütuste varud on piiratud. Sellest tulenevalt on hakatud rohkem kasutama taastuvaid energiaallikaid näiteks päikese, hüdro- ja tuuleenergiat. Eesti ratifitseeris aastal 2002 Kyoto protokoll, läbi mille kohustati ennast vähendama aastatel 2008-2012 kasvuhoonegaaside õhkupaikamist 8% võrreldes aastaga 1990, sellega vähendades ka fossiilsete kütuste tarbimist [5].

Euroopa Liidus on jõutud arusaamale, et vähendamaks energiasõltuvust EL-i välistest riikidest tuleb kasutusele võtta taastuvallikad energia tootmiseks. Euroopa Liit on seadnud endale eesmärgiks aastaks 2030 jõuda taastuenergia osakaaluni energia lõpptarbimises vähemalt 27%, kusjuures Eesti on selle eesmärgini juba jõudnud (joonis 1.1). [6]

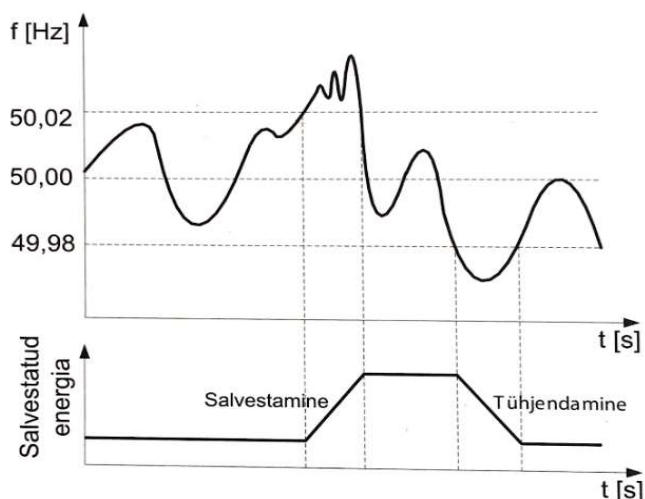


Joonis 1.1 Taastuenergia osatähtsus energia lõpptarbimises Eestis [7]

### 1.1.1 Elektrivõrgu stabiilsus

Taastuenergia laienemine läbi lokaalsete tootmisallikate süsteemi liitmisega on muutumas aina populaarsemaks. Elektrisüsteemi majanduslikud eelised on suure süsteemi puhul suuremad kui väikese, sest ühendamisest saadav majanduslik kasu on harilikult suurem elektrivõrgu ehituskuludest. Samal ajal sellisel moel elektrisüsteeme liites peab elektrisüsteem töötama stabiilsuse piiril, mis tõstab avariide tekkimise riski. [8]

Üks faktor, mis võib ohustada elektrisüsteemi stabiilsust on tootmise ja tarbimise kattuvus- et kehtiks energia jäävuse printsiip, siis peavad tootmine ja tarbimine olema samad. Samas lisavad taastuenergiaallikad elektrisüsteemile oluliselt ettearvamatut elektritootmist juurde, ajal kus näiteks tarbimine kõrge olla ei pruugi. Juhul kui elektrisüsteem töötab suurema või väiksema koormusega kui tarbimine, siis ilma elektrisalvestiteta ei suudeta tagada elektrisüsteemis vajalikku sagedusvahemikku (Joonis 1.2). [4]



Joonis 1.2 Sageduse juhtimine elektrisalvesti abil [4, lk 10]

R. Pajo (2007) kirjeldab, et taastuenergia saadavuse ajaline muutumus põhjustas näiteks 2006. aastal Lääne- Euroopas elektrikatkestuse, mis jättis 15 minutiks elektrita umbes 15 miljonit majapidamist, suuresti tänu tuuleelektrijaamade ebakorrapärasele sisse-välja lülitumisele. Et taastuenergiaallikatest põhjustatud negatiivset toimet energiasüsteemidele vähendada, tuleks need varustada elektrienergia salvestitega või tasakaalustada võrku muude vahenditega. [9, lk 400]

Elektrisalvesteid kasutatakse mitmetel põhjustel, muuhulgas koormuste halduseks, süsteemi stabiliseerimiseks, taastuenergiaallikate integreerimiseks, tarbimise juhtimiseks ja tipukoormuse vähendamiseks. Elektrisalvestitele on ette nähtud erinevad nõuded ja eelnimetatu põhjal ka rakendused (tabel 1.1). Üheks tähtsamaks faktoriks, mis määrab elektrisalvesti rakenduse on reaktsiooniaeg, mis ulatub erinevatel elektrisalvestitel millisekunditest kuni 10 minutini. [4, lk 8]

Tabel 1.1 Nõuded elektrisalvestite rakendamisele [4, lk 11]

Rakendused	Tootmiste ja tarbimise ühildamine	Katkematu toite tagamine	Taastuenergia- allikate integreerimine
Võimsusvahemik	<1 MW... 100+ MW	1...200 MW	20 kW...10 MW
Reaktsiooniaeg	<10min	<10 ms- lühiajaline <10 min- pikaajaline	<10 s
Energia- mahutavus	1...1000 MWh	1...1000 MWh	10 kWh...200 MWh
Tõhusus	kõrge	keskmise	kõrge
Eluiga	kõrge	kõrge	kõrge

### 1.1.2 Tarkvõrgud ja tarbija poole paindlikkus

Ulatuslik taastuenergia integreerimine elektrivõrku [10] nõuab nn tarkvõrgu arendamist [2]. Tarkvõrkudega on võimalik taastuenergia poolt toodetava ja suurtes vahemikes kaootiliselt muutuva võimsusega elektrienergiat tasakaalustada. Selleks integreerib tarkvõrk elektritarbijad energia reguleerimise protsessi. [11]

Elektritarbijatel on üldiselt tarkvõrkudes kasutusel kahte laadi tootmise nõudlusele reageerimise põhimõtet- hinna põhine (*price-based*) ja stiimuli põhine (*incentive based*) [12], [13], [14]. Hinna põhine motiveerib tarbijate elektrikasutuse profiili vastavalt muutlikule elektrihinnale sisaldades ajakasutust (*time of use*), hinda reaajas (*real time price*) ning kriitilist hinnakujundust (*critical pricing*). Stiimuli põhine julgustab elektritarbijaid rahaliste „preemiate“ näol või trahvidega juhul kui näiteks koormust õigeaegselt või õiges mahus ei vähendata. [15]

Hoonete puhul on üks tähtsaim osa elektritarbija poole energiapaindlikkusel elektriküttesüsteem. Selle alla võivad kuuluda nii põrandküttesüsteemid, elektriradiaatorid,- konvektorid, kerised kuid eriti ka soojuspumbad. Lisaks selleks ette nähtud soojussalvestitele on ka hoonete konstruktsioonide soojusmahtuvus piisavalt suur, et saaks elekterküttesüsteemi kasutada tarkvõrgus paindlikult. Koormuse paindlikust võib vaadelda näiteks järgmiselt- elektrivõrku minimaalselt koormatud hetkel ühendatakse kütte võimsus võimalikult kõrgeks ja tipukoormuse ajal lülitatakse kütmine välja või minimaalsele võimalikule võimsustarbele (*peak-shaving*). [11, lk 187]

## 1.2 Sisekliima

20. sajandil levima hakanud kontoritöö on põhjustanud selle, et inimesed veedavad suure, umbes 90% osa oma elust siseruumides, sellepärast on hakatud panema suurt rõhku sisekliimale. Sisekliima mõjutab olulisel määral ruumis viibijate enesetunnet, hea sisekliima hoiab ära haigusi ning väldib vaimse töövõime langust. [16, lk 11]

### 1.2.1 Sisekliima klassid

Sisekliima jaotatakse tavapäraselt nelja klassi: I- parim, II- hea, III- rahuldav, IV- puudulik [17]. I kategooria on mõeldud kõrgeid sisekliima ootusi nõudvatele hoonetele või ruumidele, II kategooria on normaaltasemel sisekliima, millele tavaliselt projekteeritakse uuselamuid või rekonstrueeritavaid hooneid, III kategooria sisekliima sobib olemasolevatele hoonetele ning IV kategooria on aktsepteeritav ainult teatud ajal aastast kasutatavatele hoonetele, näiteks suvilad. Tabelis 1.2 on välja toodud eluhoonete energiaarvutusteks kasutatavad temperatuuride vahemikud, PPD ja PMV indeks, sealjuures on küttesüsteemi riistuse tase  $\rho_{cl}$  1,0 ning jahutusel 0,5. Käesoleva uurimistöökäigus on antud tabelis kõige olulisemad väärtused siseõhu temperatuurid, sest need seavad ääritingimused hoone energiapaindlikuse potentsiaali rakendamisel. [18]

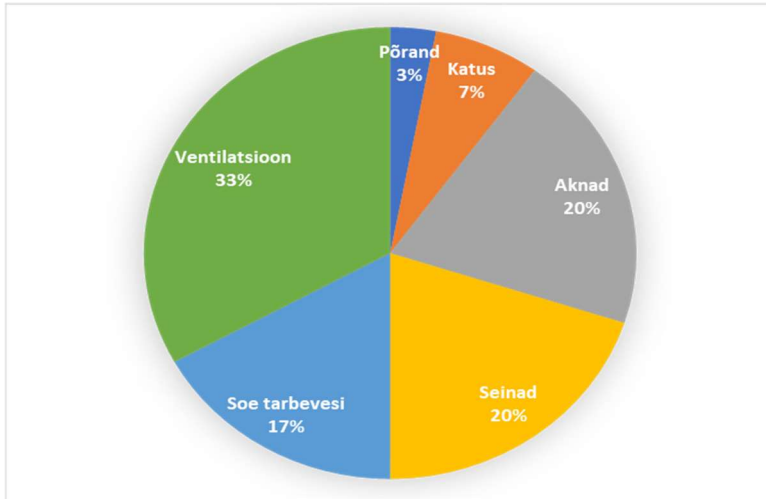
Tabel 1.2 Sisekliima klasse iseloomustav kokkuvõttev tabel [18]

Kategooria	PPD, %	PMV	Energiaarvutusteks kasutatavad operatiivsed siseõhu temperatuurid küttesüsteemil	Energiaarvutusteks kasutatavad operatiivsed siseõhu temperatuurid jahutusel	Põrandapinna temperatuuri vahemik põrandaküttesüsteemil
I	<6	$-0,2 < PMV < +0,2$	21-25 °C	23,5-25,5 °C	19-29 °C
II	<10	$-0,5 < PMV < +0,5$	20-25 °C	23-26 °C	19-29 °C
III	<15	$-0,7 < PMV < +0,7$	18-25 °C	22-27 °C	17-31 °C

### 1.2.2 Hoone soojuskaod ja soojuslik käitumine

Hoone soojusliku sisekliima tagamiseks kasutatakse kütte- ja jahutussüsteeme. Küttesüsteemi võimsuse määrab hoone soojuskadu. Hoone arvutuslikud soojuskaod sõltuvad eelkõige hoone geomeetristest omadustest, arvutuslikust sise- ja välisõhu

temperatuurist, õhuvahetusest ning hoone välispiirete soojustakistusest [19]. Hoone soojusenergia kasutuse jaotuse näide koos soojuskadudega on toodud välja joonisel 1.4. Olemasoleva hoone tegelikud soojuskaod sõltuvad ennekõike sise- ja välisõhu temperatuuride vahest. Seega kõrgema siseõhu temperatuuri korral soojusenergia küttele kasvab.



Joonis 1.4 Hoone kütteenenergia kasutuse jaotuse näide [20]

Lihtsustatud meetodil ruumi soojuskadusid arvutatakse järgneva valemi järgi:

$$\Phi = \sum_{i=1}^n \Phi_{pki} + \Phi_p + \Phi_{inf} + \Phi_v$$

Valem 1.1 [19, lk 6]

kus  $\Phi_{pki}$  - soojuskaod läbi i-nda piirdetarindi, W;

$\Phi_p$  - soojuskaod läbi põranda, W;

$\Phi_{inf}$  - soojuskaod läbi infiltratsiooni, W;

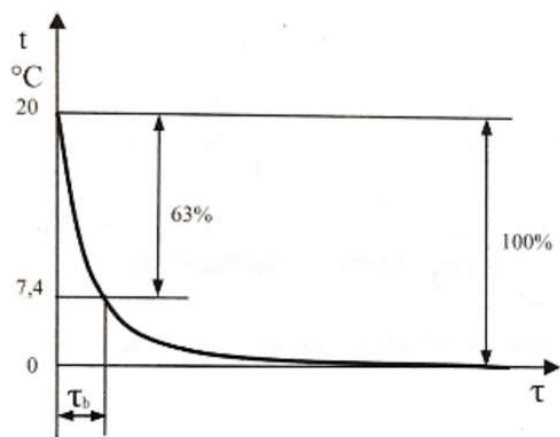
$\Phi_v$  - soojuskaod läbi ventilatsiooni, W;

$\Phi$  - ruumi soojuskaod, W.

Kogu hoone arvutuslikud soojuskaod on võimalik leida kõikide ruumide arvutuslike soojuskadude kokku liitmisega. [19]

Hoonete jahtumine ja üleskütmine on harilikult aeganõudev protsess ning küttekooormusest tingitud muutused mõjutavad siseõhu temperatuuri olulise hilistusega, eriti massiivsete konstruktsioonidega hoone puhul. Selle taga on hoonete suur

soojusmahtuvus. Lihtsustatud juhul saab hinnata hoone soojuslikku käitumist soojusliku ajakonstandiga (joonis 1.5), kui arvestada välisõhu temperatuur konstantseks. Hoone soojuslik ajakonstant väljendab perioodi, mille lõpus on siseõhu temperatuur 63% võrra väiksem sise- ja välisõhu temperatuuride vahest kui perioodi alguses, seda juhul kui küttesüsteem on välja lülitatud. [16, lk 38-39]



Joonis 1.5 Hoone soojusliku ajakonstant  $\tau_B$  lihtsustatud juhul kui välisõhu temperatuur on 0°C ja algne siseõhu temperatuur on 20°C. [16, lk 39]

Lihtsustatud meetodil hoone üleskütmise aja pikkus arvutatakse järgneva valemiga:

$$\tau_2 = -\tau_B \cdot \ln \frac{\Phi - H \cdot (t_3 - t_{v\ddot{o}})}{\Phi - H \cdot (t_2 - t_{v\ddot{o}})}$$

Valem 1.2 [16, lk 39]

kus  $\Phi$  – soojusvõimsus üleskütmisel, kW;

$H$  – hoone soojuserikaod, kW/K;

$\tau_B$  – hoone soojuslik ajakonstant

$\tau_2$  – hoone üleskütmise aja pikkus tundides

$t_2$  – õhutemperatuur üleskütmise alguses

$t_3$  – õhutemperatuur üleskütmise lõpus

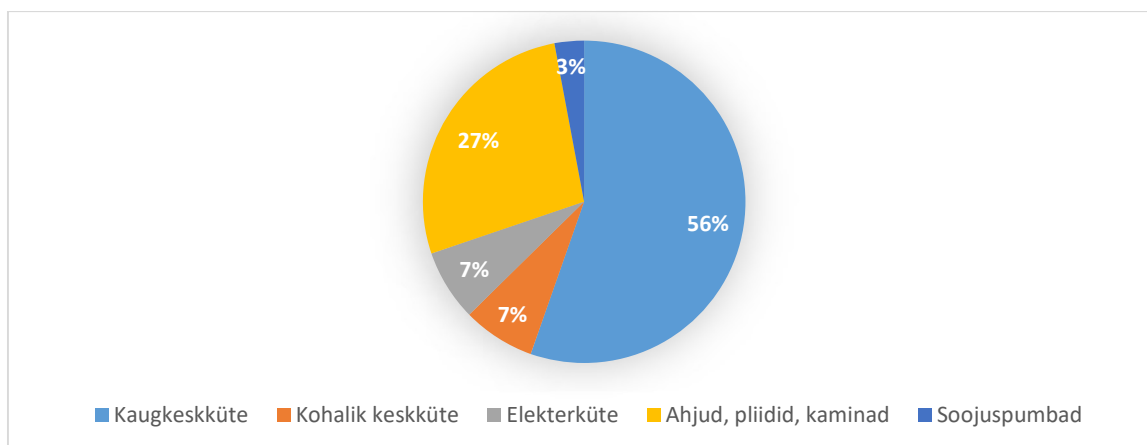
$t_{v\ddot{o}}$  – välisõhu temperatuur

### 1.3 Hoonete küte

Ületamiseks hoone soojuskadusid tuleb need kompenseerida küttesüsteemi poolt hoonesse antava soojusenergiaga. Küttesüsteeme liigitatakse muuhulgas energiakandja, kasutusviisi, ülekandmisviisi, ning küttekehade tüübi järgi [16, lk 90-95]. Statistikaamet on läbi viinud leibkondade energiatarbimise uuringu, millest selgub,



et peamised Eestis kasutatavad soojusallikad on kaugküte, kohalik keskküte, elekterküte, ahjud, pliivid, kaminad ja soojuspumbad (joonis 1.6) [21].



Joonis 1.6 Hoonete soojusega varustamine kütisviisi järgi, 2010 [21]

### 1.3.1 Põrandküte

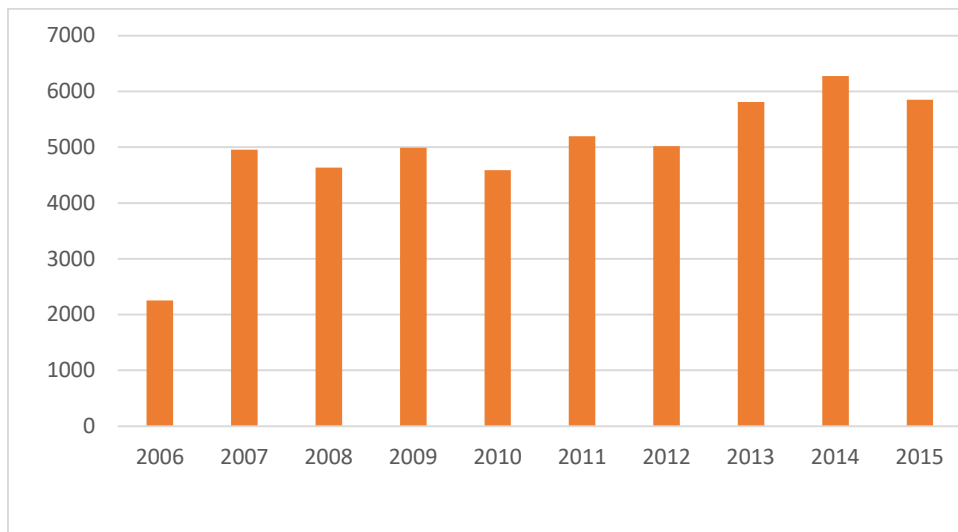
Hoonete kütmiseks on suhteliselt levinud viis põrandküte, osalt tema sobivusega soojuspumpadega integreerimiseks madalate soojuskandja temperatuuride tõttu ning ka nähtavate küttekehade puudumise tõttu [16, lk 212]. Põrandküte kütab ruume läbi soojendatud põranda, see teeb põrandkütte kasutamise elektrivõrgu tasakaalustamisel eriti ahvatlevaks, aktiveerides põranda termilise massi otseselt energia salvestamiseks, samas kui radiaatorküte kipub soojendama peamiselt siseõhku, mille tulemuseks on kiire siseõhu temperatuuri tõus [2]. Kütte, kuid eriti põrandkütte kasutamiseks hoonete energiapaindlikumaks muutmisel tuleb varustada küttesüsteemi automaatika juhtimis- ja kontrollstrategiatega, mis välistavad hoone sisekliima minemist väljaspoole lubatud piire [2].

Põrandkütte juhtimine toimub põrandküttekollektoris vahamootoriga ajamitega, mis paiknevad harilikult tagasivoolul. Vahamootoriga juhtimisel tuleb arvestada viivisega, signaali ja tegeliku ajami oleku muutuse vahel, mis võib osutada oluliseks süsteemides, kus on vajalik kiiret reageerimist. Selline viivis on suurusjärgus 5 minutit ja tuleneb vahamootorite ülesehituse ja tööpõhimõtte iseärasustest, mille alla kuulub vaha sulatamine. [22]

## 1.4 Soojuspumbad

Kaugküte on Eestis veel seni kõige tihemini kasutatud küttesüsteemi soojusallikas, kuid viimastel aastatel on hakanud populaarsust koguma ka soojuspumpade kasutamine. Peamisteks põhjusteks, miks soojuspumpade levik on tõusutrendis on tõenäoliselt

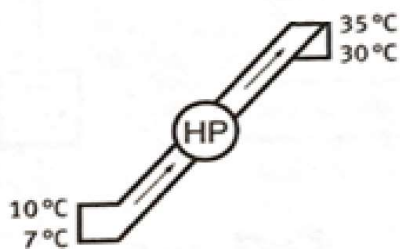
madala tasuvusaja, paigalduse lihtsuse, kasutuse mugavuse ning energiatõhususe tõttu. Soojuspumba liidu andmetel on Eestis ajavahemikus 1991-2015.a paigaldatud kuni 120000 soojuspumpa, neist ca 107000 on õhksoojuspumbad ning ca 13000 on maasoojuspumbad [23].



Joonis 1.7 Paigaldatud soojuspumbad aastatel 2006-2015 [23]

#### 1.4.1 Soojuspumba tööpõhimõte

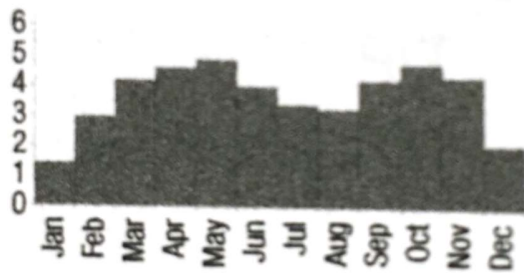
Soojuspump on jahutusmasin, seade, mida harilikult kasutatakse külmutamiseks, nt külmkappides. Soojuspump töötab eemaldades madalama soojusenergiaga keskkonnast soojust ning kandes selle kõrgema soojusenergiaga keskkonda. Joonis 1.8 näitlikustab maasoojus- ehk „vesi-vesi“ tüüpi soojuspumba töötamist. Soojuspump võtab maasoojuspumba torustikust soojust jahutades seda 10°C-lt kraadilt 7°C-ni. See ära võetud soojus kasutatakse põrandkütte süsteemi tagasivoolu vee soojendamiseks 35°C-ni. Pärast soojuse ruumi ära andmist jahtub küttesüsteemi vesi 5 kraadi võrra 30°C-ni. Sellega on soojuspump pumbanud soojust 10°C-lt kraadilt 35°C-ni. [24, lk 11-12]



Joonis 1.8 Soojuspumba lihtsustatud tööpõhimõte [24, lk 11]

Soojuspumba efektiivsuse hindamiseks kasutatakse soojustegurit COP. Lihtsustatuna määrab COP suurus selle, kui suure hulga elektrienergiat on võimalik soojuseks muundada ümbritseva keskkonna soojuse arvelt. Olukorras, kus  $COP=4$ , siis 1 kWh elektrienergiat on võimeline väljastama kütteenergiana 4 kWh soojusenergiat. COP sõltub suuresti ka sekundaarpoole temperatuurigraafikust, mistõttu kasutatakse soojuspumpa tihti koostöös põrandküttega, kus on madalad peale- ja tagasivoolu temperatuurid. [16, lk 305-306]

Soojusteguri suurust mõjutavad ka primaarpoole temperatuurid, eriti tähtis on see õhksoojuspumpade puhul, kus väga külma ilma puhul on soojustegurid arvestataval määral madalamad kui soojema ilma puhul. Lisaks külmadest ilmadest tuleneva küttevõimsuse kasvuga on ka see põhjuseks, miks on soojuspumba elektrienergiatarve eri aastaegadel erinev (Joonis 1.9). [24]



Joonis 1.9 Õhk-vesi soojuspumba jõudluse varieeruvus puhul eri kuudel [24, lk 69]

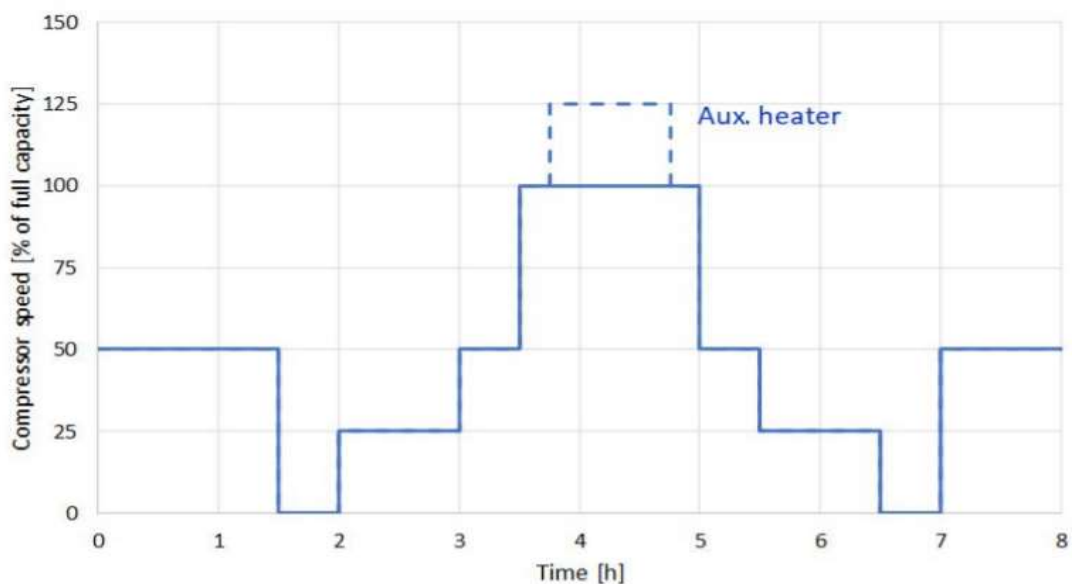
## 2. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

Võitlemiseks kliimamuutustega ja fossiikütuste tarbimise vähendamiseks on suureulatuslik hajutatud taastuenergia integreerimine elektritootmisesse võtmetähtsusega. Samas integreerida katkendlikku ja ettearvamatut taastuenergia tootmist olemasolevasse elektrivõrku on väga suur katsumus. Tootmise ja tarbimise vahelist energia ajalist kokkusobimatust on võimalik majandada kas tootmise poolelt või tarbija poolelt [25]. Hoone suurt soojusmahtuvust on võimalik kasutada konstruktsioonidesse soojuse salvestamiseks, et aktiveerida tarbija poole energiapaindlikkuse potentsiaali. Sellest tulenevalt saab tarku juhtimissüsteeme kasutades optimeerida hoone soojusliku massi kasutamist [26] [27], võttes arvesse hoone soojuslikke omadusi ja ajas sõltuvaid elektrienergia hindu. [1] [2]

Reynders'i, Nuytten'i ja Saelens'i poolt läbiviidud uurimuses [2] leiti, et hoone konstruktsioonide kasutamine soojuse salvestamiseks aitab vähendada soojuspumba elektritarvet tipukoormuse ajal märgatavalt. Kõrgeimad alandused leiti 75% radiaatorkütte puhul ning 94% põrandkütte puhul, arvestades sisekliima piirväärtuseid ääritingimustena. Sellest tulenevalt näitab põrandküte suuremat tipu lõikamise potentsiaali, sest see on võimeline otseselt soojuslikult aktiveerima hoone konstruktsioone ja lubab soojuspumbal jääda aktiivseks pikemaks ajaks enne, kui kõrgendatud ruumi temperatuuri seadepunkt on saavutatud. Lisaks sellele leiti, et massiivse konstruktsiooniga hooned on võimelised kasutama tarbija poole energiapaindlikkuse potentsiaali rohkem kui kergeke konstruktsioonidega hooned. Tipukoormuse vähendamiseks on vajalik elektrivõrku vähem koormatud hetkedel hoonet üle kütta, põhjustades sellega aastase koguenergia kulu tõusu. Eriti oluliseks kujunes see antud uuringus põrandkütte puhul, kus kogu aastane energiatarve küttele kasvas 23%. Ühelt poolt tuleneb see uurimuse autorite hinnangul põrandkütte iseärasustest, kus on vaja suuremat eelkütet, et taastuda elektrivõrgu tipukoormuse ajal tekkinud madalseisust. Teiselt poolt aga suure ajakonstandiga hoonetes võib põrandkütte ventiilide käitumine olla ebaefektiivne, nende aeglase reageerimise tõttu.

Kanadas, Quebeci ülikoolis tehtud uuringus [1] on leitud, et tänu põranda suurele soojuslikule massile on võimalik põrandküttega saavutada kuni 0.2 kWh/m<sup>2</sup> energiapaindlikkust ning 4 tundi tipukoormuse nihutamist. Uurimuses määratud energiapaindlikkus on eriti kasulik ennustava ja reageeriva loomuga küttesüsteemi automaatikale, mis võimaldab reageerida elektrivõrgu tipukoormuse märguannetele, et vähendada elektrivõrgu tarbimist just elektrivõrku kõige rohkem koormatud ajavahemikel.

Lindahl'i poolt tehtud soojuspumpadega tarbija poolt elektri tootmisele reageerimist kajastavas uuringus [3] kasutati kahte erinevat reeglitepõhist soojuspumba juhtimise liiki: otsene- ja kaudne. Otsese juhtimise puhul asendati kogu soojuspumba automaatika käsitsi inverteri sageduse juhtimisega, kaudse juhtimisega aga tekitati soojuspumba välisõhu temperatuuriandurile kunstlikult olukord, mis imiteerib suurt küttevajadust. Kaudse juhtimisega leiti, et tegelik elektritarve püsib ainult 64% testtsükli ajast  $\pm 10\%$  etteantud vahemikus. Otsese juhtimise puhul oli võimalik soojuspumba elektritarvet suurendada kiiremini ja täpsemini, resultaatiks oli elektritarve 97% testtsükli ajast  $\pm 10\%$  etteantud vahemikus. Uurimuses fikseeriti ka asjaolu, et soojuspumba väline juhtimine mõjutab negatiivselt COP väärtust, töö autori hinnangul võib see tulla sellest, et soojuspump on sunnitud töötama vähem optimaalsetel tingimustel. COP väärtuse languseks näitasid tulemused 11% ja 13% otsese- ja kaudse juhtimisega vastavalt.



Joonis 2.1 Soojuspumba juhtimise graafik Markus Lindahl'i poolt tehtud uurimuses [3]

Soojuspumpade juhtimisloogikad avaldavad olulist mõju tipukoormuse märguannetele reageerimisel positiivse tulemuse saavutamiseks. Pëan kasutas oma 2019. aasta doktori töös [28] kahte erinevat juhtimisliiki, milleks olid reeglite- ja mudelipõhine ennustav juhtimine. Antud uurimuses leiti, et mudelipõhine ennustav juhtimissüsteem annab COP väärtusele väikese tõusu, kuna suudab tuleviku tingimusi paremini ennustada ja sellega luua soojuspumba jaoks optimaalsemad tööpunktid. Reeglitepõhise juhtimisega olulist muutust COP väärtusele ei täheldatud. Energiapaindlikkuse hindamisel võrreldi kahte juhtimisloogikat ja leiti, et kütte puhul oli mudelipõhine ennustav juhtimine võimeline küttekoormust nihutama madala elektrihinnaga perioodi vähem kui reeglitepõhine,

samas küttes madala elektri hinnaga perioodil üle. Uurimuse tulemustes märgiti ka, et hinnapõhise elektrivõrgu signaalide järgi mudelipõhise juhtimisega süsteemis saavutati rahaline sääst ainult 4,5%, kusjuures reeglitepõhise juhtimisega hinnasäästu saavutada ei olnud võimalik.

Varasemate uurimistöödega on soojuspumba ja tarkvõrgu koostööd küll uuritud, kuid autorile teadaolevalt ei ole võetud arvesse põrandkütte vahamootoritega ajamite ajalise viivise faktorit koostöös soojuspumba ajamite avanemise viivisega. Samas võib vahamootorite avanemise viivis olla oluline tegur lühiajaliste [29] etteteatamiseaegadega võrgust [22]. Lisaks sellele ei ole tõenäoliselt olemasolevates uuringutes arvesse võetud Eesti kliima iseärasusi ning Eesti turul olevate soojuspumpade valikut ja välja kujunenud ehituspraktikat.

Samas tarbija poole energiapaindlikkus on varasemate uurimistöödega leidnud küll laia kasutust, kuid autori teada ei ole hoonete energiapaindlikkust uuritud Eesti kliimas, soojuspumbaga põrandküttesüsteemiga hoones, tuginedes reaalsele mõõtetulemustele. Selleks kalibreeritakse käesolevas uurimistöös IDA ICE tarkvaras TalTech testhoone üks ruum reaalsest mõõtmistest saadud mõõtetulemuste põhjal. Saadud mõõtetulemused laiendatakse tervele aastale kasutades erinevaid juhtimisalgoritme ning võttes aluseks Eesti baasaasta väliskliima andmed.

## 3. METOODIKA

### 3.1 Katseteks kasutatav hoone

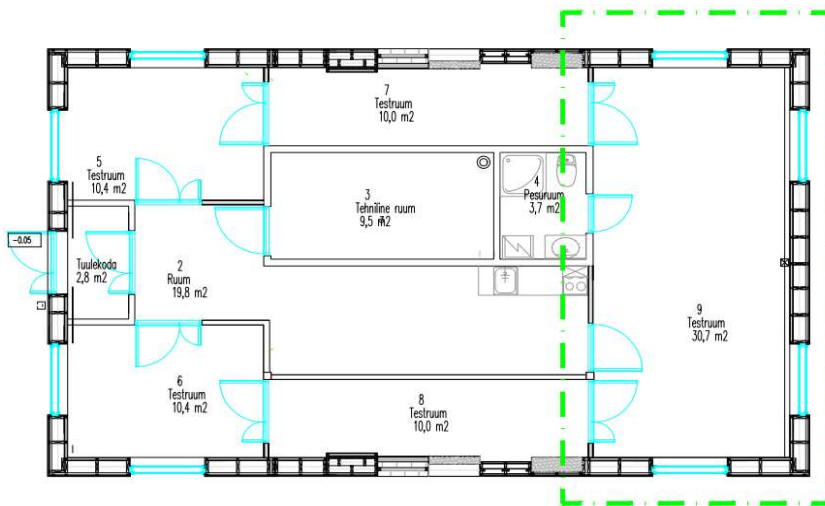
Uurimuse läbiviimiseks teostati katsed TalTech liginullenergia testhoones (joonis 3.1), mille netopindala on 107,3 m<sup>2</sup>. Testhoone on suunatud eelkõige ehituse- ja energiatõhususe tudengitele ja teadlastele erinevate energiakasutuse tõhusust tõstvate tehnoloogiatega eksperimenteerimiseks. Testmajas on kasutamiseks mitmesuguseid soojusallikaid: maasoojuspump, õhk- vesi soojuspump, õhk- õhk soojuspump ning lisaks sellele ka lokaalsel taastuenergiial põhinevad lahendused. [30]



Joonis 3.1 Taltech liginullenergia testhoone välisvaade [31]

#### 3.1.1 Testhoone ruum 9

Mõõtmised teostati ruumis 9, netopindalaga 30,7 m<sup>2</sup>. Ruumi 9 konstruktsioonideks on projekteeritud puitkonstruktsioonidega välisseinad ja katus. Põranda kandevkonstruktsioon on ehitatud betoonist. Vastavalt hoone arhitektuursele projektile on ruumis neli akent suurusega 1500x2000 mm, millest 2 on ida ja teised 2 on lõuna ning põhja suunalised. Joonisel 3.2 on näidatud hoone arhitektuurne korruse plaan, kus ruumil 9 on roheline kast ümber.



Joonis 3.2 Taltech liginullenergia testmaja korruse arhitektuurne plaan

### 3.1.2 Tehnosüsteemid

TalTech liginullenergia testhoone on varustatud nii pörandküttesüsteemiga kui ka radiaatorküttesüsteemiga st kõiki ruume saab kütta mõlema süsteemiga. Antud katse puhul on oluline kasutada maksimaalselt ära hoone soojusmahtuvust, sellel põhjusel kasutatakse katseteks pörandküttesüsteemi. Soojuspumpade võimsusväljastuse ühtlustamiseks on hoones kasutusel ka akumulatsioonipaagid. Uurimustöö soojusallikaks kasutati õhk- vesi soojuspumpa Nibe Split ACVM 10-270, AMS 10 [32].

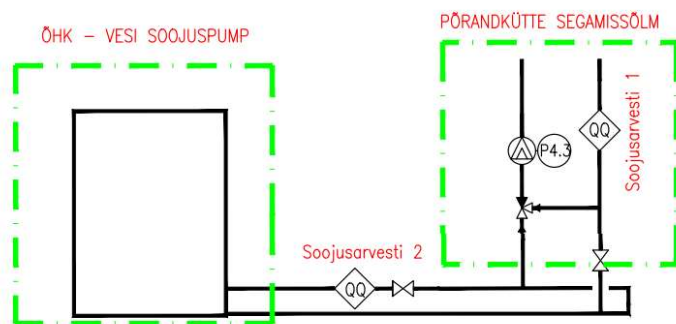
### 3.2 Süsteemi seadistamine

Mõõtmiste teisejärguliseks eesmärgiks oli ka hilisema hoone mudeli kalibreerimise lihtsustamine, selleks tuli mõõtmiste ajal välistada võimalikult palju määramatusi ja segavaid faktoreid. Üheks määramatuseks oli ventilatsioonisüsteem, mis lülitati mõõtmiste ajaks täielikult välja. Ventilatsioonisüsteemi poolt põhjustatavad protsessid soojuslikule sisekliimale on võimalik hilisemate simulatsioonide juures arvesse võtta. Ruumis 9 oli varasemate katsete käigus rajatud hulga värskeõhuklappe, mille tõttu suurenes hoone infiltratsioonist põhjustatud õhuvahetus.

Tegemaks kindlaks, et kogu soojuspumba poolt genereeritav kütteenergia läheks ainult pörandaküttesüsteemi peatati kõikide teiste segamissõlmede tsirkulatsioonipumbad, suleti tarbevee küte ning muud toru hargnemised soojuspumba ja pörandkütte kollektori vahel (täpsemalt vt Lisa 1). Samal põhjusel on ka eraldatud mõõtmiste ajaks akumulatsioonipaak möödaviikude avamisega ning akumulatsioonipaaki minevate torude kuulkraanide sulgemisega (joonis 3.4). Segamissõlme tsirkulatsioonipump

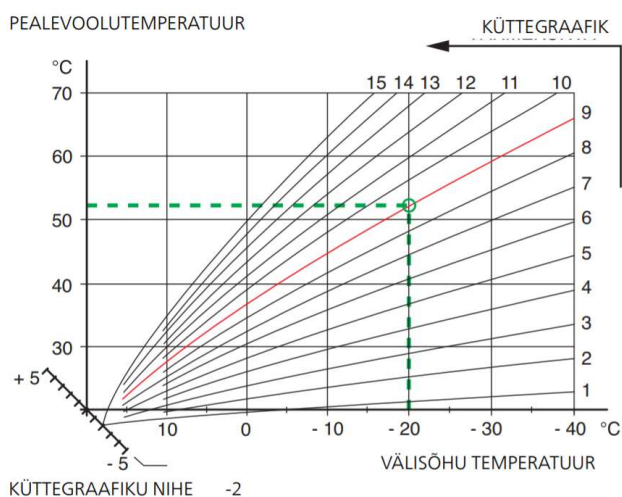


ALPHA2 25-60 180 seati katsetuste käigus töötama konstantsele režiimile 2. Selleks, et välistada tarbetu reguleerimine, seati põrandkütte segamissõlme 3-TEE ventiil segamist välistavasse äärmusesse ja lülitati välja automaatne juhtimine.



Joonis 3.4 Lihtsustatud soojussõlme skeem

Soojuspumba seadistamisel valiti küttegaafik 8 nihkega 0 (Joonis 3.5). Soojuspumba sisemenüüst lülitati sooja tarbevee valmistamine katsete ajaks välja.



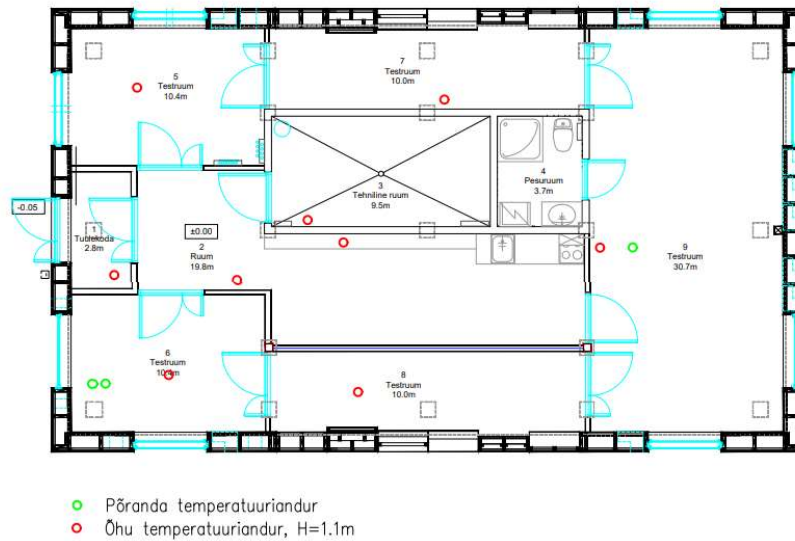
Joonis 3.5 Õhk- vesi soojuspumba küttegaafikud, joonise näites seadistatud küttegaafik 9. astme peale (katsetes 8. astme peale), nihkega 0. [32]

## 3.3 Mõõtmised

### 3.3.1 Sisekliima mõõtmised

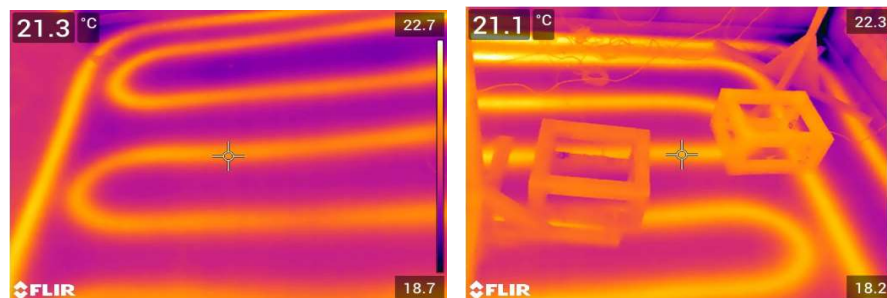
Ruumides temperatuuride mõõtmiseks paigaldati hoonesse temperatuuriandurid (Joonis 3.6). Testruumis 9 paigaldati õhutemperatuuri andur ruumi siseseina äärde, kõrgusele *circa* 1,1 m. Kõrvalasuvate ruumide temperatuure mõõdeti sel põhjusel, et kalibreerimisel tekkivat ruumide vahelist soojusülekannet vajadusel arvesse võtta, sellega veelgi vähendades määramatusi. Lisaks õhutemperatuurile mõõdeti ruumides 6

ja 9 ka põrandapinna temperatuure. Kõik mõõtmistes kasutatavad mõõteseadmed on toodud välja tabelis 3.2.



Joonis 3.6 TalTech liginullenergia hoones andurite paiknemine

Põrandapinna temperatuur sõltus termokaamera piltide järgi ligi 3 °C ulatuses anduri paiknemisest põrandkütte kontuuride suhtes, torule lähemal oli temperatuur suurem (joonis 3.7). Põrandapinna temperatuuri mõõtvad temperatuuri andurid paigaldati eelnimetatud põhjusel kahte eri kohta põrandkütte torude suhtes: otse toru peale (ruumis 6) ning 150 mm torust eemale kahe toru vahele (ruumis 9 ja 6).



Joonis 3.7 Termokaamera pildid põrandkütte soojusväljastuse jaotusest põrandapinna lõikes

Sisekliima mõõtmised koosnesid kahest erinevast osast- jahtumise katse ja üleskütmise katse. Katsete iseloom valiti sellisel põhjusel, et hiljem kalibreerida täpselt just hoone soojuskadude ja soojusmahtuvuse mõju jahtumisele ja üleskütmisele. Jahtumise katseks lülitati välja soojuspump, ventilatsioon ning põrandküttekontuurides toimuva tsirkulatsiooni välistamiseks keerati ka kütte seadepunktid 12 °C' ni. Üleskütmise katsed toimusid kõik ajaliselt kohe pärast jahtumise katset. Selleks lülitati soojuspump sisse, seadistati ta tavaolukorrale ja tõsteti põrandküttekontuuride seadepunktid 35 °C' ni. Nii

jahtumise kui ka üleskütmise katse ajaks suleti kõik ukсед v.a tamburi ja tehnoruumi uks. Katsete käigus mõõdeti joonisel 3.6 näidatud anduritest siseõhu temperatuure sagedusega 30 sekundit. Üleskütmise katse puhul mõõdeti ka soojusarvestis 1 (joonis 3.4) peale- ja tagasivoolu temperatuuri ning vooluhulka. Kuna kalibreerimisel hinnati protsessi kiirust, siis nii jahtumise kui ka üleskütmise katse lõpphetke täpselt ajaliselt määratleda polnud vajalik, aga mõõtmiste üldine ajagraafik on toodud tabelis 3.1.

### **3.3.2 Soojuspumba katsed**

Hindamaks soojuspumba tippkoormuse saavutamise kiirust, maksimaalvõimsusel töötamise eripärasid, COP suuruse kujunemist ja põrandkütte vahamootoritega ajamite koos töötamist soojuspumba võimsuse tõstmisega, tehti soojuspumba katsed (edaspidi: soojuspumba katsed). Soojuspumba katsed olid lühiajalised, maksimaalvõimsusega töötamine kestis igas katses 0,5 tundi. Soojuspumba võimsuse tõstmine toimus käsitsi soojuspumba menüüst. Selleks tuli esmalt võtta maha automaatjuhtimine ja seejärel tõsta soojuspumba inverteri sageduse seadepunkt maksimaalsele 85 Hz'le. Katsete käigus mõõdeti soojuspumba elektritarbimist (välis- ja siseosa on ühe elektriarvesti all), soojusarvestit 2 (joonis 3.4) ning väliskliimat. Siseõhu temperatuure käesoleva katse jooksul ei mõõdetud. Kõik katsetes kasutatud mõõteseadmed on toodud välja tabelis 3.2.

Peegeldamaks reaalistest kasutusolukordadest võimsuse tõstmiseks ebasobilikemat, tehti katsed sellisel moel kus enne soojuspumba võimsuse tõstmist on põrandkütte ventiilid kinni. Soojuspumba mõõtmised jagunesid juhtimisloogikate järgi kolmeks (tabel 3.1).



1. ventiilidele anti avanemissignaali samaaegselt soojuspumba inverteri sageduse seadepunkti tõstmisega;
2. ventiilidele anti avanemissignaali 15 minutit enne soojuspumba inverteri sageduse seadepunkti tõstmist;
3. ventiilidele anti avanemissignaali 5 minutit enne soojuspumba inverteri sageduse seadepunkti tõstmist.

Iga juhtimisalgoritmi korral tehti kolm erinevat katset välistamiseks juhuslike vigade arvestamist tulemustena. Eelmainitud kolm katset on pandud vastavusse välisõhu temperatuuridega ( $t_{v\delta}$ ), mis mõõdeti katse alguses.

Tabel 3.1 Mõõtmiste ajakava TalTech liginullenergia testhoones ja soojuspumba katsete juhtimisalgoritmid

Kuupäev	23.11.2020	24.11.2020	25.11.2020	26.11.2020	27.11.2020	28.11.2020	29.11.2020	30.11.2020	05.02.2021	06.02.2021	07.02.2021	08.02.2021	09.02.2021	10.02.2021	11.02.2021	12.02.2021	13.02.2021	14.02.2021	15.02.2021	16.02.2021	19.03.2021	20.03.2021	21.03.2021	22.03.2021	23.03.2021	24.03.2021	25.03.2021	26.03.2021	27.03.2021	01.04.2021	17.04.2021	18.04.2021		
Mõõtmiste seadistamine	■																																	
1. Juhtimisloogikaga katsed					■																											■		
2. Juhtimisloogikaga katsed								■																										
3. Juhtimisloogikaga katsed										■																								■
Jahtumise katse									■	■	■	■	■	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
Üleskütmise katse											■	■	■					■	■	■				■	■	■			■	■	■			
Tulemuste vahekokkuvõtte, edasiste mõõtmiste planeerimine					■	■	■	■						■	■	■	■								■									
Juhtimisloogika nr	<b>1</b>							<b>2</b>							<b>3</b>																			
Juhtimisloogika skeem																																		
<ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: blue;">■</span> SP inverteri sagedus</li> <li><span style="color: red;">■</span> ventiilide seadepunkt</li> <li>TO- tavaolukorras töötamine</li> </ul>																																		

Tabel 3.2 Mõõteseadmete tehnilised andmed [33] [34] [35] [36] [37] [38] [39]

Mõõteseadme tüüp	ECS 3-80 M	FLIR E95 42°	Onset TMC20-HD	Sensus POLLUSTAT E	LSI Lastem DPA053	LSI Lastem DMA672.1	Onset HOBO UX120-006M
Mõõteseadme nimi	Elektriarvesti	Termokaamera	Temperatuuriandur	Soojusarvesti	Püranomeeter	Suhtelise niiskuse ja temperatuuri andur	Andmete logger
Kasutus mõõtmistel	Soojuspumba elektrivõimsuse mõõtmiseks	Põrandapinna temperatuuride mõõtmiseks	Õhu ja põrandapinna temperatuuride mõõtmiseks	Sekundaarpoole vooluhulkade, temperatuuride ja soojusvõimsuse mõõtmiseks	Päikese koguja ja hajuskiirguse mõõtmiseks	Välisõhu temperatuuri ja suhtelise niiskuse mõõtmiseks	Andmete lugemiseks ja salvestamiseks
Pilt							
Mõõtepiirkond	319...418 V & 0.015...80 A	0...360°	-40...100 °C	2...180 °C	0...2000 W/m <sup>2</sup>	-30...70 °C & 0...100% RH	-
Mõõtetäpsus	< ±0,5%	±2°	±0,15 °C	< ±0,5%	< ±10 W/m <sup>2</sup>	±0,2 °C & ±1,5% RH	-

## 3.4 Simulatsioonid

### 3.4.1 IDA ICE simulatsiooni tarkvara

Hindamaks katsetulemusi mitte ainult katsete läbiviimise perioodil, vaid kogu aasta lõikes ning erinevate seinte konstruktsiooni soojusmahtuvustega viidi läbi aastased simulatsioonid IDA ICE simulatsiooni tarkvaras. IDA ICE on programm, mis võimaldab hinnata kogu hoone soojuslikku sisekliimat ning energiakasutust läbi detailse dünaamilise simuleerimise. IDA ICE'i füüsikalised mudelid, mis programmis läbi arvutatakse ühtivad harilikult mõõtetulemustega hästi. [40]

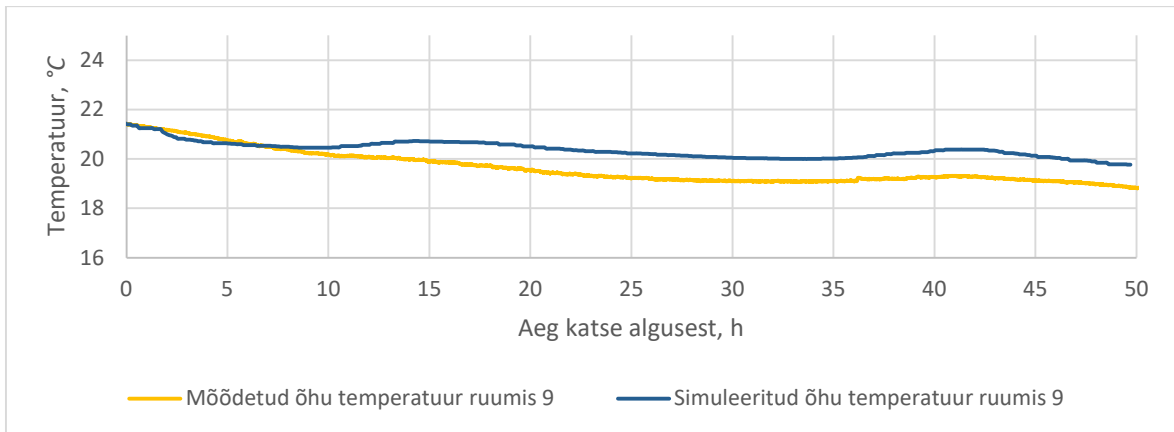
Vähendamaks ebaolulist tööd kasutati varem koostatud ja osaliselt kalibreeritud mudelit [41], [42] TalTech liginullenergia hoonest (edaspidi: olemasolev mudel). Käesoleva magistritöö autori poolt tehti kindlaks, et hoone konstruktsioonid mudelis vastavad arhitektuurses ehitusprojektis ettenähtule (joonis 3.10). Aastaste simulatsioonide läbiviimiseks kasutati Estonian TRY baasaastat [43], kus on välja toodud arvutuslikud väliskliima parameetrid ühe aasta kohta.



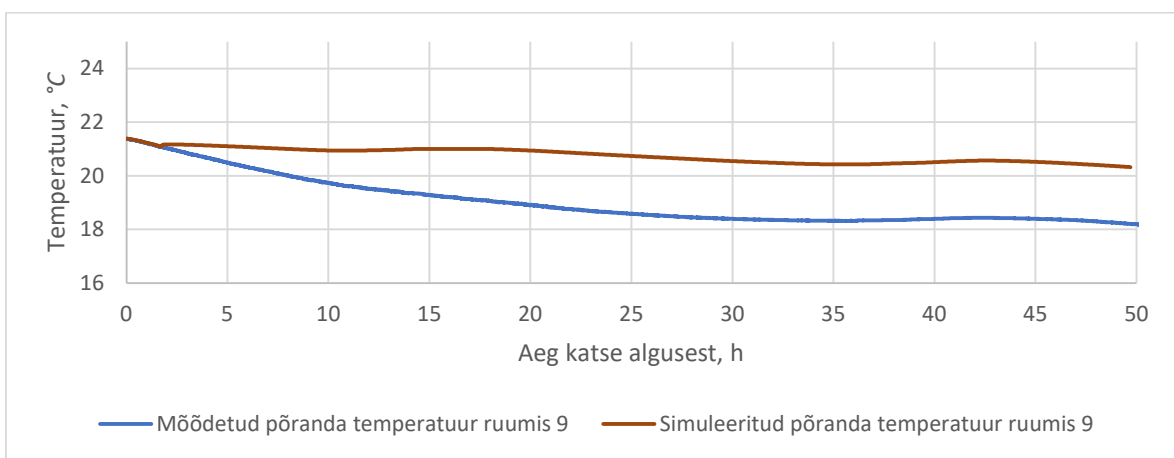
Joonis 3.10 Hoone mudeli 3D vaade IDA ICE programmis

### 3.4.2 Kalibreerimine

Olemasoleva kalibreerimata mudeliga simuleeriti nii jahtumise- kui ka üleskütmise katsed mõõdetud välisõhu temperatuuriga ning päikese otse- ja hajus kiirgusega (joonised 3.11 ja 3.12) ruumis 9. Kuna mõõtetulemuste ja simuleeritu vahe ehk viga oli suur, siis tuli varem koostatud mudel kalibreerida. Jahtumise katse keskmine absoluutne viga simuleeritu ja mõõdetu vahel fikseeriti põranda- ja õhutemperatuuri puhul 1,8 °C ja 0,8 °C vastavalt. Üleskütmise katse puhul olid vea suurused samas suurusjärgus



Joonis 3.11 Jahtumise katse õhutamperatuuride võrdlus simuleeritu ja mõõdetu vahel



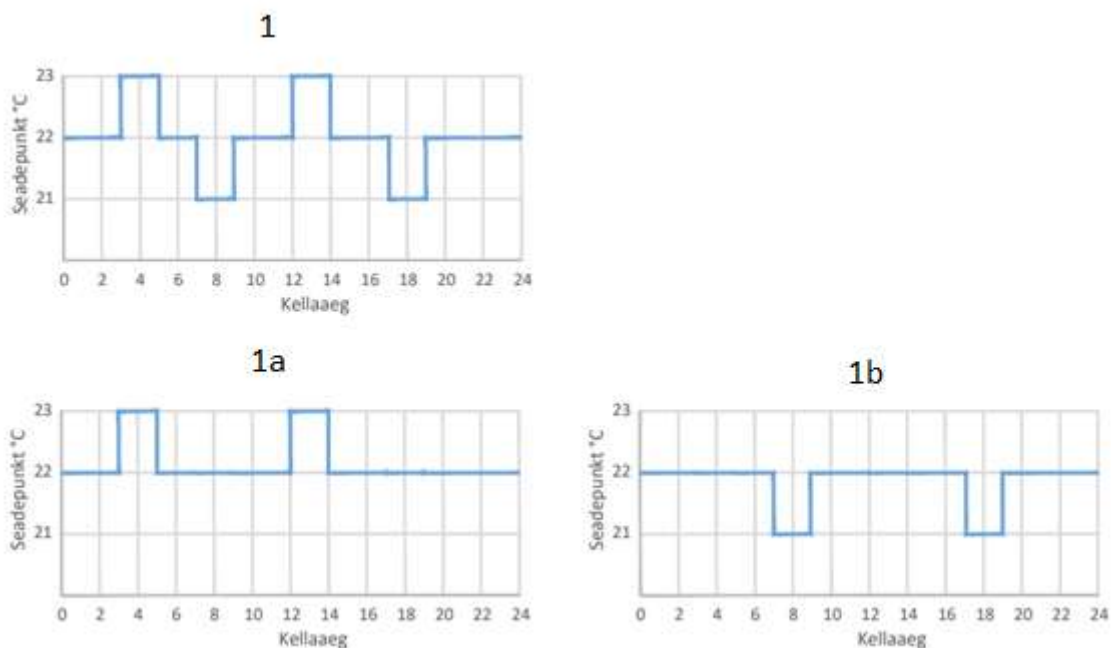
Joonis 3.12 Jahtumise katse põrandatemperatuuride võrdlus simuleeritu ja mõõdetu vahel

Lisaks õhu- ja põrandapinna temperatuuridele tuli kalibreerida ka küttesüsteemi hüdraulilist poolt, ehk vooluhulka ja tagasivoolu temperatuuri. Selleks tuli modelleerimis programmis ehitada üles konkreetne algoritm, mis arvestab põrandkütte eripärasid. Täpsemalt IDA ICE kalibreerimisest räägitakse 4. peatüki all.

### 3.4.3 Simulatsioonide ettevalmistamine

Pärast mudeli kalibreerimist aksepteeritava veani, alustati aastaste simulatsioonidega elektrivõrgu tasakaalustamise potentsiaali hindamiseks. Selleks kasutati termostaatide juhtimise loogikat nr 1 (joonis 3.13), mis on 2 tunniste intervallidega (edaspidi: juhtimisalgoritmi periood), kus seadepunktide tõstmine (edaspidi: ülekütmine) toimub vahemikes kella 3-st kuni kella 5-ni ning kella 12-st kuni kella 14-ni. Sellised ajavahemikud on valitud sellel põhjusel, et harilikult on nendel kellaaegadel madal elektritarbimine võrgus. Sama juhtimisloogika puhul on ka kasutatud seadepunktide alandamist (edaspidi: alakütmine), et hinnata seadepunktide tõstmisega saavutatud

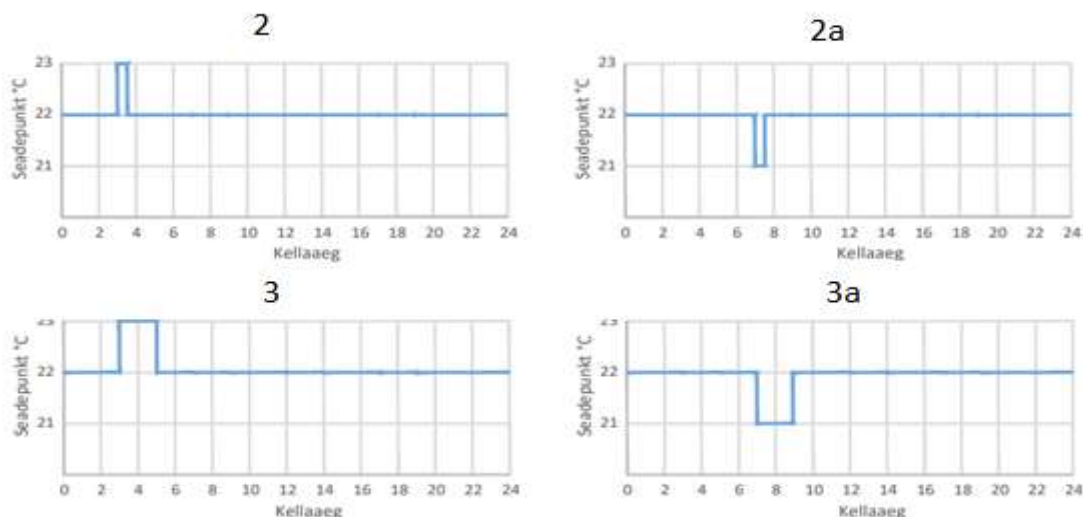
kasulikku energiat koguenergiast. Ülekütmise eesmärgiks on koormata elektrivõrku madala tarbimisega hetkedel ning alakütmise eesmärk on vastupidiselt vähendada koormust ajal, kus elektrivõrk on suuresti muude tarbijate poolt koormatud. Seadepunktide alandamine toimub ajavahemikes kella 7-st kuni kella 9-ni ning kella 17-st kuni kella 19-ni, sest nendel hetkedel on tavapäraselt elektritarbimine kõige kõrgem. Juhtimisloogika nr 1 jaotati lisaks eraldi kaheks erinevaks loogikaks (1a ja 1b), kus toimuvad ainult üle- ja alakütmine, mitte mõlemad korraga. 1a ja 1b loogikatega on võimalik näha nii üle- kui ka alakütmisega eraldiseisvat mõju aasta energiakasutusele.



Joonis 3.13 Termostaatide seadepunktide juhtimisalgoritmid IDA ICE tarkvaras.

2.- ja 3. liiki juhtimisloogikat (joonis 3.14) kasutatakse selleks, et hinnata kui kiiresti tõuseb siseõhu temperatuur ning kui palju energiat on võimalik ühe vastavalt 30- ja 120 minutilise intervalliga hoone konstruktsioonidesse mahutada. 2a. ja 3a. juhtimisloogikaga tehti kindlaks kui pikalt saab erinevate välisõhutemperatuuride ja hoone soojusmahtuvuste puhul jätta hoonet kütmata, ilma, et sisekliima läheks lubatud piiridest välja.





Joonis 3.14 Termostaatide seadepunktide juhtimisalgoritmid IDA ICE tarkvaras.

Juhtimisalgoritmide perioodid, mida simulatsioonides kasutati (joonised 3.13 ja 3.14) jagunesid laias laastus kaheks- 0,5- ja 2 tunnisteks. Perioodide pikkus määrab selle, kui pikalt hoitakse erinevat seadepunkti nominaalset ehk 22 °C' st. Selline jaotus tehti selle jaoks, et näha erinevate perioodide pikkuste mõju sisekliimale ja energiatarbele. Selleks, et oleks võrdluspunkt, tehti simulatsioon läbi ka konstantse 22 °C seadepunkti hoidmisega (edaspidi: võrdlusaasta). Hindamiseks ühe tsükli mõju päevasele energiatarbele ning siseõhu temperatuuride kujunemisele valiti 4 erineva päeva (tabel 3.3) väliskliimad, mille järgi oli võimalik näha ilmastikuolude mõju hoone energiapaindlikkusele.

Tabel 3.3 Erinevate võrdluspäevade välisõhu temperatuurid seadepunktide muutmise alguses juhtimisloogikatega nr 3 ja nr 3a

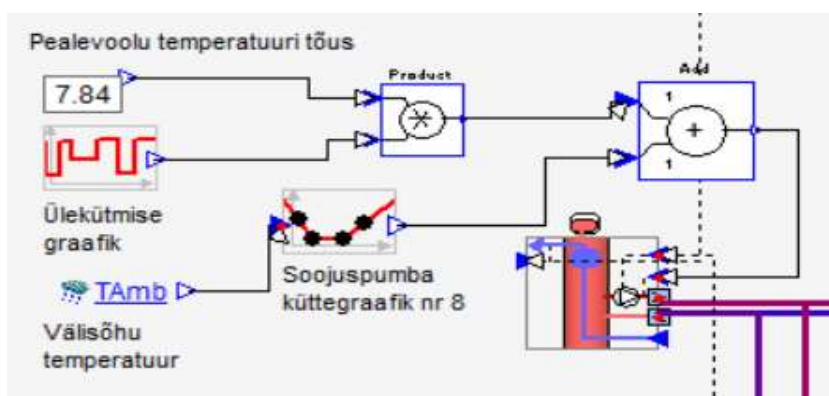
Välisõhu temperatuuri tähis	2 tunnise juhtimisalgoritmi perioodi keskmine temperatuur °C		2 tunnise juhtimisalgoritmi perioodi keskmine kogu päikesekiirgus W/m <sup>2</sup>	
	Alakütmine	Ülekütmine	Alakütmine	Ülekütmine
T1	-10.2	-14.1	2.6	0
T2	-7.2	-9.3	10.7	0
T3	4.9	4.7	62.8	0
T4	7.9	9.2	114.6	0

Hindamaks seinte soojusmahtuvuse mõju hoone energiapaindlikkusele simuleeriti kõik erinevad juhtimisloogikad kolme erineva seinte soojusmahtuvusega (tabel 3.4). Seinte U- arvud jäeti samaks sellel põhjusel, et hinnata ainult soojusmahtuvuse mõju suurust. Seinad tüübid liigitati soojusmahtuvuse kasvu järjekorras kolmeks, S-1, S-2 ning S-3. Sein S-1 vastab hoone arhitektuurses projektis kirjeldatule, seinad S-2 ja S-3 on valitud suurema soojusmahtuvusega, kusjuures kandevkonstruktsioon paikneb hoone siseperimeetris ning soojustus välisperimeetris.

Tabel 3.4 Simuleerimisel kasutatud erinevad seinte kandevkonstruktsioonid

Seina tüüp	Seina kandevkonstruktsioon	Erisoojus, J/(kg*K)	Tihedus, kg/m <sup>3</sup>
S-1	Puitkarkass, d=0,245 m, s=0,6 m	1720	56
S-2	Columbia kivi, d=0,19 m	1000	1100
S-3	Betoon, d=0,50 m	880	2300

Selleks, et üleskütmise protsess oleks võimalikult kiire ja vastaks soojuspumba mõõtmistele, lisati pealevoolu temperatuurile nr 1; 1a; 2 ja 3 juhtimisloogika puhul lisaks soojuspumba enda küttegraafikule juurde 7,84 °C (joonis 3.15). Selline väärtus leiti arvutades soojuspumba kõikide katsete mõõdetud maksimaalse pealevoolu temperatuuri (maksimaalse inverteri sageduse seadepunkti kestel) ja küttegraafiku pealevoolu temperatuuride vahede aritmeetiline keskmine. Küttegraafiku pealevoolu temperatuur sõltub teatavasti välisõhu temperatuurist ja valitud küttegraafikust (joonis 3.5).



Joonis 3.15 Pealevoolu temperatuuri tõstmise algoritm

Simuleerimiseks kasutatud vabasoojuste suuruste ning kasutusprofiilide puhul võeti eeskujult „Hoone energiatõhususe arvutamise meetodikast“ [44]. Ventilatsiooni välisõhu vooluhulka arvestati kogu aasta ja hoone ulatuses konstantselt 0,42 l/(s m<sup>2</sup>), mis vastab

„Hoone energiatõhususe miinimumnõuetele“ [45]. Kuna harilikult projekteeritakse sissepuhke ja väljatõmbe õhuvooluhulgad hoone ulatuses samad, siis väljatõmbe õhuvooluhulga suurus võeti mudelis võrdseks sissepuhkega.

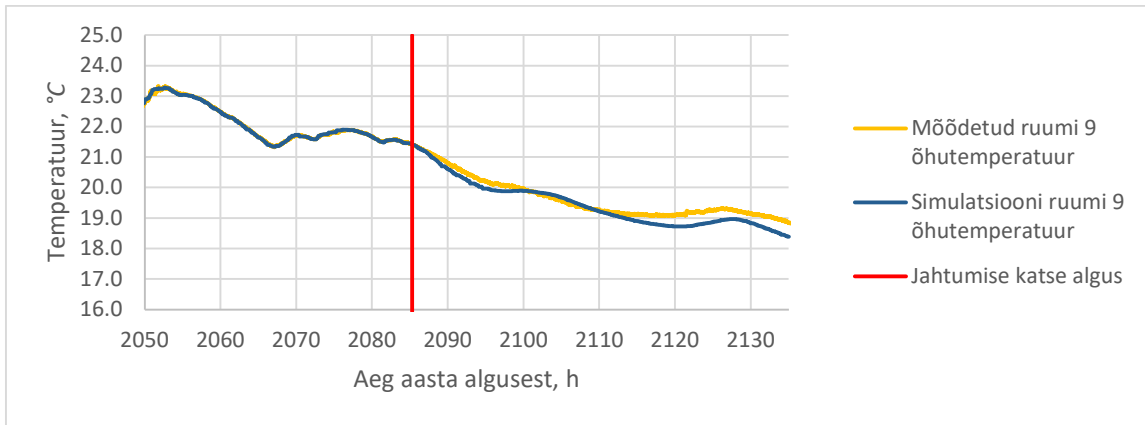
## 4. MUDELI KALIBREERIMINE

IDA ICE modelleerimistarkvaras tuli tulemuste õigsuse jaoks olemasolev mudel kalibreerida. Kalibreerimiseks tuli esmalt mõõteandmed programmi sisestada. Kalibreerimiseks kasutatud mõõteandmeteks olid väliskliima, ruumide siseõhu temperatuurid, ruumi 9 põrandapinna temperatuur ning põrandküttesüsteemi peale- ja tagasivoolu temperatuurid ning vooluhulk. Vastamaks käesoleva uurimistöö võtmeküsimustele oli oluline kalibreerida just lühikest, kuni 3 päevast perioodi, et määrata hoone energiapaindlikkus üleskütmise ja jahtumise teel. Kalibreerimine jaguneski kaheks osaks, milleks olid jahtumise- ning üleskütmise katse kalibreerimine ruumis 9.

Kalibreerimist alustati jahtumiskatsest, selle puhul oli esmatähtis saada paika eeltingimused simulatsioonis, et jahtumiskatse alguses oleks ruumis 9 mõõdetud ning simuleeritud õhu- ja põrandapinna temperatuurid identsed. Seda tehti ideaalsete kütte ja -jahutusseadmetega õhutemperatuuri jaoks ning põrandkütte- ja jahutusega põrandapinna temperatuuri jaoks, kasutades seadepunktidenäidatuid mõõdetud väärtusi. Selleks, et vähendada võimalikku viga soojusülekanne kõrvalruumidesse hoiti kõrvalruumides nii enne jahtumiskatset, kui ka jahtumiskatse ajal ideaalsete kütte ja -jahutusseadmetega mõõdetud temperatuuri. Simulatsioonides nagu ka mõõtmistes lülitati katse ajal ruumi 9 kõik kütte- ja jahutusseadmed välja. Pärast eeltingimuste ja muu seadistuse paika saamist viidi läbi esmased simulatsioonid (joonis 3.11 ja 3.12), millest tuli välja, et jahtumise protsessi tuleb kalibreerida.

Esmastest simulatsioonidest selgus, et nii õhutemperatuuri kui ka põrandapinna temperatuuri jahtumine toimus simulatsioonis tegelikult oluliselt aeglasemalt. Sellest võis järeldada, et soojusülekanne infiltratsioonile ja põrandast välisõhule on suuremad, kui olemasolevas mudelis. Soojusülekanne põrandast välisõhule on suuremad kui arvatud tõenäoliselt sellel põhjusel, et kuna põrand on välisõhu kohal ja alt tuulutatav, siis võib tuule kiirus mängida soojusülekanne puhul arvestatavat rolli. Paraku tuule kiiruse andmeid käesoleva uurimustöö raames ei mõõdetud. Et suurenenud soojusülekanne arvesse võtta ja mudel kalibreerida, siis muudeti põranda soojustuse kihi soojustakistust võrreldes olemasoleva mudeliga väiksemaks.

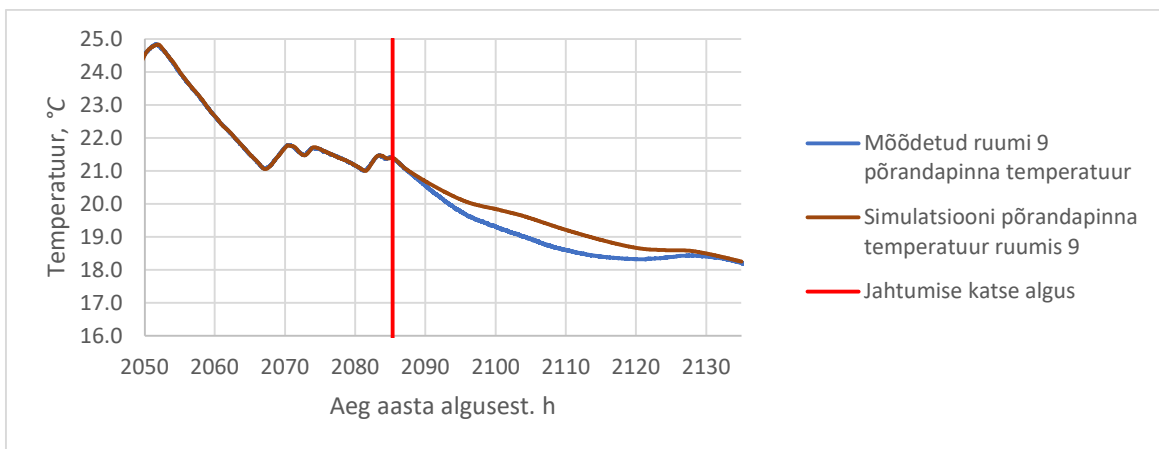
Mõlema muutuja väärtus leiti, kasutades IDA ICE programmi sisseehitatud rakendust „*Parametric Runs*“. Antud rakendus võimaldab automatiseeritult läbi proovida erinevaid muutuja väärtuste kombinatsioone arvutades igaühe jaoks veahinnangu, milleks siin kasutati keskmist absoluutset viga simulatsiooni- ja mõõtetulemuste vahel. Leitud madalaima veahinnanguga kombinatsioon loeti sobivaks.



Joonis 4.1 Kalibreeritud mudeli simulatsioonide ja jahtumise katsetulemuste võrdlus ruumis 9

Paraku on õhu- ja pörandapinna temperatuur omavahel tihedalt seotud ja neid ei ole võimalik eraldiseisvalt kalibreerida. Samas ei olnud ainult kahte parameetrit muutes võimalik mõlemat korruga korrektselt seadistada. Sellest tulenevalt toodi sisse kolmas muutuja, milleks oli kogu mööbli pindala ruumis. Ruumis paiknes katsete ajal 3 lauda ning ligi 10 tooli. Tõenäoliselt lisasid need ruumile piisavalt soojusmahtuvust, sest pärast mööbli hulga tõstmist võrreldes algse mudeliga ning muutes teist kahte parameetrit *Parametric Runs*’iga saadi nii pörand- kui ka õhutemperatuuri viga rahuldavale tasemele.

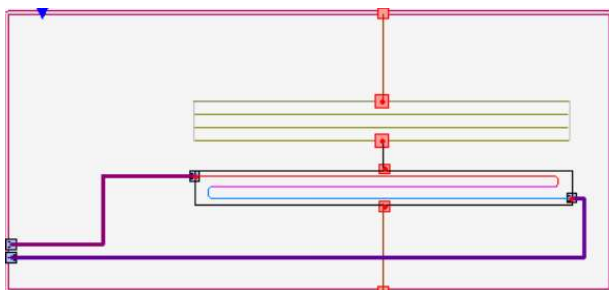
Joonisel 4.1 ning 4.2 on välja toodud kalibreeritud mudeli simulatsioonide ja katsetulemuste võrdlus, kus on näha, et viga võrreldes algsete simulatsioonidega on olulisel määral kahanenud. Sellest võis järeldada, et jahtumise katse on kalibreeritud.



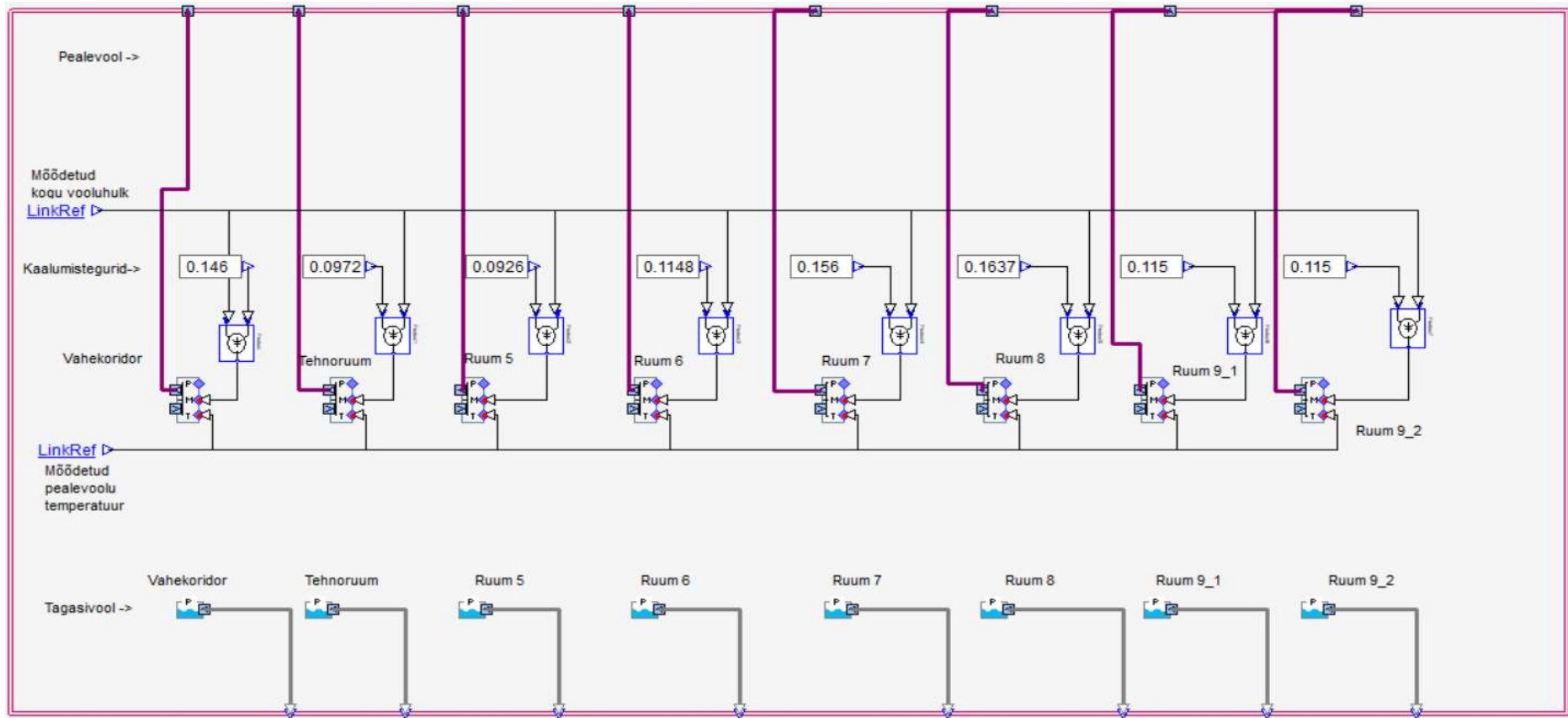
Joonis 4.2 Kalibreeritud mudeli simulatsioonide ja jahtumise katsetulemuste võrdlus ruumis 9

Üleskütmise katse kalibreerimiseks tuli simulatsiooniprogrammi üles ehitada spetsiaalne algoritm (joonis 4.4), millega küttesüsteemi juhtida. Selleks anti mudelile ette mõõdetud peaveolootemperatuur ja vooluhulk, kusjuures kogu vooluhulk tuli hoone kütteprojektist võetud konkreetse ruumi küttekoormuse kaalumisteguriga läbi korrutada, et anda ette igasse kontuuri minev vooluhulk. Lisaks sellele eemaldati igasugune mudeli enda küttesüsteemi juhtimine seadepunktide alusel, olemaks kindel, et mõõdetud vooluhulk koos peaveolootemperatuuriga igal ajahetkel ka põrandkütte kontuuridesse läheb. Käesoleva algoritmi läbi simuleerimisel oli võimalik võrrelda, kas ruumi 9 tagasivoolu temperatuur, vooluhulk ning õhu- ja põrandapinna temperatuurid ühtivad mõõdetuga.

Selleks, et eemaldada mudeli enda küttesüsteemi juhtimine seadepunktide alusel tuli eemaldada IDA ICE „advanced“ tasemelt põrandkütte ventiilid (joonis 4.3) ja teha ühendused otse joonisel 4.4 näidatud sisendite ja väljunditega. Nii sai olla kindel, et kogu mõõdetud vooluhulk ja peaveolu temperatuur mudelis põrandküttesüsteemi läheb. Selleks, et „advanced“ tasemel ei peaks iga kord uuesti joonisel 4.3 näidatud juhtimist üles ehitama, koostati programmi sisseehitatud võimalus kirjutada „Graphical script“, mis võimaldas eelnimetatud juhtimise automaatselt enne igat simulatsiooni üles ehitada. „Graphical scripti“ väljatrükk on toodud lisas 2.

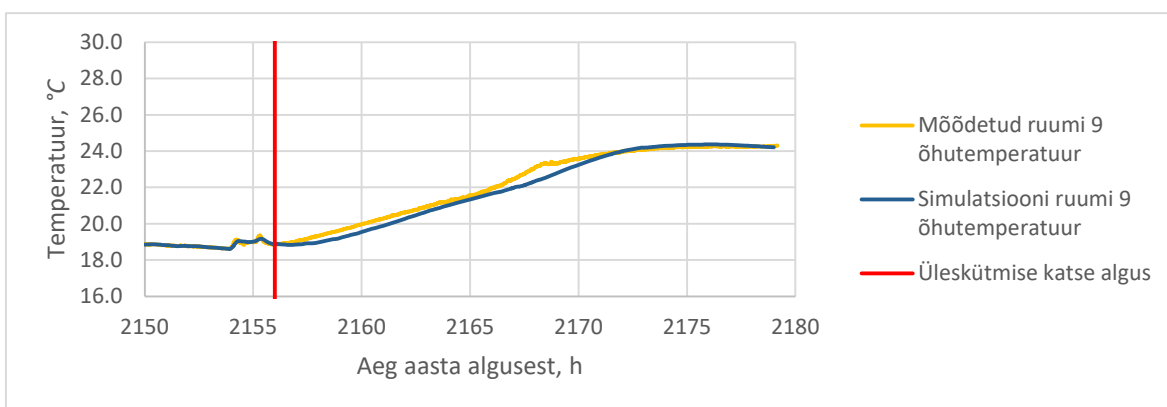


Joonis 4.3 IDA ICE „advanced“ tasemel põrandkütte juhtimine mõõtetulemuste alusel

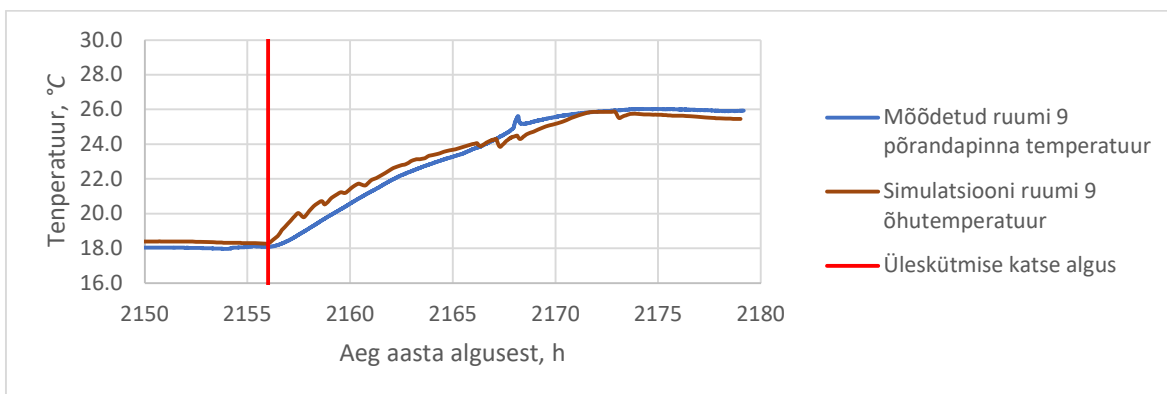


Joonis 4.4 Põrandkütte juhtimise algoritm

Üleskütmise katse kalibreerimist alustati jällegi eeltingimuste paika saamisest. Selleks oli antud simulatsioonis võimalik kasutada ainult ideaalseid küttekehasid ja -jahutustalasid. Põrandkütet- ja jahutust ei olnud võimalik erinevalt jahtumiskatsest kasutada sellel põhjusel, et eelnevalt üles ehitatud algoritm (joonis 4.3 ja 4.4) ei võimalda seadepunktide järgi juhtimist. Sellest tulenevalt ei olnud võimalik põrandapinna temperatuure enne üleskütmise algust ideaalselt paika saada. Kuna jahtumise katse oli kalibreeritud üsna täpselt, siis ka üleskütmise simulatsioonid ühtisid sisekliima (joonised 4.5 ja 4.6) ja tagasivoolu temperatuuri osas mõõdetuga suhteliselt väikese veaga.



Joonis 4.5 Kalibreeritud mudeli simulatsioonide ja üleskütmise katsetulemuste võrdlus ruumis 9

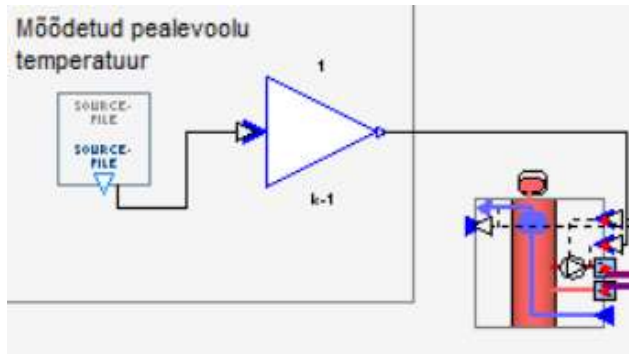


Joonis 4.6 Kalibreeritud mudeli simulatsioonide ja üleskütmise katsetulemuste võrdlus ruumis 9

Aastaste simulatsioonide jaoks on aga oluline, et küttesüsteemi saaks juhtida seadepunktide järgi. Kuna sisekliima ja tagasivoolu temperatuur simulatsioonides oli mõõtmistega ühtiv, siis edasi alustati mudelis küttesüsteemi hüdraulika seadistamisega nii, et küttesüsteemi juhiti seadepunktide järgi. Selleks kustutati joonisel 4.3 ja 4.4 kirjeldatud algoritm ja asendati see mõõdetud pealevoolu temperatuuriga (joonis 4.7).

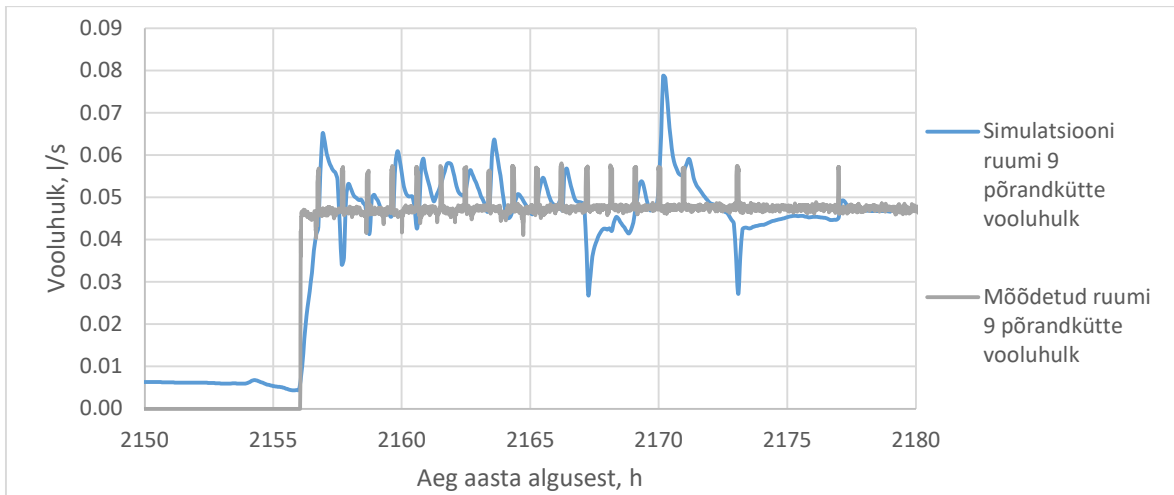


Seadepunktideks anti mudelile ette mõõdetud siseõhu temperatuur ning võrreldi kas simulatsioon arvutab vooluhulga ja tagasivoolu temperatuuri vastavalt mõõdetuga.

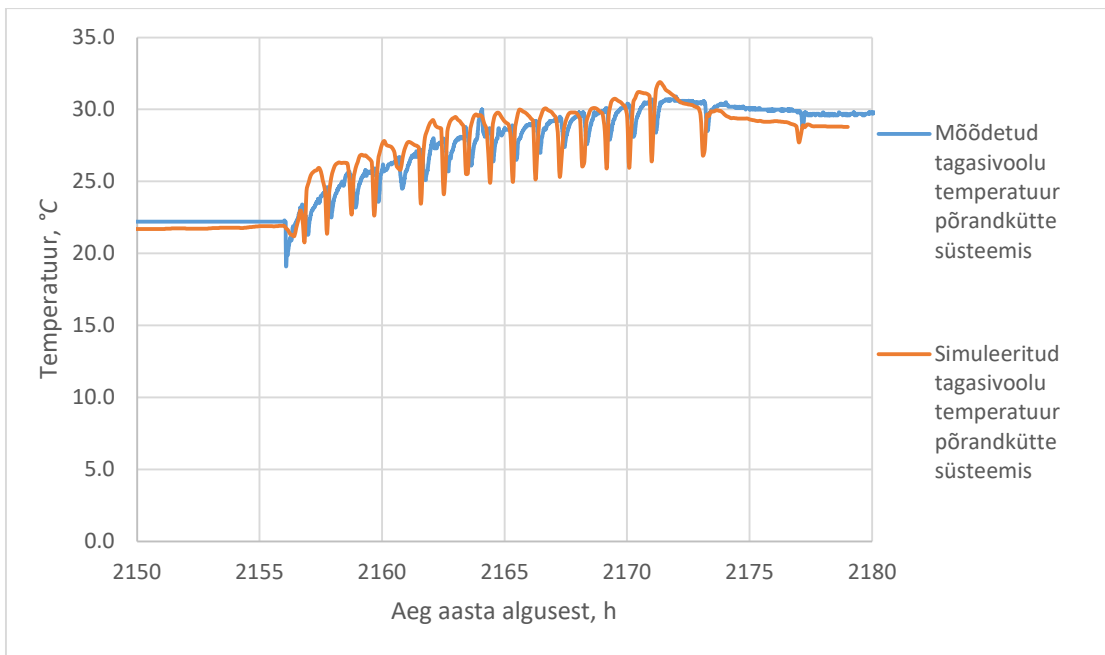


Joonis 4.7 Mõõdetud pealevoolu temperatuuri järgi küttesüsteemi hüdraulika kalibreerimise juhtimisloogika

Joonis 4.7 loogika järgi ei andnud simulatsioonid rahuldavat tulemust. Selles mängis tõenäoliselt rolli mudelis olevad põrandkütte kontrollerite parameetrid. Põrandkütet juhitakse käesolevas juhtimisalgoritmis PI (*proportional-integral*) kontrolleriga, mille põhiparameetriteks on (proportsionaalse vea) võimendustegur ja integreerimisajakonstant. Nende parameetrite suurusjärgud põrandkütte puhul võeti Kulli, Thalfeldti ja Kurnitski poolt varasemalt tehtud uurimusest [46]. Lihtsustatuna iseloomustavad eelnimetatud parameetrid põrandkütte ventiilide reageerimise kiirust seadepunktide ja küttevajaduse muutustele. Kasutades eelnevalt mainitud *Parametric Run* nendele kahele muutujale sai need tõstetud kõrgemale kui olemasolevas mudelis, mis andis oluliselt parema tulemuse (joonised 4.8 ja 4.9). Arvestades, et viga mõõtetulemuste ja kalibreeritud mudeli simulatsiooni tulemuste vahel oli väike, siis loeti mudelis ruum 9 täielikult kalibreerituks ning oli võimalik asuda simulatsioone läbi viima vastavalt peatükis 3.4.3 kirjeldatule.



Joonis 4.8 Põrandkütte vooluhulkade võrdlus ruumis 9 kalibreeritud mudeli simuleerimisel ja mõõdetul



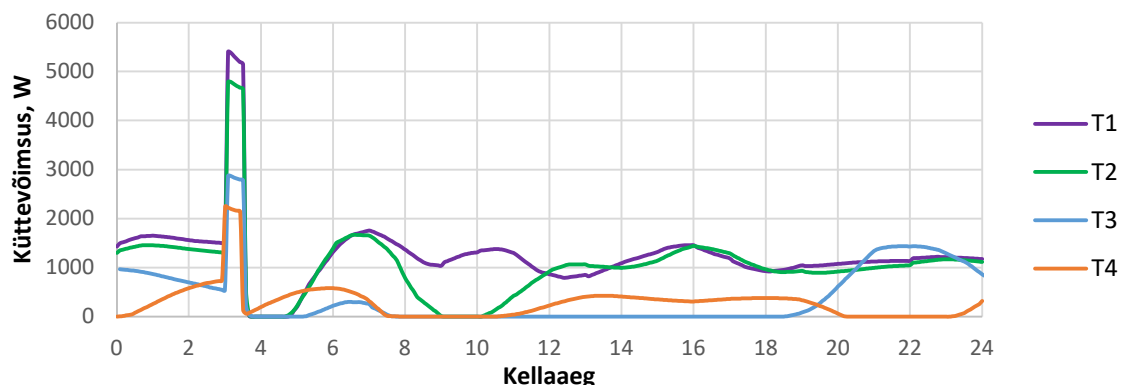
Joonis 4.9 Põrandkütte tagasivoolu temperatuuride võrdlus kalibreeritud mudeli simuleerimisel ja mõõdetul

## 5. TULEMUSED

### 5.1 Tarbimise nihutamise mõju simulatsioonide alusel

#### 5.1.1 Üle- ja alakütmise mõju sisekliimale ja küttevõimsusele

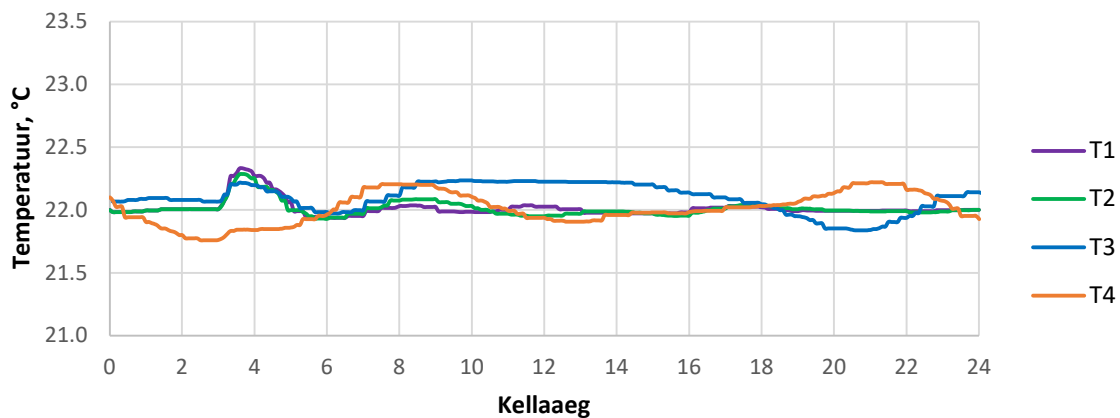
Üle- ja alakütmise mõju soojuslikule sisekliimale energiapaindlikkuse potentsiaali rakendamisel hinnati meetoditel, mis on kirjeldatud peatükkides 3.4.1 ja 3.4.3. Ülekütmise simulatsioonid poole tunniste juhtimistsüklitega näitasid (joonised 5.1 ja 5.2), et põrandkütte tipukoormus on külmade välisõhu temperatuuride korral suurem. Kõrgem tipukoormuse saavutamise juhtimistsükli ajal on väga loogiline sellel põhjusel, et külmemate ilmadega on pealevoolu temperatuur ja soojuskaod suuremad. Nagu ka järgnevas peatükis mainitud, järgnes tipukoormuse ajast välja tulemisel arvestatava pikkusega küttevõimsuse madalseis, kus küte oli täielikult välja lülitatud, kuna seadepunkt oli väiksem kui siseõhu temperatuur.



Joonis 5.1 Küttevõimsused ruumis 9 eri kuupäevadel juhtimisloogikaga 2 (ülekütmine)

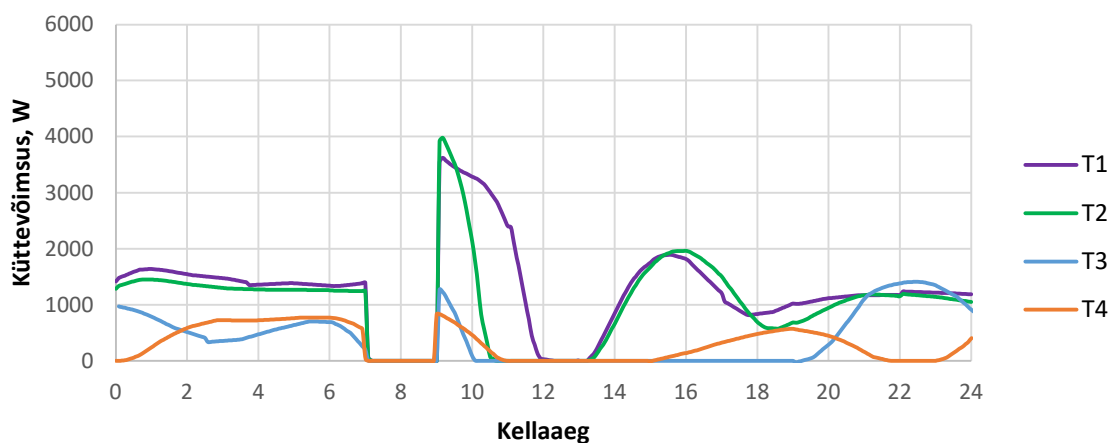
Ruumi 9 siseõhu temperatuuride kõikumised olid küll arvestatavad, ent mitte soojuslikku mugavust ohustavalt suured. Kõige rangem I kategooria sisekliima klass sätestab (tabel 1.3), et energiaarvutusteks kasutatakse siseõhu operatiivsete temperatuuride piire küttel 21-25 °C. Sellega mahuvad käesolevate simulatsioonide tulemused juhtimistsükli ajal (kella 3-st 5-ni) I klassi piiridesse. Ühegi välisõhu temperatuuri korral ei ulatunud poole tunnise juhtimistsükliga ülekütmise korral siseõhu temperatuur valitud seadepunktini. Temperatuuri tõusmise kiirus fikseeriti külmade ilmade korral marginaalselt suurem. Kõige soojema ilmaga T4 pole enne ülekütmise algust seadepunkt tagatud. See on ilmselt põrandkütte kontrolleri parameetrite tõttu. Juhtimistsükli algusele on eelnenud päikesest tingitud ülekuumenemine ja selle järgsel

jahtumisprotsessil temperatuur langeb valitud kütte kontrolleri parameetrite tõttu alla seadepunkti. Joonisel 5.1. on näha, et võimsus tõuseb aeglaselt kui siseõhu temperatuur alla seadepunkti langeb.



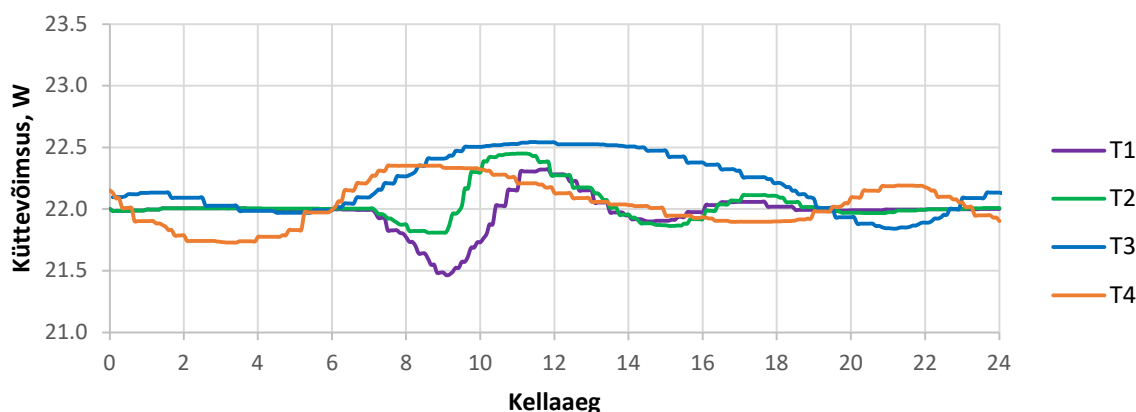
Joonis 5.2 Siseõhu temperatuurid ruumis 9 eri kuupäevadel juhtimisloogikaga 2 (ülekiütmine)

Alakiütmise puhul 2-tunniste juhtimistsükliatega leiti, et küttevõimsuse vähendamise järel tekib vastupidiselt ülekiütmisele madalseisust välja tulemise kompensatsiooniks tipukoormuse tekkimine (joonis 5.3). See tuleneb tõenäoliselt sellest, et põrandkütte ventiilid on mõeldud töötama konstantse siseõhu temperatuuri juures ning kiiretele siseõhu temperatuuri muutustele reageerimine toimub ebaefektiivselt.



Joonis 5.3 Küttevõimsused ruumis 9 eri kuupäevadel juhtimisloogikaga 3a (alakiütmine)

Muutused ruumi 9 siseõhu temperatuuri osas alakütmise puhul on näidatud joonisel 5.4. Tulemustest nähtub, et külmemate välisõhu temperatuuride korral T1 ja T2 toimub juhtimistsükli ajal kella 7-st kella 9-ni arvestatav temperatuuri langus, mille kiirus on külmemal välisõhu temperatuuri puhul kiirem. Samas ka külmade ilmade korral on langus päris aeglane- kahe tunni kütmata jätmise jooksul langeb siseõhu temperatuur T1 ja T2 korral 0,54- ning 0,18 °C. Kuna juhtimistsükkel on valitud hommikusele ajale, siis on võimalik, et päikesekiirgus võib muuta temperatuuri langemist aeglasemaks. Juhul kui T1 välisõhu temperatuuri korral siseõhu temperatuuri langemine arvata lineaarseks, siis ekstrapoleerides on võimalik leida, et 1 °C langus leiab aset 3,7 tunni kütmata jätmisel. Sellisel juhul oleks ikka veel siseõhu temperatuur eelnevalt mainitud I sisekliima klassi piirides. Äramärkimist väärib ka asjaolu, et põrandkütte inertsus alakütmise madalseisust taastumisel mõjutab hilisemat ülekütmist rohkem T2 puhul kui T1 puhul. Soojemate ilmadega T3 ja T4 kellaaja vahemikel 7-9 olulist temperatuuri langust simulatsioonidega välja ei tulnud. See tuleneb tõenäoliselt päikese otse- ja hajuskiirguse suurest mõjust siseõhu temperatuurile.



Joonis 5.4 Siseõhu temperatuurid ruumis 9 eri kuupäevadel juhtimisloogikaga 3a (alაკütmine)

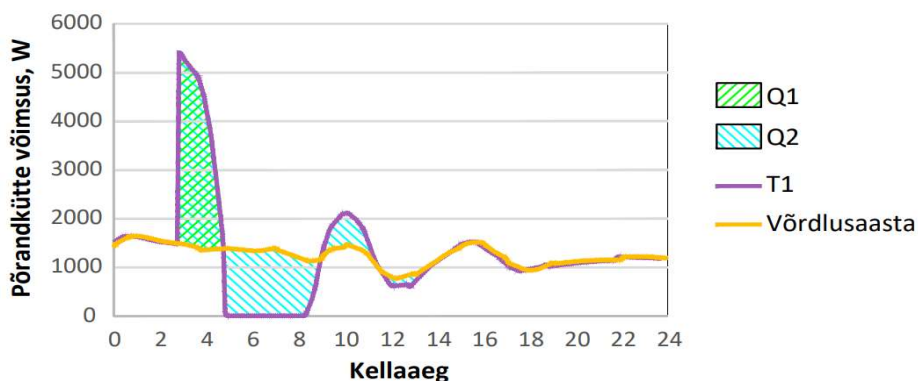
### 5.1.2 Erinevate juhtimisalgoritmide mõju päevastele energiakasutustele

Võrdlusaasta läbi simuleerimisel leiti päevased kütteenergia kulud põrandkütte. Nii nagu võis eeldada, siis on tulemustel korrelatsioon välisilmaga, kus välisõhu temperatuuri kasvades vähenevad kütteenergia kulud. Aastane kulu põrandkütte ruumis 9 fikseeriti võrdlusaastal 147,4 kWh/m<sup>2</sup>.

Tabel 5.1 Võrdlusaasta päevane kütteenergia kulu erinevatel päevadel

Päeva tähis	Võrdlusaasta kütteenergia kulu pörandküttele ruumis 9, Wh/m <sup>2</sup> päevas
T1	979.3
T2	802.6
T3	290.1
T4	229.9

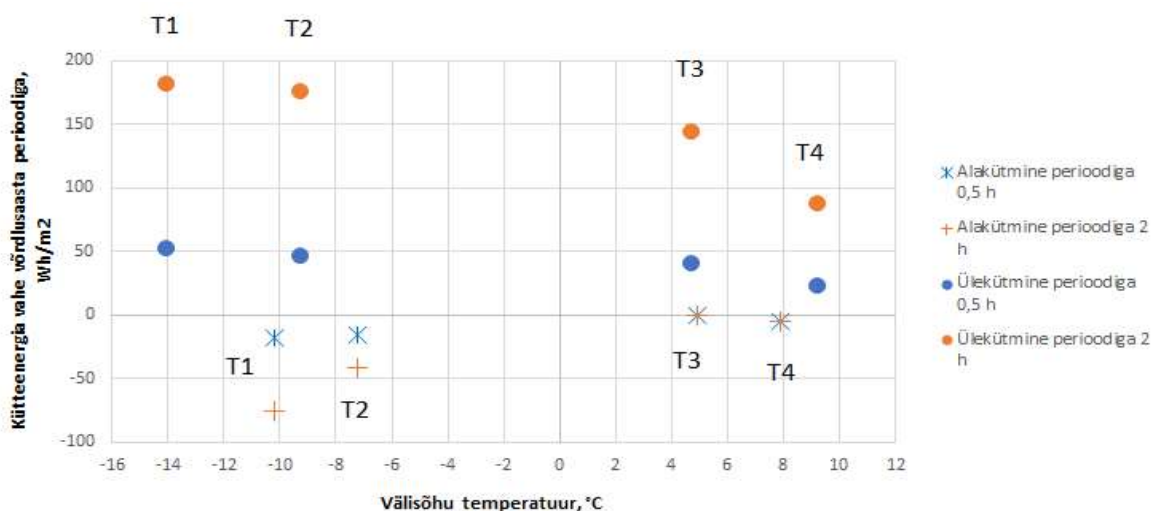
Üle- ja alakütmisega hoone energiapaindlikkuse hindamisel tuleb tõenäoliselt arvesse võtta pörandkütte aeglasest juhtimisest põhjustatud energiakadusid. Joonisel 5.5 on näidatud kahe tunnise ülekütmise juhtimistsükli 3 poolt hoonesse mahutatud energia Q1 ning tsüklilist põhjustatud koguenergia erinevus võrdlusaasta päevast Q2. Suuruse Q1 järgi on võimalik hinnata erinevate juhtimistsüklite poolt perioodi jooksul lisatud või ära jäetud energia hulka, et leida käesolevas uurimistöös kasutatud hoone energiapaindlikkuse potentsiaal. Suuruse Q2 järgi on näha, milline on energiapaindlikkuse poolt põhjustatud kogu soojusenergiakadu kuni stabiilsuse saavutamiseni. Stabiliseerumine tekib siis, kui pörandkütte võimsus võrdlusaastal ja juhtimistsükliga simulatsioonil ühtivad.



Joonis 5.5 Abijoonis kasuliku ja lisandunud koguenergia vahel

Joonis 5.6 näitlikustab üle- ja alakütmise perioodide pikkuste ja välisõhu temperatuuride vahelist seost ja mõju kütteenergia kulule. Joonise y- teljel olev kütteenergia viitab kütteenergia kasvule või kahanemisele võrdlusena võrdlusaastaga just üle- või alakütmise perioodi jooksul. Tulemustest on näha korrelatsiooni, kus küttesüsteemi ja laiemalt hoonete energiapaindlikkus on suurema potentsiaaliga külmadel ilmadel ning väiksem soojemate ilmadel korral. Tõenäoliselt tuleb see sellest, et külmematel ilmadel

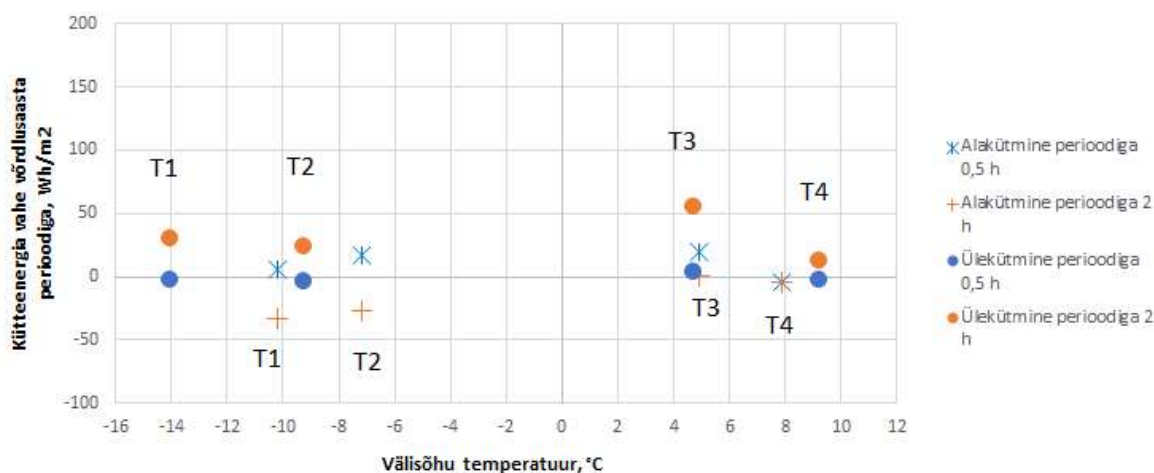
on hoone soojuskaod suuremad ja tipukoormus, mida saavutatakse on kõrgem. Näiteks ülekütmise perioodiga 2 tundi võimaldab salvestada hoone konstruktsioonidesse 181,9 Wh/m<sup>2</sup> soojusenergiat ilmaga T1, aga soojema T3 ilmaga ainult 144,6 Wh/m<sup>2</sup>. Paraku on Eesti kliimas taastuvenergia ajaline saadavus suurem just soojemate ilmadega, kus hoonete energiapaindlikkus on väiksem. Oluliseks faktoriks lisaks välisõhu temperatuurile kujunes ka päikese kiirgusvõimsus, mis muutis alakütmise soojadel perioodidel sisuliselt kasutuks, sest võrdlusaasta puhul oli juba küttevõimsus väga madal. Kõige külmemal perioodil T1 leiti, et alakütmisega on võimalik küttesüsteemi võrreldes võrdlusaastaga vähem koormata 75,5 Wh/m<sup>2</sup> ulatuses, 2 tunni jooksul.



Joonis 5.6 Erinevate juhtimisalgoritmide võrdlus võrdlusaasta kütteenergiaga juhtimisalgoritmide perioodide jooksul, Q1

Simulatsioonide tulemusel selgus ka, et hoonete energiapaindlikkuse rakendamine suurendab üldiselt sama päeva küttele kuluvat koguergiat. Joonisel 5.7 on kujutatud päevade T1...T4 erinevate juhtimisalgoritmide mõju kogu päevasele kütteenergia kulule võrreldes võrdlusaastaga ( $y=0$  joon tähistab võrdlusaasta kütteenergia kulu). Tulemustest nähtub, et ülekütmisel on energiakadu oluliselt suurem pikema perioodi puhul, alakütmisel perioodi pikkus suurt rolli ei mänginud. Kõige suurem energiakadu fikseeriti T3 päeval ning see ulatus 53,1 Wh/m<sup>2</sup> kuni süsteemi stabiliseerumiseni. Alakütmisel tuleneb kadu võrreldes võrdlusaastaga sellest, et siseõhu temperatuuri madalseisust välja tulles on põrandkütte inertsus piisavalt suur, et kütta siseõhu temperatuur seadepunktist kõrgemale. Paraku ei ole käesolevate simulatsioonide puhul võimalik määrata, millest tuleneb kao suurenemine ja vähenemine erinevate välisõhu temperatuuride juures, aga tõenäoliselt on määravaks faktoriks põrandkütte reageerimise kiirus muutustele süsteemis ning päikesekiirguse suurus.

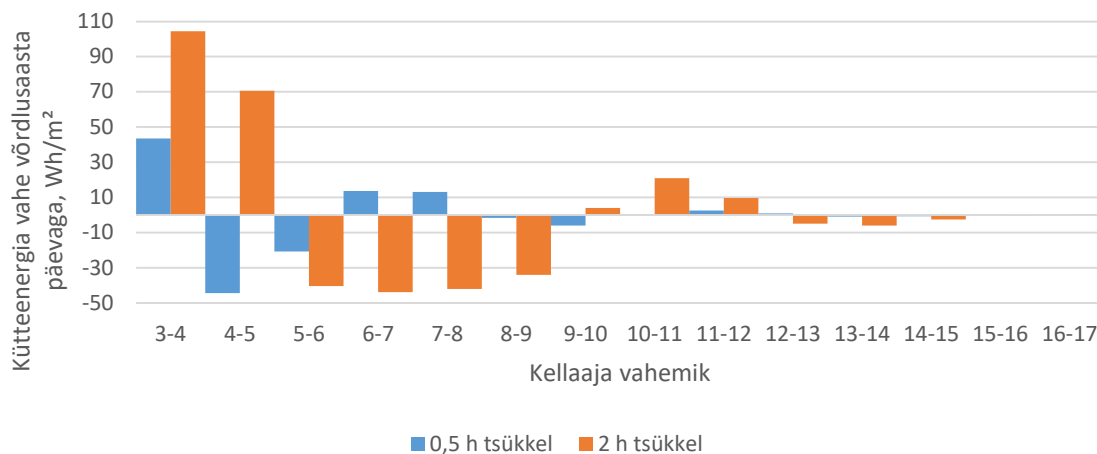
Kahju hoone omanikule energiapaindlikkuse rakendamisest on käesolevate katsete tulemusel suhteliselt väike, aga selleks, et seda rahaliselt määratleda tuleks teha teatud lihtsustused. Näidistingimustel, kus hoone köetav pind on 100 m<sup>2</sup> ning soojuspumba COP=3, siis ülekütmisel perioodiga 2 tundi ja kõige külmema valitud ilmaga (T1) on võimalik salvestada hoone konstruktsioonidesse 18,2 kWh soojusenergiat, kaoga 3,1 kWh. 3,1 kWh soojusenergiat teisendub eelmainitud COP suurusel 1,0 kWh elektrienergiaks ning juhul kui arvestada keskmiseks elektri hinnaks 0,12 €/kWh, siis selleks, et kahjud kompenseerida tuleb elektri tootjal välja käia käesolevate katsetulemuste põhjal 0,12 €, et salvestada 6,1 kWh elektrienergiat kahe tunni jooksul.



Joonis 5.7 Erinevate juhtimisalgoritmide võrdlus võrdlusaasta kütteenergiaga juhtimisalgoritmide stabiliseerumise jooksul, Q2

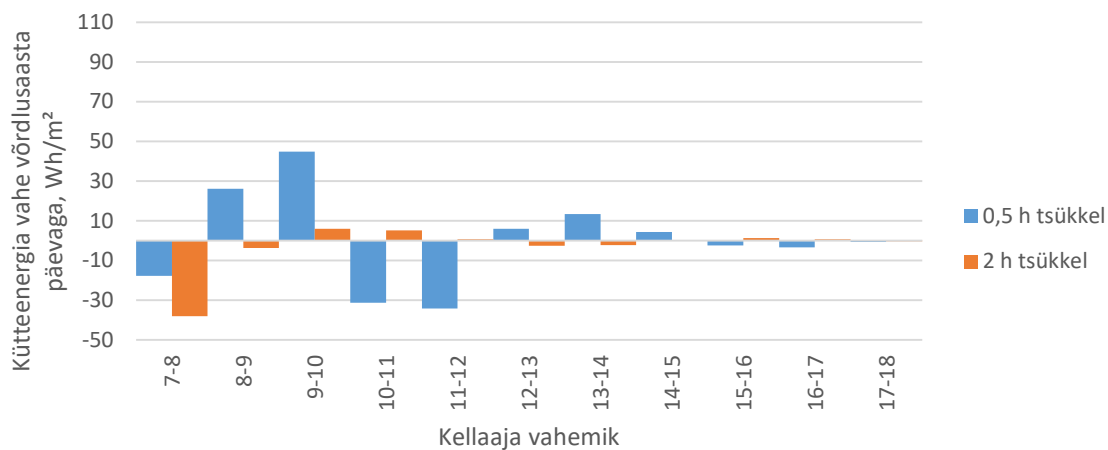
Põrandkütte inertsus iseloomustavad hästi joonised 5.8 ja 5.9, kus on näidatud kõige külmema valitud ilmaga (T1) põrandküttele mineva soojusvõimsuse taastumist tavaolukorda ehk süsteemi stabiliseerumiseni. Simulatsioonidest selgub, et ülekütmisel taastumine tavaolukorda kestab kauem 2 tunnise tsükli puhul, kui 0,5 tunnise puhul. 2 tunnise tsükkel jõudis käesoleval juhul tavaolukorda umbes kell 15 ning 30 minutilise tsükli puhul saavutati tavaolukord juba kell 12, mis on 4,5 tundi pärast tsükli lõppu. Ühtlasi näitavad tulemused seda, et pärast ülekütmist tuleb arvestada küttevõimsuse vähenemisega. See võib kujuneda eriti oluliseks hoonete kasutamisel elektrivõrgu tasakaalustamisel kaskaadis, kus selliste juhtimisalgoritmide ja põrandkütte ventiilide puhul võib toimuda oluline võimsuse langus pärast tipukoormuse saavutamist.





Joonis 5.8 Ülekütmisel põrandkütte inertsiga näide väliskliimaga T1 energiakasutusele päeval profiilil kuni stabiliseerumiseni, võrreldes võrdlusaastaga

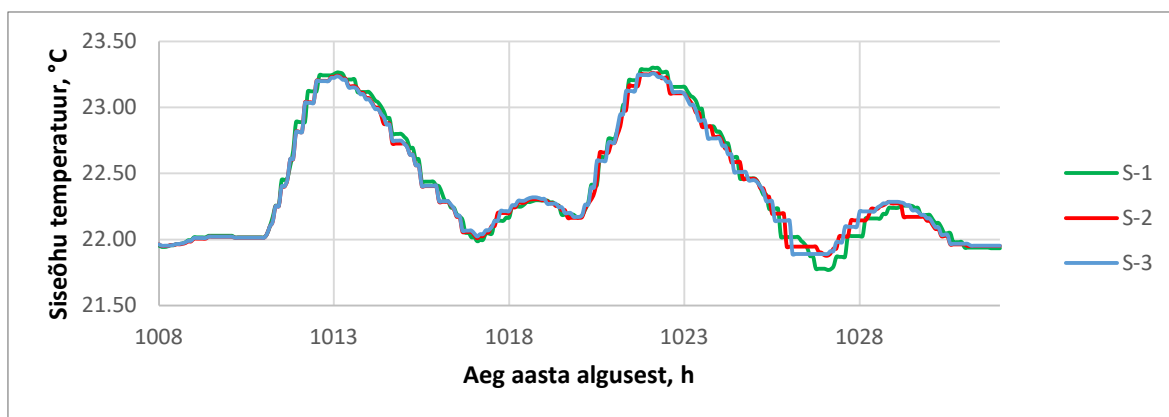
Alakütmise puhul ei toetanud tulemused seda, et pikem juhtimistsükli perioodi pikkus tähendab pikemat aega süsteemi stabiliseerumiseni. Kõige külmema välisõhu temperatuuri (T1) juures fikseeriti poole tunnise alakütmise juhtimistsükliga stabiliseerumine 9,5 tunniga, samas 2 tunnise juhtimistsükliga juba 5 tunniga pärast tsükli lõppu. Selline ebakõla võib olla tingitud jällegi põrandkütte kontrolleri parameetritest või arvestatavast päikese mõjust.



Joonis 5.9 Alakütmisel põrandkütte inertsiga näide väliskliimaga T1 energiakasutusele päeval profiilil kuni stabiliseerumiseni, võrreldes võrdlusaastaga

### 5.1.3 Hoone energiapaindlikkuse potentsiaali rakendamise mõju aastasele energiavajadusele ja hoone soojusmahtuvuse mõju

Soojusmahtuvuse mõju arvestamiseks kasutati simulatsioonides kolme erinevat välisseina konstruktsiooni (tabel 3.3) soojusmahtuvuse kasvu järjekorras S-1; S-2 ning S-3, kusjuures S-1 on testhoone tegelik välisseina konstruktsioon. Soojusmahtuvuse mõju siseõhu temperatuuridele on välja toodud juhtimisalgoritmi 1 puhul joonisel 5.10, millest nähtub, et mõju temperatuurile on minimaalne. Vähesel määral küll kõige väiksema soojusmahtuvusega seinte puhul küll toimub temperatuuri tõusmine ja langemine kiiremini kuid vahe teiste soojusmahtuvustega võrreldes on väga väike. See võib tuleneda asjaolust, et põrandkütte aktiveerib otseselt põranda soojuslikku massi ning kuna see on testmaja puhul juba suhteliselt suure soojusmahtuvusega, siis seinte soojusmahtuvuse roll sellega väheneb. Soojusmahtuvuse mõju küttevõimsusele oli sarnase suurusega.



Joonis 5.10 Erinevate seinte soojusmahtuvuste võrdlus siseõhu temperatuurile 1. juhtimistsükliga ühe päeva jooksul

Selgitamaks välja energiapaindlikkuse mõju aastasele kütteenergia kulule simuleeriti 1; 1a ning 1b juhtimisalgoritmide läbi Estonian TRY baasaasta väliskliima andmetega ja võrreldi neid võrdlusaasta energiakuludega (tabel 5.2). Käesolevad simulatsioonid käivad kogu hoone kohta ehk tuleb tähele panna, et kalibreeriti ainult ruumi 9 ning tabelis 5.2 olevad tulemused ei pruugi olla sama täpsusega, mis on kalibreeritud ruumi 9 täpsus. Simulatsioonide tulemustega ei olnud võimalik korrelatsiooni aastase kütteenergia tõusu või languse ja soojusmahtuvuse järele leida. Võimalik, et selline ettearvamatult aastase kütteenergia muutus erinevate soojusmahtuvuste korral on jällegi aeglase küttesüsteemi muutustele reageerimise tagajärg. Jättes arvestamata erinevate soojusmahtuvuste mõju, siis nähtub tulemustest, et üle- ja alakütmist korraga rakendades juhtimisalgoritmi 1 ja soojusmahtuvuse tüübi S-1 järgi kasvab aastane küttekulu 5,8 %.

Tabel 5.2 Aastase kütteenergia kulu võrdlus erinevate juhtimisalgoritmide kasutamisel võrdlusaastaga erinevate soojusmahtuvustega välisseinte korral

Juhtimisloogika	Soojusmahtuvuse tüüp	Kogu aastane kütteenergia, kWh/m <sup>2</sup>	Vahe võrdlusaastaga, %
Võrdlusaasta	S-1	146.6	0.0
	S-2	146.3	0.0
	S-3	146.1	0.0
Ülekütmine	S-1	153.1	4.5
	S-2	152.2	4.0
	S-3	152.2	4.2
Alakütmine	S-1	147.8	-3.5
	S-2	147.7	-3.0
	S-3	147.5	-3.1
Üle- ja alakütmine	S-1	156.4	5.8
	S-2	155.6	5.4
	S-3	155.6	5.5

## 5.2 Ventiilide avamisaja mõju soojuspumba juhtimisele

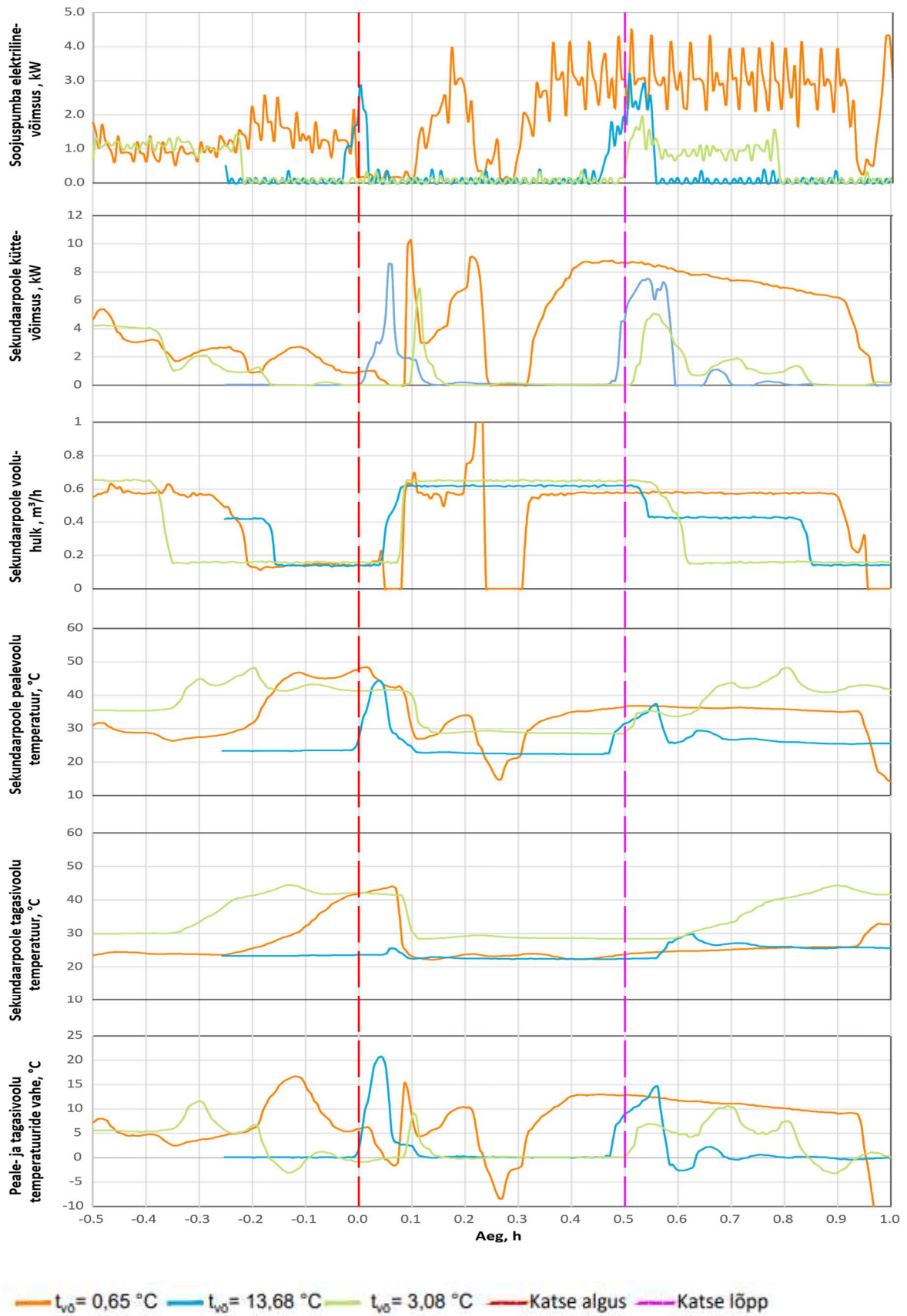
Soojuspumba katsete tulemused on koondatud kolmele joonisele, kus ventiilidele antakse avanemissignaali samaaegselt soojuspumba inverteri sageduse seadepunkti tõstmisega (joonis 5.11), 5 minutit varem (joonis 5.12) ning 15 minutit varem (joonis 5.13). Joonistel katse algus määrab soojuspumba inverteri sageduse seadepunkti tõstmise hetke (edaspidi: katse algus). Mõõtetulemuste joonistel on välja toodud 6 erinevat mõõtetulemust: soojuspumba elektriline võimsus, sekundaarpoole küttevõimsus, -vooluhulk, -pealevoolu temperatuur, -tagasivoolu temperatuur ning pealevoolu ja tagasivoolu temperatuuride vahe. Elektri- ja soojusarvesti väljavõttest näeb soojuspumba reageerimise kiirust soojuspumba inverteri sageduse seadepunktide tõstmise hetkest. Sekundaarpoole muud mõõteandmed on selleks, et leida kui suur vahe on ventiilide avanemissignaali ja ventiilide tegeliku avanemise vahel ning analüüsida, mis sekundaarpoole hüdraulikas osutub oluliseks. Selleks, et mõõtetulemusi korrektselt mõista tuleks eelnimetatud suurusi vaadelda koos.

Põrandkütte ventiilide avanemise viiteaeg pärast seadepunktide tõstmist, mis on hästi näitlikustatud joonisel 5.12 „Sekundaarpoole vooluhulk“ graafikul, ei ole igal katsel sama, aga käesolevate katsetulemuste järgi on võimalik hinnata, et 5 minutit võiks olla piisav etteteatamisaeg ventiilide seadepunktide tõstmiseks, et vooluhulga tõus tekiks. See annab eelduse soojuspumba võimsuse tõstmiseks, vastasel korral tõuseb sekundaarpoole tagasivoolu temperatuur tõenäoliselt piisavalt kõrgele, et soojuspump enda kaitseks välja lülitub. Üldist soojuspumba tipukoormuse saavutamise kiirust ei ole läbivalt paraku võimalik käesolevate mõõtetulemustega täpselt hinnata, sest tulemused varieerusid eri katsete vahel oluliselt. Samas on võimalik öelda, et madala välisõhu temperatuuridega (oranžid jooned graafikutel) on näha elektriarvestite väljavõtetest, et juhtimisloogikatele allumine toimub korrapärasemalt ning tipukoormuse saavutamine pärast katse algust on kiirem. Näiteks andes ventiilidele avanemissignaali 5 minutit enne katse algust, saavutati elektrilise võimsuse tipukoormus (võimsus >3 kW) 4,9 minutiga. Samal ajal katses, kus anti ventiilidele avanemissignaali 15 minutit enne soojuspumba inverteri sageduse seadepunkti tõstmist saavutati tipukoormus (võimsus >4 kW) 3,8 minutiga.

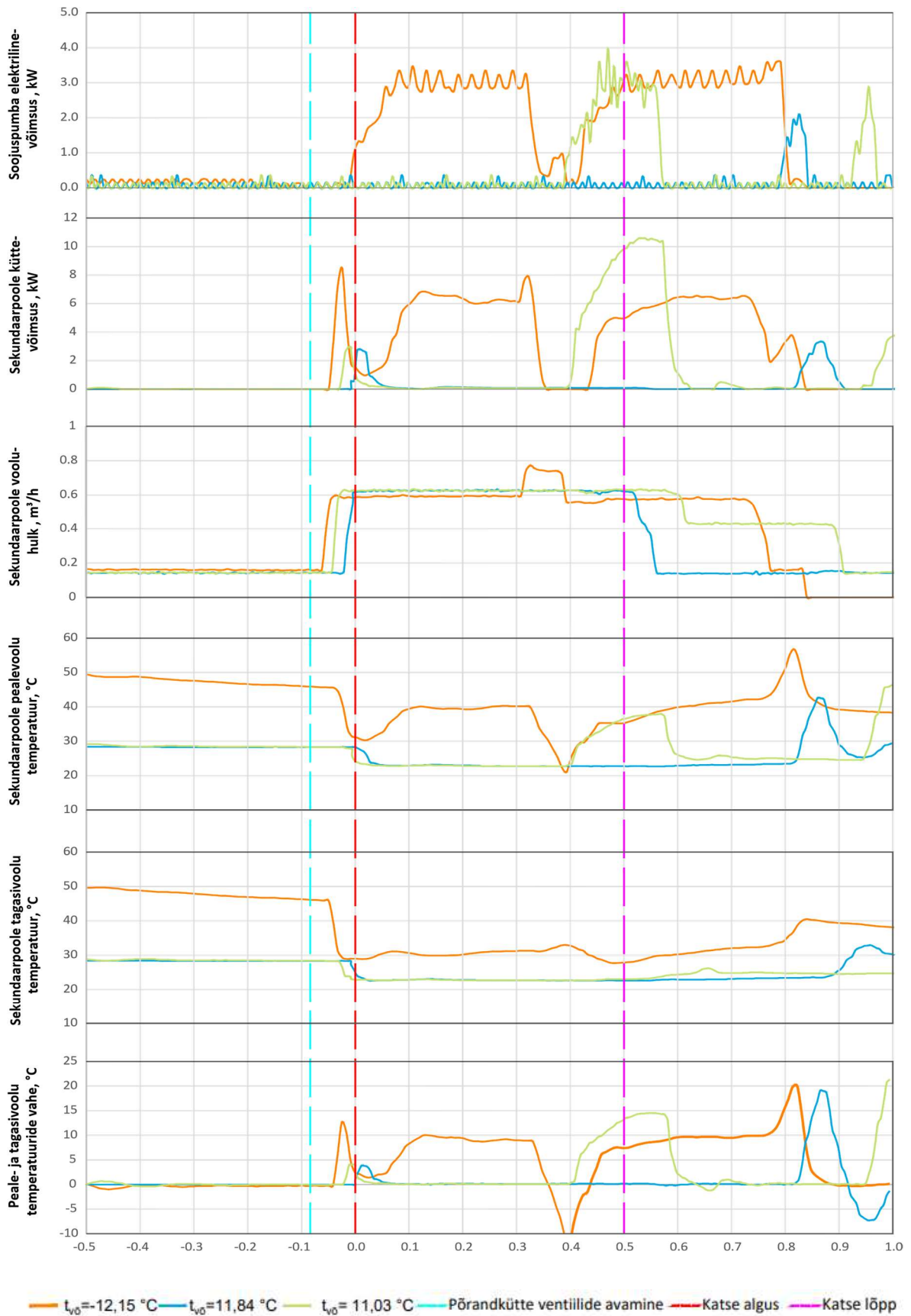
Üheks soojuspumba katsete eesmärgiks oli fikseerida soojuspumba reageerimiskiirus elektrivõrgust tulevatele signaalidele. Üldiselt ei olnud käesolevate mõõtetulemuste põhjal võimalik hüpoteesis seatud küsimusele vastata, osaliselt selle tõttu, et soojuspumba võimsusväljastuse juhtimine inverteri sageduse seadepunktide manuaalse muutmisega ei olnud tõenäoliselt olemuselt täielikult soojuspumba enda automaatika ülekirjutamine. Nii oli võimalik muudel soojuspumba automaatika osadel ja süsteemi

kaitsetel juhtimine üle võtta. Teisalt mängis soojuspumba elektrilise võimsuse kujunemisel olulist rolli välisõhu temperatuur, kus soojadel välisõhu temperatuuridel mitme erineva katse puhul oli juhtimisele reageerimine mitterahuldava viibeajaga või ei reageerinud soojuspump juhtimisele absoluutselt. Kohati on tulemustes näha tendentsi, kus sekundaarpoole küttearvesti näitab katse alguses olulist võimsuse kasvu, samas elektriarvesti näitades pole seda märgata, näiteks joonisel 5.11. See võib tuleneda asjaolust, et ventiilid olid enne katset kinni ja ventiilide avanemisel jõuab soojusarvestisse kontuurides seisnud, jahenenud soojuskandja, mis näitab madalat tagasivoolu temperatuuri ja suurendab temperatuuride vahet ilma, et tegelikkuses kütteenergiat süsteemi lisanduks.

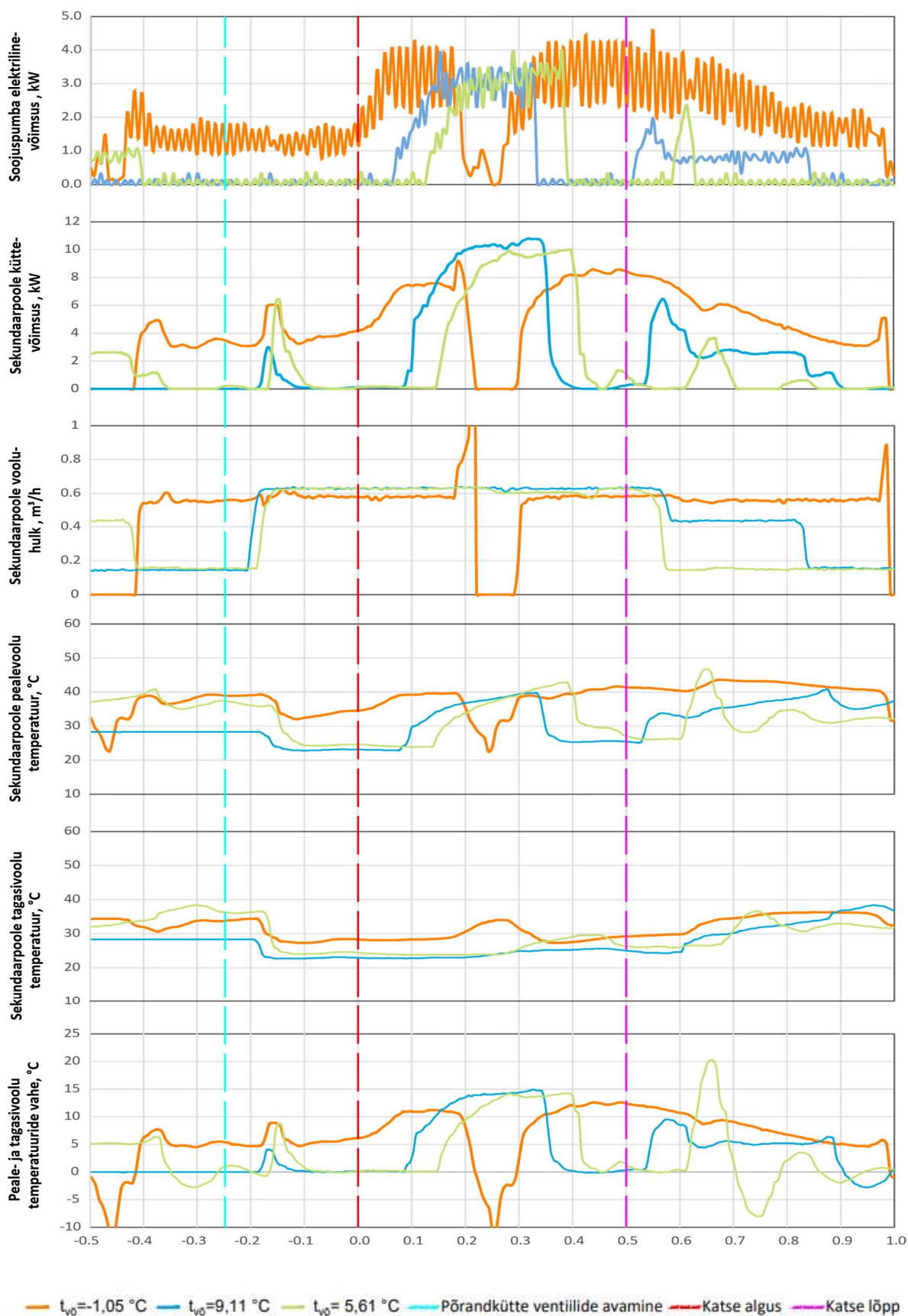
Hüpotees, et põrandkütte ventiilide avanemise viibeajal on arvestatav mõju sekundaarpoole vooluhulga tõusu kiirusele ning sellega ka sekundaarpoole küttevõimsuse tõusule sai käesolevate katsetulemustega kinnitust. Näiteks joonisel 5.12, kus vooluhulga mõõtetulemused olid 3 erineva mõõtmisega sarnased oli ventiilidele avanemissignaali andmisel ja ventiilide avanemise keskmine vahe ehk viivis 4,1 minutit. Selline tulemus näitab seda, et järgnevate sarnaste uurimistööde puhul oleks oluline põrandkütte ventiilide avanemise viivist arvesse võtta. Käesoleva uurimistöö katsete kõige õnnestunuma tulemuse puhul (joonis 5.12) saavutati tipukoormus signaali andmisest ventiilide avanemiseks 9,9 minutiga. Samas tulevikus tehtavate uurimuste katsete paremaks õnnestumiseks tuleks leida viis kuidas soojuspumba enda sisseehitatud automaatikat üle kirjutada ja kaitsed eemaldada, et oleks võimalik soojuspumba võimsusväljastust korrapärasemalt juhtida.



Joonis 5.11 Soojuspumba katsete koondtulemused. Ventiiidele anti avanemissignaali samaaegselt soojuspumba sageduse seadepunkti tõstmisega



Joonis 5.12 Soojuspumba katsete koondtulemused. Ventiilidele anti avanemissignaali 5 minutit enne soojuspumba sageduse seadepunkti tõstmist



Joonis 5.13 Soojuspumba katsete koondtulemused. Ventiilidele anti avanemissignaali 15 minutit enne soojuspumba sageduse seadepunkti tõstmist



## KOKKUVÕTE

Käesolevas magistritöös uuriti soojuspumbaga põrandküttesüsteemi potentsiaali elektrivõrgu tasakaalustamiseks. Selleks teostati mõõtmised TalTech liginullenergia testhoones, kus katsetati soojuspumba ning põrandkütte ventiilide koostööd ning hoone energiapaindlikkust. Testhoone ühes ruumis tehtud katsetega kalibreeriti IDA ICE tarkvaras mudel, millega oli võimalik erinevate juhtimisalgoritmidega teha aastaseid simulatsioone, et hinnata hoone energiapaindlikkuse potentsiaali ning võimalikke energiakadusid eelmainitud potentsiaali rakendamises. Lisaks sellele võeti simulatsioonidega arvesse erinevate soojusmahtuvusega seinte konstruktsioonide mõju hoone energiapaindlikkusele.

Soojuspumba katsetest nähtus, et põrandkütte ventiilide hilistust on soojuspumba lühiajalisel juhtimisel oluline arvesse võtta. Katsete puhul, kus ventiilidele anti avanemissignaali 5 minutit enne soojuspumba inverteri sageduse seadepunkti tõstmist, fikseeriti põrandkütte ventiilide avanemise keskmiseks viiviseks 4,1 minutit. Soojuspumba enda reageerimine tipukoormuse saavutamiseks pärast inverteri sageduse seadepunkti tõstmist leiti sama juhtimisloogikaga katsetega minimaalselt 4,9 minutit. Selline tulemus viitab sellele, et 10 minutit võib olla piisav etteteatamisaeg võrgust, et soojuspump jõuaks ettenähtud ajaks tipukoormuse saavutada. Tulemustest leiti ka asjaolu, et soojuspumba inverteri sageduse seadepunkti tõstmine ei pruugi olla täielik soojuspumba enda automaatika ülekirjutamine, mistõttu ei olnud katsetulemused järjepidevad. Käesolev uurimistöö ei kajastanud sooja tarbevee valmistamise ja elektritennidega kütmise mõju. Täiendavaid uurimusi vajaks ka soojuspumba lühiajaline juhtimine, et see oleks usaldusväärsem ja tulemused oleksid järjepidevamad.

Hoone energiapaindlikkuse potentsiaali määr leiti sarnane varasemate uurimustega. Külma ilmaga ( $T_1$ ) suudeti kahe tunnise seadepunktide tõstmisega mahutada hoone konstruktsioonidesse ligi  $182 \text{ Wh/m}^2$  soojusenergiat võrreldes võrdlusaasta sama perioodiga. Näiteks Kanadas, Quebeci ülikoolis varem tehtud uuringus [1] leiti, et põrandküttega on võimalik saavutada kuni  $200 \text{ Wh/m}^2$  energiapaindlikkust ning 4 tundi tipukoormuse nihutamist. Alakütmisel 2 tunnise perioodiga juhtimisalgoritmiga leiti, et sama väliskliimaga on võimalik küttesüsteemi tipukoormust nihutada ligi 3,7 tundi, enne kui temperatuur  $I$  sisekliima piiridest väljub, nii on võimalik vähendada võrreldes võrdlusaastaga soojusenergia tarbimist  $75 \text{ Wh/m}^2$ , eelmainitud juhtimisalgoritmi perioodi jooksul. Kaod hoone energiapaindlikkuse potentsiaali rakendamises leiti suuruses  $30 \text{ Wh/m}^2$  ülekütmisel 2 tunnise perioodiga eelnimetatud välisilma korral. Hinnates kadusid energiapaindlikkuse rakendamises kogu aasta kohta leiti tulemustes,

et küttekulud suurenevad juhtimistsükli puhul kus kasutati iga päev 2 korda nii üle- kui ka alakütmist perioodidega 2 tundi, 5,8 % võrreldes võrdlusaastaga. Tuleviku uurimustes võiks sarnaseid katseid tehes kasutada tarku juhtimis- ja kontrollstrateegiaid, mis suudaksid arvestada põrandkütte inertsusega, et vähendada kadusid hoonete energiapaindlikkuse rakendamisel.

Soojusmahtuvuse suurt mõju hoone energiapaindlikkusele käesolevas uurimuses ei tuvastatud. Mingil määral küll kõige väiksema soojusmahtuvusega seinte konstruktsiooni juures toimuvad temperatuuri muutused kiiremini kuid vahe teiste soojusmahtuvustega võrreldes on marginaalne. See võib tuleneda asjaolust, et põrandkütte aktiveerib just põranda soojusmahtuvust otseselt ja ei pruugi seintega nii suurt seost omada, sest kuna ruumiõhu temperatuur palju ei muutu, siis aktiveeritakse seinte soojusmahtuvust oluliselt väiksemal määral. Samas oleks võimalik täiendavalt analüüsida põranda soojusmahtuvuse mõju energiapaindlikkusele.

## SUMMARY

The main focus of this master's thesis was to estimate the potential of balancing the electricity grid through underfloor heating system with heat pump. In order to find a satisfactory estimate, a series of measurements was conducted in TalTech's nearly-zero energy test facility. First set of measurements were carried out to see the role that underfloor heating valves are playing in the total heat pump reaction speed to electricity grid's signals. Second set of measurements were done to estimate the building's energy flexibility. According to these measurements a model in IDA ICE software was calibrated with which it was possible to simulate long and short periods to see the effect that implementing building's energy flexibility with different control algorithms has on the indoor climate and energy use. In addition, different construction of exterior walls were tested in the simulations to find an estimate of heat capacity's effect on the aforementioned changes in indoor climate and energy use.

The results of the first set of measurements showed that it could be important to take into account the delay resulting from the wax actuators of the underfloor heating valves. In the measurements where the valves were given 5 minutes to open before raising the setpoint of the heat pump's inverter frequency, the results showed a median delay of 4.1 minutes between the opening signal was given and the actual opening of the valves. In one of the results, the heat pump itself achieved peak performance with the same control algorithm within 4.9 minutes after increasing inverter's frequency setpoint. These results imply that 10 minutes could be enough of an advance notice time from the grid that heat pump could achieve peak performance, considering that the valves are closed beforehand. Results also showed that, most likely, raising the setpoints of the inverter frequency might not be fully overwriting the heat pump's own control systems and for that reason the consistency of the results was not ideal. This master's thesis did not contain analysis on using heat pump's built in function of heating with directly electrical energy or hot water heating. Furthermore, future works could include finding better ways for short-time heat pump control so that the results could be more predictable and consistent.

Building's energy flexibility was found to be in agreement with other similar and earlier studies. With the coldest chosen weather (T1) the building could fit around 182 Wh/m<sup>2</sup> of heating energy with overheating periods of 2 hours compared to the reference year without overheating periods. For example, a study [1] that was conducted in Canada showed around 200 Wh/m<sup>2</sup> of energy flexibility and 4 hours of peak shifting capabilities in rooms with underfloor heating. However with underheating control algorithms of 2

hours at the same weather it is possible to shift the peak heating load by 3.7 hours before the indoor temperature goes 1 °C below the setpoint. Within the underheating 2-hour window, it was observed that heating system consumed around 75 Wh/m<sup>2</sup> less heating energy than the reference year. Losses of using the building's energy flexibility were found to be around 30 Wh/m<sup>2</sup> with overheating period of 2 hours and the coldest weather T1. Estimating losses to a full year where both overheating and underheating control algorithms were used every day twice for a period of 2 hours, it was observed that overall heating consumption would rise around 5.8 %. In future analysis, it could be very beneficial to use smart control strategies to minimize the effect the floor heating inertia has on the heating losses.

The effect of heat capacity in exterior walls did not play a major role in energy flexibility of the building. In some hours the changes in indoor temperatures were indeed faster with lower capacity walls, but the difference was minimal. Reason for this might be that the higher indoor temperature comes with a significant delay and is considerably smaller in size than floor temperature fluctuations, because underfloor heating activates the floor heat capacity directly, but walls' heat capacity is activated through indoor air temperature. Therefore, in future analysis it could be beneficial to assess floor heat capacities effect on building's energy flexibility instead.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. A. S. Derakhtenjani ja A. Athienitis, "Energy Flexibility Assessment of a Zone with Radiant Floor Heating System by Means of Experimental Measurements," *E3S Web of Conferences*, vol. 172, p. 12010, 2020, doi: 10.1051/e3sconf/202017212010
2. G. Reynder, T. Nuytten ja D. Saelens, "Potential of structural thermal mass for demand-side management in dwellings," *Building and Environment*, vol. 64, pp. 187-199, 2013, doi: 10.1016/j.buildenv.2013.03.010
3. M. Lindahl, "Grid Flexible Control of Heat Pumps," *HPT MAGAZINE*, vol. 38, no. 1, pp. 31-34, April 2020, Loetud aadressil: <https://etkhpcorderapi.extweb.sp.se/api/file/2051>. Kasutatud: 17.05.2021
4. A. Rosin, S. Link, H. Hõimoja ja I. Drovtar, *Energiasalvestid ja -salvestustehnoloogiad*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2015
5. Ühinenud Rahvaste Organisatsiooni kliimamuutuste raamkonventsiooni Kyoto protokoll. *Riigi Teataja* II 2002, 26, 111.
6. Eesti Statistikaameti kodulehekülg. Säästva arengu näitajad. Tallinn, 2018. [Online]. Loetud aadressil: [https://www.stat.ee/sites/default/files/2020-08/Saastva\\_arengu\\_naitajad%20%281%29.pdf](https://www.stat.ee/sites/default/files/2020-08/Saastva_arengu_naitajad%20%281%29.pdf). Kasutatud: 17.05.2021
7. Eurostat andmebaasi kodulehekülg. Share of renewable energy in gross final energy consumption by sector. Loetud aadressil: [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/sdg\\_07\\_40/default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/sdg_07_40/default/table?lang=en). Kasutatud: 17.05.2021
8. M. Meldorf ja J. Kilter, *Elektrisüsteemi stabiilsus*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2011
9. E. Risthein, *Energiatehnika ja maailm*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2013
10. A. Battaglini, J. Lilliestam, A. Haas ja A. Patt, "Development of SuperSmart Grids for a more efficient utilisation of electricity from renewable sources," *Journal of Cleaner Production*, vol. 17, no. 10, pp. 911-918, 2009, doi: 10.1016/j.jclepro.2009.02.006
11. T. Lehtla ja T. Vinnal, *Elektrivarustuse tulevikuvisionid*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2016
12. Y. Shimomura, Y. Nemoto, F. Akasaka, R. Chiba ja K. Kimita, "A method for designing customer-oriented demand response," *CIRP Annals*, vol. 63, no. 1, pp. 413-416, 2014, doi: 10.1016/j.cirp.2014.03.117

13. A. Asadinejad ja K. Tomsovic, "Optimal use of incentive and price based demand response to reduce costs and price volatility," *Electric Power Systems Research*, vol. 144, pp. 215-223, 2017, doi: 10.1016/j.epsr.2016.12.012
14. M. Rahmani-andebili, "Modeling nonlinear incentive-based and price-based demand response programs and implementing on real power markets," *Electric Power Systems Research*, vol. 132, pp. 115-124, 2016, doi: 10.1016/j.epsr.2015.11.006
15. Y. Chen, P. Xu, J. Gu, F. Schmidt ja W. Li, "Measures to improve energy demand flexibility in buildings for demand response (DR): A review," *Energy and Buildings* vol. 177, pp. 125-139, 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.08.003
16. T.-A. Kõiv ja A. Rant, *Hoonete küte, 2nd ed.* Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2013
17. Riigi Kinnisvaraameti kodulehekülj. Olemasolevate hoonete sisekliima hindamise juhend. Tallinn, 2016. [Online]. Loetud aadressil: [https://www.rkas.ee/sites/default/files/public-uploaded-files/juhendid/Olemasolevate\\_hoonete\\_sisekliima\\_hindamise\\_juhend\\_2016.pdf](https://www.rkas.ee/sites/default/files/public-uploaded-files/juhendid/Olemasolevate_hoonete_sisekliima_hindamise_juhend_2016.pdf) Kasutatud: 17.05.2021
18. *Hoonete energiatõhusus. Hoonete ventilatsioon. Osa 1: Sisekeskkonna lähteandmed hoonete energiatõhususe projekteerimiseks ja hindamiseks, lähtudes siseõhu kvaliteedist, soojuslikust keskkonnast, valgustusest ja akustikast. Moodul M1-6. Eesti standard EVS-EN 16798-1:2019. Standardiamet, Tallinn, 2019.*
19. T.-A. Kõiv ja A. Rant, *Juhised kursuseprojekti koostamiseks, 2nd ed.* Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2009
20. J. Wallin, „Investigating different opportunities to increase energy efficiency in buildings by retrofitting Heat pump Coupled heat recovery systems“, [Doktoridissertatsioon], KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2014. [Online]. Loetud aadressil: [https://www.researchgate.net/publication/275885949\\_Investigating\\_different\\_opportunities\\_to\\_increase\\_energy\\_efficiency\\_in\\_buildings\\_by\\_retrofitting\\_Heat\\_pump\\_Coupled\\_heat\\_recovery\\_systems](https://www.researchgate.net/publication/275885949_Investigating_different_opportunities_to_increase_energy_efficiency_in_buildings_by_retrofitting_Heat_pump_Coupled_heat_recovery_systems) Kasutatud: 17.05.2021
21. Eesti Statistikaameti kodulehekülj. 2012 Leibkondade energiatarbimise uuring-Lõppraport. Tallinn, 2013. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.stat.ee/dokumendid/67933>. Kasutatud: 17.05.2021
22. T. M. Kull, M. Thalfeldt, J. Kurnitski, "Modelling of Wax Actuators in Underfloor Heating Manifolds," *E3S Web of Conferences*, vol. 246, p. 11009, 2021, doi: 10.1051/e3sconf/202124611009
23. J. Miks. Soojuspumpade kasutuselevõtu dünaamika Eestis 2006-2015. Eesti Soojuspumba Liidu kodulehekülj. 2016. [Online]. Loetud aadressil:

- [http://www.soojuspumbaliit.ee/upload/editor/files/Soojuspumpade\\_kasutuselevot\\_u\\_dynaamika\\_Eestis\\_2006-2015.pdf](http://www.soojuspumbaliit.ee/upload/editor/files/Soojuspumpade_kasutuselevot_u_dynaamika_Eestis_2006-2015.pdf). Kasutatud: 17.05.2021
24. J. Bonin, *Heat Pump Planning Handbook*, New York: Routledge, 2015.
25. P. D. Lund, J. Lindgren, J. Mikkola ja J. Salpakari, "Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, pp. 785-807, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.01.057
26. W. A. Qureshi, N.-K. C. Nair ja M. M. Farid, "Impact of energy storage in buildings on electricity demand side management," *Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 5, pp. 2110-2120, 2011, doi: 10.1016/j.enconman.2010.12.008
27. F. Oldewurtel, A. Parisio, C. N. Jones, D. Gyalistras, M. Gwerder, V. Stauch, B. Lehmann ja M. Morari, "Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control," *Energy and Buildings*, vol. 45, pp. 15-27, 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.09.022
28. T. Q. Péan, „Heat Pump Controls to Exploit The Energy Flexibility of Building Thermal Loads”, [Doktoridissertatsioon], Catalonia Institute for Energy Research, Barcelona, Spain, 2021. [Online]. Loetud aadressil: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/330731/TTQP1de1.pdf>  
Kasutatud: 17.05.2021
29. L. Zhang, N. Good ja P. Mancarella, "Building-to-grid flexibility: Modelling and assessment metrics for residential demand response from heat pump aggregations," *Applied Energy*, vol. 233-234, pp. 709-723, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.10.058
30. TalTech kodulehekülg. Liginullenergia testmaja. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.taltech.ee/ehituse-ja-arhitektuuri-instituut-liginullenergia-testmaja#p15031>. Kasutatud: 17.05.2021
31. Uniflex kodulehekülg. TalTech liginullenergia testhoone. [Online]. Loetud aadressil: <https://uniflex.ee/et/portfolio/tark-maja-sydneys/>. Kasutatud: 17.05.2021
32. Nibe kodulehekülg. Nibe Split ACVM 270 paigaldus- ja hooldusjuhend. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.nibe.eu/assets/documents/19289/331202-4.pdf>  
Kasutatud: 17.05.2021
33. Janitza kodulehekülg. ECS3-80 Basic M-Bus paigaldusjuhend. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.janitza.com/manuals.html?file=files/download/manuals/current/ECS-EM-Series/janitza-bhb-ecsem-75mid-de-en.pdf>. Kasutatud: 17.05.2021

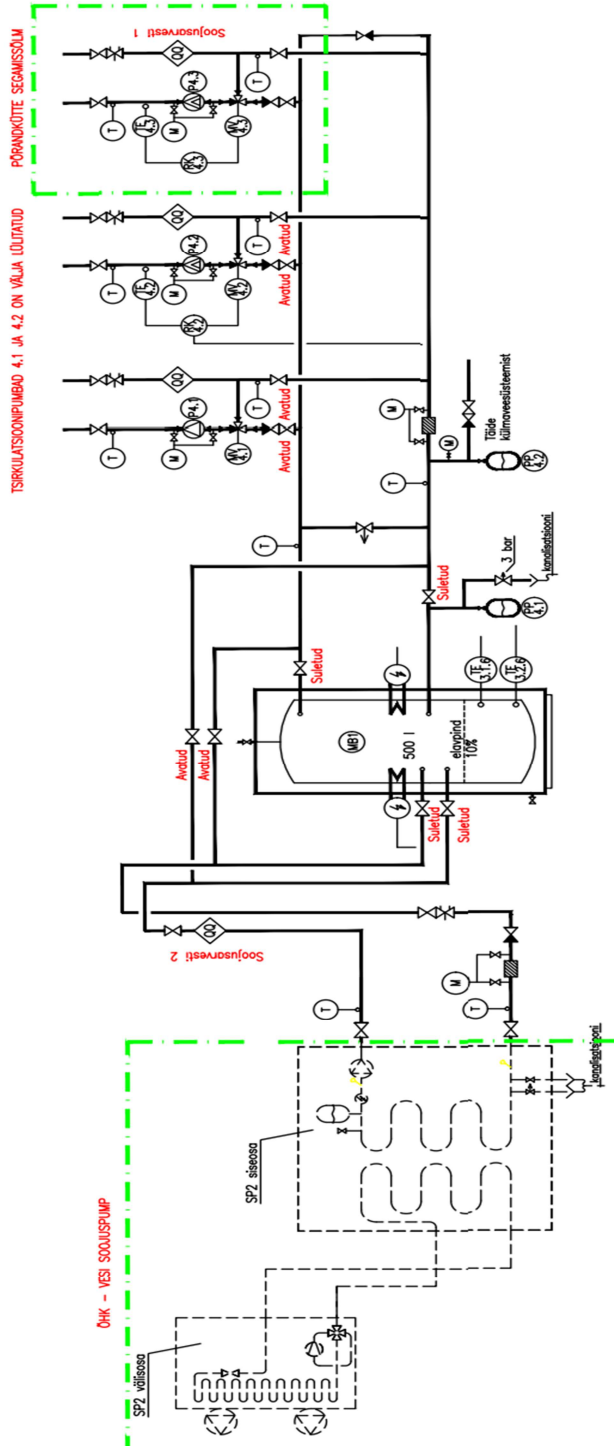
34. FLIR Systems, Inc kodulehekülg. Advanced Thermal Camera Flir E95. [Online].  
Loetud aadressil: <https://www.flir.com/products/e95/?model=78503-0301>.  
Kasutatud: 17.05.2021
35. Onset Computer Corporation kodulehekülg. Air/Water/Soil Temperature Sensor.  
[Online]. Loetud aadressil: <https://www.onsetcomp.com/products/sensors/tmcx-hd/?qt-mini-tabs=0>. Kasutatud: 17.05.2021
36. Brinck kodulehekülg. PolluStat E Installation and operating instructions. [Online].  
Loetud aadressil: <https://www.brinck.nl/producten?format=raw&task=download&fid=274>  
Kasutatud: 17.05.2021
37. Keison products kodulehekülg. Secondary standard pyranometers. [Online]. Loetud  
aadressil: <https://www.keison.co.uk/products/lstilastem/pyranometers.pdf>  
Kasutatud: 17.05.2021
38. LSI LASTEM s.r.l. kodulehekülg. Direct signal output. Thermohygrometer. [Online].  
Loetud aadressil: <https://www.lsi-lastem.com/PDF/MW9000/MW9000-ENG-05-Air-temperature-and-relative-humidity.pdf> Kasutatud: 17.05.2021
39. Onset Computer Corporation kodulehekülg. HOBO 4-Channel Analog Data Logger.  
[Online]. Loetud aadressil: <https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/ux120-006m/> Kasutatud: 17.05.2021
40. IDA Indoor Climate and Energy (version 4.8 SP2, Expert Edition, 2020). EQUA  
Simulation AB. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.equa.se/en/ida-ice>  
Kasutatud: 17.05.2021
41. T. M. Kull, K.-R. Penu, M. Thalfeldt ja J. Kurnitski, "Energy saving potential with  
smart thermostats in low-energy homes in cold climate," *E3S Web of Conferences*,  
vol. 172, p. 09009, 2020, doi: 10.1051/e3sconf/202017209009
42. M. Maivel, A. Ferrantelli ja J. Kurnitski, "Experimental determination of radiator,  
underfloor and air heating emission losses due to stratification and operative  
temperature variations," *Energy and Buildings*, vol. 166, pp. 220-228, 2020, doi:  
10.1016/j.enbuild.2018.01.061
43. T. Kalamees ja J. Kurnitski, "Estonian test reference year for energy calculations,"  
*Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Engineering*, vol. 12, no. 1, pp.  
40-58, 2006
44. Hoone energiatõhususe arvutamise meetoodika. *Riigi Teataja I*, 09.06.2015, 21.
45. Hoone energiatõhususe miinimumnõuded. Lisa 1 Ventilatsiooni välisõhu  
vooluhulgale ja energiaarvutuses kasutatavate ruumitemperatuuride  
seadeväärtustele kehtivad nõuded. *Riigi Teataja I*, 13.12.2018, 14.



46. T. M. Kull, M. Thalfeldt ja J. Kurnitski, "Optimal PI control parameters for accurate underfloor heating temperature control," *E3S Web of Conferences*, vol. 111, p. 01081, 2019, doi: 10.1051/e3sconf/201911101081

# LISAD

LISA 1 TalTech liginullenergia testhoone lihtsustatud soojussõlme skeem



TINGMÄRGID

MB	MAHTBOILER	STV	SOE TARBEVESI	☐	SOLENOIDVENTIIL	⊗	KAITSEKLAPP	⊕	TEMPERATUURANDUR
AK	AKUMULAATOR		ELEKTERKÜTTEKEHA	⊗	KUULKRAAN, SIIBER	⊕	AUTOMAATNE ÕHJERALDI	⊕	RÕHUANDUR
SV	SOOJUSVAHETI		SOOJUSMÕÕDUSÕLM	⊗	TAGASILÜÜGIKLAPP	⊕	TERMOMEETER		TSIRKULATSIOONPUMP
PP	PAISUPAAK		TERMOSTAATLINE AUTOMAATSEGISTI	⊗	TASKAALUSTUSVENTIIL	⊕	MANOMEETER		SUJUVALT REGULEERITAV TSIRKULATSIOONPUMP
KTV	KÜLM TARBEVESI		AJAMIGA VENTIIL	⊗	VÕRKFILTER	⊕	REGULEERIKESKUS		

## LISA 2 Simulatsioonides kasutatud „Graphical script“

```
(:UPDATE [@ :SYSTEM]
(DISCONNECT
(("sisekoridor" "Rtn_hot_FH_1") '(RTNHOTMERGE (INLET 8)))
(("sisekoridor" "Sup_hot_FH_1") '(SUPHOTSPLIT (OUTLET 8)))
(("Ruum 7" "Rtn_hot_FH_1") '(RTNHOTMERGE (INLET 7)))
(("Ruum 7" "Sup_hot_FH_1") '(SUPHOTSPLIT (OUTLET 7)))
(("Ruum 8" "Rtn_hot_FH_1") '(RTNHOTMERGE (INLET 6)))
(("Ruum 8" "Sup_hot_FH_1") '(SUPHOTSPLIT (OUTLET 6)))
(("Ruum 5" "Rtn_hot_FH_1") '(RTNHOTMERGE (INLET 5)))
(("Ruum 5" "Sup_hot_FH_1") '(SUPHOTSPLIT (OUTLET 5)))
(("Ruum 6" "Rtn_hot_FH_1") '(RTNHOTMERGE (INLET 4)))
(("Ruum 6" "Sup_hot_FH_1") '(SUPHOTSPLIT (OUTLET 4)))
(("Ruum 9" "Rtn_hot_FH_2") '(RTNHOTMERGE (INLET 3)))
(("Ruum 9" "Sup_hot_FH_2") '(SUPHOTSPLIT (OUTLET 3)))
(("Ruum 9" "Rtn_hot_FH_1") '(RTNHOTMERGE (INLET 2)))
(("Ruum 9" "Sup_hot_FH_1") '(SUPHOTSPLIT (OUTLET 2)))
(("tehniline ruum" "Rtn_hot_FH_1") '(RTNHOTMERGE (INLET 1)))
(("tehniline ruum" "Sup_hot_FH_1") '(SUPHOTSPLIT (OUTLET 1))))
(PRIM-MACRO :N PLANT)
(MACRO-OBJECT :N "Macro1")
(OUTPUT-FILE :N "OUTPUT-FILE"))
(CE-ZONE :N "tehniline ruum")
(MACRO-OBJECT :N "FH_hc-floor@FLOOR")
(DISCONNECT
("HcGate" '(CONTROL 1)) ("HotCtrl" OUTSIGNALLINK))
("HcGate" '(EXHAUST 1)) RTN_HOT)
("HcGate" '(SUPPLY 1)) SUP_HOT)
("HcFloor" OUTLET) ("HcGate" FROMDEV))
("HcFloor" INLET) ("HcGate" TODEV))
(:REMOVE "HcGate")
(:EO :SYMBOL '(:ICON "lib:bdfwall.ids") :N "Upper_layer")
((:EO :N "HcFloor")
(:VAR :N P :B (-1 OUTLET 0)))
(:EO :SYMBOL '(:ICON "lib:picontr.ids") :N "HotCtrl")
(CONNECTIONS
(("HcFloor" OUTLET) RTN_HOT 0 0 '(:AT ((444 230) (454 230) (454 275) (18
275)) :LINE-COLOR (:CALL PMT-COLOR [@ 1] [@ 2]) :LINE-STYLE 3))
(("HcFloor" INLET) SUP_HOT 0 0 '(:AT ((158 213) (88 213) (88 265) (18
265)) :LINE-COLOR (:CALL PMT-COLOR [@ 1] [@ 2]) :LINE-STYLE 3))))
(CE-ZONE :N "Ruum 9")
(MACRO-OBJECT :N "FH_hc-floor1@FLOOR")
(DISCONNECT
("HcGate" '(CONTROL 1)) ("HCctrl" "heatCtrlOut"))
("HcGate" '(EXHAUST 1)) RTN_HOT)
("HcGate" '(SUPPLY 1)) SUP_HOT)
("HcFloor" OUTLET) ("HcGate" FROMDEV))
("HcFloor" INLET) ("HcGate" TODEV))
(:REMOVE "HcGate")
(:EO :SYMBOL '(:ICON "lib:bdfwall.ids") :N "Upper_layer")
((:EO :N "HcFloor")
(:VAR :N P :B (-1 OUTLET 0)))
(CONNECTIONS
(("HcFloor" OUTLET) RTN_HOT 0 0 '(:AT ((444 230) (454 230) (454 275) (18
275)) :LINE-COLOR (:CALL PMT-COLOR [@ 1] [@ 2]) :LINE-STYLE 3))
(("HcFloor" INLET) SUP_HOT 0 0 '(:AT ((158 213) (88 213) (88 265) (18
265)) :LINE-COLOR (:CALL PMT-COLOR [@ 1] [@ 2]) :LINE-STYLE 3))))
(MACRO-OBJECT :N "FH_hc-floor@FLOOR")
(DISCONNECT
```

```

(("HcGate" '(CONTROL 1)) ("HCctrl" "heatCtrlOut"))
(("HcGate" '(EXHAUST 1)) RTN_HOT)
(("HcGate" '(SUPPLY 1)) SUP_HOT)
(("HcFloor" OUTLET) ("HcGate" FROMDEV))
(("HcFloor" INLET) ("HcGate" TODEV))
(:REMOVE "HcGate")
(:EO :SYMBOL '(:ICON "lib:bdfwall.ids") :N "Upper_layer")
(:EO :N "HcFloor")
(:VAR :N P :B (-1 OUTLET 0))
(CONNECTIONS
(("HcFloor" OUTLET) RTN_HOT 0 0 '(:AT ((444 230) (454 230) (454 275) (18
275)) :LINE-COLOR (:CALL PMT-COLOR [@ 1] [@ 2]) :LINE-STYLE 3))
(("HcFloor" INLET) SUP_HOT 0 0 '(:AT ((158 213) (88 213) (88 265) (18
265)) :LINE-COLOR (:CALL PMT-COLOR [@ 1] [@ 2]) :LINE-STYLE 3))))
(CE-ZONE :N "Ruum 6")
(MACRO-OBJECT :N "FH_hc-floor@FLOOR")
(DISCONNECT
(("HcGate" '(CONTROL 1)) ("HCctrl" "heatCtrlOut"))
(("HcGate" '(EXHAUST 1)) RTN_HOT)
(("HcGate" '(SUPPLY 1)) SUP_HOT)
(("HcFloor" OUTLET) ("HcGate" FROMDEV))
(("HcFloor" INLET) ("HcGate" TODEV))
(:REMOVE "HcGate")
(:EO :SYMBOL '(:ICON "lib:bdfwall.ids") :N "Upper_layer")
(:EO :N "HcFloor")
(:VAR :N P :B (-1 OUTLET 0))
(CONNECTIONS
(("HcFloor" OUTLET) RTN_HOT 0 0 '(:AT ((444 230) (454 230) (454 275) (18
275)) :LINE-COLOR (:CALL PMT-COLOR [@ 1] [@ 2]) :LINE-STYLE 3))
(("HcFloor" INLET) SUP_HOT 0 0 '(:AT ((158 213) (88 213) (88 265) (18
265)) :LINE-COLOR (:CALL PMT-COLOR [@ 1] [@ 2]) :LINE-STYLE 3))))
(CE-ZONE :N "Ruum 5")
(MACRO-OBJECT :N "FH_hc-floor@FLOOR")
(DISCONNECT
(("HcGate" '(CONTROL 1)) ("HotCtrl" OUTSIGNALLINK))
(("HcGate" '(EXHAUST 1)) RTN_HOT)
(("HcGate" '(SUPPLY 1)) SUP_HOT)
(("HcFloor" OUTLET) ("HcGate" FROMDEV))
(("HcFloor" INLET) ("HcGate" TODEV))
(:REMOVE "HcGate")
(:EO :SYMBOL '(:ICON "lib:bdfwall.ids") :N "Upper_layer")
(:EO :N "HcFloor")
(:VAR :N P :B (-1 OUTLET 0))
(:EO :SYMBOL '(:ICON "lib:picontr.ids") :N "HotCtrl")
(CONNECTIONS
(("HcFloor" OUTLET) RTN_HOT 0 0 '(:AT ((444 230) (454 230) (454 275) (18
275)) :LINE-COLOR (:CALL PMT-COLOR [@ 1] [@ 2]) :LINE-STYLE 3))
(("HcFloor" INLET) SUP_HOT 0 0 '(:AT ((158 213) (88 213) (88 265) (18
265)) :LINE-COLOR (:CALL PMT-COLOR [@ 1] [@ 2]) :LINE-STYLE 3))))
(CE-ZONE :N "Ruum 8")
(MACRO-OBJECT :N "FH_hc-floor@FLOOR")
(DISCONNECT
(("HcGate" '(CONTROL 1)) ("HotCtrl" OUTSIGNALLINK))
(("HcGate" '(EXHAUST 1)) RTN_HOT)
(("HcGate" '(SUPPLY 1)) SUP_HOT)
(("HcFloor" OUTLET) ("HcGate" FROMDEV))
(("HcFloor" INLET) ("HcGate" TODEV))
(:REMOVE "HcGate")
(:EO :SYMBOL '(:ICON "lib:bdfwall.ids") :N "Upper_layer")
(:EO :N "HcFloor")
(:VAR :N P :B (-1 OUTLET 0))

```

```

(:EO :SYMBOL '(:ICON "lib:picontr.ids") :N "HotCtrl")
(CONNECTIONS
(("HcFloor" OUTLET) RTN_HOT 0 0 '(:AT ((444 230) (454 230) (454 275) (18
275)) :LINE-COLOR (:CALL PMT-COLOR [@ 1] [@ 2]) :LINE-STYLE 3))
(("HcFloor" INLET) SUP_HOT 0 0 '(:AT ((158 213) (88 213) (88 265) (18
265)) :LINE-COLOR (:CALL PMT-COLOR [@ 1] [@ 2]) :LINE-STYLE 3))))
(CE-ZONE :N "Ruum 7")
(MACRO-OBJECT :N "FH_hc-floor@FLOOR")
(DISCONNECT
(("HcGate" '(CONTROL 1)) ("HotCtrl" OUTSIGNALLINK))
(("HcGate" '(EXHAUST 1)) RTN_HOT)
(("HcGate" '(SUPPLY 1)) SUP_HOT)
(("HcFloor" OUTLET) ("HcGate" FROMDEV))
(("HcFloor" INLET) ("HcGate" TODEV))
(:REMOVE "HcGate")
(:EO :SYMBOL '(:ICON "lib:bdfwall.ids") :N "Upper_layer")
(:EO :N "HcFloor")
(:VAR :N P :B (-1 OUTLET 0)))
(:EO :SYMBOL '(:ICON "lib:picontr.ids") :N "HotCtrl")
(CONNECTIONS
(("HcFloor" OUTLET) RTN_HOT 0 0 '(:AT ((444 230) (454 230) (454 275) (18
275)) :LINE-COLOR (:CALL PMT-COLOR [@ 1] [@ 2]) :LINE-STYLE 3))
(("HcFloor" INLET) SUP_HOT 0 0 '(:AT ((158 213) (88 213) (88 265) (18
265)) :LINE-COLOR (:CALL PMT-COLOR [@ 1] [@ 2]) :LINE-STYLE 3))))
(CE-ZONE :N "sisekoridor")
(MACRO-OBJECT :N "FH_hc-floor@FLOOR")
(DISCONNECT
(("HcGate" '(CONTROL 1)) ("HotCtrl" OUTSIGNALLINK))
(("HcGate" '(EXHAUST 1)) RTN_HOT)
(("HcGate" '(SUPPLY 1)) SUP_HOT)
(("HcFloor" OUTLET) ("HcGate" FROMDEV))
(("HcFloor" INLET) ("HcGate" TODEV))
(:REMOVE "HcGate")
(:EO :SYMBOL '(:ICON "lib:bdfwall.ids") :N "Upper_layer")
(:EO :N "HcFloor")
(:VAR :N P :B (-1 OUTLET 0)))
(:EO :SYMBOL '(:ICON "lib:picontr.ids") :N "HotCtrl")
(CONNECTIONS
(("HcFloor" OUTLET) RTN_HOT 0 0 '(:AT ((444 230) (454 230) (454 275) (18
275)) :LINE-COLOR (:CALL PMT-COLOR [@ 1] [@ 2]) :LINE-STYLE 3))
(("HcFloor" INLET) SUP_HOT 0 0 '(:AT ((158 213) (88 213) (88 265) (18
265)) :LINE-COLOR (:CALL PMT-COLOR [@ 1] [@ 2]) :LINE-STYLE 3))))
(OUTPUT-FILE :N "RUUMITEMP")
(:EO :N SUPHOTSPLIT)
(:VAR :N MOUT :B #S(MS-SPARSE DEFAULT-VALUE NIL DIMENSION 1 VALUE ((1 -2
(OUTLET 1) 1) (2 -2 (OUTLET 2) 1) (3 -2 (OUTLET 3) 1) (4 -2 (OUTLET 4) 1)
(5 -2 (OUTLET 5) 1) (6 -2 (OUTLET 6) 1) (7 -2 (OUTLET 7) 1) (8 -2 (OUTLET
8) 1))))))
(:EO :N RTNHOTMERGE)
(:VAR :N M_IN :B #S(MS-SPARSE DEFAULT-VALUE NIL DIMENSION 1 VALUE ((1 -2
(INLET 1) 1) (3 -2 (INLET 3) 1) (2 -2 (INLET 2) 1) (4 -2 (INLET 4) 1) (5
-2 (INLET 5) 1) (6 -2 (INLET 6) 1) (7 -2 (INLET 7) 1) (8 -2 (INLET 8)
1))))))
(:VAR :N T :B #S(MS-SPARSE DEFAULT-VALUE NIL DIMENSION 1 VALUE ((1 -2
(INLET 1) 2) (2 -2 (INLET 2) 2) (3 -2 (INLET 3) 2) (4 -2 (INLET 4) 2) (5
-2 (INLET 5) 2) (6 -2 (INLET 6) 2) (7 -2 (INLET 7) 2) (8 -2 (INLET 8)
2))))))
(:CEO :SYMBOL '(:AT ((28.0 493.0))) :N EMETERLOCCOOL)
(:CEO :SYMBOL '(:AT ((56.0 493.0))) :N EMETERLOCHEAT)
(:CEO :SYMBOL '(:AT ((28.0 533.0))) :N EMETERCENTCOOL)
(:CEO :SYMBOL '(:AT ((56.0 533.0))) :N EMETERCENTHEAT)

```

```

(SCHEDULE :SYMBOL '(:AT ((36.0 607.0))) :N "Schedule_1")
(:CEO :SYMBOL '(:AT ((84.0 493.0))) :N EMETER_TOTWORKHOUR)
(:CEO :SYMBOL '(:AT ((112.0 493.0))) :N EMETER_LOSTWORKHOUR)
(CONNECTIONS
(' (RTNHOTMERGE (INLET 8)) (' (:LIB WATPLUG) OUTLET) 2 2 NIL)
(' (RTNHOTMERGE (INLET 7)) (' (:LIB WATPLUG) OUTLET) 2 2 NIL)
(' (RTNHOTMERGE (INLET 6)) (' (:LIB WATPLUG) OUTLET) 2 2 NIL)
(' (RTNHOTMERGE (INLET 5)) (' (:LIB WATPLUG) OUTLET) 2 2 NIL)
(' (RTNHOTMERGE (INLET 4)) (' (:LIB WATPLUG) OUTLET) 2 2 NIL)
(' (RTNHOTMERGE (INLET 3)) (' (:LIB WATPLUG) OUTLET) 2 2 NIL)
(' (RTNHOTMERGE (INLET 2)) (' (:LIB WATPLUG) OUTLET) 2 2 NIL)
(' (RTNHOTMERGE (INLET 1)) (' (:LIB WATPLUG) OUTLET) 2 2 NIL)
(' (SUPHOTSPLIT (OUTLET 8)) (' (:LIB WATPLUG) INLET) 2 2 NIL)
(' (SUPHOTSPLIT (OUTLET 7)) (' (:LIB WATPLUG) INLET) 2 2 NIL)
(' (SUPHOTSPLIT (OUTLET 6)) (' (:LIB WATPLUG) INLET) 2 2 NIL)
(' (SUPHOTSPLIT (OUTLET 5)) (' (:LIB WATPLUG) INLET) 2 2 NIL)
(' (SUPHOTSPLIT (OUTLET 4)) (' (:LIB WATPLUG) INLET) 2 2 NIL)
(' (SUPHOTSPLIT (OUTLET 3)) (' (:LIB WATPLUG) INLET) 2 2 NIL)
(' (SUPHOTSPLIT (OUTLET 2)) (' (:LIB WATPLUG) INLET) 2 2 NIL)
(' (SUPHOTSPLIT (OUTLET 1)) (' (:LIB WATPLUG) INLET) 2 2 NIL)
(("sisekoridor" "Rtn_hot_FH_1") '(PLANT "Vahek_ret") 0 0 '(:AT ((290 569)
(18 569) (18 265)) :LINE-COLOR (:CALL PMT-COLOR [@ 1] [@ 2]) :LINE-STYLE
3 :DIR :LEFT :ARROW (4864 8 8)))
(("Ruum 7" "Rtn_hot_FH_1") '(PLANT "R7_ret") 0 0 '(:AT ((290 513) (33
513) (33 265)) :LINE-COLOR (:CALL PMT-COLOR [@ 1] [@ 2]) :LINE-STYLE 3
:DIR :LEFT :ARROW (4864 8 8)))
(("Ruum 8" "Rtn_hot_FH_1") '(PLANT "R8_ret") 0 0 '(:AT ((290 464) (51
464) (51 265)) :LINE-COLOR (:CALL PMT-COLOR [@ 1] [@ 2]) :LINE-STYLE 3
:DIR :LEFT :ARROW (4864 8 8)))
(("Ruum 5" "Rtn_hot_FH_1") '(PLANT "R5_ret") 0 0 '(:AT ((290 414) (68
414) (68 265)) :LINE-COLOR (:CALL PMT-COLOR [@ 1] [@ 2]) :LINE-STYLE 3
:DIR :LEFT :ARROW (4864 8 8)))
(("Ruum 6" "Rtn_hot_FH_1") '(PLANT "R6_ret") 0 0 '(:AT ((290 363) (94
363) (94 265)) :LINE-COLOR (:CALL PMT-COLOR [@ 1] [@ 2]) :LINE-STYLE 3
:DIR :LEFT :ARROW (4864 8 8)))
(("Ruum 9" "Rtn_hot_FH_2") '(PLANT "R9_ret2") 0 0 '(:AT ((290 297) (200
297) (200 254) (110 254)) :LINE-COLOR (:CALL PMT-COLOR [@ 1] [@ 2])
:LINE-STYLE 3 :DIR :LEFT :ARROW (4864 8 8)))
(("Ruum 9" "Rtn_hot_FH_1") '(PLANT "R9_ret1") 0 0 '(:AT ((290 316) (200
316) (200 261) (110 261)) :LINE-COLOR (:CALL PMT-COLOR [@ 1] [@ 2])
:LINE-STYLE 3 :DIR :LEFT :ARROW (4864 8 8)))
(("tehniline ruum" "Rtn_hot_FH_1") '(PLANT "Tehruum_ret") 0 0 '(:AT ((290
212) (99 212) (99 225)) :LINE-COLOR (:CALL PMT-COLOR [@ 1] [@ 2]) :LINE-
STYLE 3 :DIR :LEFT :ARROW (4864 8 8)))
('(PLANT "R9_sup2") ("Ruum 9" "Sup_hot_FH_2") 0 0 '(:AT ((110 252) (200
252) (200 311) (290 311)) :LINE-COLOR (:CALL PMT-COLOR [@ 1] [@ 2])
:LINE-STYLE 3))
('(PLANT "R9_sup1") ("Ruum 9" "Sup_hot_FH_1") 0 0 '(:AT ((110 252) (200
252) (200 305) (290 305)) :LINE-COLOR (:CALL PMT-COLOR [@ 1] [@ 2])
:LINE-STYLE 3))
('(PLANT "R8_sup") ("Ruum 8" "Sup_hot_FH_1") 0 0 '(:AT ((60 265) (60 445)
(290 445)) :LINE-COLOR (:CALL PMT-COLOR [@ 1] [@ 2]) :LINE-STYLE 3))
('(PLANT "R7_sup") ("Ruum 7" "Sup_hot_FH_1") 0 0 '(:AT ((41 265) (41 498)
(290 498)) :LINE-COLOR (:CALL PMT-COLOR [@ 1] [@ 2]) :LINE-STYLE 3))
('(PLANT "R6_sup") ("Ruum 6" "Sup_hot_FH_1") 0 0 '(:AT ((100 265) (100
343) (290 343)) :LINE-COLOR (:CALL PMT-COLOR [@ 1] [@ 2]) :LINE-STYLE 3))
('(PLANT "R5_sup") ("Ruum 5" "Sup_hot_FH_1") 0 0 '(:AT ((81 265) (81 396)
(290 396)) :LINE-COLOR (:CALL PMT-COLOR [@ 1] [@ 2]) :LINE-STYLE 3))
('(PLANT "Tehruum_sup") ("tehniline ruum" "Sup_hot_FH_1") 0 0 '(:AT ((84
225) (84 196) (290 196)) :LINE-COLOR (:CALL PMT-COLOR [@ 1] [@ 2]) :LINE-
STYLE 3))

```

```
(' (PLANT "Vahek_sup") ("sisekoridor" "Sup_hot_FH_1") 0 0 ' (:AT ((28 265)
(28 549) (290 549)) :LINE-COLOR (:CALL PMT-COLOR [@ 1] [@ 2]) :LINE-STYLE
3))))
```