



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND  
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**ÕHUTEMPERATUURI ALANDAMISEGA  
RADIAATORKÜTTE  
ENERGIASÄÄSTUPOTENTSIAALI HINDAMINE**

**ASSESSMENT OF ENERGY SAVINGS POTENTIAL WITH  
SETBACK HEATING FOR RADIATORS**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Karl-Rihard Penu

Üliõpilaskood EAKI153926

Juhendaja: Tuule Mall Kull, noorem teadur

Tallinn 2020

# AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

25. mai 2020

Autor: Karl-Rihard Penu

*/ allkirjastatud digitaalselt /*

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

25. mai 2020

Juhendaja: Tuule Mall Kull

*/ allkirjastatud digitaalselt /*

Kaitsmisele lubatud

"....." .....202... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

*/ nimi ja allkiri /*

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

Mina, Karl-Rihard Penu (sünnikuupäev: 28.11.1995)

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

Õhutemperatuuri alandamisega radiaatorkütte energiasäästupotentsiaali hindamine,

*(lõputöö pealkiri)*

mille juhendaja on

Tuule Mall Kull,

*(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 /*

25. mai 2020

# Ehituse ja arhitektuuri instituut

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Karl-Rihard Penu, 153926EAKI (nimi, üliõpilaskood)  
Õppekava, peeriala: EAKI02/15 – Hoonete sisekliima ja veetehnika (kood ja nimetus)  
**Juhendaja(d):** Nooremteadur, Tuule Mall Kull (amet, nimi)  
**Konsultant:** ..... (nimi, amet)  
..... (ettevõtte, telefon, e-post)

### Lõputöö teema:

(eesti keeles) Õhutemperatuuri alandamisega radiaatorkütte energiasäästupotentsiaali hindamine

(inglise keeles) Assessment of Energy Savings Potential with Setback Heating for Radiators

### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Viia läbi temperatuurialandamise mõõtmised Taltech liginullenergia testhoones, et saada vajalikud andmed hoonemudeli kalibreerimiseks.
2. Hoonemudeli kalibreerimine aastaste energiasimulatsioonide läbiviimiseks.
3. Potentsiaalse energiasäästu hindamine ja analüüs vastavalt aastaste simulatsioonide andmetele kalibreeritud mudeliga.

### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjanduse ülevaate koostamine	10.12.2019
2.	Mõõtmiste plaani koostamine ja mõõtmiste ettevalmistused	06.01.2020
3.	Mõõtmiste teostamine	03.02.2020
4.	Mõõtmistulemuste analüüs ja simulatsioonimudeli kalibreerimine	20.02.2020
5.	Sissejuhatuse ja metodika osa esitamine	17.04.2020
5.	Simulatsioonide teostamine	28.04.2020
6.	Andmeanalüüs; jooniste ja tabelite vormistamine	03.05.2020
7.	Lõputöö kirjutamine ja vormistamine	15.05.2020

**Töö keel:** eesti keel

**Lõputöö esitamise tähtaeg:** 25. mai 2020. a

**Üliõpilane:** Karl-Rihard Penu

25. mai 2020. a

*/ allkirjastatud digitaalselt /*

**Juhendaja:** Tuule Mall Kull

25. mai 2020. a

*/ allkirjastatud digitaalselt /*

**Konsultant:** .....

..... "....." .....202....a

*/allkiri/*

**Programmijuht:** .....

..... "....." .....202....a

*/allkiri/*

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

# SISUKORD

EESSÕNA.....	7
Lühendite ja tähiste loetelu.....	8
SISSEJUHATUS.....	9
1. VALDKONNA ÜLEVAADE .....	10
1.1 Sisekliima.....	10
1.1.1 Sisekliima klassid ja piirväärtused .....	10
1.2 Hoone soojuslik tasakaal .....	12
1.2.1 Vabasoojus.....	12
1.2.2 Soojuskaod .....	13
1.2.3 Soojusmahtuvus .....	14
1.3 Eramu soojusvarustus.....	15
1.3.1 Soojusallikad .....	15
1.3.2 Ruumide küte .....	16
1.3.3 Soojusülekande reguleerimine .....	17
2. KIRJANDUSE ÜLEVAADE.....	21
3. MEETODID .....	24
3.1 Uuritav hoone .....	24
3.1.1 Küttesüsteem .....	25
3.2 Eksperimendi püstitus.....	25
3.2.1 Olemasoleva süsteemi seadistus .....	25
3.2.2 Kasutusprofiilid .....	27
3.3 Mõõtmised.....	28
3.3.1 Mõõteseadmed .....	32
3.4 Simulatsioonid .....	33
4. MUDELI KALIBREERIMINE .....	36
5. ENERGIASÄÄSTUPOTENTSIAALI HINDAMINE .....	40
5.1 Temperatuurialandamise graafikud .....	40
5.2 Terviklik ja osaline temperatuurialandamine .....	41
5.3 Temperatuurilanguse mõju energiasäästule .....	42
5.4 Soojusmahtuvuse mõju energiasäästule.....	45
5.5 Ventilatsiooni mõju energiasäästule.....	46
KOKKUVÕTE .....	49
SUMMARY .....	52
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	55
LISAD .....	59

## **EESSÕNA**

Käesoleva magistritöö lähteülesande idee andis Eesti Energia AS, kes soovis uurida, kas temperatuurialandamisega kütmisel on võimalik saavutada kokku hoida kuludelt kütteenergiale. Antud idee ajel viidi läbi mõõtmised Tallinnas, Taltech'i liginullenergia testhoones, kus katsetati temperatuurialandamisega kütmist. Mõõtmistulemuste põhjal kalibreeriti hiljem sama hoone mudel aastaste simulatsioonide tegemiseks. Mõõtmistulemuste kogumisel oli suunitluste andmisel abiks nooremteadur Tuule Mall Kull ning hiljem hoone mudeli kalibreerimisel aitas IDA ICE programmi spetsiifiliste teadmistega doktorant-nooremteadur Karl-Villem Võsa. Autor tänab omalt poolt Eesti Energias vajalike nutipistikute ja -termostaatidega varustamise eest ja kõiki abilisi.

Peale mudeli kalibreerimist viidi läbi aastased simulatsioonid, mille eesmärk oli leida erinevate parameetrite mõju kütteenergia kulule. Energiasäästupotentsiaali hindamise peatükis analüüsiti erinevate temperatuurialandamise graafikute, temperatuurilanguste suuruste, hoone massiivsuse ja ventilatsiooni õhuvooluhulkade mõju kütteenergia kulule. Antud magistritöö mõningad võtmesõnad oleksid: temperatuurialandamisega kütmine, energiasääst, nutitermostaat, radiaatori juhtimine ja IDA ICE.

## Lühendite ja tähiste loetelu

$c$	massierisoojus	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
$\Delta t_{a,v}$	vertikaalne temperatuurigradient	$^{\circ}\text{C}$
$\Delta t_{\ln}$	temperatuuride logaritmiline vahe	$^{\circ}\text{C}$
$\eta$	parandustegur	-
$\Phi$	soojuslik võimsus	W
$\Phi_{\text{ük},i}$	üleskütmise võimsus perioodilisel kütmisel	W
$H_{T,ie}$	ruumi (i) soojuserikaod läbi välispiirdetaarindite	W/K
$H_{T,ij}$	soojuserikaod madalama temperatuuriga ruumi	W/K
$H_{T,ipõr}$	põranda soojuserikadu	W/K
$H_{T,iu}$	ruumi (i) soojuserikaod läbi kütmata ruumide	W/K
$H_{V,i}$	ruumi (i) ventilatsiooni soojuserikadu	W/K
K	soojuseriväljastus	W/K
KHG	kasvuhoonegaasid	
n	küttekeha iseloomustav eksponenttegur	-
PMV	(ingl) <i>Predicted Mean Vote</i> = tõenäosuslik soojusliku mugavustunde hinnang	-
PPD	(ingl) <i>Predicted Percentage Dissatisfied</i> = tõenäosuslikult soojuslikku ebamugavustunnet tundvate inimeste osakaal	%
$\tau$	ajakonstant	h
TalTech	Tallinna Tehnikaülikool	
$t_{s,pv}$	soojuskandja pealevoolu temperatuur	$^{\circ}\text{C}$
$t_{s,tv}$	soojuskandja tagasivoolu temperatuur	$^{\circ}\text{C}$
$t_{v\check{o}}$	välisõhu temperatuur	$^{\circ}\text{C}$
$t_{v\check{o},arv}$	välisõhu arvutuslik temperatuur	$^{\circ}\text{C}$
$t_{\check{o}}$	õhutemperatuur	$^{\circ}\text{C}$
$t_{\check{o},arv,i}$	siseõhu arvutuslik temperatuur ruumis (i)	$^{\circ}\text{C}$
$t_1$	esialgne temperatuur	$^{\circ}\text{C}$
$t_2$	hilisem temperatuur	$^{\circ}\text{C}$



## SISSEJUHATUS

Kasvuhoonegaaside (KHG) eraldumise piiramine on üks peamisi kliimasoojenemise peatamise meetodeid. Selleks, et KHG eraldumist vähendada on võimalus elamuid ehitada ja renoveerida energiatõhusamateks. Vastavalt Kyoto protokollile on Eesti Valitsus nõustunud strateegiaga vähendada KHG emissioone 80% aastaks 2050 võrreldes emissioonidega aastal 1990 [1]. Hoonete energiatõhususe parandamiseks levinud meetmed on näiteks efektiivsemate kütteseadmete kasutamine, hoone täiendav soojustamine või akende vahetamine. Lisaks nendele on olemasolevate elamute kütteenergia tarbimist võimalik vähendada temperatuurialandamisega kütmisega [2, 3, 4], mis omakorda vähendab KHG emissioone.

Temperatuurialandamisega kütmist on varasemalt põgusalt uuritud nii simulatsiooni kui ka reaalseste mõõtmiste põhjal, aga keskendutud on üksikule ruumile [2, 4]. Samuti on käsitletud erinevate temperatuurialandamise graafikute kasutamist ning hinnatud, kui kiiresti erinevate hoonetüüpide puhul võtab aega ruumide jahtumine ja üleskütmine [5, 6, 7, 3]. Põhjalikumad uuringud, mis käsitleks terve hoone temperatuurialandamisega kütmist analüüsides erinevate temperatuurialandamise graafikute mõju energiasäästule ja seda Eestiga sarnases kliimas autori andmetel puuduvad.

Sellest tulenevalt võeti eesmärgiks läbi viia simulatsioonidel põhinev uuring temperatuurialandamisega kütmise võimaliku energiasäästu leidmiseks. Adekvaatsete tulemuste saamiseks viidi läbi mõõtmised Tallinna Tehnikaülikooli liginullenergia testhoone ühes ruumis. Saadud mõõtmistulemuste põhjal kalibreeriti IDA ICE simulatsioonitarkvaras mudel, et viimase tulemused kattuksid reaalse olukorraga. Seejärel tekkis võimalus laiendada temperatuurialandamisega kütmise simuleerimist tervele hoonele, kasutades erinevaid temperatuurialandamise graafikuid, eri ruumides ja eri aegadel.

Käesoleva magistritöö tulemusena selgub, kui palju on võimalik saavutada säästu kütteenergialt, kui kasutada temperatuurialandamisega kütmist. Töö käigus analüüsitakse erinevate temperatuurialandamise graafikute, hoone tervikliku ja osalise temperatuurialandamise ning hoone massiivsuse ja ventilatsiooni mõju energiasäästule. Tulemused on avaldamisel ka teadusartiklis.

# 1. VALDKONNA ÜLEVAADE

## 1.1 Sisekliima

Inimesed veedavad oma elust ligi 90% siseruumides ning sisekliima kvaliteet saab aina olulisemaks osaks meie hea tervise tagamisel [8]. Head sisekliima kvaliteeti seostatakse kõrge produktiivsuse ja pikema elueaga [9, 10]. Selleks, et head sisekliimat hoonetes tagada rajatakse ventilatsiooni-, kütte- ja jahutussüsteeme, mille abil saab võimalikult täpselt hoida inimestele sobivadi sisekliima parameetreid. Head sisekliimat iseloomustavad soojuslik mugavus, valgustatus, akustika ja õhu kvaliteet [11].

### 1.1.1 Sisekliima klassid ja piirväärtused

Hoone sisekliima tagamisel tuleb lähtuda standardi EVS-EN 16798-1:2019 poolt ette antud väärtustest, kus on piiritletud sobiv siseõhu temperatuur, õhu liikumise kiirus ja müratase. Sisekliima soovituslikud parameetrid on omakorda jaotatud kolme klassi. Eluhoonete sisekliima soovituslikud parameetrid on toodud Tabelis 1.2 [12].

Tabel 1.1 Eluhoonete soovituslikud sisekliima parameetrid vastavalt sisekliima klassile [12]

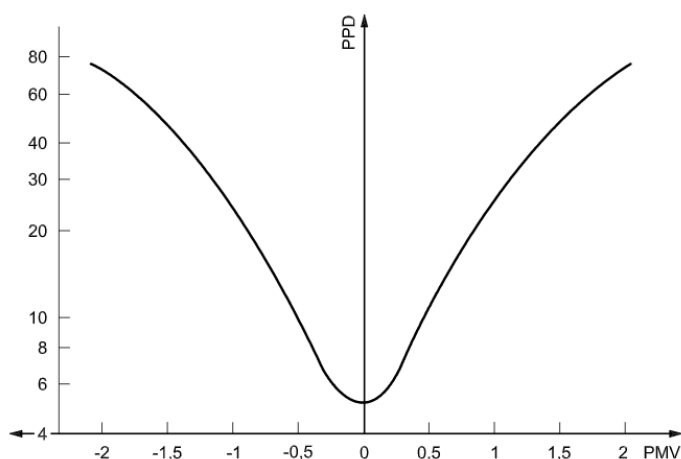
Parameeter	Sisekliima klass		
	I	II	III
Proгноositud rahulolematuse protsent, % (PPD)	< 6	< 10	< 15
Proгноositud keskmine soojustunnetus (PMV)	-0.2 < PMV < +0.2	-0.5 < PMV < +0.5	-0.7 < PMV < +0.7
Eluruumide (magamistoad, elutoad jne) temperatuurid, °C	21...25.5	20...26	18...27
Teiste ruumide (köögid, hoidlad jne) temperatuurid, °C	18...	17...	14...
CO2 kontsentratsioon üle välise kontsentratsiooni, ppm	550	800	1350
Ventilatsiooni õhuvooluhulk ühe inimese kohta, l/s	10	7	4

Olenemata sellest, et on ette antud vahemikud, mille piiresse peaks hea sisekliima parameetrid jääma on sisekliima tunnetus igal inimesel erinev. Reeglina ei ole võimalik, et kõigile ruumis viibijatele sama sisekliima 100% sobib. Selleks, et hinnata inimeste sisekliima tunnetust on professor Fanger välja töötanud järgmised seosed: tõenäosuslik soojusliku mugavustunde hinnang (PMV indeks) ja tõenäosuslikult soojuslikku

ebamugavustunnet tundvate inimeste osakaal (PPD indeks). PMV indeksi järgi määravad inimesed, kuidas nad ennast ruumis soojusliku mugavuse seisukohast tunnevad. Kui ruumis viibijal on jahe, siis valib -1, kui natuke palav, siis +1 jne (Tabel 1.3). PPD indeks on määratav PMV indeksi kaudu (Joonis 1.2) ning selle põhjal saame eeldada, kui suurele osale ruumis viibijatest ei ole sisekliima meelepärane [13].

Tabel 1.2 PMV indeksi 7-punkti skaala, EVS-EN ISO 7730:2006 põhjal [13]

+3	Kuum
+2	Soe
+1	Kergelt soe
0	Mugav
-1	Kergelt jahe
-2	Jahe
-3	Külm



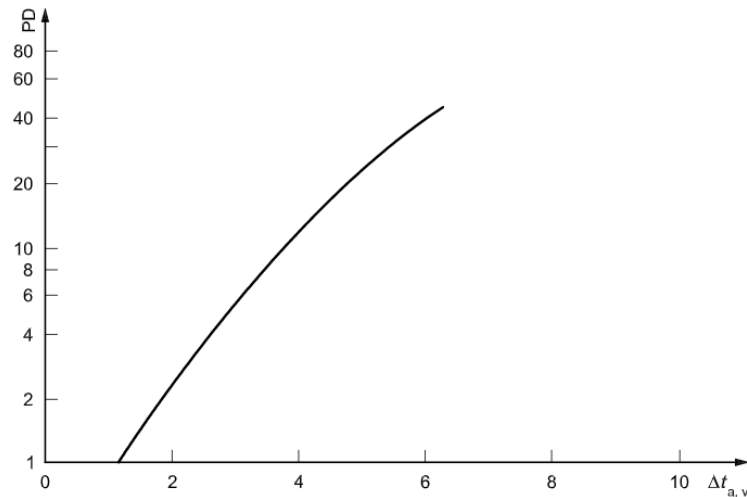
Joonis 1.1 PPD indeksi funktsioon PMV indeksi suhtes [13]

Mugavustunnet ruumis mõjutab ka see, milline on küttekehade domineeriv soojusülekanne viis. Soovitav on eelistada suurema soojuskiirguse osakaaluga küttekehasid, sest need tagavad ruumis kõige ühtlasema temperatuurijaotuse [14, lk 94]. Suur temperatuuride erinevus inimese pea ja jalgade vahel põhjustab ebamugavustunnet [13, lk 6]. Rahulolematute inimeste osakaal on võimalik välja arvutada valemiga (1) ning leitav ka rahulolematut osakaalu funktsioonist vertikaalse temperatuurierinevuse suhtes (Joonis 1.2) [13, lk 6-7].

$$PD = \frac{100}{1 + \exp(5,76 - 0,856 \cdot \Delta t_{a,v})} \quad (1.1)$$

Kus  $PD$  – rahulolematute inimeste osakaal, %,

$\Delta t_{a,v}$  – vertikaalne temperatuurigradient pea ja jalgade vahel, °C.



Joonis 1.2 Ebamugavustunne põhjustatud vertikaalsest temperatuurigradiendist [13, lk 7]

## 1.2 Hoone soojuslik tasakaal

Hea sisekliima tagamiseks tuleb hoonetes saavutada soojuslik tasakaal olenemata sisestest ja välistest mõjudest. Väliste mõjude alla saab liigitada tuule, välisõhu temperatuuri, päikesekiirguse jne. Neid mõjusid meil ei ole võimalik kontrollida. Selleks, et sõltumata välistest mõjutustest tagada hoones sees soojuslik tasakaal rajatakse kütte- jahutuse- ja ventilatsioonisüsteeme. Küttesüsteemid katavad soojuskadudest tekkiva küttevajaduse, jahutussüsteemid katavad vabasoojustest tuleneva jahutuskoormuse ning ventilatsioonisüsteemidega tagatakse õhu puhtus ruumides.

### 1.2.1 Vabasoojus

Vabasoojuseks nimetatakse ruumis inimeste, valgustite, elektriseadmete poolt eraldatud soojust ja ruumi sisenevat päikeseenergiat. Vabasoojuse võrra peab ruume vähem kütma, see tähendab, et näiliselt on see osa soojusest „vabalt“ käes, ning suvisel perioodil ka jahutama [15]. Vabasoojust ruumis arvestatakse olemasolevas hoones vastavalt reaalsele andmetele: valgustite võimsused, inimeste arv, seadmete arv ja võimsus. Uut hoonet planeerides ei ole sellised andmed teada ning siis lähtutakse määrusest „Hoonete energiatõhususe arvutamise metoodika“ võetud väärtustega (Tabel 1.3). Toodud konstantsed võimsused korrutatakse läbi kasutusastmega, et saada vastavalt kasutusprofiilidele võimalikult tõesed tulemused vabasoojuste hindamiseks. Päikesekiirgusest tulenevat vabasoojust arvestatakse simulatsioonides olemasolevate või mõõdetud kliimaandmete põhjal.

Tabel 1.3 Hoone tüüpiline kasutus ja sellele vastav suurim vabasoojus koetava pinna ruutmeetri kohta [16]

Hoone kasutusotstarve	Kasutusaeg			Kasutusaste	Valgustus <sup>a</sup> W/m <sup>2</sup>	Seade W/m <sup>2</sup>	Inimene <sup>b</sup> W/m <sup>2</sup>	Inimene m <sup>2</sup> /inim.
	Kellaaeg	h/24h	d/7d					
Väikeelamu	00:00–00:00	24	7	0,6	8 <sup>c</sup>	2,4 <sup>d</sup>	2	42,5
Korterelamu	00:00–00:00	24	7	0,6	8 <sup>c</sup>	3 <sup>d</sup>	3	28,3
Büroohoone, raamatukogu ja teadushoone	07:00–18:00	11	5	0,55	12	12	5	17,0
Kaubandushoone ja terminal	07:00–21:00	14	7	0,55	20	1	5	17,0
Majutushoone	00:00–00:00	24	7	0,5	8	1	4	21,3
Toitlustus- ja teenindushoone	12:00–22:00	10	7	0,4	20	4	14	6,1
Avalik hoone	08:00–22:00	14	7	0,5	14	0	5	17,0
Haridushoone <sup>e</sup>	08:00–16:00	8	5	0,5 <sup>f</sup>	15	8	14	5,4
Koolieelne lasteasutus	07:00–19:00	12	5	0,4	15	4	20	3,8
Tervishoiuhoone	00:00–00:00	24	7	0,6	9	4	8	10,6

<sup>a</sup> esitatud andmete puhul on eeldatud, et mitteelamus kasutatakse päevavalguslambi või vastava efektiivsusega muud valgustit. Toodud soojuseraldus sisaldab nii päevavalguslambi nimivõimsuse kui ka starteri võimsuse, mis on ligikaudu 25% nimivõimsusest.

<sup>b</sup> inimese soojuseraldus sisaldab ainult ilmset soojust. Varjatud soojuse arvesse võtmiseks tuleb toodud väärtused jagada läbi teguriga 0,6.

<sup>c</sup> elamu valgustuse kasutusaste on 0,1.

<sup>d</sup> elamu seadme elektritarbimise saamiseks jagada soojuseraldus läbi teguriga 0,7.

<sup>e</sup> v.a koolieelne lasteasutus.

<sup>f</sup> arvestuslikul koolivaheajal 15. juuni kuni 15. august kasutusaste on 0,1 ja ventilatsioon vastab kasutusaja välisele režiimile.

## 1.2.2 Soojuskaod

Eestis ja ka Põhja-Euroopas üldiselt on tavaliselt välisõhk siseõhust külmem, millest tulenevalt liigub soojus läbi välistarindite hoonest välja. Hoonetes põhjustavad põhiliselt soojuskadu soojuslähikanne läbi välisseinte ja akende ning soojuskadu õhulekete kaudu. Nendest ligi 90% on kaasaegsetes hoonetes tingitud soojuslevist läbi akende ja õhuleketest [17, lk 66]. Väiksemal määral tekitab soojuskadusid ka ventilatsioonisüsteem. Soojuskadusid on võimalik arvutada järgmise seosega [14, lk 40]:

$$\Phi_i = (H_{T,ie} + H_{T,iu} + H_{T,ipõr} + H_{T,ij} + H_{V,i}) * (t_{\text{õ,arv},i} + t_{v\text{õ,arv}}) + \Phi_{\text{ük},i} \quad (1.2)$$

- kus  $H_{T,ie}$  – köetava ruumi (i) soojuserikaod läbi välispiirdetaarindite, W/K,  
 $H_{T,iu}$  – köetava ruumi (i) soojuserikaod läbi kütmata ruumide, W/K,  
 $H_{T,ipõr}$  – põranda soojuserikaod, W/K,  
 $H_{T,ij}$  – soojuserikaod madalama temperatuuriga naaberuumidesse, W/K,  
 $H_{V,i}$  – köetava ruumi (i) ventilatsiooni arvutuslikud soojuserikaod, W/K,  
 $t_{\text{õ,arv},i}$  – siseõhu arvutuslik temperatuur köetavas ruumis (i), °C,  
 $t_{v\text{õ,arv}}$  – välisõhu arvutuslik temperatuur, °C,  
 $\Phi_{\text{ük},i}$  – vajalik üleskütmise võimsus perioodilise kütmise kompenseerimiseks, W.

### 1.2.3 Soojusmahtuvus

Välised temperatuurikõikumised küll mõjutavad siseõhu temperatuuri, aga seda võrdlemisi aeglaselt. Hooned on valdavalt massiivsed ja suure soojusmahtuvusega. Sellest tulenevalt võtab nii ruumide üles kütmine kui ka jahtumine aega. Seda, kui kiiresti ruumi temperatuur muutub mõjutab hoone soojusmahtuvus. Soojusmahtuvust iseloomustatakse hoone soojusliku ajakonstandi abil. Hoone soojuslik ajakonstant näitab aega, mille jooksul langeb sisetemperatuur 63% võrra sise- ja välistemperatuuride vahest, kui küttesüsteem on välja lülitatud. Viimane sõltub hoone tarindite materjalidest. Hoone soojusliku ajakonstandi  $\tau_B$  saab leida seosest [14, lk 38-39]:

$$\tau_B = \frac{\tau}{\ln \frac{t_1 - t_{v\text{õ}}}{t_2 - t_{v\text{õ}}}} \quad (1.3)$$

- kus  $\tau$  – perioodi pikkus, h,  
 $t_1$  – esialgne siseõhu temperatuur, °C,  
 $t_2$  – siseõhu temperatuur jahtumise lõpus, °C,  
 $t_{v\text{õ}}$  – välisõhu temperatuur, °C.

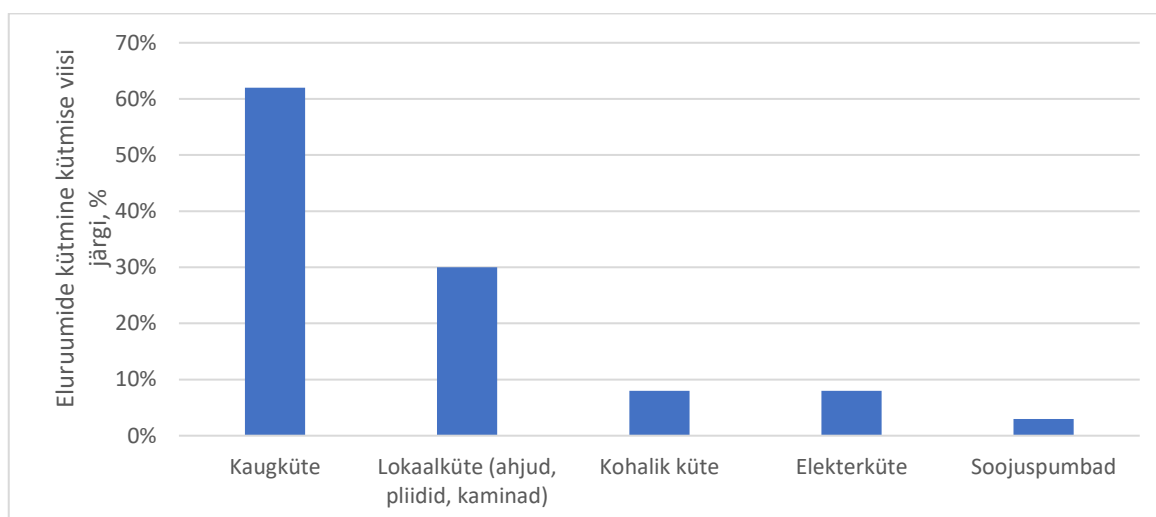
Soojusmahtuvuse mõju ruumiõhu temperatuuri muutumise kiirusele tuleb välja hoonete perioodilisel kütmisel, mis on oma olemuselt sarnane temperatuurialandamisega kütmisele. Perioodiliselt köetavad hooned või ruumid vajavad eelnevat üleskütmist, et tagada soovitud temperatuur ettenähtud ajaks pärast temperatuurialandamist. Üleskütmiseks vajalik võimsus sõltub hoone soojuserikadudest, üleskütmise ajast, temperatuurialandamise suuruselt ja regulaatori parameetritest. Üleskütmise jaoks pole vaja täiendavat lisavõimsust või seda võib vähendada kui reguleerimissüsteem

väldib temperatuurialandamist külmematel päevadel ning soojuskadusid on võimalik vähendada temperatuurialandamise ajal (ventilatsiooni kadusid). Detailselt on võimalik üleskütmiseks vajalikku võimsust määrata dünaamilise arvutusega. [14, lk 49]

## 1.3 Eramu soojusvarustus

### 1.3.1 Soojusallikad

Eluruumide soojusvarustuseks Eestis kasutatakse peamiselt kaugkütet, kohalikku keskkütet, lokaalkütet (ahjud, pliivid, kaminad), soojuspumpasid ja elektrikütet. Eesti Statistikaameti poolt läbi viidud uuring näitab, et enim kasutatud on kaugküte, seejärel lokaalküte [18].



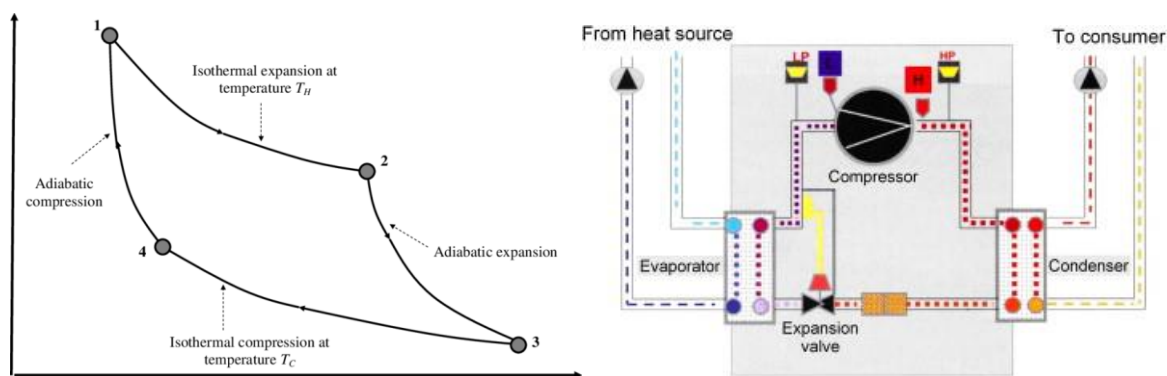
Joonis 1.3 Eluruumide soojusega varustamine kütmissviisi järgi [18]

Kaugkütteks nimetatakse soojuse tootmist ja selle jaotamist kaugküttevõrgu kaudu tarbijatele nende soojusega varustamiseks. Eestis on kaugkütte reguleeritud Kaugkütteseadusega [19]. Selle eesmärgiks on tagada usaldusväärne, efektiivne ja põhjendatud hinnaga soojusvarustus. Eestis on kaugküte saadaval 226-st omavalitusest 146-s. Soojust kaugküttevõrkude tarbeks toodetakse kaugküttekattlamajades ning seda peamiselt bio massist ja maagaasist [20].

Lokaalküte on ühe tarbija oma kasutuseks paigaldatud soojusvarustuse süsteem. Nende alla kuuluvad elekterküte, ahjud, pliivid, kaminad, soojuspumbad ja päikeseküte. Nende hulgast on ahjud, pliivid, kaminad ning õhk-õhk tüüpi soojuspumbad pigem kasutuses kohtkütte lahendustes. Lokaalkütet võib pidada kaugküttest odavamaks kütelahenduseks, kui jätta arvestamata esialgsed ehituskulud ja hoolduskulud [21].

Eluhoonetes kasutatakse iga aastaga järjest rohkem soojuspumba lahendusi [22]. Soojuspumpade kasutamine on järjest populaarsem ka Eestis, kuhu on soojuspumpasid paigaldatud juba aastast 1993. Ajavahemikul 1993...2010 on hinnanguliselt paigaldatud Eestisse 73500 soojuspumpa, millest ~64900 on õhksoojuspumbad ja ~6800 on maasoojuspumbad [22]. 2010. aastal kasutati Eestis 3,3 %-i eluruumide kütteks soojuspumpasid [18].

Soojuspumbad jaotatakse omakorda õhksoojuspumpadeks ja maasoojuspumpadeks. Nende tööpõhimõtte toetub Carnot ringprotsessil (Joonis 1.4), mille käigus kantakse soojus üle madalama temperatuuriga keskkonnast kõrgema temperatuuriga keskkonda. Soojuspumba soojusallikas võib olla välisõhk (õhksoojuspump) või maapind (maasoojuspump) [23].



Joonis 1.4 Carnot' ringprotsess ja soojuspumba tööpõhimõtte skeem [24, 23]

### 1.3.2 Ruumide küte

Põhja-Euroopas on kõige enam levinud küttekehad kuumaveeradiaatorid. Radiaatorites kasutatakse üldjuhul pealevoolutemperatuuri 60...80 °C, mis on sobilik kaugküttega ühendatud või lokaalse katlaga varustatud majadel. Liginullenergia hoonetel kasutatakse aga järjest madalamaid temperatuurigraafikuid. [17, lk 77]

Sõltuvalt radiaatori konstruktsioonist ja välispinna iseloomust toimub soojusülekanne radiaatori ja ruumiõhu vahel konvektsiooni ja kiirguse teel. Radiaatori kiirgusliku ja konvektiivse soojusväljastuse osakaalu mõjutavad pinnatemperatuur, mõõtmed, paiknemine ruumis ja värvus. Ruumi sisekliima seisukohast oleks parem eelistada kiirguslikku soojusväljastust konvektiivsele, sest see tagab ühtlasema temperatuurijaotuse ruumis ning sellest tulenevalt ka parema mugavustunde ruumis viibijale. [14, lk 94]



Küttekeha soojusväljastuse saab arvutada valemiga [14, lk 107]:

$$\Phi = K * \Delta t_{ln}^n * \eta \quad (1.4)$$

kus  $K$  – küttekeha soojuseriväljastus, W/K,

$\Delta t_{ln}$  – küttekehasse siseneva ja väljuva ning ruumiõhu temperatuuride logaritmiline vahe, °C,

$n$  – küttekeha iseloomustav eksponenttegur, mis sõltub küttekeha konvektiivse ja kiirgusliku soojusülekanne suhtest ja on vahemikus 1,1...1,4. Teraspaneelradiaatorite puhul  $n \approx 1,3$ ,

$\eta$  – küttekeha paigaldustingimustest sõltuv parandustegur.

Logaritmiline temperatuuride vahe on määratav seosest [14, lk 106]:

$$\Delta t_{ln} = \frac{t_{s,pv} - t_{s,tv}}{\ln \frac{t_{s,pv} - t_{\delta}}{t_{s,tv} - t_{\delta}}} \quad (1.5)$$

kus  $t_{s,pv}$  – soojuskandja pealevoolu temperatuur, °C,

$t_{s,tv}$  – soojuskandja tagasivoolu temperatuur, °C,

$t_{\delta}$  – õhutemperatuur, °C.

Radiaatorite kõrval leiavad laialdast kasutust ka põrandaküttesüsteemid, mida on paigaldatud alates 1990-ndate aastate algusest. Põrandaküte loob mugava soojusliku sisekliima eeldusel, et maja on korralikult soojustatud. Neid süsteeme kasutatakse oluliselt madalama pealevoolutemperatuuriga: 20...30 °C. Madal temperatuur annab suurepärase võimaluse kasutada põrandakütet koostöös soojuspumba lahendusega, mille suurim kasutegur on just madalate temperatuuride juures. [17, lk 77]

### 1.3.3 Soojusülekanne reguleerimine

Radiaatorkütte puhul kasutatakse soojuskandja jaotamiseks püstikuid ja kollektoreid. Püstikutega radiaatorkütte süsteemi puhul toimub süsteemi tasakaalustamine iga püstiku alguses ja iga radiaatori juures eraldi. Kollektorisüsteemi puhul toimub kogu vooluhulkade reguleerimine kollektoris. Reguleerimise eesmärk on jagada piisav kogus soojuskandjat iga kütteelemendini ja sellega koos tagada ühtlane soojuse jaotus hoone ruumide vahel.

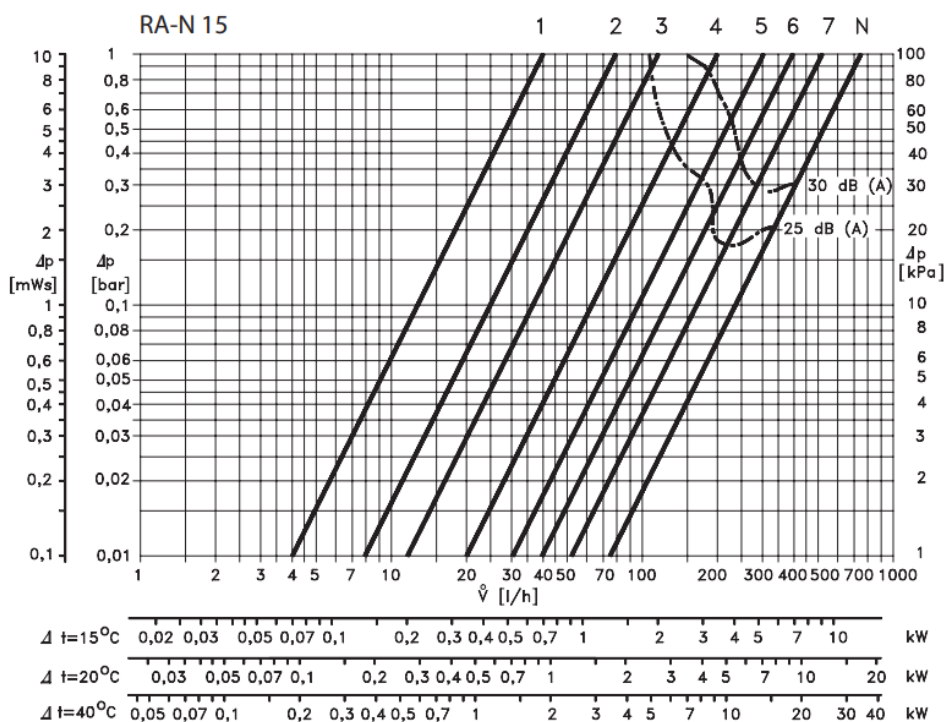
Vooluhulkade reguleerimiseks kasutatakse staatilisi ja dünaamilisi tasakaalustusventiile. Staatiliste ventiilide puhul seadistatakse kogu hoone soojusjaotuse süsteem välja ning erinevaid tsoone hiljem üksikutena reguleerida ei saa ilma süsteemi tasakaalu rikkumata. Sellise variandi puhul reguleeritakse küttevõimsust tsentraalselt varieerides temperatuurigraafikut sõltuvalt näiteks välisõhu temperatuurist. Staatilised lahendused on levinud vanemates kortermajades. Seal on tihti ka probleeme, et sügisel on toad külmad, sest kütmisega alustamisega viivitatakse ning kevadel see-eest palav.

Dünaamiliste tasakaalustusventiilidega reguleeritud küttesüsteemi puhul on võimalik kasutuse käigus ka iga tsooni eraldi reguleerida. See annab võimaluse kasutada radiaatoritel termostaate, mis juhivad radiaatori soojusväljastust vastavalt vajadusele. Soojusväljastuse juhtimine käib soojuskandja läbivoolu piiramise abil. Termostaatide valik on lai – lihtsamad nendest on käsiseade termostaadid, mis hoiavad soovitud temperatuuri ning kaasaegsemad termostaadid on varustatud iseõppimise ja -juhtimise automaatikaga (Joonis 1.5).



Joonis 1.5 Danfoss termostaadiga radiaatoriventiidid [25]

Igale radiaatorile tuleb paigaldada seadeventiil, mida termostaat saaks reguleerida. Seadeventiili ülesanne on soojuskandja läbivoolu avada ja sulgeda. Soojuskandja läbivool läbi seadeventiili on defineeritud ventiili karakteristikuga. Teades ventiili läbivat vooluhulka ja takistuse suurust on võimalik ventiili karakteristikuga järgi määrata sobiva ventiili läbimõõtu ja läbivooluava suurust (Joonis 1.6).



Joonis 1.6 Radiaatori seadeventiili karakteristik [26]

Termostaadid mõõdavad ruumiõhu temperatuuri enda korpuse sees ning selle järgi reguleerivad ventiili asendit, mis omakorda reguleerib soojuskandja läbivoolu. Vahetult radiaatori kõrval ruumiõhu temperatuuri mõõtmine ei anna kõige adekvaatsemad tulemusi, aga arvestades väikese mõõtetulemuse nihkega ei teki juhtimisega probleeme. Vastavalt mõõdetud ruumiõhu temperatuurile ja termostaadi seadetemperatuurile reguleerib termostaat ventiili avatust. Kui ruumiõhu temperatuur langeb alla seadepunkti, siis ventiil avatakse ning jõudes seadepunktini või seda ületades suletakse. Seadetemperatuuri valimine käib üldjuhul mehaaniliselt termostaati pöörates kuid uuemate lahenduste puhul saab seda teha ka läbi termostaadiga ühilduva nutiseadme rakenduse (Joonis 1.7).



Joonis 1.7 Danfoss Eco termostaadi juhtimise rakendus [25]

Termostaatide juhtimine toimub kas ON/OFF või PID (proportional–integral–derivative) kontrolleri abil. ON/OFF kontrolleri puhul ei ole võimalik varieerida termostaadi seadepunkti. Seda tüüpi termostaat on kas avatud või suletud. Eelised ON/OFF lahendusel on lihtsus ja soodne hind. Puudusena ei suuda lihtsustatud juhtimine tagada täpset temperatuuri hoidmist ning sellest tuleneb ka ebaefektiivsem energiatarbimine. PID kontrolleri termostaadiga on aga võimalusi rohkem. [27]

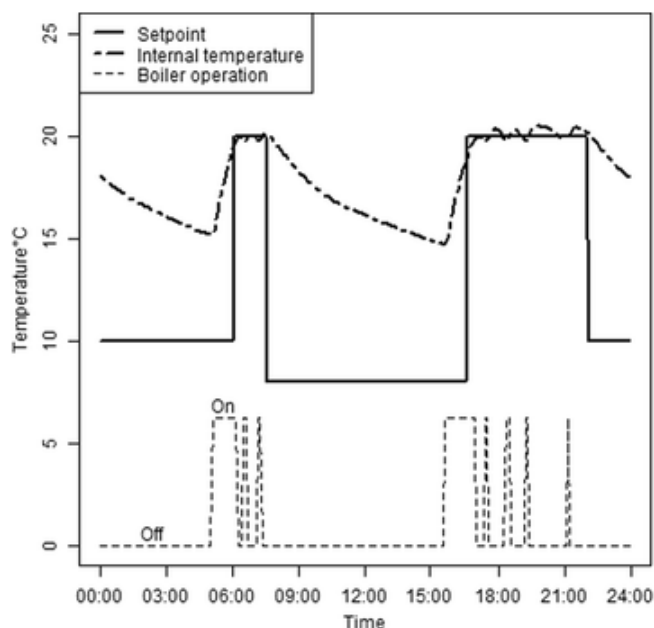
PID kontrolleri juhtseade arvutab pidevalt kõrvalekallet talle ette antud seadepunktist. PID kontrolleri termostaadi puhul tähendab see, et kontrolleri arvutab pidevat erinevust seadetemperatuuri ja mõõdetud õhutemperatuuri vahel ning sellele vastavalt reguleerib radiaatori seadeventiili avatust. PID kontrolleri termostaate on jällegi mitmeid erinevaid: konstantse seadepunktiga, ajagraafiku alusel töötavad, automaatselt seadepunkti reguleerivad ning seadepunkti ennustavad termostaadid. [27]

PID kontrolleri termostaadid on võimelised reaalajas seadepunkti astmeliselt muutma vastavalt välistele sisenditele nagu ilma andmed ning inimeste viibimine ja seadmete töötamine ruumis. Tänu sellele on võimalik saavutada väga ühtlane temperatuur ruumis ning seda väga energiasäästlikult kasutades vahepeal madalamaid seadepunkte kui ruum on kasutuseta. [27]

## 2. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

Temperatuurialandamisega kütmist radiaatorkütte näitel on võimalik juhtida termostaatidest manuaalselt või automatiseeritult kasutades programmeeritavaid termostaate. Seda võimalust aga tihti ei kasutata nagu näitab Karjalaineni uuring [28]. Karjalaineni uuringust selgub, et tunnetades külma, paneb 52% inimestest paksemalt riidesse ja ainult 22% inimestest reguleerib termostaati. Tunnetades liigset palavust, reguleerib termostaati 10% inimestest ning 47% avab aknaid. See tähendab aga liigset kütmist või ebamugavust ning vähendab võimalust saavutada säästu küttekuludel ka hästi soojustatud majadel.

Maksimaalse energiasäästu saavutamiseks tuleb valida kõige optimaalsem temperatuurialandamise graafik võttes arvesse ka asjaolu, et inimeste mugavustunne ei halveneks. Clare Hanmer leidis Inglismaal läbi viidud uuringus [5], et temperatuurialandamist kasutatakse enim öösel vahemikus 22:30 kuni 6:00 ja päeval 8:00 kuni 17:00. Ülejäänud ajal, kui inimesed on kodus, hoitakse etteseadistatud soojemat temperatuuri. Sarnastele järeldustele temperatuurialandamise graafiku osas on jõudnud ka M. Fournier [29], M. Adolph [6], ja E. Marshall [7], kes lähtusid vastavalt elektrienergia tarbimisest, inimeste harjumustest ja tüüppere mudelitest. Temperatuurialandamisega kütmise puhul antakse termostaadile graafik, mis temperatuure ja millal see hoidma peab ning termostaat koostöös küttesüsteemiga vastutavad selle eest, et soovitud temperatuur oleks õigeks ajaks tagatud (Joonis 1).



Joonis 2.1 Temperatuurialandamise graafik Clare Hanmeri uuringust [5]

Temperatuurialandamisega kütmise puhul mõjutab energiasäästu suurust hoone soojuslik mahtuvus, küttesüsteemi inerts ja küttesüsteemi võimsus. Temperatuurialanemine ja üleskütmine on kiirem madala soojusmahtuvusega hoonetel. Pupeikise, Burlinigi ja Stankeviciuse poolt 2009. aastal läbiviidud uuringu põhjal on võimalik temperatuurialandamisega kütisel saavutada märkimisväärset kokkuhoidu kütteenergialt. Leiti, et keskmise soojusliku inertsiga hoonetes (ajakonstant  $\tau = 144$  h) optimaalsete säästutulemuste saavutamiseks tuleb hoone küttesüsteemi võimsust suurendada 50%. Lisaks toodi välja, et suurema küttesüsteemi peale kulunud investeering on võimalik tagasi teenida temperatuurialandamisega kütisel 1 aastaga. [3]

Temperatuurialandamisega kütmist on uurinud 2015. aastal ka Wang, Lin ja Zhu [2]. Nende uuring baseerus mudelil, mis kalibreeriti vastavalt mõõtmistele Inglismaal Cambridgeshire's asuvas eramus. Uuring tehti ühe toa modelleerimise põhjal. Modelleerimise tulemused näitasid, et temperatuurialandamisega kütisel on potentsiaalne kütteenergia kokkuhoid 5% võrreldes konstantse temperatuurihoidmisega kütisel. Sarnase simulatsioonil põhineva uuringu, mis käsitles ainult ühe ruumi temperatuurialandamisega kütmist viisid läbi ka Kull, Simson ja Kurnitski [4]. Nende uuringu eesmärk oli võrrelda temperatuurialandamisega kütmise energiasäästu uuel, madalate soojuskadudega ja vanal, suuremate soojuskadudega hoonel ning põrandküttega ja radiaatorküttega hoonel. Uuringu tulemustest tuli välja, et madalate soojuskadudega hoonel jääb öisel ja ka nädalavahetusel temperatuurialandamise puhul osa säästupotentsiaalset kasutamata, sest ruumiõhutemperatuurid ei jõua langeda soovitud tasemeni. Suuremate soojuskadudega hoone puhul on kütteenergia sääst suurem, aga sellegipoolest ei ületa saavutatud sääst 7%.

Danfoss termostaatide tootjana väidab samas, et nende uus Danfoss Eco termostaat suudab tänu efektiivsele ruumitemperatuuri hoidmisele ja temperatuurialandamisega kütmise võimalusele säästa küttekuludelt kuni 30 % võrreldes tavalise termostaadiga. Danfossi termostaate on võimalik seadistada nutiseadme rakendusest ning võimalik juhtida kasvõi iga radiaatorit eraldi. Termostaadile saab ette anda graafiku, mille järgi ta hoiab soovitud ruumitemperatuuri soovitud ajal. Danfoss Ecol on ka õppimisfunktsioon, mis õpib tundma ventiili karakteristikut ja ruumi, kus radiaator paikneb. Tänu sellele oskab termostaat alustada ruumi üleskütmisega juba varakult, et tagada temperatuurialandamisega kütisel soovitud siseõhu temperatuur õigel ajal (Joonis 1). [30]

Temperatuurialandamisega kütmist on küll uuritud, aga autorile teadaolevalt ei ole uuritud erinevate temperatuurialandamise graafikute mõju energiasäästule. Erinevate pikkustega perioodid temperatuurialandamiseks võivad anda vägagi erinevaid tulemusi säästu saavutamisel. Samuti on suur potentsiaal energiasäästuks, kui alandada temperatuuri seadepunkti nendes ruumides, kus inimesed tõenäoliselt teataval ajal ei viibi. Kombineeritud temperatuurialandamisega võib eeldatavasti saavutada kütteenergia kokkuhoidu üle 20 % võrreldes konstantse seadepunktiga kütmisega. Lisaks eelnevale ei ole autorile teadaolevalt uuritud temperatuurialandamisega kütmise säästupotentsiaali Eesti turule kohandavas kliimas, kasutades mudeli kalibreerimiseks andmeid reaalsetest mõõtmistest.

Tekkinud eelduste kontrollimiseks viidi läbi mõõtmised Taltech liginullenergia testhoones. Mõõtmiste teostamise eesmärk oli saada piisavad andmed, et varasemalt koostatud hoone mudel [31, 32] kalibreerida ja hiljem simulatsioonidega katsetada erinevaid temperatuurialandamise graafikuid ning nende mõjusid kütteenergia säästule. Selleks koguti võimalikult palju andmeid testhoones tehtud katsete kohta, et hiljem mudeli kalibreerimine tuleks võimalikult täpne.

### 3. MEETODID

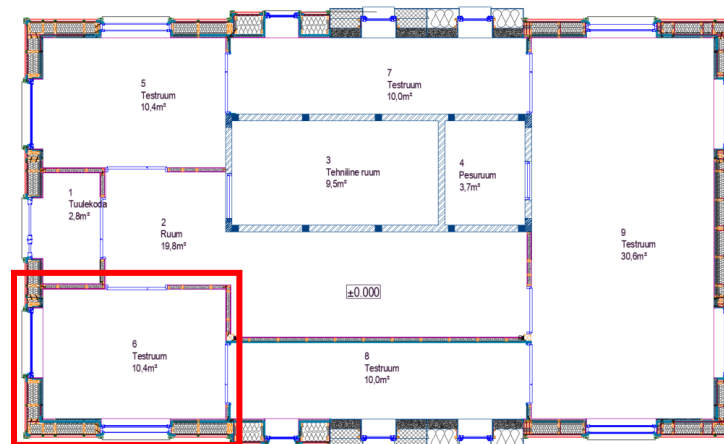
#### 3.1 Uuritav hoone

Uurimuse alusandmete saamiseks, mudeli koostamiseks ja kalibreerimiseks teostati mõõtmised Tallinnas asuvas TalTech liginullenergia testhoones (Joonis 3.2). Tegemist on ühekorruselise, 100 m<sup>2</sup> netopindalaga hoonega, millel on koridorile täielikult avatud pööning. Testmaja on mõeldud erinevate energiatõhususe lahenduste katsetamiseks. Hoones on võimalik testida nii elamutele kui ka mitteelamutele mõeldud lahendusi (välispiirdeid, avatäidiseid, tehnosüsteeme jne). [33]



Joonis 3.1 Taltech liginullenergia testmaja välisvaade

Uurimuses kasutatud mõõtmised teostati testruumis nr 6, mille pindala on 10,4 m<sup>2</sup> (Joonis 3.2). Ruumis on kaks akent pindalaga 4 m<sup>2</sup>, üks suunaga lõunasse ja teine läände. Hoone seinad ja katus on tehtud puitkonstruktsioonile ning põrand on betoonist. Põrandaalune on tuulutatud. Konstruktsioonide soojusjuhtivused on järgmised: välisseinad 0,12 W/(m<sup>2</sup>\*K), aknad 0,75 W/(m<sup>2</sup>\*K), katus ja põrand 0,08 W/(m<sup>2</sup>\*K).



Joonis 3.2 Taltech liginullenergia testhoone ruumide plaan



### 3.1.1 Küttesüsteem

Taltech liginullenergia testhoonesse on rajatud mitmeid erinevaid küttesüsteeme (Joonis 3.3). Võimalus on kasutada näiteks maasoojuspumpa nii spiraal- kui ka horisontaalkollektoriga, õhk-vesi soojuspumpa ja õhk-õhk soojuspumpa. Ka ventilatsiooniseadme maasoojusvaheti on ühendatud maasoojuspumba kollektoriga, et tagada talvel ventilatsiooniõhu eelküte ja suvel eeljahutus. Kõiki testhoone ruume on võimalik kütta põranda- või radiaatorküttega. Erinevate süsteemide vahel saab valida vastavalt katse iseloomule. Käesoleva magistritöö mõõtmiste ajal oli kütteks kasutusel õhk-vesi soojuspump Nibe Split ACVM 10-270, AMS 10 [34].



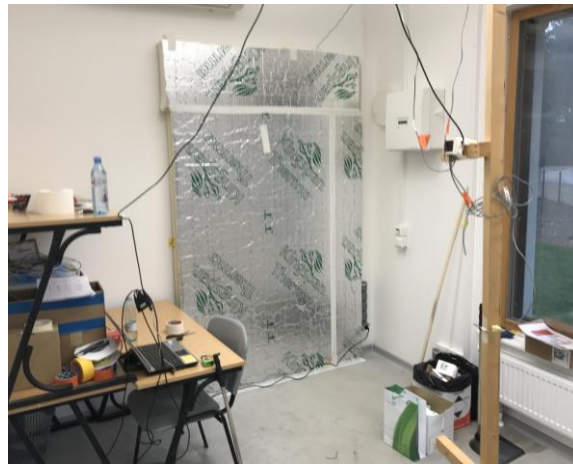
Joonis 3.3 Taltech liginullenergia testhoone tehnoruum

## 3.2 Eksperimendi püstitus

### 3.2.1 Olemasoleva süsteemi seadistus

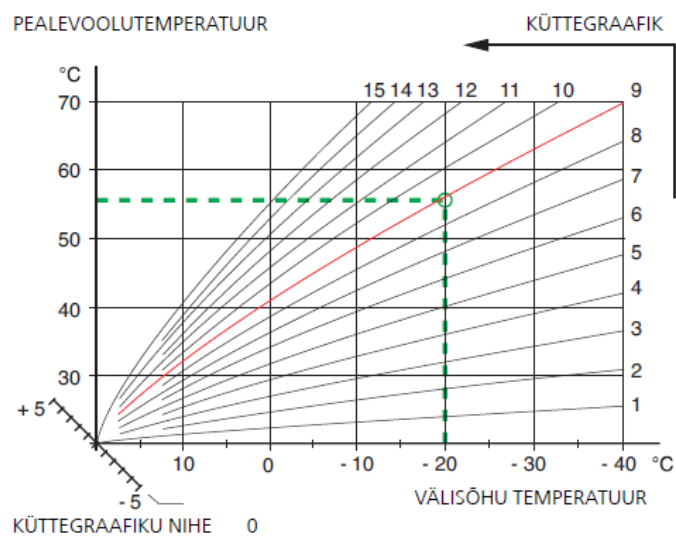
Selleks, et lihtsustada hoone mudeli kalibreerimist ja vältida võimalikke vigu valmistati kõigepealt katsetusteks ette testruum nr 6 (Joonis 3.2). Ruumist eemaldati kõik üleliigsed esemed, et vähendada nende mõju temperatuuri alandamisele ja tõstmisele. Vaheuks testruumide 6 ja 8 vahel kaeti täiendava 100 mm paksuse soojustusega ning õhupidavuseks teibiti ääred tihedaks (Joonis 3.4). See oli vajalik võimalike kõrvalmõjude minimeerimiseks, sest mõõtmiste perioodil ei püsinud testruumi nr 8

õhutemperatuur konstantne. Peale testruumi ettevalmistust reguleeriti küttesüsteemi parameetreid.



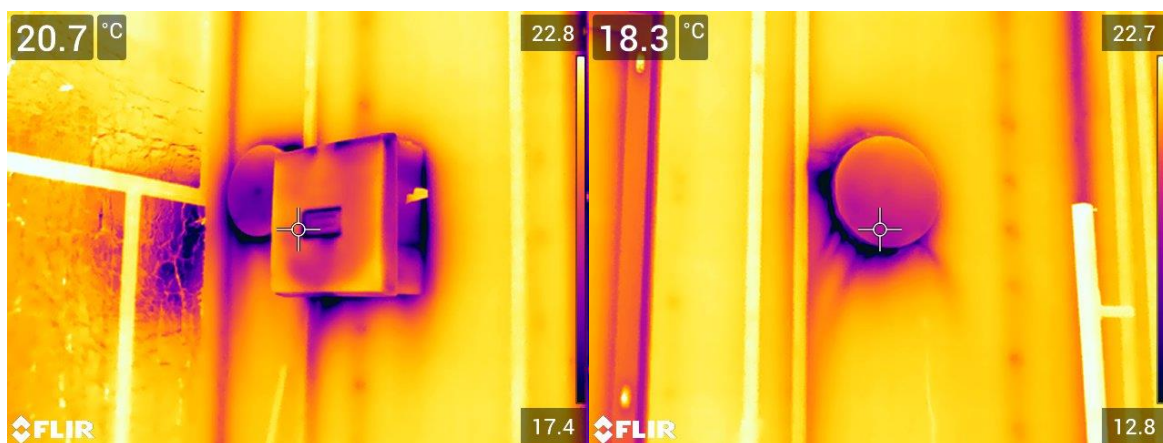
Joonis 3.4 Soojustatud uks testruumide 6 ja 8 vahel

Sobivaima kütte temperatuurigrافیku saamiseks seadistati maasoojuspump küttevett valmistama vastavalt välistemperatuurile küttegaafiku nr 8 järgi, nihe 0 (Joonis 3.5). Küttesüsteem lülitati radiaatorkütte peale. Selleks, et maksimaalne vooluhulk oleks radiaatoris kogu katse vältel konstantne, keerati radiaatorkütte kollektorist kõik teised radiaatorid kinni. Kuna katse ajal käis vesi ainult läbi testruumi nr 6 ühe radiaatori, siis seadistati ringluspump Grundfos Alpha2 25-60 180 teisele konstantsele kiirusele. Segamissõlme ventiil seadistati käsitsi juhtimisele selliselt, et segamine oleks välditud. Sellega kindlustati, et radiaatorisse jõuab soojuspumba poolt ettevalmistatud temperatuuriga vesi.



Joonis 3.5 Õhk-vesi soojuspumba küttegaafik [34]

Ventilatsioonisüsteemi mõju mudeli kalibreerimise lihtsustamise huvides kõrvaldati. Selleks kaeti õhutihedalt kinni kõik ruumis olevad ventilatsiooni sissepuhke ja väljatõmbe avad. Ventilatsiooni puudumine küll mõnevõrra vähendab temperatuurialandamisega kütmise efekti, aga hiljem kalibreeritud mudelis on see võimalik juurde lisada. Testruumis nr 6 oli ka seina sisse paigaldatud kolm seinasisest ventilatsiooniseadet, mille äärtest oli tunda külma õhu sisenemist ruumi (Joonis 3.6). Ka need ventilatsiooniseadmed lülitati välja ning ääred ja avad teibiti kinni, et vähendada õhulekkeid. Kuna vähesed õhulekked siiski jäid, siis ka need võeti hiljem mudeli kalibreerimisel arvesse.



Joonis 3.6 Õhulekked seinasisestest ventilatsiooniseadmetest

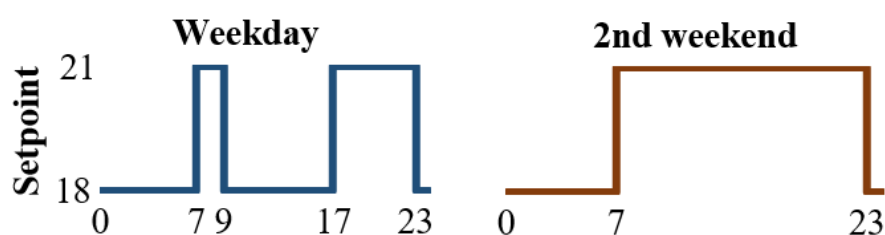
### 3.2.2 Kasutusprofiilid

Mõõtmiste reaalsemaks muutmiseks emuleeriti ka inimese viibimist ruumis. Inimese kehastamiseks kasutati vabasoojust, mis koosnes lambist, torust ja ventilaatorist (Joonis 3.7). Vabasoojuse võimsus oli 93 W ning selle töötamist kontrolliti Enefit nutipistikutega. Enefit rakendusest oli võimalik pistikule ette anda ajagraafik, millal vabasoojus on sees ja millal väljas. Lisaks andis rakendus võimaluse logida täpset vabasoojuse võimsustarvet igal ajahetkel, et seda hiljem mudeli kalibreerimisel kasutada. Enefit rakendusega logiti ka mõõtmisandmete kogumise arvuti võimsustarvet.



Joonis 3.7 Inimese poolt tekitatava vabasoojuse emuleerimise seade

Testruumis oleva radiaatori juhtimiseks paigaldati Danfos Eco radiaatori termostaat. Tegemist on tänapäevase nutitermostaadiga, mis võimaldab seadistamist läbi Danfossi nutirakenduse [30]. Mõõtmiste perioodiks seadistati radiaatori termostaadile temperatuurialandamise graafik (Joonis 3.8), mille järgi pidi termostaat tagama ruumis inimeste ärkvel oleku kodus viibimise ajal õhutemperatuuri 21 °C ning inimeste kodust äraoleku või magamise ajal pidi tagama 18 °C. Nädalavahetuseti eeldati, et inimesed on terve päeva kodus.

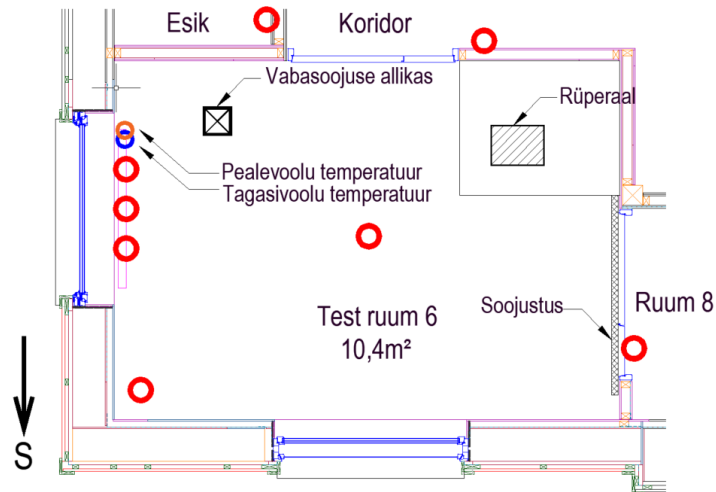


Joonis 3.8 Termostaadile ette antud temperatuurialandamise graafikud

### 3.3 Mõõtmised

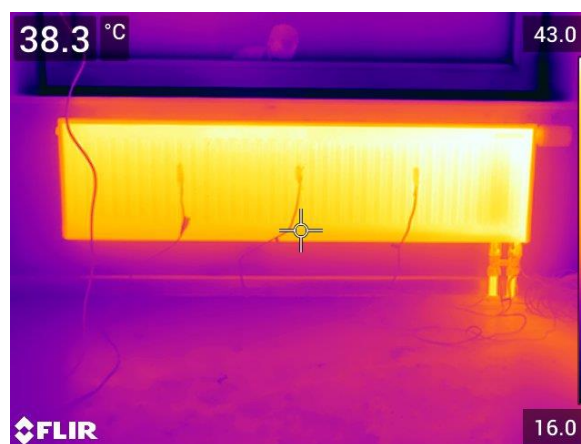
Peale küttesüsteemi ja testruumi ettevalmistamist pandi üles temperatuuride mõõtmiseks vajalikud andurid (Joonis 3.9). Esiteks mõõdeti kõikide kõrvalruumide temperatuure, et simulatsioonis nende mõju arvestada. Testruumis sees mõõdeti õhutemperatuuri kahes punktis: ruumi keskel ja nurgas. Ruumi keskmine andur oli avatud ka päikesepaistele, mille järgi sai simulatsioonis kinnitust päikese poolt põhjustatud temperatuuri kõrvalekalletest. Ruumi nurgas olev õhutemperatuuri andur

andis kõige realistlikuma ülevaate tõelisest ruumitemperatuurist. Kõik õhutemperatuuriandurid paigaldati maast 1,1 meetri kõrgusele, mis iseloomustab vastavalt standardile nii inimese istuva kui ka seisva viibimistsooni temperatuuri [35].



Joonis 3.9 Testruumi temperatuuriandurite paiknemine

Lisaks õhutemperatuuridele mõõdeti ka radiaatori pinnatemperatuure viies punktis. Radiaatori veeühenduste sisendi ja väljundi juurest mõõdeti pealevoolu ja tagasivoolu temperatuure ning kolmes punktis mõõdeti ka radiaatori pinna temperatuure. Pinnatemperatuuride mõõtmisel paigaldati temperatuurianduri ja pinna vahele termopastat, et anduri näit oleks võrdne pinna temperatuuriga. Radiaatori pinnale paigaldatud andurite eesmärk oli hinnata radiaatori pinna keskmist temperatuuri. Selle jaoks paigaldati andurid termokaamera abil võimalikult keskmiste temperatuuridega punktidesse, mis juhuslikult osutusid kõik vertikaalselt samale kõrgusele (Joonis 3.10).



Joonis 3.10 Radiaatori pinnatemperatuuri andurite paiknemine

Vooluhulka, mis läbis radiaatorit mõõdeti kahel viisil. Esiteks kasutati soojusarvestit, mis logis pidevalt vooluhulga andmeid 5-sekundilise vahega. Kahjuks salvestas soojusarvesti andmeid ainult osaliselt mõõteperioodi alguses ajal, kui oli termostaadi õppimise periood. Teise variandina kasutati kaudset vooluhulga hindamist arvutades seda läbi radiaatori soojusväljastuse ja peale- ning tagasivoolu temperatuuride [14, lk 110]. Radiaatori soojusväljastusena võib kasutada tootja andmeid või arvutada M. Maiveli poolt kirjeldatud empiiriliste valemitega [36].

$$G_m = \frac{\Phi}{c \cdot (t_{s,pv} - t_{s,tv})} \quad (3.1)$$

kus  $\Phi$  – radiaatori soojusväljastus, W,  
 $c$  – soojuskandja massierisoojus, vee korral  $c = 4,187 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ,  
 $t_{s,pv}$  – soojuskandja pealivoolu temperatuur, °C,  
 $t_{s,tv}$  – soojuskandja tagasivoolu temperatuur, °C.

Mõõtmisandmete kogumine toimus vahemikus 26.01.2020 kuni 02.03.2020. Sellest perioodist 26.01 kuni 09.02 oli termostaadi iseõppimise periood ning täiendati veel vabasoojuste graafikuid ja andmete loggerite tööd. 10.02 kuni 16.02 oli esimene temperatuurialandamisega kütmise mõõtmiste nädal (Tabel 3.1). 17.02 kuni 23.02 tehti vahekokkuvõtteid ning täiendati temperatuurialandamise graafikut. 24.02 kuni 01.03 tehti viimane mõõtmine natuke muudetud temperatuurialandamise graafikuga, et koguda täiendavaid andmeid mudeli kalibreerimiseks (Tabel 3.1).







Tabel 3.1 Mõõtmisandmete kogumise ajagraafik ja temperatuurialandamise graafikud

	26-01-20	27-01-20	28-01-20	29-01-20	30-01-20	31-01-20	01-02-20	02-02-20	03-02-20	04-02-20	05-02-20	06-02-20	07-02-20	08-02-20	09-02-20	10-02-20	11-02-20	12-02-20	13-02-20	14-02-20	15-02-20	16-02-20	17-02-20	18-02-20	19-02-20	20-02-20	21-02-20	22-02-20	23-02-20	24-02-20	25-02-20	26-02-20	27-02-20	28-02-20	29-02-20	01-03-20			
Mõõtmiste alustamise ja täiendamise periood																																							
Nutitermostaadi iseõppimise periood																																							
1. temperatuurialandamise graafikuga mõõtmised																																							
Vaheülevaate tegemine ja seadeparametrite muutmine																																							
2. temperatuurialandamise graafikuga mõõtmised																																							
1. temperatuurialandamise graafik	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p><b>Tööpäevad</b></p> </div> <div style="text-align: center;"> <p><b>Nädalavahetus</b></p> </div> </div>																																						
2. temperatuurialandamise graafik	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p><b>Tööpäevad</b></p> </div> <div style="text-align: center;"> <p><b>Nädalavahetus</b></p> </div> </div>																																						

### 3.3.1 Mõõteseadmed

Õhu ja pinnatemperatuuride mõõtmiseks kasutati Onset temperatuuriandureid ja andmete salvestamise seadet. Pinnapealsete temperatuuriandurite paigaldamiseks vaadati sobivad kohad välja Flir E95 termokaameraga. Samuti tuvastati kaameraga õhulekked seinasisestest ventilatsiooniseadmetest. Mõõtmiste ajal olnud täpsete kliimaandmete kogumiseks kasutati Taltech testhoone katusel paiknevad ilmajaama, kust võeti andmed välistemperatuuri, õhu suhtelise niiskuse ja päikesekiirguse kohta (Tabel 3.2).

Tabel 3.2 Mõõteseadmete spetsifikatsioonid [37, 38, 39, 40, 41, 42]

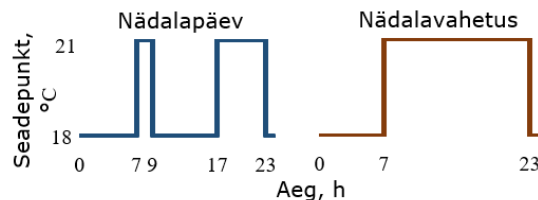
Mõõteseadede/ andur	Onset HOBO UX120- 006M	Onset TMC20-HD	FLIR E95 42°	Sensus POLLUSTAT E
Kirjeldus	Andmete logger	Temperatuuriandur	Termokaamera	Soojusarvesti
				
Mõõtepiirkond	-	-40...100 °C	0...360°	2...180 °C
Mõõtetäpsus	-	±0,15 °C	±2°	< ±0,5%
Mõõteseadede/ andur	LSI Lastem DPA053	LSI Lastem DMA672.1		
Kirjeldus	Püranomeeter	Temperatuuri ja RH sensor		
				
Mõõtepiirkond	0...2000 W/m <sup>2</sup>	-30...70 °C 0...100% RH		
Mõõtetäpsus	< ±10 W/m <sup>2</sup>	±0,2 °C ±1,5% RH		



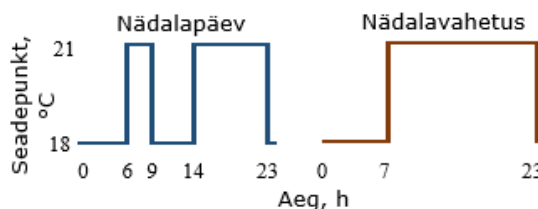
### 3.4 Simulatsioonid

Simulatsioonide läbiviimiseks kasutati IDA ICE 4.8 simulatsiooniprogrammi. IDA ICE on hoonete energiasimulatsiooni tarkvara, mille abil on võimalik koostada detailseid ja dünaamilisi mitme tsooniga simulatsioone nii sisekliimaga seotud uurimustöodes kui ka energiatõhususe arvutustes [43]. Käesolev magistritöö ei sisaldanud Taltech testhoone mudeli koostamist, selleks kasutati varasemalt koostatud ja kalibreeritud mudelit [31, 32]. Olemasolev mudel vajab aga täiendavat kalibreerimist, et see oleks vastavuses uurimuse käigus läbi viidud mõõtmiste tulemustega.

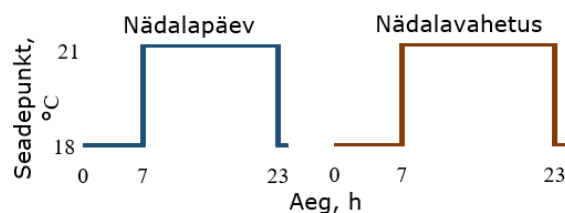
Simulatsioonide esimene etapp koosnes mudeli kalibreerimisest, millest räägitakse täpsemalt peatükis 4.1. Peale kalibreerimist viidi läbi simulatsioonid, mille eesmärk oli välja selgitada, kuidas erinevad parameetrid mõjutavad kütteenergia kulu. Lahenduste leidmisel uuriti erinevaid võimalikke temperatuurialandamise graafikuid, et näha, kas ja kuidas kütte seadepunkti alandamise aeg mõjutab kütteenergia kulu. Uuriti ka ventilatsiooni mõju energiasäästule kasutades hoones erinevaid soovitatud õhuvooluhulkasid. Samuti muudeti hoone soojusmahtuvust, et näha, kas see mõjutab ruumiõhu temperatuuri tõusmist ja langemist (Tabel 3.4). Erinevad kasutatud temperatuurialandamise graafikud on toodud Joonistel 3.11a, 3.11b, 3.11c ja 3.11d. Kasutati ka osalist temperatuurialandamist, mille käigus alandati temperatuuri vastavalt graafikule ainult eluruumides.



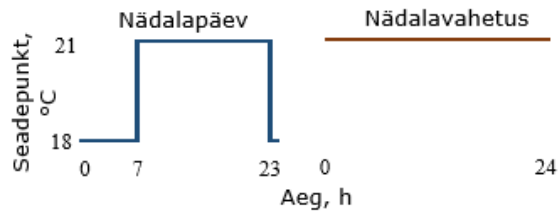
Joonis 3.11a Esimene temperatuurialandamise graafik



Joonis 3.11b Teine temperatuurialandamise graafik



Joonis 3.11c Kolmas temperatuurialandamise graafik



Joonis 3.11d Neljas temperatuurialandamise graafik

Ventilatsioonisüsteemi seadistamisel kasutati kahe allika andmeid. Esiteks määrati ventilatsioonisüsteemi õhuvooluhulgad vastavalt Hoone energiatõhususe arvutamise metoodikale [16] ning teiseks vastavalt REHVA käsiraamatule „Residential Heat Recovery Ventilation“ [44]. Mõlemal juhul võeti ventilatsioonisüsteemi sissepuhke temperatuuriks 18 °C, soojustagastuseks 70% ja heitõhu minimaalseks temperatuuriks 0 °C. Kasutatud andmed on koondatud Tabelisse 3.4. Hoone soojusmahtuvust suurendati välisseinte sisemise 50 mm soojustuskihi asendamisega Columbia kiviga (soojusmahtuvus 1000 J/(kg\*K), tihedus 1100 kg/m<sup>3</sup>) ning vaheseinte konstruktsiooniks määrati Aeroc Classic poorbetoon blokk (soojusmahtuvus 1050 J/(kg\*K), tihedus 500 kg/m<sup>3</sup>).

Tabel 3.3 Ventilatsiooni õhuvooluhulkade kasutatud andmed

Ruum	Energiatõhususe miinimumnõuded				REHVA Guidebook			
	Sissepuhke õhuvooluhulk		Väljatõmbe õhuvooluhulk		Sissepuhke õhuvooluhulk		Väljatõmbe õhuvooluhulk	
	l/s	l/(s*m <sup>2</sup> )	l/s	l/(s*m <sup>2</sup> )	l/s	l/(s*m <sup>2</sup> )	l/s	l/(s*m <sup>2</sup> )
Magamistuba 1	5,2	0,5	5,2	0,5	8	0,77	-	-
Magamistuba 2	5,2	0,5	5,2	0,5	8	0,77	-	-
Esik	1,4	0,5	1,4	0,5	-	-	6	2,18
Koridor	9,9	0,5	9,9	0,5	9,9	0,5	9,9	0,5
Garderoob	5,0	0,5	5,0	0,5	-	-	6	0,60
Töötuba	5,0	0,5	5,0	0,5	8	0,80	-	-
Vannituba	4,7	0,5	4,7	0,5	-	-	15	1,58
WC	2,3	0,5	2,3	0,5	-	-	10	2,15
Elutuba + köök	15,4	0,5	15,4	0,5	16,3	0,53	8	0,26
<b>KOKKU</b>	<b>54,3</b>	<b>l/s</b>	<b>54,3</b>	<b>l/s</b>	<b>50,2</b>	<b>l/s</b>	<b>54,9</b>	<b>l/s</b>

Vabasoojused ja nende kasutusprofiilid määrati kõikides simulatsioonides vastavalt Hoone energiatõhususe arvutamise metoodikale [16]. Peale temperatuurialandamist algas ettekütmine väikese soojusmahtuvusega peale öist temperatuurialandamist 2 h ette ja peale lühemat temperatuurialandamist päeval köeti 1 h ette. Suurema massiivsusega hoone puhul olid mõlemad ettekütmise ajad 1 h võrra suuremad. Ettekütmise ajad määrati vastavalt mõõdetud olukorrale.

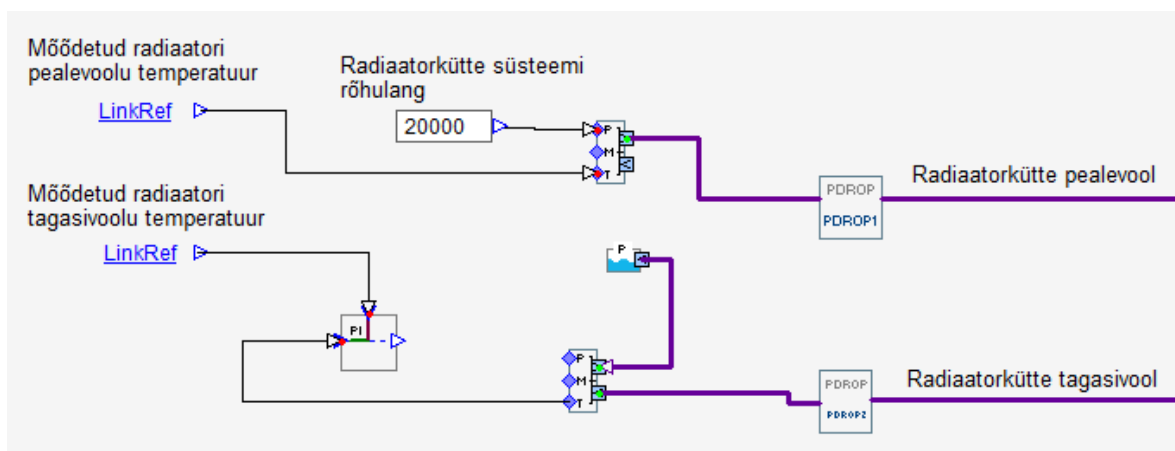
Tabel 3.4 Energiasäästu saavutamise meetodid

Variandi nr	Nimetus	Variandi nr	Nimetus
1	Väikese soojusmahtuvusega hoone	2	Suure soojusmahtuvusega hoone
1.1	Ventilatsioon vastavalt Hoone energiatõhususe miinimumnõuetele	2.1	Ventilatsioon vastavalt Hoone energiatõhususe miinimumnõuetele
1.1.1... 1.1.4	Õhutemperatuur konstantne (18, 20, 21 ja 23 kraadi)	2.1.1... 2.1.4	Õhutemperatuur konstantne (18, 20, 21 ja 23 kraadi)
1.1.5... 1.1.8	Õhutemperatuuri alandamine 21/18 (graafikud 1, 2, 3, 4)	2.1.5... 2.1.8	Õhutemperatuuri alandamine 21/18 (graafikud 1, 2, 3, 4)
1.1.9... 1.1.12	Õhutemperatuuri alandamine 23/20 (graafikud 1, 2, 3, 4)	2.1.9... 2.1.12	Õhutemperatuuri alandamine 23/20 (graafikud 1, 2, 3, 4)
1.1.13... 1.1.16	Õhutemperatuuri alandamine 23/18 (graafikud 1, 2, 3, 4)	2.1.13... 2.1.16	Õhutemperatuuri alandamine 23/18 (graafikud 1, 2, 3, 4)
1.1.17... 1.1.20	Osaline õhutemperatuuri alandamine eluruumides 21/18 (graafikud 1, 2, 3, 4)	2.1.17... 2.1.20	Osaline õhutemperatuuri alandamine eluruumides 21/18 (graafikud 1, 2, 3, 4)
1.1.21... 1.1.24	Osaline õhutemperatuuri alandamine eluruumides 23/20 (graafikud 1, 2, 3, 4)	2.1.21... 2.1.24	Osaline õhutemperatuuri alandamine eluruumides 23/20 (graafikud 1, 2, 3, 4)
1.1.25... 1.1.28	Osaline õhutemperatuuri alandamine eluruumides 23/18 (graafikud 1, 2, 3, 4)	2.1.25... 2.1.28	Osaline õhutemperatuuri alandamine eluruumides 23/18 (graafikud 1, 2, 3, 4)
1.2	Ventilatsioon vastavalt REHVA Guidebook "Residential Heat Recovery Ventilation"	2.2	Ventilatsioon vastavalt REHVA Guidebook "Residential Heat Recovery Ventilation"
1.2.1... 1.2.4	Õhutemperatuur konstantne (18, 20, 21 ja 23 kraadi)	2.2.1... 2.2.4	Õhutemperatuur konstantne (18, 20, 21 ja 23 kraadi)
1.2.5... 1.2.8	Õhutemperatuuri alandamine 21/18 (graafikud 1, 2, 3, 4)	2.2.5... 2.2.8	Õhutemperatuuri alandamine 21/18 (graafikud 1, 2, 3, 4)
1.2.9... 1.2.12	Õhutemperatuuri alandamine 23/20 (graafikud 1, 2, 3, 4)	2.2.9... 2.2.12	Õhutemperatuuri alandamine 23/20 (graafikud 1, 2, 3, 4)
1.2.13... 1.2.16	Õhutemperatuuri alandamine 23/18 (graafikud 1, 2, 3, 4)	2.2.13... 2.2.16	Õhutemperatuuri alandamine 23/18 (graafikud 1, 2, 3, 4)
1.2.17... 1.2.20	Osaline õhutemperatuuri alandamine eluruumides 21/18 (graafikud 1, 2, 3, 4)	2.2.17... 2.2.20	Osaline õhutemperatuuri alandamine eluruumides 21/18 (graafikud 1, 2, 3, 4)
1.2.21... 1.2.24	Osaline õhutemperatuuri alandamine eluruumides 23/20 (graafikud 1, 2, 3, 4)	2.2.21... 2.2.24	Osaline õhutemperatuuri alandamine eluruumides 23/20 (graafikud 1, 2, 3, 4)
1.2.25... 1.2.28	Osaline õhutemperatuuri alandamine eluruumides 23/18 (graafikud 1, 2, 3, 4)	2.2.25... 2.2.28	Osaline õhutemperatuuri alandamine eluruumides 23/18 (graafikud 1, 2, 3, 4)

## 4. MUDELI KALIBREERIMINE

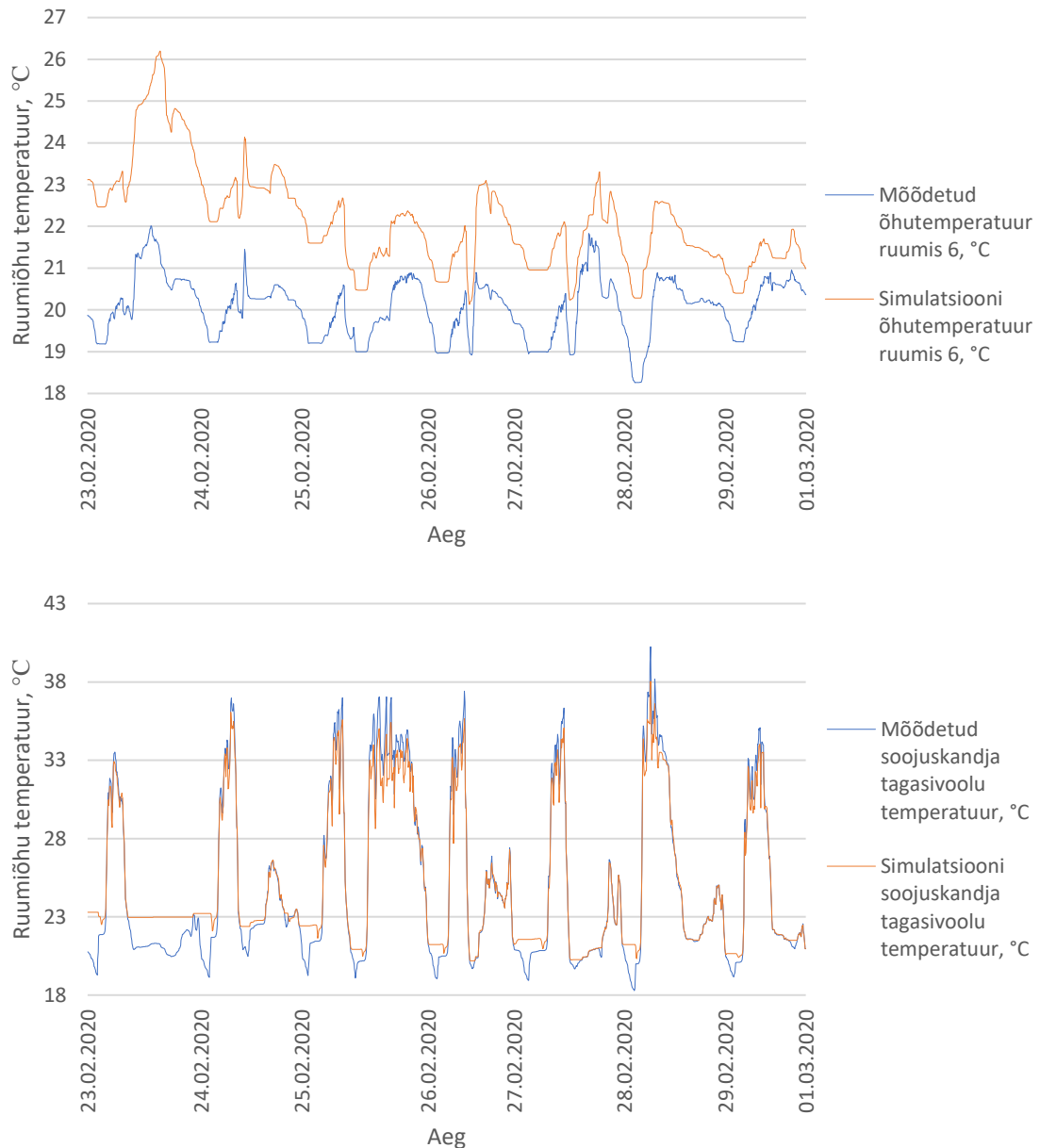
Taltech liginullenergia testhoone varasemalt koostatud mudel [31, 32] tuli täiendavalt kalibreerida, et see vastaks saadud mõõtetulemustele. Esialgne kalibreerimine viidi läbi 24.02 kuni 01.03 saadud mõõtetulemuste järgi. Kalibreerimise alustuseks sisestati mudelisse lähteandmed: kliimaandmed, vabasoojuste andmed ja mõõdetud temperatuurid, mille järgi toimus ka kõrvalruumide kütte juhtimine. Kliimaandmed võeti vastavalt Eesti energiaarvutuste baasaastale (Estonia TRY) [45]. Vabasoojused sisestati igale ruumile inimeste, seadmete ja valgustite kohta vastavalt Hoone energiatõhususe arvutamise metoodikale [16]. Samuti lisati igale vabasoojusele kasutusprofiilid.

Testruumi ümbritsevate ruumide juhtimine tehti ideaalsete küttekehadega, mille seadepunktiks anti andmed vastavalt realselt mõõdetud väärtustele. Peale andmete sisestamist koostati algoritm, mille järgi hakata test ruum nr. 6 radiaatorit juhtima (Joonis 4.1). Algoritmi põhimõte seisnes selles, et radiaatorit juhitakse vastavalt mõõdetud peale- ja tagasivoolu temperatuuridele. Vooluhulga arvutas simulatsiooniprogramm ise ning see kattus hästi ka mõõdetud vooluhulgaga.



Joonis 4.1 Algoritm radiaatori juhtimiseks ruumis nr. 6

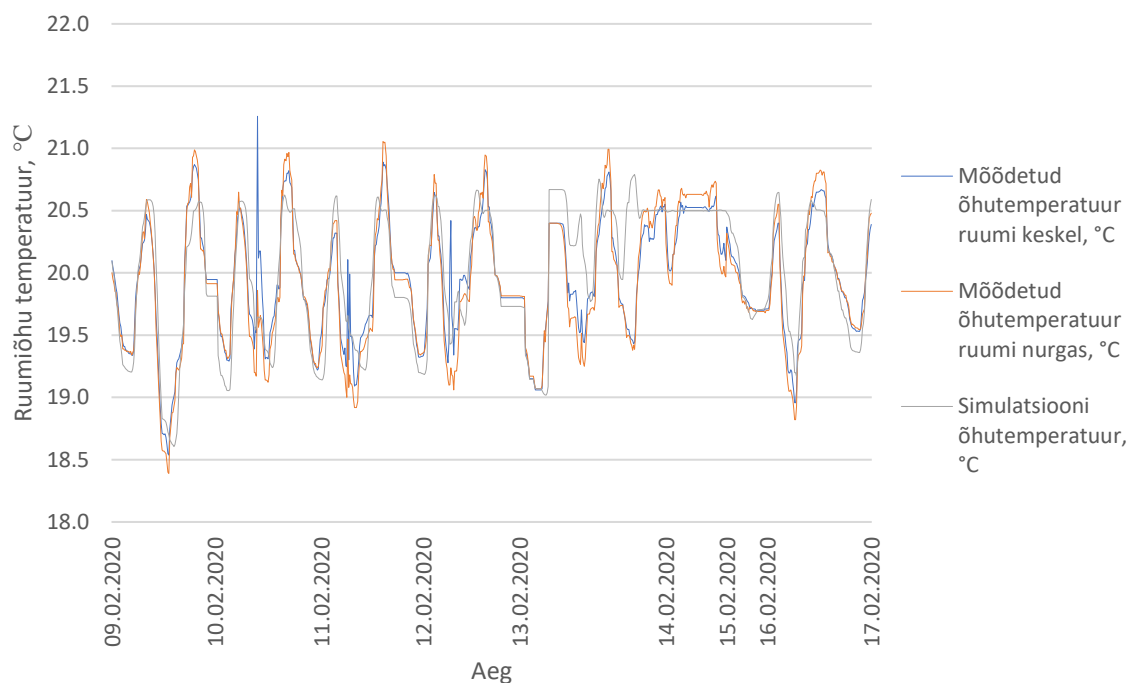
Peale mõõteandmete sisestamist viidi läbi esimesed simulatsioonid, et hinnata mõõtmistulemuste kattuvust simulatsiooni tulemustega. Esimeste tulemuste järgi oli näha, et kõrvalruumide temperatuurihoidmine toimus väga hästi, samuti kattusid pealevoolu temperatuurid (Lisa 1, 2). Sellest võis järeldada, et loodud algoritm töötas. Täpsemat seadistamist vajasis katseruumi õhutemperatuur ja radiaatori tagasivoolu temperatuur (Joonis 4.2).



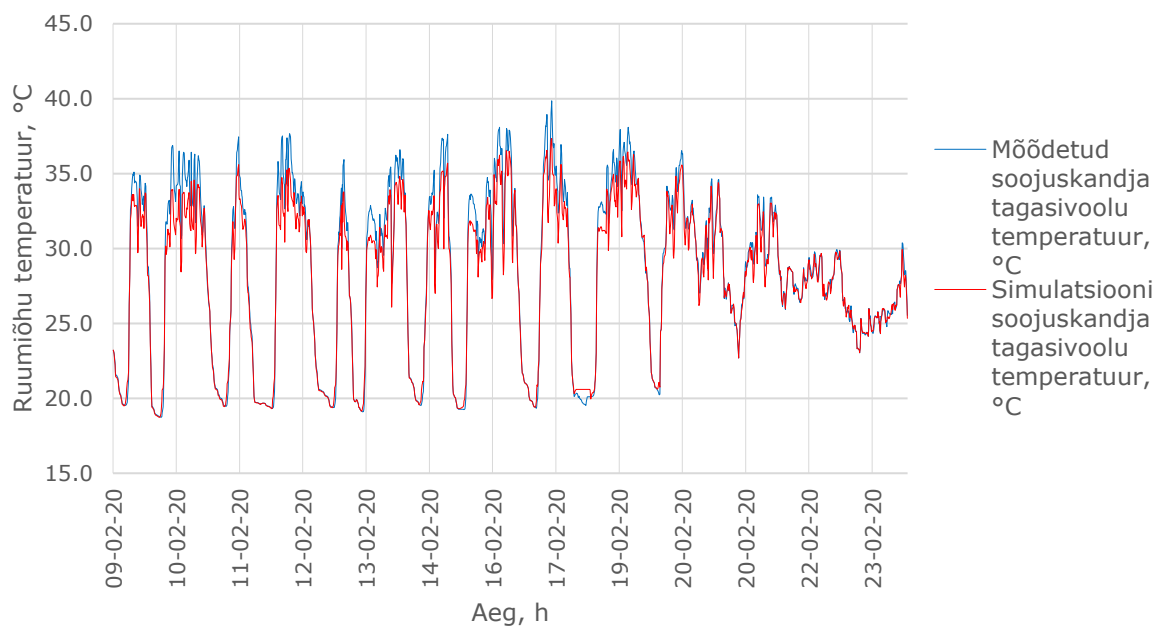
Joonis 4.2 Kalibreerimata õhutemperatuur ruumis 6 ja soojuskandja tagasivoolu temperatuur

Edasised kalibreerimised viidi läbi 10.02 kuni 16.02 saadud mõõteandmete põhjal, sest sellel perioodil kasutas nutitermostaat ettekütmise funktsiooni. Ruumiõhu temperatuuride ühtlustamiseks lisati ruumi nr. 6 välisseina leke -0,4 l/s, mis iseloomustas seinasiseste ventilatsiooniseadmete ebatihedustest põhjustatud külma õhu infiltratsiooni. Lisaks sellele kasutati edaspidi simulatsioonides käivitusperioodi 14 päeva, mis eelnevalt oli 0 ja see aitas temperatuurigraafikute algused paremini kokku viia (Joonis 4.3). Soojuskandja tagasivoolu temperatuuride erinevuse vähendamiseks suurendati mudelis radiaatori maksimaalset vooluhulka kuni 0,035 kg/s ja tavaline vesiradiaator asendati mudelis reaalse, massiga radiaatoriga (Joonis 4.4). Vaikimisi sisestatud radiaator ei oma mudelis termilist massi ja see jahtus liiga kiiresti.

Radiaatorile anti mass vastavalt tootja andmetele ning see aitas jällegi mõõtmiste ja simulatsiooni tulemusi sarnasemaks muuta.



Joonis 4.3 Kalibreeritud testruumi nr 6 õhutemperatuurid



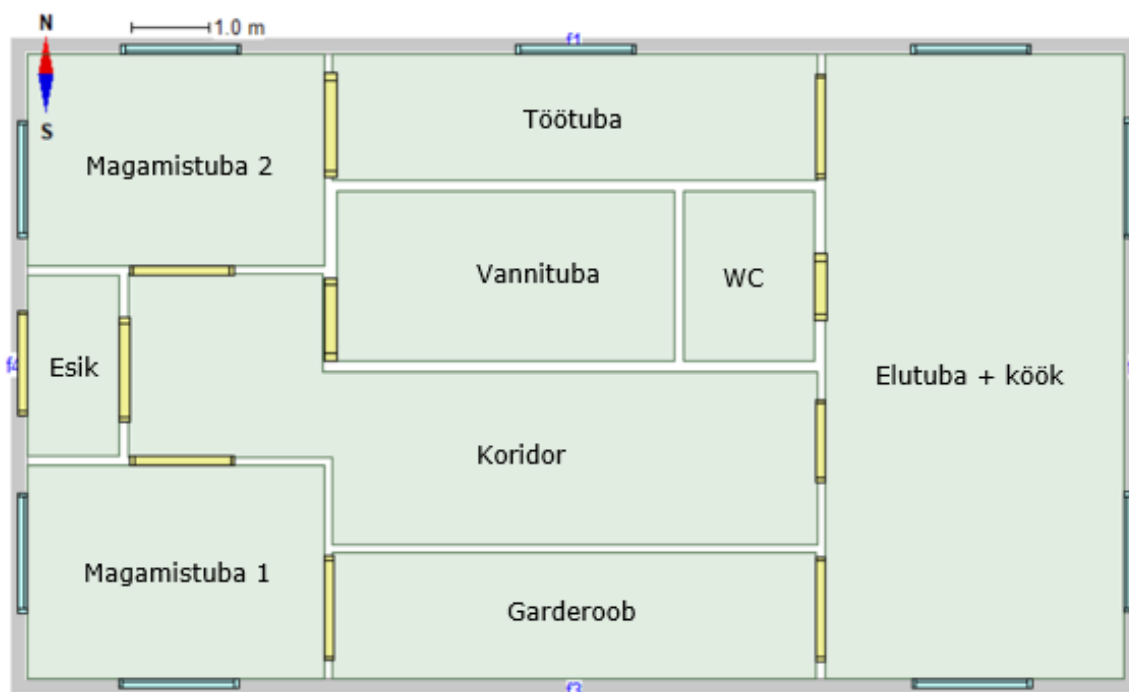
Joonis 4.4 Kalibreeritud soojuskandja tagasivoolu temperatuurid

Kalibreerimise tulemusi kokkuvõttes oli näha, et suuremad hälbed simulatsiooni ja mõõtmistulemuste vahel on põhjustatud päikesest. Mõõdetud päikese andmed olid mõnevõrra ekslikud, sest päikese kiirguse mõõtmisseade oli paigast ära. Kuna

erinevused mudeli ja mõõtmiste tulemuste vahel olid sellegipoolest väga väikesed, siis võis järeldada, et mudel on kalibreeritud.

Aastaste simulatsioonide teostamiseks taastati radiaatori temperatuuride juhtimine soojuspumba poolt, mille küttegaafikut nihutati vastavalt reaalsele pealevoolu temperatuuridele, sest soojuspumba ja radiaatori vahel oli märgata umbes 2...3 °C suurust soojuskandja jahtumist. Kõikide hoone ruumide ideaalsed küttekehad asendati reaalse, massiga radiaatoritega. Kõik kasutatud radiaatorid vastasid omadustelt kalibreeritud massiga radiaatorile ning radiaatorite arv ruumides vastavalt reaalsele kogustele Taltech testhoones. Energiasäästupotentsiaali hindamiseks lisati hoonele ka ventilatsioonisüsteem, et iseloomustada võimalikult realistlikku olukorda kasutuses olevas hoones.

Taltech'i liginullenergia testhoone ruumid nimetati ümber selliselt, et need iseloomustaks tüüpilises eramus olevaid ruume (Joonis 4.5). Ruumis 7 ei olnud kalibreerimise käigus akent, aga selleks, et see teha töötoaks lisati sinna täpselt samade parameetritega aken nagu ruumi 5 põhjaseinas.



Joonis 4.5 Hinnatava eramu ruumide nimetused

Analüüsitavate tulemuste saamiseks viidi läbi kokku 112 simulatsiooni. Üldine tulemuste ülevaade näitas, et iga kasutatud temperatuurialandamise graafik nii hoone osalisel kui terviklikul temperatuurialandamisel andis säästu kütteenergia kulult võrreldes konstantse kütmisega.

## 5. ENERGIASÄÄSTUPOTENTSIAALI HINDAMINE

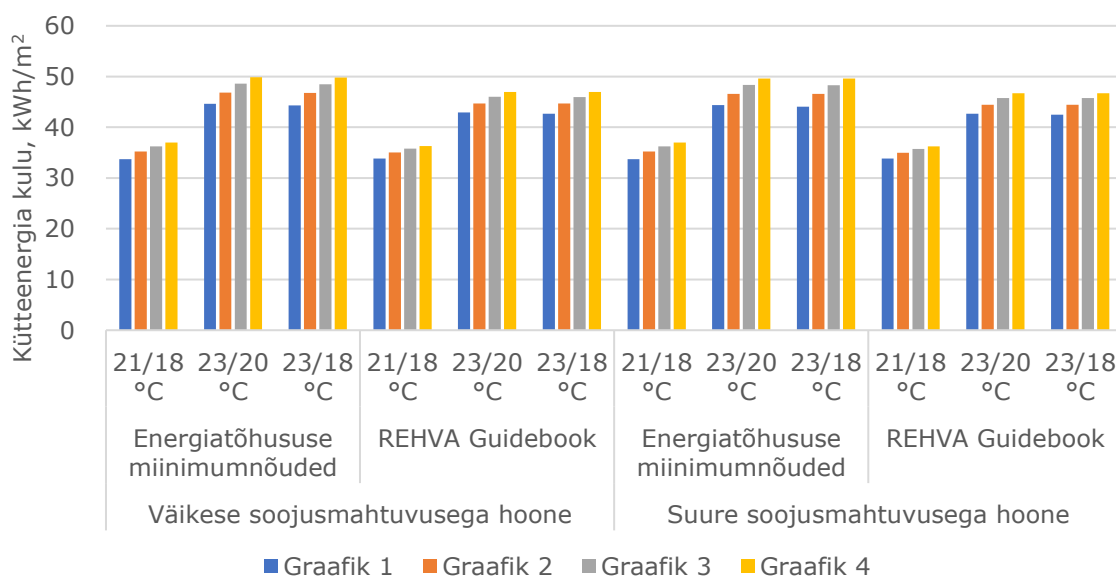
### 5.1 Temperatuurialandamise graafikud

Simulatsioonides kasutati kokku 4 erinevat temperatuurialandamise graafikut (Joonised 3.11a, 3.11b, 3.11c ja 3.11d). Graafikud koostati vastavalt tüüpilise 9-17 töötava inimese tõenäolise kodus viibimise aja järgi selliselt, et hommikuti ärgates ja õhtuti kodus olles oleks tagatud mugav soojuslik sisekliima. Esimesel graafikul oli temperatuurialandamise aeg kõige pikem ning iga järgmise graafikuga läks see järjest lühemaks. Selle järgi sai hinnata, kas ja kui palju mõjutab temperatuurialandamise aeg nädalas energiasäästu suurust (Tabel 5.1).

Tabel 5.1 Temperatuurialandamise aja osakaal nädalas

	Temperatuurialandamise aja osakaal nädalas, %
Temperatuurialandamise graafik 1	57,1%
Temperatuurialandamise graafik 2	45,2%
Temperatuurialandamise graafik 3	33,3%
Temperatuurialandamise graafik 4	23,8%

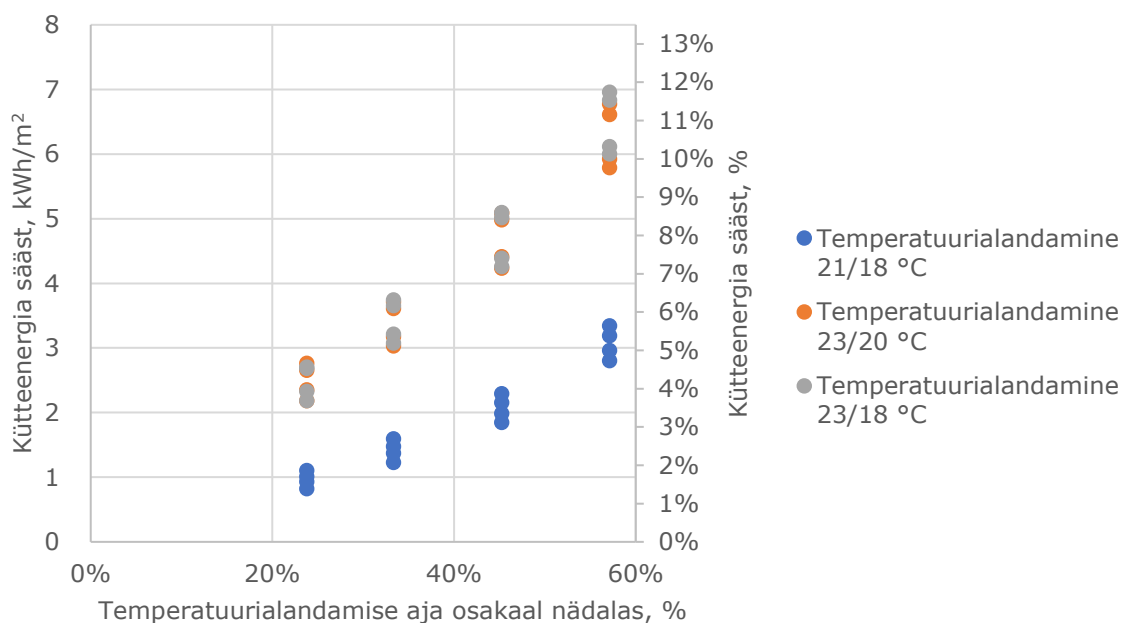
Erinevate temperatuurialandamise graafikute kasutamisel kujunes välja selge erinevus kütteenergia tarbimises (Joonis 5.1). Sõltumata ruumiõhu temperatuuri seadepunktist, hoone konstruktsioonide massiivsusest ega ventilatsioonist on näha, et kõige vähem energiat kulub hoone küttele esimese temperatuurialandamise graafikuga, mille puhul on ka temperatuurialandamise aeg kõige pikem. Samuti kulub energiat kõige rohkem kasutades temperatuurialandamise graafikut 4.



Joonis 5.1 Kütteenergia tarbimine sõltuvalt temperatuurialandamise graafikust



Sellest tulenevalt kujunes välja korrelatsioon temperatuurialandamise aja osakaalu ja energiasäästu vahel (Joonis 5.2). Mida rohkem aega kasutatakse madalamat ruumiõhu temperatuuri madalamat seadepunkti, seda suuremat kütteenergia säästu on võimalik saavutada. Kuna temperatuurialandamise graafik 1 puhul hoitakse madalamat seadepunkti kõige pikemalt, siis ülejäänud parameetrite mõju hindamine energiasäästule toimub selle sama graafiku alusel.



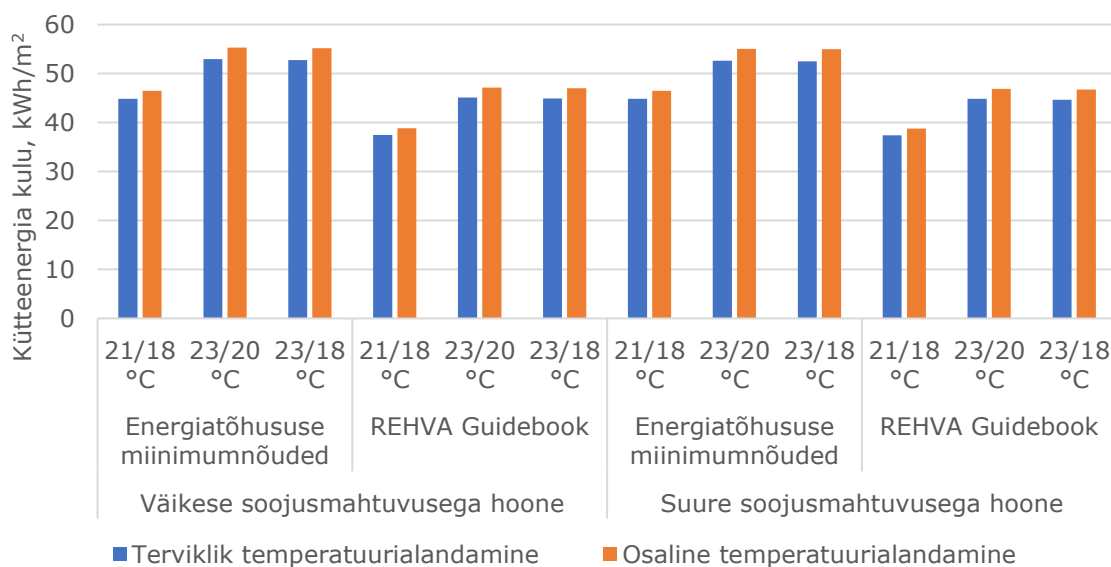
Joonis 5.2 Energiasäästu suuruse sõltuvus temperatuurialandamise ajast

## 5.2 Terviklik ja osaline temperatuurialandamine

Temperatuurialandamisega kütmist simuleeriti iga temperatuurialandamise graafikuga tervele hoonele ja hoonele osaliselt. Terviklik temperatuurialandamine hõlmas kõiki hoone ruume. Osalise temperatuurialandamise puhul langetati ruumiõhu temperatuuri seadepunkti ainult elutoas, magamistubades ja töötoas. Ülejäänud ruumides temperatuuri ei alandatud ja seadepunkt püsis konstantsena kõrgema seadepunkti peal.

Simulatsioonide tulemused näitasid, et hoones tervikliku temperatuurialandamisega kulub vähem energiat kütmisele kui osalise temperatuurialandamisega (Joonis 5.3). Seda jällegi sõltumata ruumiõhu temperatuuri seadepunktist, ventilatsioonist ega hoone soojusmahtuvusest. Eeldatavasti ei saavutatud osalise temperatuurialandamisega kütteenergia kokkuhoidu esiteks sellepärast, et kõrgema seadepunktiga ruumide soojuskaod suurenesid ja pidi rohkem kütma, et neid kompenseerida. Samal ajal ei

saanud madalama temperatuuridega ruumides kasutada täis potentsiaali temperatuurialandamisest. Teiseks nagu varasemad tulemused näitasid, siis osalise temperatuurialandamisega on hoones keskmiselt madalam ruumiõhu temperatuuri seadepunkt vähem aega, seega ka suurem energiakulu küttele.



Joonis 5.3 Tervikliku ja osalise temperatuurialandamisega kütmise kütteenergia kulu temperatuurialandamise graafikuga 1

Osalise temperatuurialandamisega kütmisel graafiku 1 alusel kõige madalam kütteenergia sääst võrreldes konstantse kütmisega oli 3,2% ja kõige kõrgem 7,9%. Tervikliku temperatuurialandamisega jäi sama võrdluse puhul saavutatud kütteenergia sääst vahemikku 6,6...12,1%. Kuna osaline temperatuurialandamine toob hinnanguliselt poole väiksema võimaluse energiasäästuks, siis jäetakse see edasistes võrdlustes välja.

### 5.3 Temperatuurilanguse mõju energiasäästule

Temperatuurialandamist simuleeriti erinevate ruumiõhu temperatuuri seadepunktide juures, et saada ülevaade, kuidas mõjutab energiasäästu temperatuurialandamine 21/18 °C, 23/20 °C ja 23/18 °C. Simulatsiooni tulemused näitasid, mida kõrgem on kütmise seadepunkt ja mida suurem on temperatuurialandamine, seda suuremat energiasäästu on võimalik saavutada (Tabel 5.2). Temperatuurialandamisel 21/18 °C saavutati kütteenergia säästu kuni 7,3% võrreldes konstantse kütmisega. Temperatuurialandamisel 23/20 °C ja 23/18 °C saavutati aga märgatavalt suuremat säästu vastavalt 11,7 ja 12,1%. Temperatuuri pikem alandamine ei toonud eriti suurt

lisa kokkuhoidu, sest antud temperatuurialandamise graafikutega ei jõudnud ruumiõhu temperatuurid tihti alla 20 °C langeda.

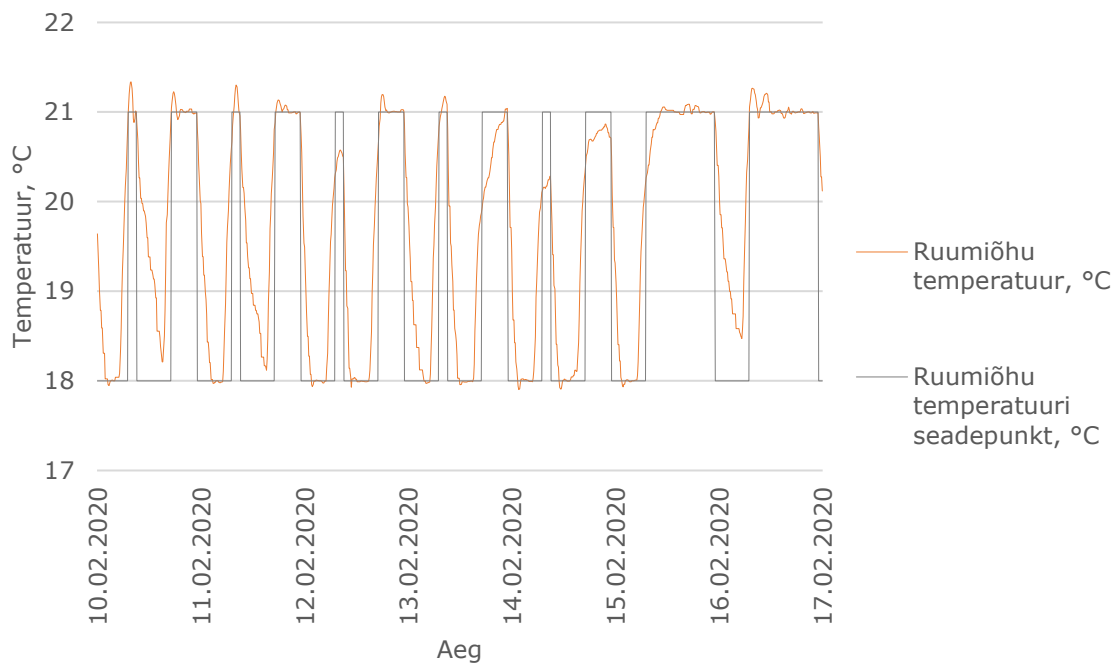
Tabel 5.2 Kütteenergia sääst sõltuvalt temperatuurilangusest

	Väikese soojusmahtuvusega hoone			
	Energiatõhususe miinimumnõuded		REHVA Guidebook	
	Kütteenergia sääst, kWh/m <sup>2</sup>	Kütteenergia sääst, %	Kütteenergia sääst, kWh/m <sup>2</sup>	Kütteenergia sääst, %
Temperatuurialandamine 21/18 °C	3,3	6,9%	3,0	7,3%
Temperatuurialandamine 23/20 °C	6,6	11,1%	5,8	11,4%
Temperatuurialandamine 23/18 °C	6,8	11,5%	6,0	11,8%
	Suure soojusmahtuvusega hoone			
	Energiatõhususe miinimumnõuded		REHVA Guidebook	
	Kütteenergia sääst, kWh/m <sup>2</sup>	Kütteenergia sääst, %	Kütteenergia sääst, kWh/m <sup>2</sup>	Kütteenergia sääst, %
Temperatuurialandamine 21/18 °C	3,2	6,6%	2,8	7,0%
Temperatuurialandamine 23/20 °C	6,8	11,4%	5,9	11,7%
Temperatuurialandamine 23/18 °C	7,0	11,7%	6,1	12,1%

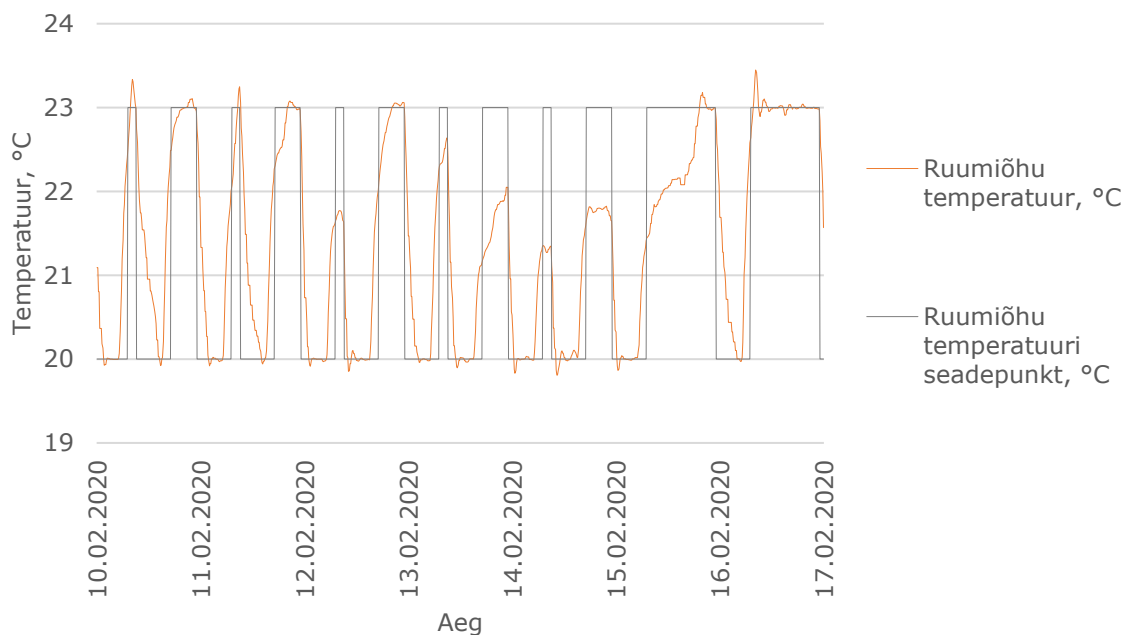
Saadud tulemuste usaldatavuse kontrollimiseks analüüsi, kui suur osa ajast ei suutnud küttesüsteem soovitud ruumiõhu temperatuuri seadepunkti tagada. Vastavalt standardile EN 16798-2 võib õhutemperatuur olla alla seadepunkti kuni 3% ajast [46]. Temperatuurialandamisel 21/18 °C jäi ruumiõhu temperatuur alla soovitud seadepunkti 2,49% ajast terve aasta jooksul. See aeg on piisavalt väike, et ei põhjusta inimestele ebamugavustunnet ruumis viibides liialt jaheda ruumiõhu tõttu. Temperatuurialandamisel 23/20 °C ja 23/18 °C esines ruumiõhu temperatuuri seadepunktist madalamat temperatuuri oluliselt rohkem. 23/20 °C temperatuurialandamise puhul ei suutnud küttesüsteem soovitud temperatuuri tagada 12,97% ajast aasta jooksul ning 23/18 °C temperatuurialandamise puhul 13,37% ajast. Sellise täpsusega ei suudetaks tagada piisavalt mugavat sisekliimat ruumis viibijatele. Ruumiõhu temperatuuri võrreldes ette antud seadepunktidega iseloomustavad Joonised 5.4, 5.5 ja 5.6.

Kõrgemate seadepunktide juures esinenud alakütmine võis olla põhjustatud asjaolust, et simulatsioon ei olnud kalibreeritud otseselt sellistel temperatuuridel töötama. Üleskütmise aeg oli kõrgemate temperatuuride puhul eeldatud vastavalt kalibreeritud

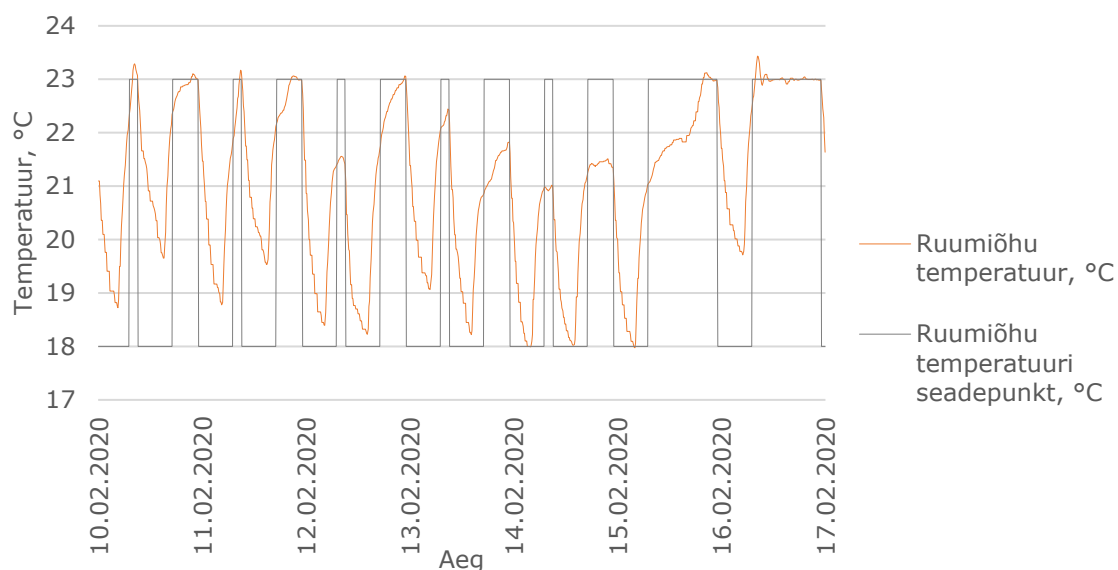
mudeli tulemustele. See ei ole aga täpselt sama, mille võiks saavutada nutitermostaat iseõppimise tulemusena. Reaalselt tehtud mõõtmised toimusid temperatuuridega 21/18 °C. Samuti oli soojuspump seadistatud töötama suhteliselt madalale temperatuurigraafikule, mis võis põhjustada küttesüsteemi võimsuse puudujääki. Joonistel 5.5 ja 5.6 on näha, et üleskütmine 23 °C-ni võtab tunduvalt kauem aega kui Joonisel 5.4 21 °C-ni kütmine.



Joonis 5.4 Elutoas seadepunkti saavutamine temperatuurialandamisel 21/18 °C



Joonis 5.5 Elutoas seadepunkti saavutamine temperatuurialandamisel 23/20 °C



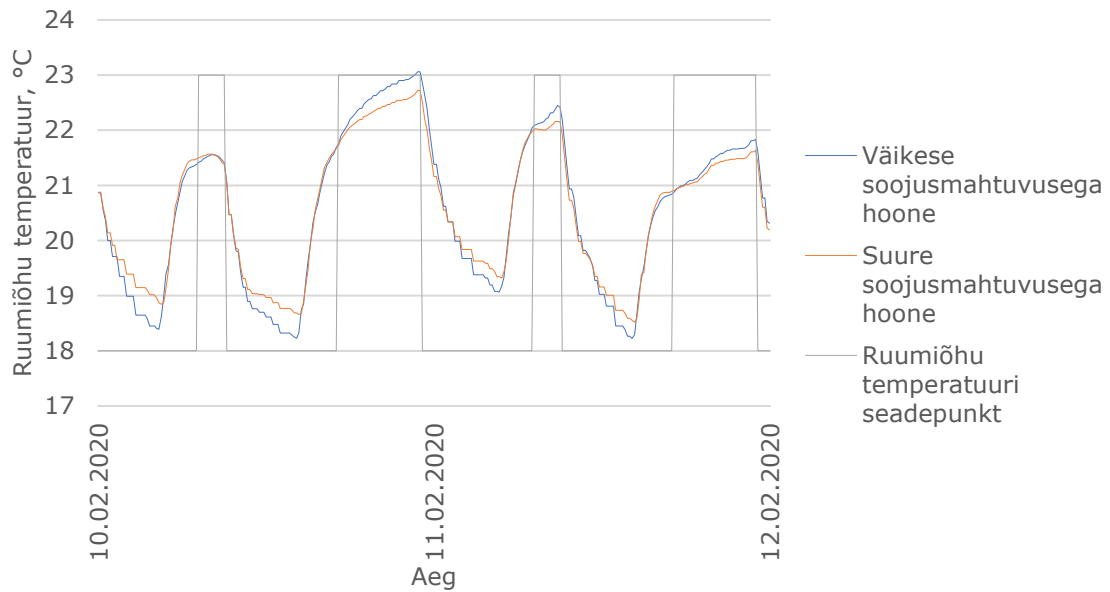
Joonis 5.6 Elutoas seadepunkti saavutamine temperatuurialandamisel 23/18 °C

## 5.4 Soojusmahtuvuse mõju energiasäästule

Üleskütmise ja temperatuuri langemise kiirust prooviti simulatsioonides mõjutada hoone soojusmahtuvuse muutmisega. Simulatsiooni tulemuste analüüs näitas, et kütteenergia kulu erinevus väikese ja suure soojusmahtuvusega hoone vahel oli marginaalne. Iga temperatuurialandamise graafiku ja ventilatsiooni lahendusega jäi saavutatud kütteenergia sääst alla 1% suure massiivsusega hoone kasuks (Tabel 5.3). Eeldati, et suurema massiivsusega hoone puhul on saavutatav sääst väiksem, sest temperatuur ei jõua piisavalt kiirest langeda ning üleskütmine võtab rohkem aega. Simulatsioonidest selgus, et ruumiõhu temperatuuri langemise esialgne kiirus oli nii suure kui väikese massiivsusega hoonel väga sarnased (Joonis 5.7). Erinevus tuli sisse ainult ülemise ja alumise ruumiõhu temperatuuri seadepunkti läheduses, kus väiksema massiivsusega hoonel temperatuur vastavalt tõusis ja langes rohkem.

Tabel 5.3 Soojusmahtuvuse mõju energiasäästule temperatuurialandamisega kütmisel

	Suur soojusmahtuvus	Väike soojusmahtuvus	Kütteenergia kulu vahe, kWh/m <sup>2</sup>	Kütteenergia kulu vahe, %
	Kütteenergia kulu, kWh/m <sup>2</sup>			
Õhutemperatuur 21 °C	48,0	48,2	0,1	0,3%
Õhutemperatuur 23 °C	59,4	59,6	0,2	0,3%
Temperatuurialandamine 21/18 °C	44,9	44,9	0,0	0,0%
Temperatuurialandamine 23/20 °C	52,7	53,0	0,3	0,6%
Temperatuurialandamine 23/18 °C	52,5	52,8	0,3	0,6%



Joonis 5.7 Ruumiõhu temperatuuri muutumise kiirus sõltuvalt hoone massiivsusest

Erinevused väikese ja suure massiivsusega hoone vahel jäid tõenäoliselt tagasihoidlikuks sellepärast, et väikese massiivsusega hoonena arvestati Taltech liginullenergia testhoonet sellisena nagu see on realsuses. See tähendab, et põrandad on betoonist, mis annab hoonele tervikuna juba suure hulga massiivsust juurde. Järelikult muutes ainult sise- ja välisseinte massiivsust ei anna see piisavalt suurt erinevust temperatuuri tõusmise ja langemise puhul.

## 5.5 Ventilatsiooni mõju energiasäästule

Erinevalt hoone soojusmahtuvuse väga väikesest mõjust energiasäästule saavutati hoone ventilatsioonisüsteemi parameetrite muutmisega oluliselt suuremaid säästu tulemusi. Kuna ventilatsioonisüsteemi sissepuhke temperatuur oli seadistatud konstantselt 18 °C peale, siis ruumiõhu temperatuuri alandamisel pidi ventilatsiooniseadme elektriline järelküte tegema oluliselt rohkem tööd, et soovitud temperatuuri tagada. See vähendas radiaatorküttelt saavutatud energiasäästu märgatavalt.

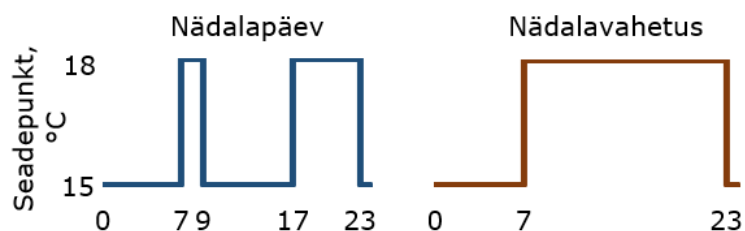
Mida pikemat aega ja mida madalama seadepunkti juures toimus temperatuurialandamine seda rohkem hakkas ventilatsiooniseade kütteenergiat kasutama. Graafikuga 1 temperatuurialandamisel 21/18 °C vähendas ventilatsiooniseadme kütteenergia kulu potentsiaalset energiasäästu peaaegu poole võrra. Seega mõjutasid erinevad lähteandmed ventilatsiooni õhuvooluhulkadele märgatavalt ka energiasäästu.

REHVA Guidebooki soovitude järgi pidid olema õhuvooluhulgad mõnevõrra madalamad kui Hoone energiatõhususe määrase. Väiksema õhuvooluhulga juures kasutas ventilatsiooniseadme järelküte vähem kütteenergiat ja sellest tulenes ka kuni 16,5% suurune kütteenergia kokkuhoid võrreldes kõrgemate nõudmistega õhuvooluhulgale (Tabel 5.4). See tähendab, et energiatõhususe arvutuse jaoks ei ole temperatuurialandamisega kütmise sääst sama suur, kui see oleks reaalse kasutatava hoone jaoks.

Tabel 5.4 Kütteenergia sääst erinevate õhuvooluhulkade andmete juures

	Energiatõhususe määrus	REHVA Guidebook	Kütteenergia kulu vahe, kWh/m <sup>2</sup>	Kütteenergia kulu vahe, %
	Kütteenergia kulu, kWh/m <sup>2</sup>			
Õhutemperatuur 21 °C	48,2	40,4	7,8	16,2%
Õhutemperatuur 23 °C	59,6	50,9	8,7	14,6%
Temperatuurialandamine 21/18 °C	44,9	37,4	7,4	16,5%
Temperatuurialandamine 23/20 °C	53,0	45,1	7,9	14,9%
Temperatuurialandamine 23/18 °C	52,8	44,9	7,9	14,9%

Kuna ventilatsiooniseadme järelküte konstantse seadepunkti juures vähendas oluliselt potentsiaalselt energiasäästu temperatuurialandamisega kütmisest, siis tehti lisaks üks simulatsioon, et lisada ventilatsiooniseadme järelküttele samasugune temperatuurialandamise graafik nagu seda oli radiaatori termostaatidel. Täiendava simulatsiooni aluseks võeti mudel, kus oli temperatuurialandamise graafik 1 temperatuuridega 21/18 °C, väikese soojusmahtuvusega hoone ja ventilatsioon vastavalt Hoone energiatõhususe määrasele. Ventilatsiooniseadme sissepuhke temperatuur seadistati vastavalt samasugusele graafikule nagu oli temperatuurialandamise graafik 1, aga temperatuurid valiti 18/15 °C selliselt, et igal ajahetkel oleks ruumiõhu ja ventilatsiooni sissepuhke temperatuuride vahe 3 °C (Joonis 5.8).



Joonis 5.8 Ventilatsiooni sissepuhke temperatuuri alandamise graafik 18/15 °C

Reaalsus, mis täiendava simulatsiooni tulemustest selgus näitas, et ventilatsiooni sissepuhke temperatuuril temperatuurialandamise graafiku kasutamine vähendas kulu kütteenergiale alla 1 kWh aastas. Ventilatsioonisüsteemi tarbitud kütteenergia küll vähenes *circa* 430 kWh, aga sama palju tõusis ka küttesüsteemi energia tarbimine. Energiatõhususe seisukohalt oleks selles kasu sees, sest näiteks maasoojuspumba puhul on kasutegur oluliselt parem kui elekterkütte puhul, mida kasutab ventilatsiooniseade. Samas, kuna 21/18 °C temperatuuride juures jõudis ruumiõhu temperatuur temperatuurialandamise puhul jõuda 18 °C-ni, siis võib eeldada, et seal on raske täiendavat säästu saavutada. Suurem potentsiaal ventilatsiooni sissepuhke temperatuuride juhtimisel ajagraafiku järgi energiasäästu saavutamiseks võiks olla 23/18 °C temperatuuridel.



## KOKKUVÕTE

Käesolevas töös uuriti temperatuurialandamisega kütmise energiasäästupotentsiaali. Selleks viidi läbi mõõtmised Taltechi liginullenergia testhoone ühes ruumis, kus katsetati temperatuurialandamisega kütmist. Testruumis kasutati kütmiseks ühte radiaatorit, mida juhiti Danfoss Eco nutitermostaadiga. Danfoss Eco termostaadile sai seadistada seadepunktid ja temperatuurialandamise graafikud. Mõõtmistulemuste saamiseks paigaldati testruumi temperatuuriandurid mõõtma õhu ja pindade temperatuure. Lisaks mõõdeti ka kõrvalruumide temperatuure, kus temperatuurialandamist ei kasutatud, et oleks hiljem mudelis võimalik neid ruume juhtida vatsavalt realselt mõõdetud temperatuuridele. Mõõtmistulemuste põhjal kalibreeriti sama hoone mudel, et teostada aastased simulatsioonid energiasäästu hindamiseks. Simulatsioonides katsetati erinevate temperatuurialandamise graafikute, seadepunktide, temperatuurilanguste, hoone massiivsuste ja ventilatsiooni õhuvooluhulkade mõju energiasäästule võrreldes konstantse seadepunktiga kütmisega.

Aastaste simulatsioonide tulemused näitasid, et energiasäästu on võimalik saavutada simuleeritud parameetrite kombinatsiooniga – mõnega rohkem, teisega vähem. Temperatuurialandamise graafikute võrdlemisel selgus, et mida pikemat aega on hoones ruumiõhu temperatuuri seadepunkt alandatud, seda suuremat energiasäästu on võimalik saavutada. Kõige parema tulemuse andis temperatuurialandamise graafik 1, millega toimus temperatuurialandamine 57,1% nädalast ning sellega saavutati kuni 12,1% energiasäästu. Sellest märkimisväärselt suuremat säästu oleks keeruline saavutada, sest veel pikem temperatuurialandamine tuleks juba inimeste soojusliku mugavuse arvelt. Samade graafikutega analüüsiti ka hoones osalist temperatuurialandamist alandades temperatuuri ainult eluruumides. See ei osutunud aga sama efektiivseks, sest saavutatud sääst oli kuni 7,9%. Eeldatavasti oli sääst väiksem, sest rohkem energiat kulus kõrgema seadepunkti hoidmisele mitte eluruumides.

Temperatuurilanguse mõju energiasäästule hinnati temperatuuride 21/18 °C, 23/20 °C ja 23/18 °C juures. Selgus, et 21/18 °C temperatuurialandamisel saavutati energiasääst kuni 7,3%, 23/20 °C temperatuurialandamisel 11,7% ja 23/18 °C temperatuurialandamisel 12,1%. Kahe viimase variandi vahel ei olnud suurt energiasäästu erinevust, sest temperatuurialandamise ajad olid liialt lühikesed ja temperatuur ei jõudnud tihti langeda alla 20 °C. Saavutatud tulemused temperatuurilanguste 23/20 °C ja 23/18 °C on aga mõnevõrra ebausaldusväärsed, sest antud seadepunktide kasutamisel ei suutnud küttesüsteem saavutada ette antud

temperatuure. Aastasel simulatsioonil ei suudetud ruumiõhu temperatuuri seadepunktidega 23/20 °C tagada 12,97% ajast ning seadepunktidega 23/18 °C 13,37% ajast. Nii pikk aeg alakütmist põhjustaks hoones viibijatele soojuslikku ebamugavust. 21/18 °C seadepunktide juures ei saavutatud soovitud temperatuuri 2,49% ajast, mis jääb alla 3% ja võib lugeda vastavalt standardile EN 16798-2 piisavalt madalaks eksimuseks.

Hoone soojusmahtuvuse märgatavat mõju energiasäästule ei tuvastatud. Väiksema massiivsusega hoone puhul õhutemperatuurid tõusid ja langesid küll mõnevõrra rohkem, kui suurema massiivsusega hoone puhul, aga tõusu ja languse kiirused olid samad. Autori arvates on väike erinevus põhjustatud sellest, et väiksema massiivsusega hoonena kujutati Taltechi liginullenergia testhoonet, millel on betoonpõrand. See lisab hoonetele juba oluliselt massiivust ja seetõttu ei tuvastatud ka märgatavaid erinevusi hoone massiivsuse muutmisel.

Ventilatsiooni mõju energiasäästule oli see-eest arvestatav. Simulatsioonides kasutati lähteandmeid õhuvooluhulkadele vastavalt Hoone energiatõhususe miinimumnõuetele ja vastavalt REHVA käsiraamatule „Residential Heat Recovery Ventilation“. Selgus, et madalamate ruumiõhu seadepunktide juures suurenes ventilatsiooniseadme järelkütte kasutatav energiatarve, mis omakorda vähendas kogu potentsiaalset energiasäästu. Võrreldes erinevate õhuvooluhulkade lähteandmetega saadud tulemusi selgus, et REHVA käsiraamatu järgi saadud tulemustega võis saavutada kuni 16,5% suuremat energiasäästu kui õhuvooluhulkadega vastavalt määrusele.

Käesoleva uurimustöö ei käsitlenud temperatuurialandamise mõju, kui seda kasutada erinevates ruumides erinevatel aegadel. Täiendavat analüüsi vajaks ka ventilatsioonisüsteemi seadistuse mõju energiasäästule analüüsid erinevaid sissepuhke temperatuure, õhuvooluhulkade graafikuid ja sissepuhke temperatuuride graafikuid. Lisaks oleks võimalik täienevalt hinnata hoonekonstruktsioonide massiivsuse mõju energiasäästule süvenedes konstruktsioonide aktiivsesse paksusesse ja arvutades täpselt välja testhoone soojusmahtuvuse. Antud magistr töö jätkuks saaks uurida temperatuurialandamisega kütmise säästupotentsiaali ka põranda- ja laeküttega hoonetes.

Autori hinnangul olid käesoleva magistr töö tulemused enamjaolt eeldatavad. Esiolgu küll eeldati, et saavutatakse suurem energiasääst, aga hetkel saavutatud tulemused ühtisid hästi varasemalt tehtud sarnaste uurimuste tulemustega. Lisaks sellele ei ole Eesti kliimas ega vastavalt Eestis kehtivatele määrustele reaalse hoone peal selliseid

arvutusi varem tehtud. Käesoleva töö tulemused annavad sisendi eramajade omanikele, kui palju nad võiksid säästa aastastelt küttekuludelt nutitermostaatide programmeerimisega. Töö käigus avastati ka mitmeid täiendavaid nüansse, mis avaldavad mõju energiasäästule temperatuurialandamisega kütmisel, mis täiendavad seniseid teadmisi antud valdkonnas.

## SUMMARY

In this work, the energy saving potential of setback heating was investigated. For this purpose measurements were performed in one room of Taltech's near-zero energy test building where setback heating was tested. One radiator controlled by a Danfoss Eco smart thermostat was used for heating in the test room. Setpoints and setback schedules can be set for the Danfoss Eco thermostat. To obtain measurement results temperature sensors were installed to measure the air and surface temperatures. In addition, the temperatures of adjoining rooms were measured, where no temperature reduction was used, so that later in the model these rooms could be controlled to the actually measured temperatures. Based on the measurement results a model of the same building was calibrated to perform annual simulations to assess energy savings. The simulations tested the effect of different temperature reduction graphs, setpoints, temperature drops, building thermal mass and ventilation airflows on energy savings compared to constant setpoint heating.

The results of the annual simulations showed that energy savings can be achieved with a combination of simulated parameters - some more, others less. A comparison of the temperature reduction graphs showed that the longer the room air temperature setpoint has been lowered in the building, the greater are the energy savings that can be achieved. The best result was obtained by the temperature reduction schedule 1, which reduced the temperature by 57.1% of the week and achieved up to 12.1% energy savings. The same graphs were also used to analyze partial temperature reduction in the building by lowering room temperatures only in livingroom, bedrooms and office. However, it did not prove to be as effective as the savings achieved were up to 7.9%. The savings were expected to be lower as rooms with higher temperatures started to heat rooms with lower temperatures through the walls.

The effect of temperature drop on energy savings was evaluated at 21/18 °C, 23/20 °C and 23/18 °C. It was found that energy savings of up to 7.3% were achieved when the temperature was reduced from 21 to 18 °C, 11.7% when the temperature was reduced from 23 to 20 °C and 12.1% when the temperature was reduced from 23 to 18 °C. There was no significant difference in energy savings between the last two options as the setback times were too short and the temperature often did not fall below 20 °C. However, the results obtained for the temperature drops of 23/20 °C and 23/18 °C are somewhat unreliable because the heating system was not able to reach given temperatures when using these setpoints. In the annual simulation, the room air temperature could not be guaranteed with setpoints 23/20 °C 12.97% of the time and

with setpoints 23/18 °C 13.37% of the time. Such a long period of temperatures below setpoint would cause thermal discomfort to the occupants of the building. At the setpoints of 21/18 °C the desired temperature was not reached 2.49% of the time, which according to the author can be considered normal.

No significant effect of the heat capacity of the building on energy saving was identified. In case of the lower thermal mass building, the air temperatures rose and fell somewhat more than in the case of the larger mass building, but the rates of rise and fall were very similar. According to the author the small difference is due to the fact that Taltech's near-zero energy test building with a concrete floor was depicted as a building with a lower mass. This already adds a significant amount of solidity to the building and therefore no significant differences were found in changing the mass of the building walls.

On the other hand, the effect of ventilation on energy savings was considerable. The simulations used recommended data for airflow volumes according to the Estonian Building Energy Efficiency Regulation and according to the REHVA Guidebook "Residential Heat Recovery Ventilation". It was found that at lower room air setpoints the energy consumption of the post-heating of the ventilation unit increased, which in turn reduced the total potential energy savings. Comparing the results obtained with the source data of different airflow volumes, it became clear that the results obtained according to the REHVA Guidebook could achieve up to 16.5% higher energy savings than with the airflow volumes according to the Estonian Building Energy Efficiency Regulation.

The present study did not address the effect of setback heating in different rooms at different times. Further analysis would also be needed to analyze the effect of ventilation system settings on energy savings by analyzing different supply temperatures, airflow time graphs and supply temperature setbacks. In addition, it would be possible to assess further the impact of the mass of building structures on energy savings by delving into the active thickness of the structures and accurately calculating the heat capacity of the test building. As a continuation of this master's thesis, the saving potential of setback heating in buildings with floor and ceiling heating could be investigated.

According to the author, the results of this master's thesis were mostly expected. Initially, it was assumed that greater energy savings would be achieved, but the results achieved at the moment were in good agreement with the results of similar studies conducted in the past. In the course of the work, several additional nuances were

discovered, which have an impact on energy savings in setback heating, which supplement the existing knowledge in this field.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. Ministry of the Environment. Estonian Environmental Research Centre. Estonian's seventh national communication. 2017. [WWW] [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/734568021\\_Estonia-NC7-2-NC7\\_EST\\_resubmission.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/734568021_Estonia-NC7-2-NC7_EST_resubmission.pdf) (27.01.2020)
2. Lin, B., Wang, Z., Zhu, Y. Modeling and measurement study on an intermittent heating system of a residence in Cambridgeshire. – *Building and Environment*, 2015, 92, 380-386.
3. Burlingis, A., Pupeikis, D., Stankevičius, V. Required additional heating power building during intermitted heating. – *Journal of Civil Engineering and Management*, 2010, 16 (1), 141-148.
4. Kull, T. M., Kurnitski, J., Simson, R. Setback Efficiency of Limited-Power Heating Systems in Cold Climate. – *Cold Climate HVAC*, 2018, 87-95.
5. Carter, E., Hanmer, C., Shipworth, D., Shopworth, M. How household thermal routines shape UK home heating demand patterns. – *Energy Efficiency*, 2018, 12, 5-17.
6. Adolph, M., Koppmann, N., Lupulescu, B., Müller, D. Adaptive control strategies for single room heating. – *Energy and Buildings*, 2014, 68 C, 771-778.
7. Dupont, V., Foxon, T. J., Marshall, E., Steinberger, J. K. Combining energy efficiency measure approaches and occupancy patterns in building modelling in the UK residential context. – *Energy and Buildings*, 2016, 111, 98-108.
8. Behar, J. V., Engelmann, W. H., Hern, S. C., Klepeis, N. E., Nelson, W. C., Ott, W. R., Robinson, J. P., Switzer, P., Tsang, A. M. The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. – *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 2001, 11, 231-252.
9. Wargocki, P., Wyon, D. P. Providing better thermal and air quality conditions in school classrooms would be cost-effective. – *Building and Environment*, 2013, 59, 581-589.
10. Ordoumpozanis, K. T., Theodosiou, T. G. Energy, comfort and indoor air quality in nursery and elementary school buildings in the cold climatic zone of Greece. – *Energy and Buildings*, 2008, 40(12), 2207-2214.
11. Sarbu, I., Sebarchievici, C. Aspects of indoor environmental quality assessment in buildings. – *Energy and Buildings*, 2013, 60, 410-419.
12. 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. Tallinn : Standardiamet, 2019.

13. Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria : Eesti standard EVS-EN ISO 7730:2006. Tallinn : Standardiamet, 2006.
14. Kõiv, T.-A., Rant A. Hoonete küte. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2012.
15. Kalamees, T., Tark, T. Madalenergia- ja liginullenergiahoone kavandamine: Juhend väikeelamute projekteerijale, ehitajale ja tellijale. – *Eesti-Sveitsikoostööprogramm*, 2012. [WWW] <https://kredex.ee/sites/default/files/2019-03/Madalenergia-%20ja%20liginullenergiahoone%20kavandamine.%20Juhend%20v%C3%A4ikeelamute%20projekteerijale,%20ehitajale%20ja%20tellijale.pdf> (23.03.2020)
16. Hoone energiatõhususe arvutamise meetodika. – *Riigi Teataja I*, 09.06.2015, 21.
17. Abel, E., Voll, H. Hoonete energiatarve ja sisekliima. Tallinn: Presshouse, 2010.
18. Eesti Statistikaameti kodulehekülj. 2012 Leibkondade energiatarbimise uuring – Lõppraport. Tallinn, 2013. [WWW] <https://www.stat.ee/dokumentid/67933> (06.04.2020)
19. Kaugkütteseadus. – *Riigi Teataja I* 2003, 25, 154.
20. Kaugküte. Energiatalgud kodulehekülj. [WWW] <https://energiatalgud.ee/index.php/Kaugk%C3%BCte?menu-97> (07.04.2020)
21. Lokaalküte. Energiatalgud kodulehekülj. [WWW] <https://energiatalgud.ee/index.php/Lokaalk%C3%BCte?menu-101> (07.04.2020)
22. Miks, J. Soojuspumpade kasutuselevõtu dünaamika Eestis. Eesti Soojuspumba Liidu kodulehekülj. [WWW] [http://www.soojuspumbaliit.ee/upload/editor/files/Soojuspumpade\\_kasutuselevotu\\_dynaamika\\_Eestis\\_2006-2015.pdf](http://www.soojuspumbaliit.ee/upload/editor/files/Soojuspumpade_kasutuselevotu_dynaamika_Eestis_2006-2015.pdf) (22.03.2020)
23. Sarbu, I., Sebarchievici, C. General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings – *Energy and Buildings*, 2014, 70, 441-454.
24. Sutanto, S. H., Tjiang, P. C. The efficiency of the Carnot cycle with arbitrary gas equations of state. – *European Journal of Physics*, 2006, 27(4), 719.
25. Danfoss Eco. Danfoss kodulehekülj. [WWW] <https://wp.danfosslink.com/danfoss-eco/> (28.03.2020)
26. Danfoss tehniline andmeleht – Eelseadistusega RA-N radiaatoriventiidid. [WWW] <https://assets.danfoss.com/documents/DOC004086403862/DOC004086403862.pdf> (29.03.2020)
27. Girod, B., Kasper, T., Nägele, F. Turning up the heat on obsolete thermostats: A simulation-based comparison of intelligent control approaches for residential heating systems. – *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 75, 1254-1268.
28. Karjalainen, S. Thermal comfort and use of thermostats in Finnish homes and offices. – *Building and Environment*. 2009, 44 (6), 1237-1245.

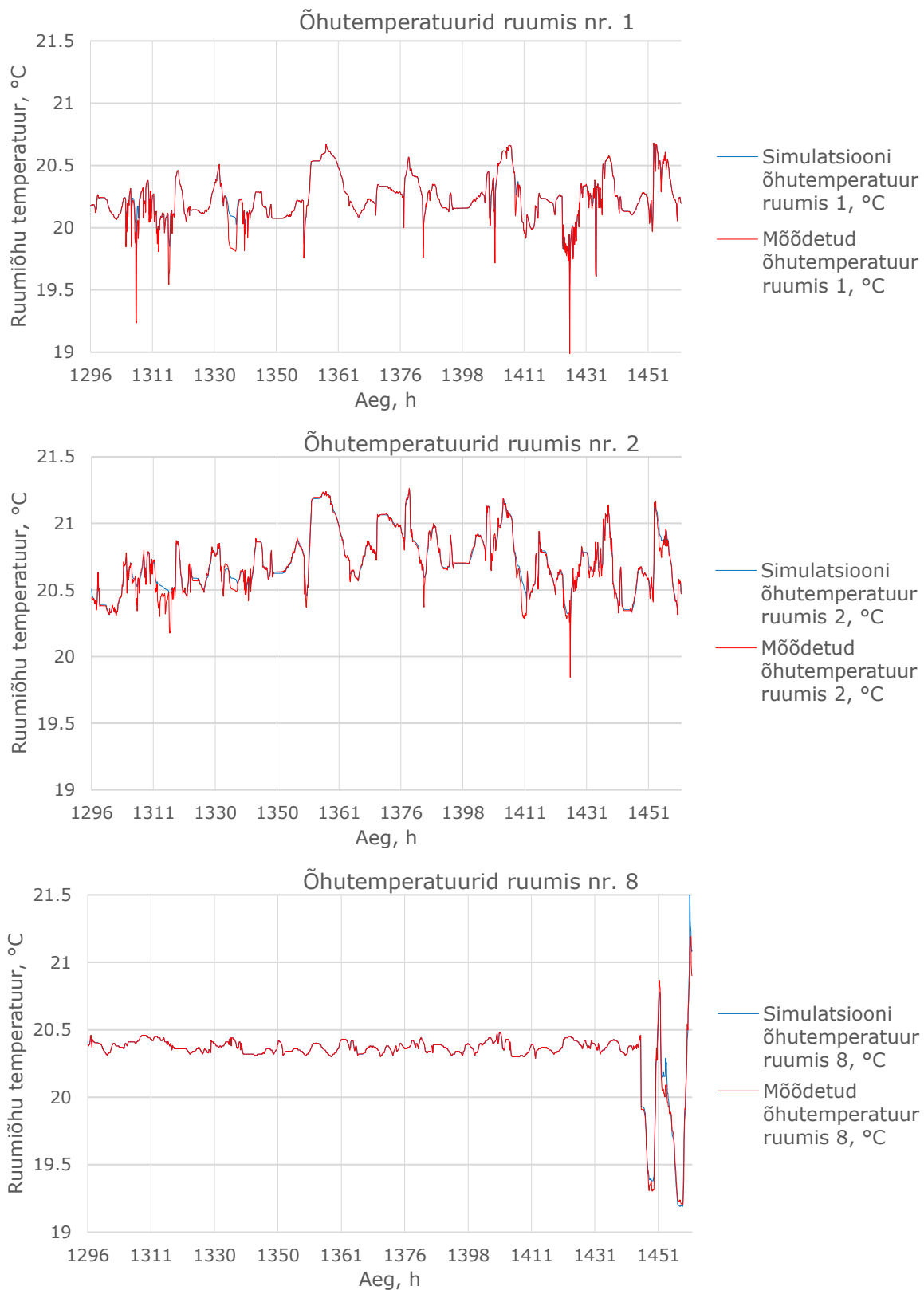


29. Fournier, M., Leduc, M.-A., Poulin, A., Sansregret, S. Making the Connection: Testing Line-Voltage Communicationg Thermostats for Baseboard Heaters in DR and EE Experiments. – ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, 2018, 1-12.
30. Danfoss Eco. Danfoss kodulehekülg. [WWW] <https://www.danfoss.com/en/products/smart-heating/dhs/smart-heating/danfoss-eco/#tab-overview> (10.04.2020)
31. Ferrantelli, A., Kurnitski, J., Võsa, K.-V. Experimental study of radiator, underfloor, ceiling and air heater systems heat emission performance in TUT nZEB test facility. – CLIMA 2019 Congress, At Bucharest, Romania, 2019.
32. Kull, T. M., Kurnitski, J., Thalfeldt, M. Estimating time constants for underfloor heating control. – *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1343.
33. TTÜ liginullenergia testmaja. Tallinna Tehnikaülikooli Ehituse ja arhitektuuri instituudi kodulehekülg. [WWW] <https://www.ttu.ee/instituut/ehituse-ja-arhitektuuri-instituut/laborid-ja-teenused-10/ttu-liginullenergia-testmaja/> (03.02.2020)
34. Paigaldus- ja hooldusjuhend Nibe Split ACVM 270. Nibe kodulehekülg. [WWW] <https://www.nibe.eu/assets/documents/19289/331202-4.pdf> (24.04.2020)
35. Keskkonna soojuslikud omadused. Mõõtevahendid füüsikaliste suuruste mõõtmiseks: Eesti standard EVS-EN ISO 7726:2003. Tallinn : Standardiamet, 2003.
36. Konzelmann, M., Kurnitski, J., Maivel, M. Energy performance of radiators with parallel and serial connected panels. – *Energy and Buildings*, 2015, 86, 745-753.
37. HOBO 4-Channel Analog Data Logger. Onset Computer Corporation kodulehekülg. [WWW] <https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/ux120-006m/> (17.03.2020)
38. Air/Water/Soil Temperature Sensor. Onset Computer Corporation kodulehekülg. [WWW] <https://www.onsetcomp.com/products/sensors/tmcx-hd/?qt-mini-tabs=0> (17.03.2020)
39. Advanced Thermal Camera Flir E95. FLIR Systems, Inc kodulehekülg. [WWW] <https://www.flir.com/products/e95/?model=78503-0301> (17.03.2020)
40. PolluStat E Installation and operating instructions. Brinck Meettechniek kodulehekülg. [WWW] <https://www.brinck.nl/producten?format=raw&task=download&fid=274> (18.03.2020)
41. Secondary standard pyranometers. Keison Products kodulehekülg. [WWW] <https://www.keison.co.uk/products/lstilastem/pyranometers.pdf> (15.03.2020)
42. Thermohygrometer. Direct signal output. LSI LASTEM s.r.l. kodulehekülg. [WWW] <http://www.lsi-lastem.it/en/products/meteorological-sensors/air-temperature-and-relative-humidity/thermohygrometer-direct-signal-output> (21.04.2020)

43. EQUA 'IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE, version 4.8 SP1, Expert edition)'. 2019. [WWW] <https://www.equa.se/en/ida-ice> (17.02.2020)
44. Bednarova, P. V., Carlsson, T., Kurnitski, J., Seppänen, O., Thalfeldt, M., Toksoy, M., Weele, H. van. Residential Heat Recovery Ventilation – *REHVA Guidebook no 25*, 2018.
45. Kalamees, T. and Kurnitski, J. 'Estonian test reference year for energy calculations.', Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Engineering, 12(1), pp. 40–58. 2006.
46. Hoonete energiatõhusus. Hoonete ventilatsioon. Osa 2: EN 16798-1 nõuete tõlgendus. Sisakeskkonna lähteandmed hoonete energiatõhususe projekteerimiseks ja hindamiseks siseõhu kvaliteedi, soojusliku mugavuse, valgustuse ja akustika osas. Moodul M1-6 : Eesti standard EVS-EN 16798-2:2019. Tallinn : Standardiamet, 2019.

# LISAD

Lisa 1 Kalibreeritud õhutemperatuurid ruumides 1, 2 ja 8



Lisa 2 Kalibreeritud soojuskandja pealevoolu temperatuurid

