



**TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL**  
INSENERITEADUSKOND  
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**NÕUKOGUDEAEGSETE MALMRADIAATORITE  
SOOJUSVÄLJASTUS MADALTEMPERATUURSETE  
KÜTTEGRAAFIKUTEGA**

**HEAT OUTPUT OF SOVIET-ERA CAST IRON RADIATORS  
SUPPLIED WITH LOW TEMPERATURE FLOW**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Anneli Antsmaa

Üliõpilaskood 182896 EAXM

Juhendaja: Karl-Villem Võsa, nooremteadur

# AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

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

16. mai 2022

Autor: Anneli Antsmaa

/ digitaalselt allkirjastatud /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

16. mai 2022

Juhendaja: Karl-Villem Võsa

/ digitaalselt allkirjastatud /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

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

Mina, Anneli Antsmaa (sünnikuupäev: 14.06.1995 )

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Nõukogudeaegsete malmradiaatorite soojusväljastus madaltemperatuursete küttegraafiktuega“,

mille juhendaja on Karl-Villem Võsa,

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)

16.05.2022

# Ehituse ja arhitektuuri instituut

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Anneli Antsmaa, 182896 EAXM

Õppekava, peeriala: EAXM15/15 – Hooned ja rajatised

Juhendaja(d): Nooremteadur, Karl-Villem Võsa, +372 6202511

### Lõputöö teema:

(eesti keeles) Nõukogudeaegsete malmradiaatorite soojusväljastus  
madaltemperatuursete küttegaafikutega

(inglise keeles) Heat output of Soviet-era cast iron radiators supplied with low  
temperature flow

### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Ehitada küttesõlm, mille kaudu katseliselt määrata tüüpilise nõukogudeaegse malmradiaatori soojusväljastus.
2. Hinnata mõõtmistulemuste alusel leitud soojusväljastuse kordaja K ja eksponendi n väärtuste kaudu, kuidas toimivad malmradiaatorid madalamatel temperatuuridel.
3. Välja selgitada, kas malmradiaatorite säilitamine renoveerimis-  
rekonstrueerimisprotsessis on võimalik või õigustatud.
4. Koostada massiga radiaatori mudel simulatsiooniprogrammis IDA-ICE.
5. Hinnata erineva detailsusega küttekehade mudelite mõju energiasimulatsiooni tulemustele.

### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjanduse ülevaate ja metodika koostamine	12.12.21
2.	Katsestendi ehitamine Taltech-i laboris	07.02.22
3.	Mõõtmised kahe erineva malmradiaatoriga	30.03.22
4.	Töö tulemuste analüüs ning tabelite ja jooniste koostamine	25.04.22
5.	IDA ICE simulatsioonide läbi viimine	10.05.22
6.	Lõputöö kokku kirjutamine	16.05.22

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

**Üliõpilane:** Anneli Antsmaa /allkirjastatud digitaalselt/ 16. mai 2022 a

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

**Programmijuht:** Simo Ilomets ..... 16. mai 2022 a

# SISUKORD

EESSÕNA.....	7
Lühendite ja tähiste loetelu .....	8
SISSEJUHATUS .....	9
KIRJANDUSE ÜLEVAADE .....	11
1 TEOREETILISED ALUSED .....	13
1.1 Soojuse tootmine ja primaarpool .....	13
1.2 Lõpptarbija ja sekundaarpool.....	14
1.2.1 Radiaatorite soojusväljastus.....	15
1.2.2 Malmradiaator .....	16
1.3 Madaltemperatuurse kütte rakendamise probleemid .....	17
2 METOODIKA .....	18
2.1 Katsestendi kirjeldus .....	18
2.1.1 Testkamber .....	18
2.1.2 Küttesõlm .....	18
2.1.3 Katsekehad.....	19
2.2 Töökäik.....	20
2.2.1 Katsekehade soojusvõimsuste arvutamine .....	20
2.2.2 Soojusväljastuse koefitsiendi K ja eksponendi n leidmine .....	22
2.2.3 Katsekeha jahtumine.....	23
2.2.4 Mõõteseadmed .....	23
2.2.5 Massiga radiaatori mudel.....	24
2.2.6 IDA-ICE energiasimulatsioonid.....	25
3 TULEMUSED JA ANALÜÜS.....	28
3.1 Soojuskadu .....	28
3.2 Soojusvõimsused .....	28
3.3 Massiga radiaatori mudeli kalibreerimine.....	33
3.4 Simulatsioonid IDA-ICE programmis .....	36
3.4.1 Küttegaafiku alandamine .....	36
3.4.2 Energiasimulatsioonid .....	37

KOKKUVÕTE.....	41
SUMMARY.....	43
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	45

## **EESSÕNA**

Käesolev magistritöö on koostatud Tallinna Tehnikaülikooli eriala Hooned ja rajatised, spetsialiseerumisega küte ja ventilatsioon lõputööna. Lõputöö teema sõnastati ja pakuti välja Martin Thalfeldti poolt. Töös teostatud katsed viidi läbi Tehnikaülikooli Ehituse Mäemajas asuvas testkambris. Simulatsioonide teostamiseks kasutati IDA-ICE 4.8 tarkvara.

Lõputöös uuritakse nõukogudeaegsete malmradiaatorite soojusväljastust erinevatel temperatuurigraafikutel, analüüsitakse soojusväljastuse valemi komponentide  $K$  ja  $n$  väärtusi ning saadud katsetulemuste abil analüüsitakse simulatsiooniprogrammis IDA-ICE olevate küttekehade erinevust.

Autor soovib tänada kõiki, kes magistritöö koostamisel abiks olid ning Karl-Villem Võsa juhendamise eest. Eriline tänu Kauri Piiskoppelile väärtuslike kommentaaride ja suure panuse eest katsetendi ehitamisel.

Võtmesõnad:

Malmradiaator

Soojusvõimsus

Temperatuurigraafik

Küttesüsteem

Magistritöö

## Lühendite ja tähiste loetelu

### Lühendid:

ekm – ekvivalentruutmeeter

EVS – Eesti standard (mitteametlikult Eesti Vabariigi standard)

EN – Euroopa standard

IDA – IDA Indoor Climate and Energy (IDA-ICE)

RMSE – ruutkeskmine viga (root mean square error)

### Tähised:

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

m – katsekeha mass, m

G – massivooluhulk, kg/s

cp - soojuskandja masserisoojus, kJ/(kg·K)

K – küttekeha konduktants ehk soojuseriväljastus, W/K

n – küttekeha soojusväljastus iseloomustav eksponenttegur

$\lambda$  - materjali soojuserijuhtivus, W/(m·K)



## SISSEJUHATUS

Euroopa Liidu eesmärk 2050. aastaks on saavutada CO<sub>2</sub>-neutraalsus. Energia tootmine ja kasutamine moodustab üle 75% kasvuhoonegaaside heitest. [1] Ühe võimalusena soojuse tootmist efektiivsemaks ja energiatõhusamaks muuta on alandada soojuskandja töötemperatuuri. Valdavalt toodetakse soojust hoone kütteks, kuna ligi 60% elanikkonnast kasutab kaugkütet soojusallikana, siis tootmise keskkonnasõbralikumaks muutmisel mängib olulist rolli tarbija. [2]

Hoonete renoveerimine aitab tarbija soojusvajadust vähendada. Kortere lamute puhul on tüüpilisemateks renoveerimislahendusteks välisseinte ja katuse soojustamine, akende vahetus, soojustagastusega ventilatsiooni kasutamine ning küttesüsteemi uuendamine termostaatventiilide lisamise näol [3]. Meie kliimas viibivad inimesed 90% oma ajast siseruumides, mistõttu on oluline, et ruumide soojuslik sisekliima oleks nõuetekohane ja mugav. [4]

Tüüpiline nõukogudeaegne malmradiaator on esialgses paigalduses ettenähtud kõrgtemperatuurse küttekehana. Käesolevas magistritöös sooviti analüüsida, kuidas tänapäevased madalamad pealevoolu temperatuurid avaldavad mõju nende soojusväljastusele. Selle hinnangu saamiseks teostati katsed kahe erinevas suuruses malmradiaatoriga. Mõõtmistulemuste põhjal leiti ja analüüsiti soojusväljastuse kordaja  $K$  ja eksponendi  $n$  väärtusi. Koostati graafik soojusväljastuse karakteristiku ja mõõtetulemuste omavahelise kattuvuse kohta ning analüüsiti eelnevalt saadud komponentide sobivust kogu temperatuurivahemikule.

Töö eesmärgiks oli ka analüüsida erinevate küttekehade toimivust simulatsiooniprogrammis IDA-ICE, hinnata nende mõju kütte netoenergia vajadusele ja analüüsida temperatuuripüsivusgraafikuid. Sisuliselt sooviti hinnata malmradiaatori toimivust üleminekuperioodidel. Selle saavutamiseks viidi läbi küttekeha jahtumise katse, mille tulemusi kasutati IDA-s oleva massiga radiaatori mudeli kalibreerimiseks. Lisaks sooviti uurida, kui madalat küttesüsteemi temperatuurigraafikut oleks võimalik rakendada tingimusel, et nõutud ruumitemperatuur oleks siiski tagatud.

Antud töö esimeses peatükis antakse ülevaade teoreetilistest alustest, mis toetab antud töös püstitatud eesmärkide olulisust ja aitab teemat lahti mõtestada. Samuti on selles peatükis kirjeldatud ka madaltemperatuurse kütte rakendamise võimalikkusest. Teises peatükis kirjeldatakse töös kasutatud mõõtmis- ja arvutusmetoodikat. Lisaks on antud ülevaade kalibreerimismudeli ehitamise ja simulatsioonide teostamise loogikast. Töö viimases peatükis esitletakse saadud mõõtmistulemusi ning nende põhjal leitud

soojusväljastust iseloomustavate kordaja  $K$  ja eksponendi  $n$  väärtusi. Kirjeldatakse jahtumiskatse tulemusi ja massiga radiaatori mudeli kalibreerimise parameetreid. Analüüsitakse erinevate küttekehade kasutamist IDA-ICE simulatsiooniprogrammis ning küttegaafiku madaldamise tulemusi.

## KIRJANDUSE ÜLEVAADE

Kolmanda põlvkonna kaugküttevõrke (*3rd Generation District Heating*) iseloomustavad maa-alused eelisoleeritud torud ning soojuskandja, mille temperatuur on 70-100 °C [5]. Maailm on liikumas jätkusuutlikumate kaugkütte lahenduste arendamise suunas [6]. See tähendab näiteks olemasolevate vanade võrkude renoveerimist, fossiilkütustel põhinevate katelde asendamist puiduhakkekateldegaga ning võimalusel koostootmisjaamade rajamist [5]. Selleks, et olla konkurentsivõimeline kaugkütte ettevõtte, toota kuluefektiivselt, vähendada trassi soojuskadusid ning parendada seejuures ka keskkonnale avalduvat mõju, tuleb liikuda madalamate soojuskandja temperatuuride suunas, kui seda on praegu [7]. Uue lähenemise ehk neljanda generatsiooni kaugküttevõrke (*4th Generation District Heating*) iseloomustab soojuskandja temperatuuriga kuni 60 (70) °C. [5]

Küttegaafiku alandamine ilma lisameetmeid kasutusele võtmata on võimalik, kui olemasolevad küttekehad on valitud üledimensioneeritult võrreldes hetkelise soojusvajadusega. See tähendab, et soojuskaod on eelnevalt arvatud väga madalale välisõhu temperatuurile, ruumi sisemised soojuskoormused on märgatavalt tõusnud. Østergaard ja Svendsen on uurinud, kui palju on 1900-ndatel ehitatud Taani elamute küttesüsteemidel potentsiaali temperatuuride alandamiseks. Uuringu tulemusena selgus, et tüüpilistes renoveerimata elamutes on suurem osa aastast võimalik hoone küttevajadus tagada madalamate temperatuuridega kui 55/35 °C. Renoveeritud hoonetes on küttevajadus võimalik tagada madalama kui 50 °C pealevoolu temperatuuriga 97% aastast. [8]

Rootsis viidi läbi uuring, milles analüüsiti 109 kortermaja radiaator küttesüsteemide temperatuurigraafikuid. Leiti, et enamik uuritavatest hoonetest vajab soojuskadude vähendamiseks siiski renoveerimist või siis küttepindade suurendamist, et minna üle madalamatele temperatuuridele. Arvutusliku välisõhu temperatuuri -16 °C juures oli 8% uuritud hoonetest küttesüsteemi pealevoolu temperatuur 55 °C või vähem. Välisõhu temperatuuride 0 °C ja 5 °C oli tulemus vastavalt 87% uuritutest ning kogu valim. See näitab potentsiaali alandada kaugkütte temperatuure mingi osa aastast. [9]

M. Harrestrup ja S. Svendsen leidsid samuti, et madalamatele temperatuuridele üleminek on võimalik renoveeritud hoonetes. Külmematel perioodidel võib tulla ette kõrge temperatuuriga soojuskandja vajadus, kuid enamuse aastast jääb pealevoolu temperatuur 60 °C ligi.[10]

Rohelisest mõtteviisist tingitud küttegaafiku madaldamine loob vajaduse suuremate soojusvahetuspindade jaoks. Järelikult üha tihedamini võib kohata soojuskandja väikest vooluhulka ja suurt temperatuuride erinevust. REHVA-s avaldatud artiklis on leitud, et standardis EN 442 toodud soojusväljastuse arvutamise valem eksponendi ja logaritmilise temperatuuride vahe kaudu on usaldusväärne sisuliselt kogu vooluhulga vahemikule, kuid väga väikeste vooluhulkade korral oli reaalne soojusväljastus väiksem kui arvatud. [11] Hiinas läbi viidud uuringus jõuti tulemusele, kus arvutusliku ja katseliselt leitud soojusväljastuse erinevus oli vähem kui 5%, mis on piisav täpsus insenertehnilisteks arvutusteks. [12]

Töö eksperimentaalse osa teostamisel on lähtutud standardist EVS-EN: 442 osa 2, kus kirjeldatakse katsestendi ülesehitust ning soojusväljastuse arvutamise meetodikat [13]. Lisaks kasutati arvutuste teostamiseks õpikut „Hoonete küte“ [14]. Samalaadseid katseid soojusväljastuse leidmiseks on läbi viinud ka A. B. ERDOĞMUŞ oma doktoritöös [15].

# 1 TEOREETILISED ALUSED

Antud peatükis tuuakse välja teoreetilised alused, millest lähtutakse töö koostamisel ning mis aitavad paremini mõista töö sisu.

## 1.1 Soojuse tootmine ja primaarpool

Kaugkütte areng sai Eestis alguse 1949. aastal, mil Kohtla-Järvel viidi kaugküttele 12 maja, mida varustati soojusega soojuselektrijaamast. Kaugkütte kasutamise juures oli probleemiks soojuse tootmise ja transportimise madal efektiivsus ning keskkonnareostus. Peamised energiatõhususega seotud meetmed Eesti kaugküttesektoris on hoonefondi ja torustike renoveerimine, vanade fossiilkütustel katelde asendamine puiduhakkekateldega ja koostootmisjaamade rajamine. Kõikidest Eesti kaugküttevõrkudest on täielikult või osaliselt renoveeritud 90%. [5]

Kaugkütte põlvkondi saab lihtsustatult kirjeldada torusüsteemi paigutuse, soojuskandja tüübi ja temperatuuri abil. Igat põlvkonda iseloomustab eelmisest madalamad soojuskandja temperatuurid. Neljanda põlvkonna süsteeme kirjeldab eesmärk varustada tarbijat madalatemperatuurilise soojuskandjaga ning teha seda väikeste võrgukadudega. Taanis on mitmeid edukaid näited, kus tarbijate vajaduste rahuldamiseks on kasutatud kuni 55 °C pealevoolu temperatuuri. [5] Neljanda põlvkonna kaugkütte peamine mõte on kõrge energiatõhusus ning taastuv- ja jääkenergia kasutamise suur osakaal. Suurimateks kaugkütte tarbijateks on korterelamud. [5]

35% Euroopa Liidus olevatest hoonetest on üle 50 aasta vanad ning ligi 75% hoonetest ei ole energiatõhusad. Kütteks, jahutuseks ning sooja tarbevee tootmiseks vajaminev energia moodustab ligi 80% kogu hoonete energiatarbest Euroopa Liidus. Selleks, et saavutada Euroopa Liidu energia ja keskkonna eesmäärke, tuleb ehitada madalama energiatarbega hooneid ning olemasolevaid hooneid renoveerida. [16]

Hoone soojusallika renoveerimiseks on erinevaid meetmeid. Näiteks korterelamu biomassil või fossiilsel kütusel töötava või otsest elektrikütet kasutava kütteseadme asendamine taastuvat kütust kasutava seadmega või korterelamu ühendamine kaugküttevõrguga. Hoonete renoveerimisega vähenevad kaugkütte ettevõtete müügiimahud, kuna hoonete soojusenergia vajadus väheneb. See annab võimaluse rakendada taastuvenergia lahenduste potentsiaali energeetika sektoris. [3]

Energiatõhususe nõuete rakendamise ning hoonete renoveerimise tulemusena muutub võimalikuks hoonete kütmine madalamate temperatuuridega.

Rekonstrueerimise pikaajalise strateegia kohaselt on oluline saavutada vähemalt energiamärgise klass C. Korterelamu puhul eeldab energiamärgise klassi C saavutamine välisseinte, katuse või pööningu soojustamist; kolmekordse klaaspaketiga akende paigaldamist; termostaatventiilidega kahetoru küttesüsteemi paigaldust; soojustagastusega ventilatsiooni paigaldust. [3]

## **1.2 Lõpptarbija ja sekundaarpool**

Eestis levinud nõukogudeaegset traditsioonilist kütelahendust iseloomustavad kõrged soojuskandja temperatuurid. Vanades elu- ja ühiskondlikes hoonetes kasutati malmradiaatorite dimensioneerimiseks temperatuurigraafikut 95/70 °C. [4] Alates 1990-ndast aastast alandati rekonstrueeritavates hoonetes soojuskandja temperatuure 80/60 °C ning uutes hoonetes 70/50 °C [14]. Roheeesmärkide ning kaugkütte arenguplaanide täitmiseks on tarvis hoone poolset tarbimist tõhustada, et oleks võimalik veelgi madalamate temperatuuridega soojuskandja kasutamine. Ka lokaalsed kütteallikad nagu soojuspump lahendused on efektiivsemad just madalamatel temperatuuridel. [17]

Jätkusuutliku kaugkütte digiõpikus toodi näited kuue erineva madalatemperatuurilise kaugkütte näidisprojekti kohta Euroopa Liidus. Toodud näidetes olid tarbijateni jõudva soojuskandja pealevoolu temperatuurid vahemikus 55...65 °C ning tagasivoolu temperatuurid 25...35°C. [5] Temperatuuride alandamisel on oluline, et see ei mõjutaks ruumis viibides inimese soojuslikku mugavust.[8]

Kaugküttevõrkude efektiivsemaks muutmisele seab piirangud tarbija. Soojuskandja temperatuuri määrab ära süsteem, mis vajab kõrgeimat pealevoolu temperatuuri. Uute hoonetega rajoonides määrab pealevoolu temperatuuri sooja tarbevee vajadus ning nõue tagada Legionella bakteri leviku ohutus. Olemasolevates võrkudes küttesüsteemi tarbimine ja küttekehade pinna suurus. [5]

Temperatuuride alandamist võimaldab küttekehade üledimensioneeritus. Selline olukord võib tekkida peale renoveerimist, kui hoone on muudetud soojapidavamaks [9]. Küttesüsteemi automaatne hüdrauliline tasakaalustamine ning sooja tarbevee tsirkulatsiooni vajaduse vähendamine, kuid tagades seejuures ka Legionella ohutuse,

on samuti lahendused, mis võivad saavutada madalamaid soojuskandja temperatuure.[7]

### **1.2.1 Radiaatorite soojusväljastus**

Küttesüsteeme kasutatakse nõuetekohase sisetemperatuuri tagamiseks ruumis, kui välisõhu temperatuur on sisetemperatuurist madalam [15]. Ruumi soojuskadu toimub tavaliselt läbi välispiirete, avatäidete ja infiltratsiooni. Lisaks võib vajada soojendamist ka ruumiõhk. Küttekehade soojusväljastus peab olema dimensioneeritud nii, et arvutusliku välisõhu temperatuuri juures oleks hoone soojuskaod kaetud. [14] Nõuetekohased ruumitemperatuurid hoone kütte dimensioneerimiseks Eestis on toodud standardites EVS 844:2022 ja EVS-EN 16798-1:20219. Korterite eluruumid dimensioneeritakse enamjaolt 21 °C.

Küttekehade ülesandeks on soojusenergia ülekandmine küttesüsteemis tsirkuleerivalt soojuskandjalt köetavatele ruumidele. Küttekehadelt toimub soojusülekanne kiirguslikul või konvektiivsel teel. Siledapinnalisem küttekeha eraldab rohkem soojust kiirguse teel, mis tagab ka ühtlasema temperatuuri ruumis, kuid seda vähem on tal kokkupuutepinda ruumiõhuga. Küttekehi, mis üle 25% soojusest annavad üle kiirguse teel nimetatakse radiaatoriteks. [4] Radiaatorid on ühed enamlevinumad küttekehad [14].

Soojusväljastust mõjutavad tegurid:

- küttekeha paigaldustingimused,
- küttekeha konstruktsioon või sektsioonide arv,
- küttekeha kuju,
- küttekeha pinnatemperatuur, ruumiõhu ja soojuskandja temperatuurid,
- küttekeha läbiv vooluhulk. [14], [9]

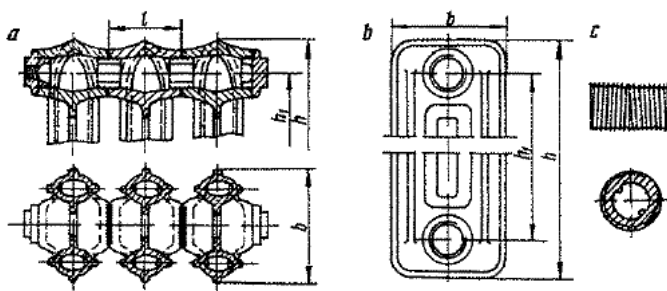
Soojusvahetuse mittelineaarsust kirjeldab eksponenttegur  $n$ . Eksponenttegur oleneb peamiselt küttekeha konvektiivse ja kiirgusliku soojusülekanne vahekorra ning jääb vahemikku 1,1-1,4. Mida suurem on  $n$  väärtus, seda suurem osakaal on konvektiivsel komponendil. Radiaatorite tootjad määravad selle väärtuse katseliselt vastavalt standardile EN 442-2 ning toovad selle välja ka toote tehnilistes andmetes [9].

Küttekeha konduktants ehk soojuseriväljastus  $K$  on seos soojuslähikandeteguri  $U$  ( $W/m^2 \cdot K$ ) ja küttekeha pindala  $A$  ( $m^2$ ) vahel. See kirjeldab soojusvahetust pinda. Soojuslähikandetegur on pöördväärtus küttekeha soojustakistusest. Soojustakistust mõjutavad soojusülekanDETegurid. Levinud ülekanDETeguri väärtused soojuskandjalt

küttekeha sisepinnale on  $\alpha_s = 100\text{-}300 \text{ (W/m}^2\cdot\text{K)}$  ning küttekeha välispinnalt ruumiõhule on  $\alpha_v = 10 \text{ (W/m}^2\cdot\text{K)}$  piires. [14]

## 1.2.2 Malmradiaator

Malmradiaator väljastab 25-30% soojust kiirguse teel ja 70-75% konvektsiooni teel. Nõukogude Liidus toodetavatest malmradiaatoritest oli enamlevinud tüüp M-140, millel sektsioonil ei olnud kaldribesid ning mida kasutati ka antud magistritöös katsekehana. [4]



Joonis 1. Malmradiaatori ehitus

Tüüp	Ühe sektsiooni mõõtmised mm				Ühe sektsiooni küttepind		Mass kg/ekv m <sup>2</sup>
	h	h <sub>1</sub>	b	l	m <sup>2</sup>	ekv. m <sup>2</sup>	
M-140	582	500	140	96	0,254	0,310	24,5
HM-150	585	500	155	99	0,254	0,310	24,2
РД-90	582	500	90	96	0,203	0,275	25,3
РД-26	582	500	190	100	0,205	0,275	25,0

Joonis 2. Malmradiaatori tehnilised andmed

Malmradiaatorid on korrosioonikindlad ning mittetundlikud soojuskandja kvaliteedi suhtes ning sõltuvalt töötingimustest võib nende eluiga olla kuni 50 aastat. Sellist tüüpi radiaatorite puudustena võib välja tuua suhteliselt raske tühimassi ning aeglase soojusinerksi. [18] Materjalina on malm suure soojusmahtuvusega ja suudab tund aega peale välja lülitamist eraldada 30% soojusvõimsusest. [14]

Enne 90-ndaid kasutati küttekehade efektiivsuse võrdlemiseks mõistet ekvivalentruutmeetrit. 1 ekv on sellise tingküttekeha küttepind, mille soojusvool on 506 W temperatuuritingimuste 95/70/18 °C juures. Ekvivalentruutmeeter ei võrdu küttepinna suurusega ruutmeetrites, vaid sõltub küttekeha tõhususest. See teeb malmradiaatori M-140 soojusväljastuseks ühe sektsiooni kohta ligi 160W. [14]



### **1.3 Madaltemperatuurse kütte rakendamise probleemid**

Üks tarbija võib määrata kogu kaugkütte süsteemi temperatuuri. Kõrged tagasivoolu temperatuurid kaugkütte süsteemis võivad negatiivselt mõjutada hüdraulilist võimekust ja tootmise efektiivsust.[7]

Piirkondades, kus osa hooneid renoveeritakse ja osa mitte, pole madaltemperatuurse kaugkütte rakendamine lihtne, kuna renoveerimata hoonete soojusvajadus on jätkuvalt suur. Eestis on tehtud paar juhtumianalüüsi, kus on uuritud madaltemperatuurilise küttesüsteemi ühendamist kõrgtemperatuurilisse kaugküttevõrku. Näiteks Lahekalda arendus, kus uuriti võimalust ühendada uued hooned kaugküttevõrgu tagasivoolu torule. Kui uusarendusele luuakse eraldi katlamaja, siis on madalamat temperatuurigraafikut kergem rakendada. [17]

Olemasolevate küttesüsteemide kasutamise probleemid võivad tekkida süsteemi amortiseerumisest. Küttekehad võivad olla setetest ummistunud ja sellest tulenevalt eraldada vähem soojust. Lisaks tekitavad nad sellisel juhul rohkem takistust. Potentsiaali on kaugküte temperatuure alandada mingi osa aastast, kuid enamik hoonetest siiski vajab renoveerimist või küttepinna suuarendamist küttegaafiku alandamiseks.[9]

## **2 METOODIKA**

Antud peatükis kirjeldatakse katsestendi, mõõtmis- ja arvutamismetoodikat ning katsekehasid. Lisaks antakse ülevaade IDA-ICE mudeli koostamise põhimõtetest ning simulatsioonide läbiviimise töökäigust.

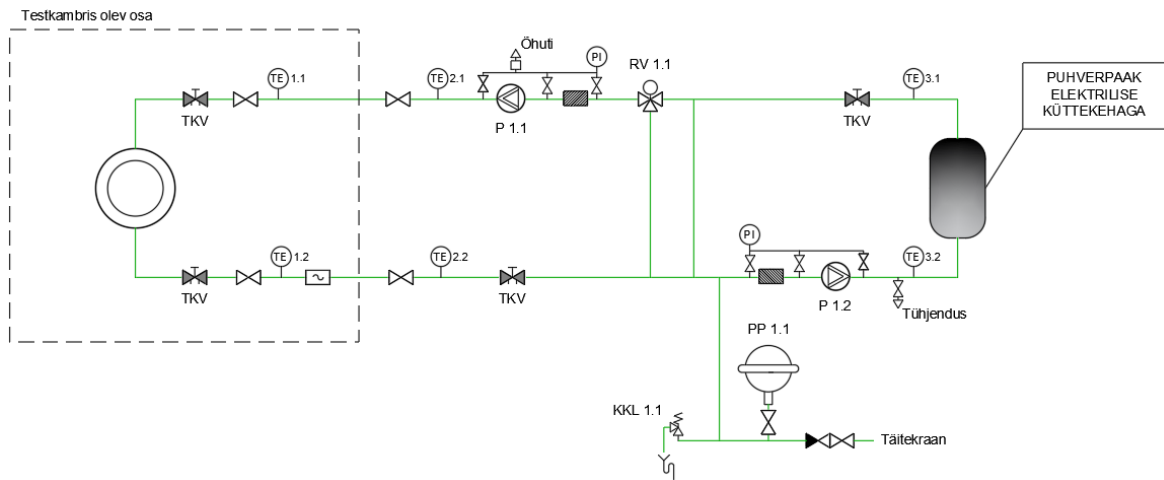
### **2.1 Katsestendi kirjeldus**

#### **2.1.1 Testkamber**

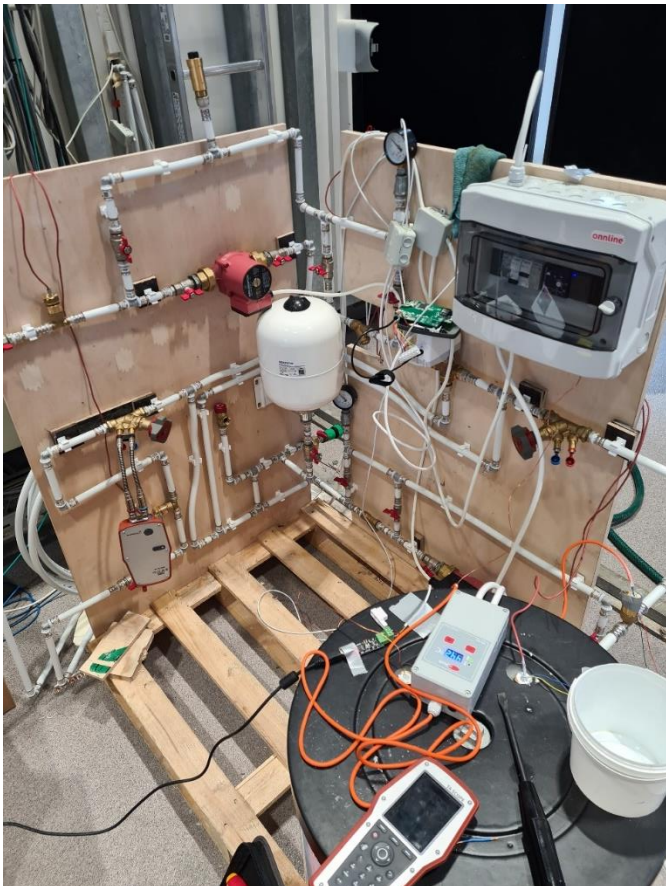
Antud magistritöö raames tehtud katsed viidi läbi Tehnikaülikooli õppehoone Ehituse Mäemajas olevas testkambris. Testkambri näol on tegu siseruumis oleva, soojuslikult hästi isoleeritud kambriga, millest soojusvool halli on viidud minimaalseks. Kambrile on hoidmiseks võimalik ette anda vajalikke sisekliima tingimusi. Katsete teostamise ajaks seadistati testkamber hoidma endas 20 °C siseõhu temperatuuri. Kuna katsete käigus radiaatorid pidevalt kütsid ruumi, siis küttevajaduse tekitamiseks oli kambril tarvis vastu jahutada. Ruumi jahutamine toimus laes oleva ventilaatori abil. Testkambri temperatuuri reguleerimise täpsus on 0,1 °C ja temperatuuri püsivus  $\pm 0,2$  °C [19].

#### **2.1.2 Küttesõlm**

Katsete teostamiseks ehitati testkambrist väljapoole küttesõlm. Sooja vett toodeti 60 liitrisesse soojustatud akumulatsioonipaaki paigaldatud elektrilise küttekeha abil. Elektrilise küttekeha tööd juhiti paaki paigaldatud temperatuuriandurite abil. Selleks, et tagada soovitud pealevooluvee temperatuuri paigaldati sõlme ajamiga 3-tee ventiil vee segamiseks. Mitmete torukolmikutesse paigaldatud temperatuuriandurite abil mõõdeti pealeminevat ja tagastuvat temperatuuri kuues erinevas punktis. Lisaks on katsestendis kasutatud tasakaalustusventiile vooluhulga seadistamiseks ning ultrahelivooluhulgamõõturit, millega mõõdeti radiaatorit läbivat vooluhulka. Vee ringluse tagamiseks on kasutatud fikseeritud kiirusel töötavaid tsirkulatsioonipumpasid.



Joonis 3. Küttesõlme põhimõtteline skeem

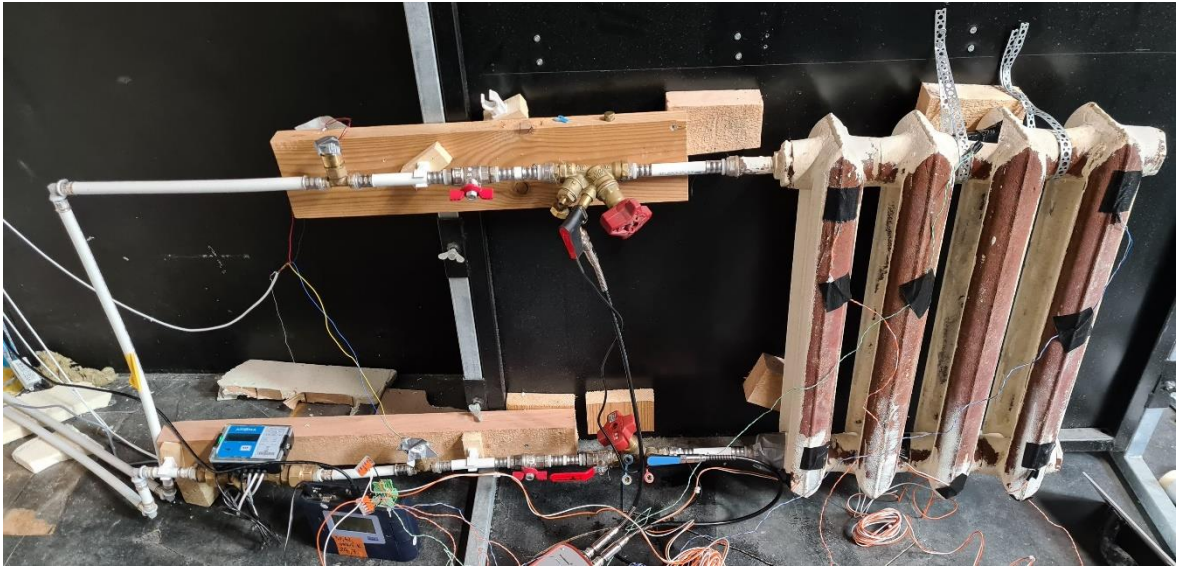


Pilt 1. Küttesõlm

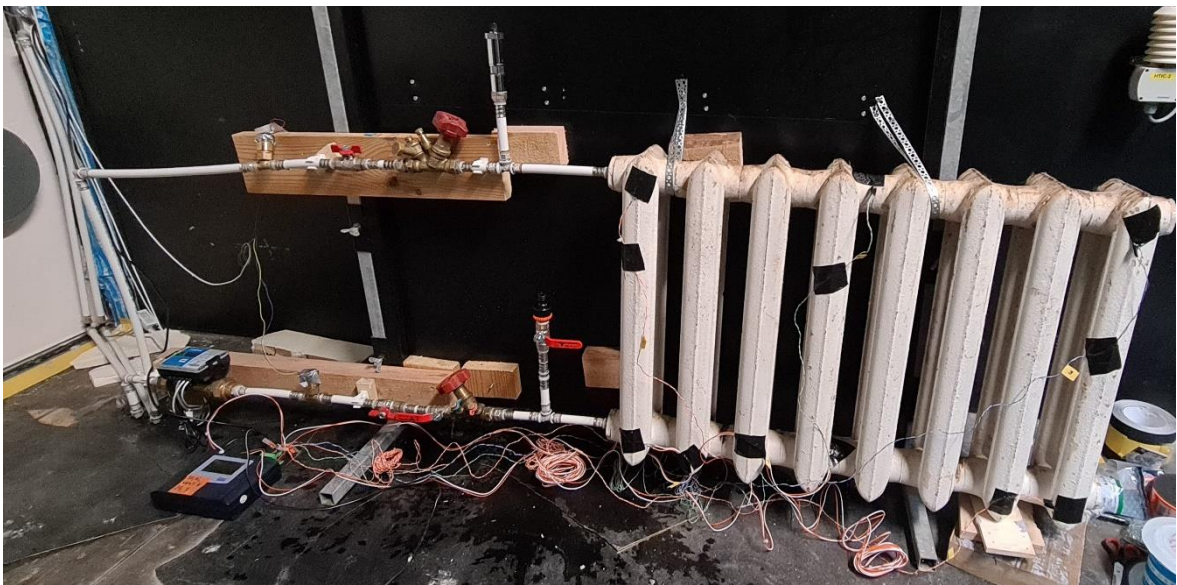
### 2.1.3 Katsekehad

Katsekehadeks on kaks malmradiaatorit ilma täiendava diagonaalribistusega (4-sektsiooniline ja 8-sektsiooniline). Tegu on pikaajalises eksploatatsioonis olnud radiaatoritega ning enne katsete teostamist neile läbipesu ei tehtud. Peale- ja tagasivoolu temperatuurid mõõdeti küttekeha lähedalt torukolmiku pealt ja vahetult

peale küttesõlme. Vooluhulk seadistati kambrist väljas asuva ventiili reguleerimisega, kuid näitu kontrolliti torule paigaldatud ultraheli-vooluhulgamõõturilt.



Pilt 2. 4-sektsiooniline katsekeha



Pilt 3. 8-sektsiooniline katsekeha

## 2.2 Töökäik

### 2.2.1 Katsekehade soojusvõimsuste arvutamine

Katsekehade arvutuslike ja eksperimentaalsete ehk mõõdetud soojusvõimsuste arvutamiseks kasutati katsetulemustest andmeid pealevoolu- ja tagasivoolu temperatuuri, ruumiõhu temperatuuri ning vooluhulga kohta. Mõõtmisi teostati kuni kolmel vooluhulgal ning kuni üheksal erineval pealevoolutemperatuuril.

Testitud radiaatorite eksperimentaalsed soojusvõimsused leiti valemiga [14];

$$P_e = G \cdot c_p \cdot \rho \cdot (t_{pv} - t_{tv}) \quad (2.1)$$

kus

$P_e$  – eksperimentaalne võimsus, W

$G$  – massivooluhulk, kg/s

$c_p$  – soojuskandja masserisoojus, kJ/(kg·K)

$\rho$  – soojuskandja tihedus, kg/m<sup>3</sup>

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

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

Testitud radiaatorite arvutuslikud soojusvõimsused leiti valemiga [14];

$$P_a = K \cdot \Delta t_{ln}^n \cdot \eta \quad (2.2)$$

kus

$P_a$  – arvutuslik võimsus, W

$K$  – küttekeha konduktants ehk soojuseriväljastus, W/K

$n$  – küttekeha iseloomustav eksponenttegur

$\eta$  – küttekeha paigaldustingimustest sõltuv parandustegur, mille väärtus läbiviidud katsel oli 1, kuna soojuskandja voolusuund oli ülevalt alla.

Küttekehasse siseneva ja väljuva ning ruumiõhu temperatuuride logaritmiline vahe leiti valemiga [14];

$$\Delta t_{ln} = \frac{t_{pv} - t_{tv}}{\ln \frac{t_{pv} - t_0}{t_{tv} - t_0}} \quad (2.3)$$

kus

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

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

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

$t_0$  – ruumiõhu temperatuur, °C.

Soojusvõimsused arvutati kolme erineva olukorra jaoks. Esmalt kasutati temperatuure, mis saadi radiaatori läheduses olevatelt anduritelt. Esiagne plaan töö koostamisel oligi nende andurite tulemusi kasutada, kuid analüüsi käigus selgus, et andurite töös ilmnis häiringuid. Seetõttu kasutati soojusvõimsuste arvutamiseks temperatuure ka anduritelt, mis paiknesid küttesõlmes enne torude testkambrisse sisenemist. Kolmanda olukorra jaoks arvutati kõigepealt soojuskaod sõlmes olevatelt temperatuurianduritelt küttekehani, kuna ühendustorustik oli isoleerimata. Vastavalt saadud tulemusele

korrigeeriti proportsionaalselt peale- ja tagasivoolu temperatuure ning leiti korrigeeritud soojusvõimsused.

Ruumis paikneva torustiku soojuserikaod leiti valemiga [14];

$$\varphi = (t - t_v) / R_t \quad (2.4)$$

kus

$\varphi$  – soojuserikaod, W/m

t – soojuskandja keskmine temperatuur, °C

$t_v$  – ümbritseva keskkonna temperatuur, °C

$R_t$  – torustiku kogusoojustakistus, (m·K)/W.

Toru kogusoojustakistuse  $R_t$  leidmiseks liideti toru seinaga soojustakistus  $R_{\text{toru}}$  ja toru pinna soojustakistus  $R_s$ , mis leiti valemitega [14];

$$R_{\text{toru}} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda} \ln \frac{d_v}{d_s} \quad (2.5)$$

kus

$R_{\text{toru}}$  – materjalikihi soojustakistus, (m·K)/W

$\lambda$  – materjali soojuserijuhtivus, W/(m·K)

$d_v$  – materjalikihi välisläbimõõt

$d_s$  – materjalikihi siseläbimõõt;

$$R_s = \frac{1}{\pi \cdot d \cdot \alpha} \quad (2.6)$$

kus

$R_s$  – toru pinna soojustakistus, (m·K)/W

d – toru välisläbimõõt, m

$\alpha$  – toru pinna soojusülekannekoefitsient, W/(m<sup>2</sup>·K).

Toru välispinna soojusülekannekoefitsient  $\alpha_v$  ruumis leiti valemiga [14];

$$\alpha_v = 10,3 + 0,05 \Delta t \quad (2.7)$$

kus

$\alpha_v$  – toru pinna soojusülekannekoefitsient, W/(m<sup>2</sup>·K)

$t_{se}$  – toru välispinna temperatuur, °C

$t_0$  – ümbritseva keskkonna temperatuur, °C.

### 2.2.2 Soojusväljastuse koefitsiendi K ja eksponendi n leidmine

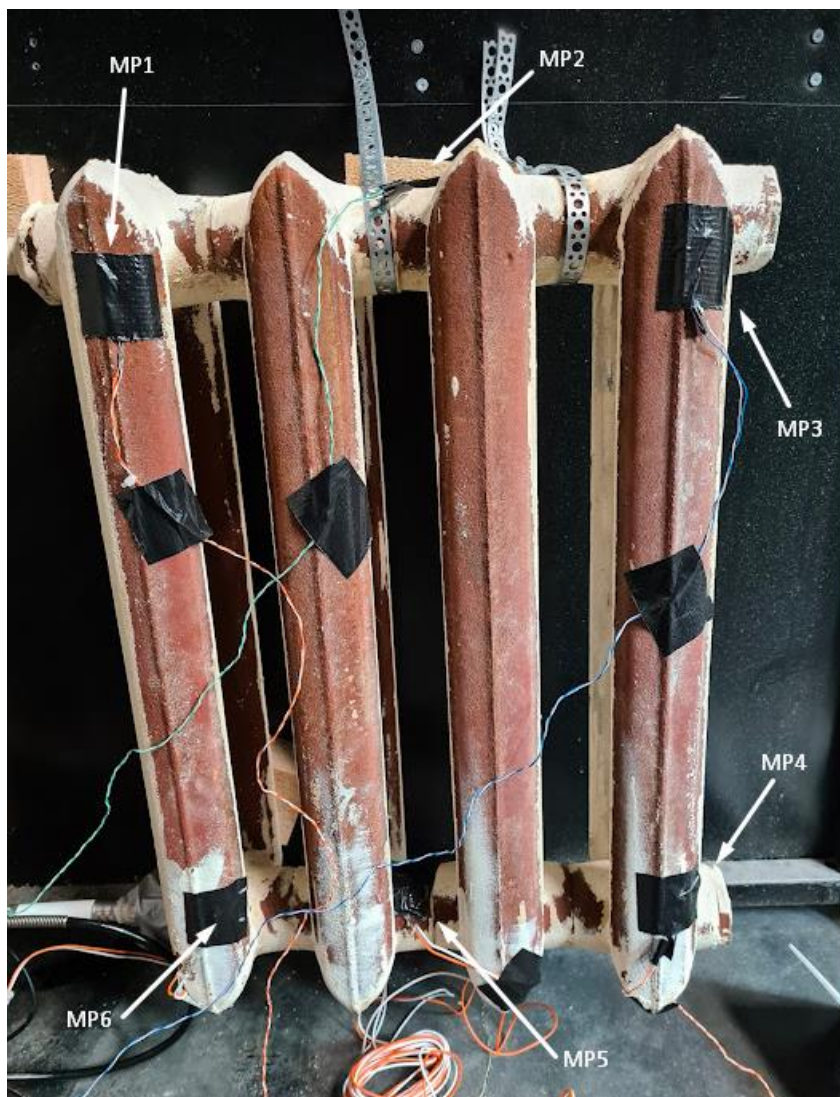
Töö üheks eesmärgiks on hinnata küttekeha soojusväljastuse koefitsiendi K ja eksponenttegi n väärtusi erinevatel töötingimustel (vt. valem 2.2). Eksponendi n ja kordaja K väärtuste leidmiseks kasutati MS Excel funktsiooni „Solver“. Tegemist on funktsiooniga, mis võimaldab etteantud kriteeriumile leida iteratiivselt



sisendparameetrite väärtuseid. Eelnevalt arvutatud eksperimentaalsete ja arvutuslike soojusvõimsuste vahel leiti igale vaadeldud tööpunktile ruutkeskmine viga (RMSE). Muutes K ja n väärtusi leiti „Solver“ funktsiooni abil minimaalne viga.

### 2.2.3 Katsekeha jahtumine

Radiaatori jahtumise mõõtmiseks paigaldati sellele 6 temperatuuriandurit hajutatult üle küttepinna (vt. pilt 4). Soovitud pealevoolutemperatuuri stabiliseerumisel fikseeriti vooluhulk ja temperatuuride info hilisemaks soojusvõimsuste arvutamiseks. Seejärel lülitati tsirkulatsioonipumbad välja ning eraldati kambris olev katsestendi osa kuulkraanide sulgemisega. Testkamber fikseeriti hoidma 20 °C.



Pilt 4. Mõõtepunktide (MP) asukohad katsekehal

### 2.2.4 Mõõteseadmed

Katsed teostati tabelis 1 toodud mõõteseadmete abil. Küttesõlmes oleva 3-tee ventiili ajami juhtimine toimus elektroonilise kontrolleri abil.

Mõõteseade	Squirrel SQ2010	TA-SCOPE	Ultrasonic water meter Qalcosonic F1
Kirjeldus	Andmeluger	Diferentsiaalrõhu manomeeter	Ultraheli-vooluhulgamõõtur
Pilt			
Mõõtepiirkond	-20...65°C	0 kPa...200 kPa	0,0064...2 m3/h
Mõõtetäpsus	±0,1% + 0,1% näidust	±1% näidust	≤ +30 °C ±2% > +30 °C ±3%

Tabel 1. Katsete teostamisel kasutatud mõõteseadmed

## 2.2.5 Massiga radiaatori mudel

Antud magistritöö raames sooviti simuleerida katsetatud radiaatorite soojuslikku käitumist. Selleks kasutati IDA-ICE 4.8 programmi. Tavaline ideaalne küttekeha IDA-s kujutab endast punktallikat, mis ei oma massi ega juhindu katla tööst. Samuti saavutavad nad koheselt vajaliku võimsuse, v.a. kui tsooni vajaminev võimsus on üle defineeritud maksimumvõimsuse. Ideaalne küttekeha sobib hästi energiavajaduse leidmiseks, kuid ruumi detailsema soojuslevi ja dünaamika kirjeldamiseks sooviti kasutada täpsemat mudelit, et paremini simuleerida reaalselt olukorda, kus toimub ka küttekeha soojenemine ja jahtumine.

Selleks loodi simulatsioonimudel, milles kasutati dünaamilist radiaatori mudelit (*DynRad* või *radiator with mass*). Parameetrid, mida dünaamilise radiaatori juures täpsustati olid mass, geomeetria, soojusväljastuse kordaja  $K$ , eksponenttegur  $n$ , soojusülekande tegur soojuskandjalt küttekeha sisepinnale  $K_{LIQ}$  ning soojusülekande tegur küttekeha välispinnalt ruumiõhule  $K_{AIR}$ . Lisaks täpsustati vooluhulka ning soojusallikast tulevaid soojuskandja temperatuure. Radiaatori massi leidmiseks kaaluti katsekehad ja neid täitva vee kogus eelnevalt ära. Tulenevalt asjaolust, et IDA-sse saab lisada vaid vedeliku massi, siis arvutati malmile vee ekvivalent ehk vee kaal, mis vastab malmi etteantud kaalule. Simulatsiooni teostamiseks lisati programmi vee ja arvutatud ekvivalendi summaarne mass. Vee ekvivalent arvutati soojusmahtuvuse kaudu;

$$C = c_p \cdot m \quad (2.8)$$

kus

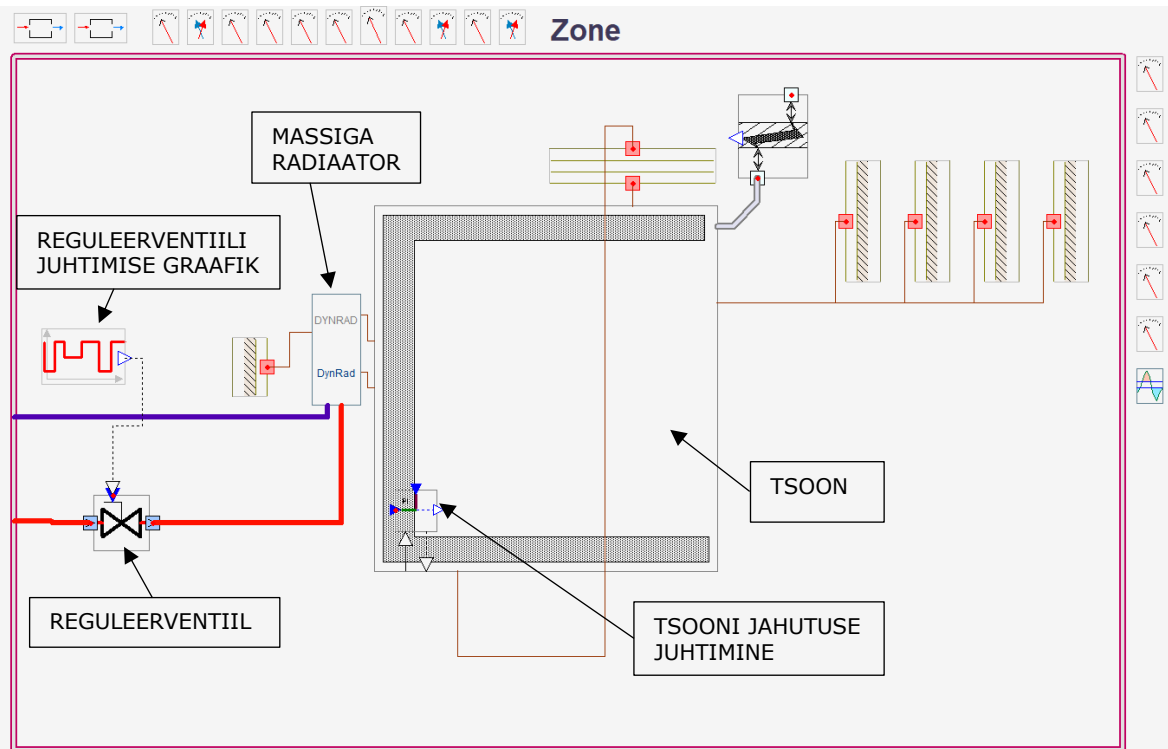
$C$  – soojusmahtuvus, kJ/K



$c_p$  – soojuskandja masserisoojus,  $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

$m$  – mass,  $\text{kg}$ .

Massiga radiaatori mudeli kalibreerimiseks logiti simulatsiooni käigus küttekeha pinnatemperatuuri ning küttekeha läbiva soojuskandja temperatuure. Radiaator mudeldati sarnaselt testkambri adiabaatsete piiretega tsoonis. Reguleerventiilile määrati graafik, mille alusel sulges see end statsionaarse olukorra saavutamisel. Simulatsiooni tulemusel saadud jahtumiskõverat hakati visuaalsel hindamisel erinevate parameetrite muutmise viimast vastavusse katsel saadud jahtumiskõveraga.

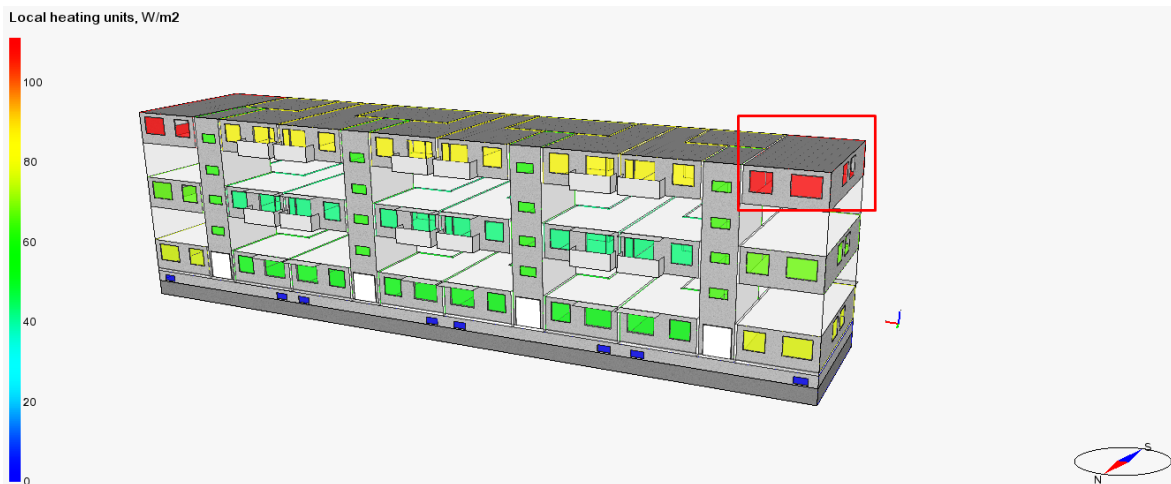


Pilt 5. Jahtumiskatse simuleerimiseks loodud mudel

## 2.2.6 IDA-ICE energiasimulatsioonid

Kalibreeritud massiga mudeli katsetamiseks on kasutatud kolme erinevat kortermaja simulatsioonimudelit. Ühel juhul on tegu renoveerimata hoonega. Teistel juhtudel on simulatsioonimudel sama hoone kohta, kuid neis on rakendatud mõnda renoveerimise meetet.

Kasutatud simulatsioonimudelid on Martin Thalfeldti poolt varasemalt koostatud ja defineeritud. Renoveerimata mudeli näol oli tegu 1960-1990 aastatel ehitatud tüüpilise paneelilamuga. Renoveerimise meetmetena kasutati katuse ning seinte soojustamist ja akende vahetamist soojapidavamate vastu. Renoveeritud mudelites tekib erinevus sellest, et ühes variandis on kasutatud soojustagastusega ventilatsiooni ning teises variandis väljatõmbeõhu soojuspumpa. [20]



Pilt 6. Renoveerimata simulatsiooni mudeli küttevajadus W/m<sup>2</sup> kohta [20]

Antud töö eesmärgiks ei ole analüüsida rakendatud renoveerimise meetmete tõhusust ega simulatsioonimudelit ennast, vaid keskenduti kõige kriitilisema korteri küttevajadustele (pildil 6 märgitud punase kastiga). Sellest tulenevalt leiti esmalt renoveerimata mudeli alusel kõige kriitilisema küttevajadusega ruum. Ruumide kütte seadeväärtuseks määrati 21 °C ning kasutati lihtsustatud katla mudelit. See tähendab, et katlale anti temperatuurigraafik ette ning katla tööd täiendavalt ei modelleeritud.

Vastavalt simulatsioonist saadud soojusvajadusele dimensioneeriti korterisse vajalik arv küttekehi. Küttekeha dimensioneeriti käesoleva töö eksperimentaalse osa analüüsi tulemustel. Selleks kasutati 4-sektsioonilise radiaatori soojusväljastust kirjeldavaid parameetreid, kuna tollega viidi läbi jahtumise katse ja massiga radiaatori mudeli kalibreerimine. Lihtsustusena ei hakatud korterisse lisama mitut radiaatorit vaid kasutati ühte, mille pikkust korrigeeriti vastavalt küttekehade arvule.

Renoveeritud simulatsioonimudelitega hinnati, kui madalale saaks küttegraafikut viia, et selle konkreetse renoveerimise lahenduse baasil oleks ruumitemperatuur 21 °C arvutuslikul välisõhu temperatuuril ikkagi tagatud. Selle tarbeks ehitati simulatsioonimudelisse eelnevalt leitud parameetritega massiga radiaatori mudel ning teostati küttevõimsuste arvutus, peale mida hakati temperatuurigraafikut muutama.

Kõige madalama pealevoolu temperatuuri alusel leiti uus välisõhu temperatuurist sõltuv küttegraafik katlale. Selleks kasutati MS Excelis loodud arvutustabelit, mis põhineb õpiku „Hoonete küte“ peatükk 11.1.6. toodud reguleerimisgraafiku väljatöötamise valemitega [14]. Arvutusliku tagasivoolu temperatuuri leidmisel lähtuti põhimõttest, et maksimaalne vooluhulk vaadeldavas olukorras jääks samaks. Saadud graafik sisestati

IDA-sse, et teha energiaanalüüs erinevate IDA-ICE programmis olevate küttekehade vahel ning hinnata, kas nende kasutamisel on erinevust soojusvajadusele.

Energiasimulatsioonis kasutati Eesti energiaarvutuse baasaasta kliimafaili. Energiakulu võrreldi kahes renoveerimislahenduses kasutatud kolme erineva küttekeha vahel – massiga radiaator, ideaalne küttekeha ja massita vesiradiaator.

## 3 TULEMUSED JA ANALÜÜS

### 3.1 Soojuskadu

Katsestendi ehitamisel kasutati komposiitтору suuruses 16x 2,0 mm. Komposiitтору soojusjuhtivus on  $\lambda = 0,41 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  [21]. Torustiku pikkus temperatuurianduritest katsekehani oli kokku 11,8 m. Suurema katsekeha korral moodustasid soojuskaod ~20% mõõdetud soojusvõimsusest. Väiksema katsekeha korral oli see väärtus ~30%.

### 3.2 Soojusvõimsused

Enne katsete teostamist pandi paika soovitud vooluhulga ja temperatuuride seadeväärtused. Reaalselt olid seadeväärtused katsete teostamise käigus veidi varieeruvad ning sellest tulenevalt on tabelites need välja toodud vahemikena. Pealevoolu temperatuuri seadeväärtust muudeti 5 või 10 kraadise sammuga. Tagasivoolu temperatuuri stabiliseerumine toimus ~15 minutiga. Peale stabiliseerumist saadud mõõtmisandmeid kasutati hilisema analüüsi tegemiseks. Õhutemperatuur testkambris oli ühtlaselt ja konstantselt 20°C.

Katsetulemuste analüüsimise käigus tehti soojusväljastuse arvutused läbi kahelt temperatuuriandurite paarilt saadud temperatuuridega. Tabelites 2...5 on toodud soojusvõimsused, mille arvutamiseks on kasutatud temperatuure mõõdetuna anduritelt TE1.1 ja TE1.2 (vt. joonis 3), mis asusid testkambris katsekeha juures.

Vooluhulk (l/h)	Temperatuur (°C)								
	33...35	36...40	40...45	44...50	48...51	52...60	60...71	68...72	68...84
50 (46...59)	229	289	346	401	469	506	569	609	582
75 (87...96)	292	399	505	608	716	829	1034	1252	1357
100 (76...99)	482	635	782	913	1067	1207	1529	1666	1446

Tabel 2. 4-sektsioonilise katsekeha eksperimentaalsed soojusvõimsused, W

Vooluhulk (l/h)	Temperatuur (°C)								
	33...35	36...40	40...45	44...50	48...51	52...60	60...71	68...72	68...84
50 (46...59)	318	405	489	570	653	745	914	1075	1062
75 (87...96)	397	509	618	721	821	924	1117	1309	1401
100 (76...99)	335	428	518	605	691	776	1073	1097	1145

Tabel 3. 4-sektsioonilise katsekeha arvutuslikud soojusvõimsused, W

Vooluhulk (l/h)	Temperatuur (°C)							
	35	40	44...45	49...50	54...55	59...60	68...70	77...80
50 (45...54)	430	623	726	849	958	1075	1323	1543
100 (96...103)	337	460	581	720	856	1067	1438	1966

Tabel 4. 8-sektsioonilise katsekeha eksperimentaalsed soojusvõimsused, W

Vooluhulk (l/h)	Temperatuur (°C)							
	35	40	44...45	49...50	54...55	59...60	68...70	77...80
50 (45...54)	321	430	569	700	840	968	1230	1484
100 (96...103)	431	586	745	902	1068	1217	1533	1836

Tabel 5. 8-sektsioonilise katsekeha arvutuslikud soojusvõimsused, W

Teisel juhul kasutati soojusvõimsuste arvutamiseks temperatuure, mis mõõdeti anduritelt TE2.1 ja TE2.2 (vt. joonis 3). Sõlme juures olevatelt anduritelt logitud info aga ei kajasta tegelikku küttekehasse sisenevat ja väljuvat temperatuuri, mistõttu neid tulemusi ei esitleta.

Tabelites 6...9 on toodud soojusvõimsused, mille arvutamiseks on kasutatud temperatuure, mis on mõõdetud sõlmes olevatelt anduritelt TE2.1 ja TE2.2 (vt. joonis 3) ning millest on maha lahutatud soojuskadu katsekehani.

Vooluhulk (l/h)	Temperatuur (°C)								
	34...35	39	44	49	54	58...59	68...77	77...78	81...83
50 (46...59)	159	230	308	391	456	511	641	738	846
75 (87...96)	188	266	342	428	518	604	808	983	1079
100 (76...99)	209	293	371	455	549	632	925	952	956

Tabel 6. 4-sektsioonilise katsekeha eksperimentaalsed soojusvõimsused, W

Vooluhulk (l/h)	Temperatuur (°C)								
	34...35	39	44	49	54	58...59	68...77	77...78	81...83
50 (46...59)	187	257	328	400	476	556	713	874	911
75 (87...96)	195	270	347	425	504	587	747	917	1003
100 (76...99)	195	270	346	424	506	587	904	924	992

Tabel 7. 4-sektsioonilise katsekeha arvutuslikud soojusvõimsused, W

Vooluhulk (l/h)	Temperatuur (°C)							
	34...35	39...40	44	49	54	58...59	68...69	77...79
50 (45...54)	301	432	537	662	779	915	1172	1399
100 (96...103)	344	486	622	774	935	1162	1495	1882

Tabel 8. 8-sektsioonilise katsekeha eksperimentaalsed soojusvõimsused, W

Vooluhulk (l/h)	Temperatuur (°C)							
	34...35	39...40	44	49	54	58...59	68...69	77...79
50 (45...54)	279	401	534	668	809	938	1226	1519
100 (96...103)	331	471	622	778	939	1096	1445	1811

Tabel 9. 8-sektsioonilise katsekeha arvutuslikud soojusvõimsused, W

Saadud soojusvõimsuste alusel leiti MS Exceli „Solver“ funktsiooni abil minimaalne ruutviga arvutuslike ja eksperimentaalsete tulemuste vahel. Seda tehes saadi soojusväljastuse koefitsiendi K ja eksponentteguri n katselised väärtused. Vea minimeerimine teostati kogu temperatuurivahemikule korraga. Tabelites 10...11 on

toodud tulemused mõlema katsekeha jaoks. Esimene veerg kirjeldab soojusvõimsuste arvutamiseks kasutatud sisendinfo allikat.

	RMSE	K	n
Temperatuuriandurid katsekeha juures	271,21	39,20	0,88
Temperatuuriandurid küttesõlmes	43,76	14,12	1,14
Temperatuuriandurid küttesõlmes - soojuskadu	45,31	9,98	1,14

Tabel 10. 4-sektsioonilise katsekeha tulemused

	RMSE	K	n
Temperatuuriandurid katsekeha juures	139,47	23,92	1,11
Temperatuuriandurid küttesõlmes	38,58	16,87	1,24
Temperatuuriandurid küttesõlmes - soojuskadu	44,94	12,66	1,27

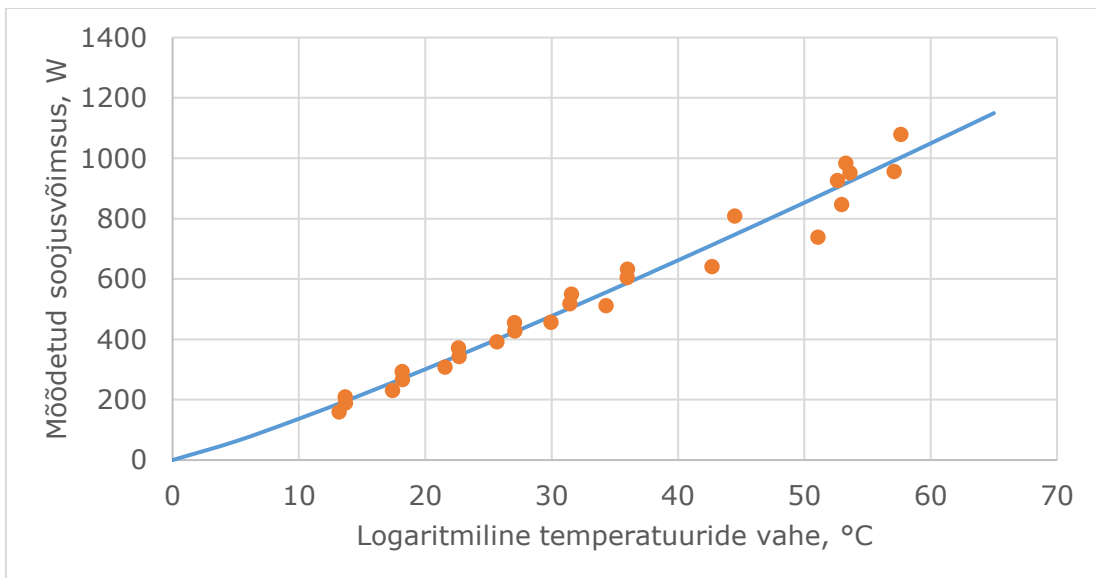
Tabel 11. 8-sektsioonilise katsekeha tulemused

Tulemustest selgub, et katsekehade läheduses asuvate temperatuuriandurite töös ilmselt häiringuid. Mõõdetud võimsuste arvutamisel oli olukordi, kus katsekeha andis välja rohkem soojusvõimsust, kui sõlmes mõõdetud andmete kohaselt võimalik oli. Minimaalne ruutviga on väga suur ning samuti ei vasta saadud K ja n väärtused kirjanduses toodule. Nagu eelnevalt mainitud, siis küttesõlmest saadud temperatuurid ei kirjelda katsekeha läbiva soojuskandja temperatuure, mistõttu pole neid korrektselt kasutada edasiseks analüüsiks.

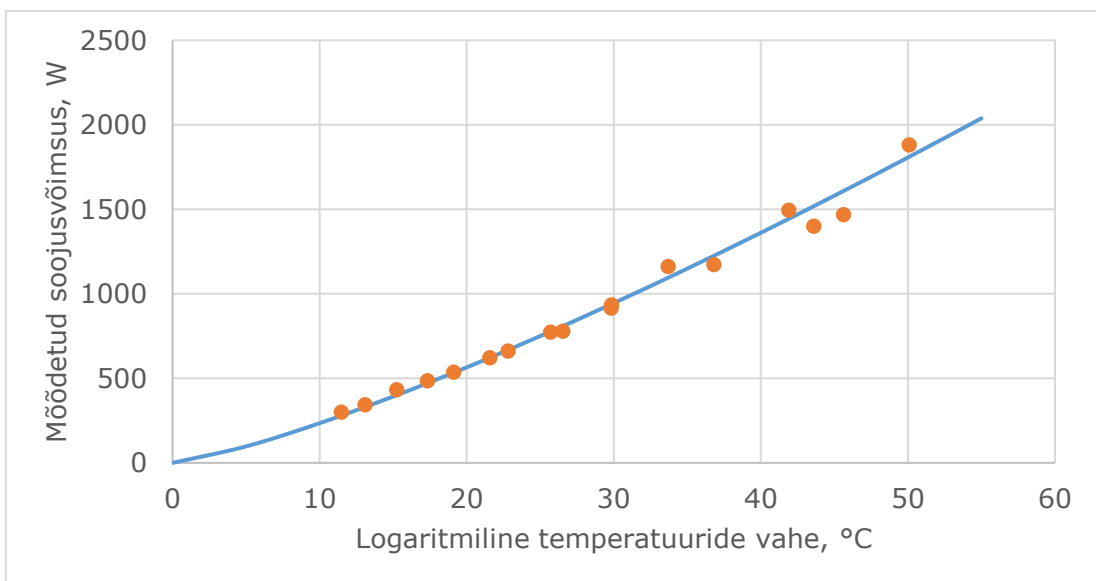
Kõige parem tulemus on saavutatud olukorras, kus küttesõlmes olevatelt anduritelt saadud temperatuure on korrigeeritud vastavalt soojuskadudele. Neid väärtusi on kasutatud ka edasiseks tööks. Tabelitest 10 ja 11 on näha, et soojuskaost lähtumine mõjutab ainult valemi lineaarset osa ehk kordaja K komponenti. Mõlema katsekeha korral soojuskaost maha lahutamine vähendas K komponenti 4 ühiku võrra.

EkspONENTtegur n kirjeldab küttekeha soojusülekanne. Mida suurem on kiirgusliku komponendi osakaal, seda väiksem on n väärtus. Väiksemal katsekehal on kiirgusliku komponendi osakaal suurem, kuna radiaatori sektsioonide lisamisel hakkavad nad teineteise efektiivsust mõjutama. Seda kinnitavad ka katsetulemused, kus 4-sektsioonilise küttekeha eksponent on väiksem. Radiaatorite tootjad määravad eksponenti n väärtuse katselist igale radiaatori tüübile. Käesoleva töö katsetulemused ei saa järeldada, et kasutatud malmradiaatorid oleks samatüübilised.

Katseliselt saadud kordaja  $K$  ja eksponendi  $n$  väärtustega on leitud arvutusliku soojusvõimsuse karakteristik erinevate logaritmiliste temperatuuride juures, joonisel toodud sinisega. Punktidena on graafikule lisatud mõõdetud soojusvõimsused.



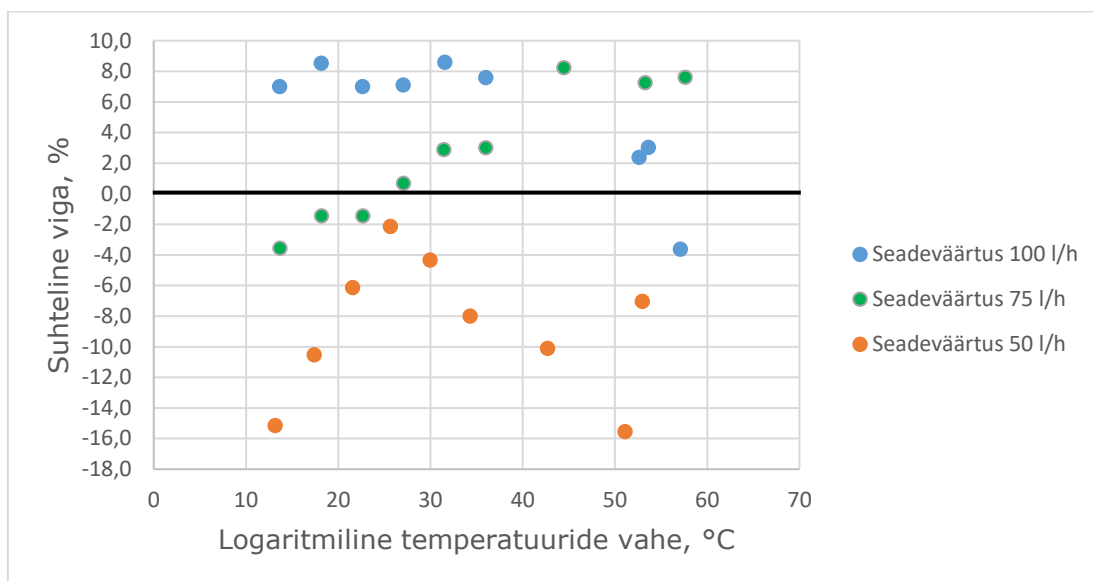
Joonis 4. 4-sektsioonilise katsekeha soojusvõimsusi kirjeldav graafik



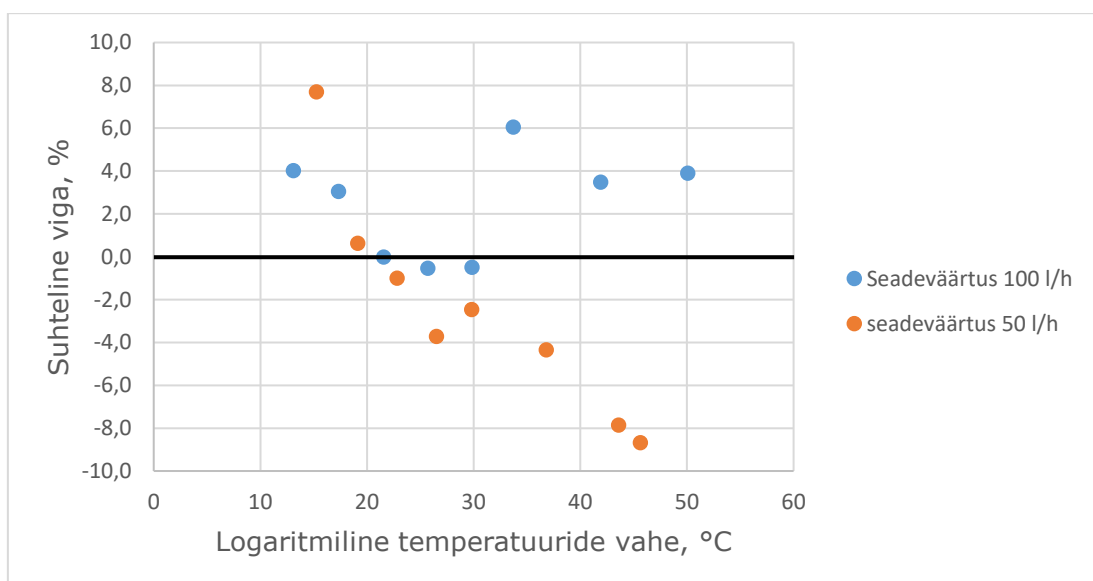
Joonis 5. 8-sektsioonilise katsekeha soojusvõimsusi kirjeldav graafik

Originaalis on malmradiaatorid mõeldud kõrgtemperatuurse küttekehana. Sellest tulenevalt võis arvata, et erinevatele temperatuurivahemikele kehtib erinev eksponendi väärtus. Katsetulemustest aga selgub, et mõõtetulemuste alusel leitud  $K$  ja  $n$  väärtustega saadud karakteristikuline võrrand kehtib mõlema radiaatori puhul kogu logaritmilise temperatuuride vahemikule suhteliselt hästi.

Selleks, et paremini mõista mõõtetulemuste täpsust, on joonistel 6 ja 7 toodud suhtelise vea suurus iga mõõdetud punkti kohta.



Joonis 6. 4-sektsioonilise katsekeha soojusvõimsuste suhteline viga



Joonis 7. 8-sektsioonilise katsekeha soojusvõimsuste suhteline viga

Miinusmärgiga viga tähendab, et arvutuslik soojusvõimsus oli suurem kui mõõdetud tulemus. Küttekehasid võrreldes, siis 8-sektsioonilise katsekeha tulemused olid täpsemad kui väiksema katsekehad omad. Selles võib rolli mängida ka mõõtepunktide vähesus. 4-sektsioonilise radiaatori korral on mõõteviga kuni 16%. 8-sektsioonilise radiaatori korral on see väärtus kuni 9%. Suhtelist viga kirjeldavatelt joonistelt ei selgu, et teatud temperatuurivahemiku või vooluhulga juures oleks erinevus mõõdetud ja arvutusliku olukorra vahel oluliselt suurem. Seetõttu ei peetud kordaja  $K$  ning eksponendi  $n$  seisukohast oluliseks mõnda vahemikku eraldi analüüsida.



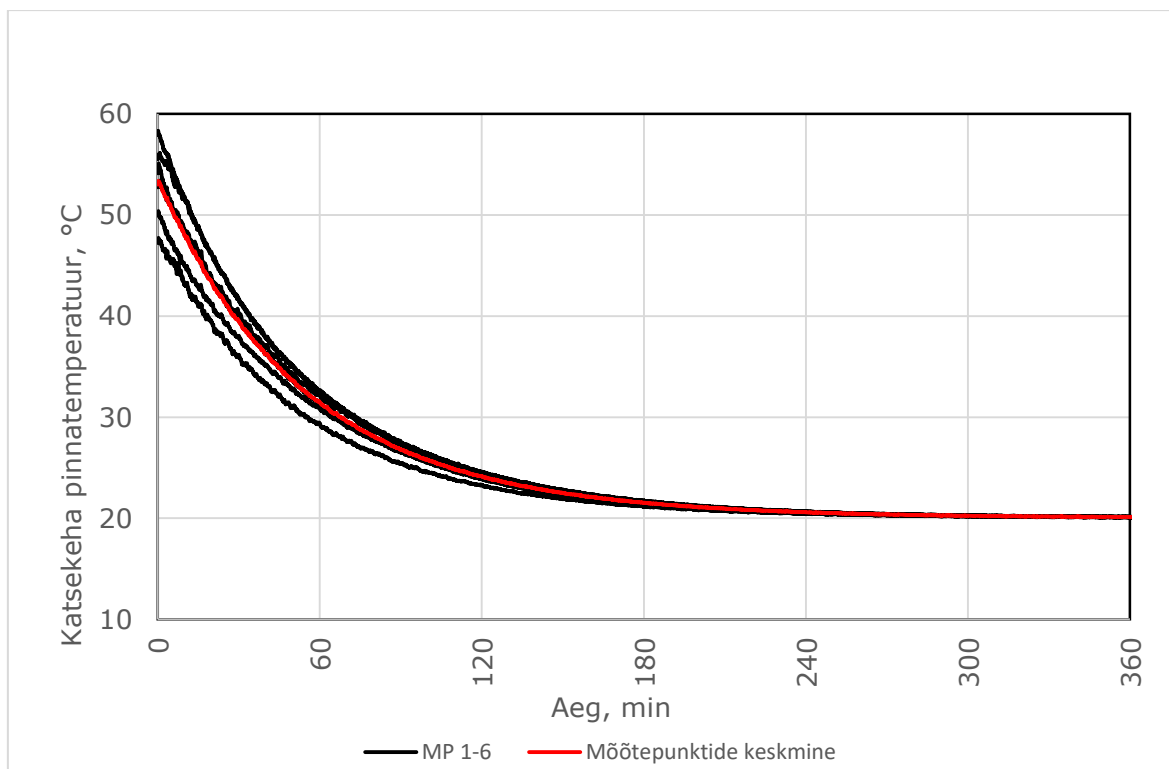
Antud katsete põhjal ei ole võimalik hinnata, mis mõju avaldab ekspluatatsioon radiaatorite soojusväljastusele. Selle tarbeks oleks tarvis suuremat valimit samas suuruses malmradiaatoreid, mille põhjal teha keskmistatud hinnang ning nendele referentsiks kasutamata malmradiaatorit. Sõltuvalt soojuskandja kvaliteedist võivad töös olevad radiaatorid olla mustunud, mis mõjub soojusväljastusele kehvasti, kuna see vähendab vooluhulka läbi küttekeha.

Teooria osas toodule on teada, et katsetatud malmradiaatorite üks sektsioon vastab 0,31 ekm. Sellest tulenevalt on ühe sektsiooni soojusväljastus ~163 W. Kasutades katseliselt leitud kordaja K ja eksponendi n väärtusi leiti mõlema katsekeha ühe sektsiooni soojusväljastus samadel tingimustel (95/70/18 °C). Saadud tulemused olid 310 W suurema radiaatori puhul ning 284 W väiksema korral. See näitab, et teadaolev malmradiaatorite soojusväljastus (1 ekm = 506W) on oluliselt väiksem saadud katsetulemustest. Madalam tulemus oleks olnud mõnevõrra loogilisem küttekehade mustumise pärast, mistõttu võib tegu võib olla mõõtmisest või meetoodikast tuleneva ebatäpsusega.

### **3.3 Massiga radiaatori mudeli kalibreerimine**

Selleks, et massiga radiaatori mudelit IDA-ICE programmis võimalikult täpselt kirjeldada, viidi 4-sektsioonilise radiaatoriga läbi jahtumise katse. Ruumi jahutati soojusväljastuse võrra. See tähendab, et olemuselt on tegu mudelis hästi kalibreeritava olukorraga, kuna toimub kontrollitud tingimustel jahtumine. Soojusväljastus vähenes ajas, koos sellega ka kambri jahutamine, kuniks radiaator saavutas kambri oleva õhutemperatuuri seadeväärtuse lähedase väärtuse.

Joonisel 8 on toodud karakteristikud, mis kirjeldavad saadud tulemusi. Mustaga on toodud kuue erineva mõõtepunkti andmed ning punasega nende keskmistatud väärtus. Jooniselt on näha, et katsekeha jahtub ruumitemperatuurini ligikaudu ~6 tunniga. Joonisel 8 on näha, et ühe tunni mõõdudes on küttekeha pinnatemperatuur ikka ligi 30°C.



Joonis 8. 4-sektsioonilise katsekeha jahtumine

Massiga radiaatori mudeli kalibreerimise idee oli mõõtmistelt saadud karakteristik viia visuaalselt vastavusse IDA mudelis oleva karakteristikuga. Selleks lisati IDA-sse reaalselt katsekeha iseloomustavad parameetrid ning ruumitingimused katse teostamise ajal. IDA-sse sisestatud katsekeha mass on toodud alljärgnevas tabelis. Malmi erisoojusena on kasutatud väärtust  $c_p = 0,46 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$  [22].

	Mass [kg]	Erisoojus [kJ/(kg·K)]	Soojusmahtuvus [kJ/K]
Vesi	6,11	4,19	25,59
Malm	31,70	0,46	14,58
Vee ekvivalent	3,48		
<b>Summaarne</b>	<b>9,60</b>		

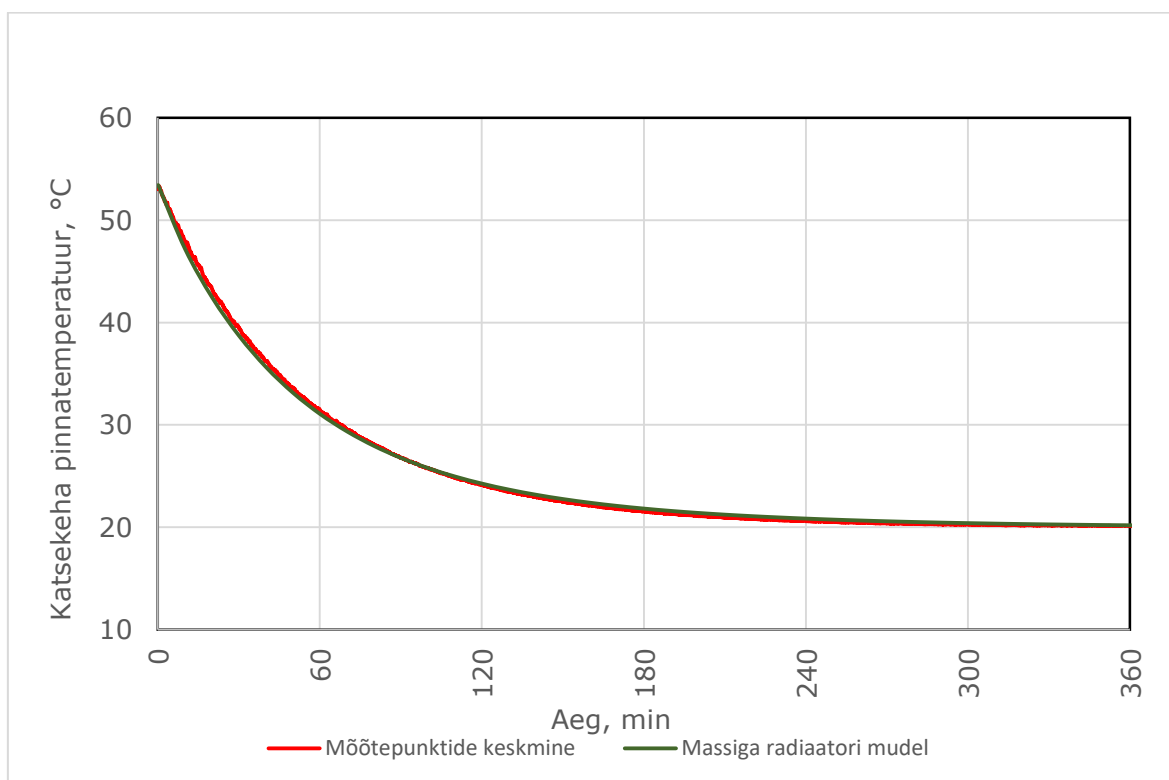
Tabel 12. Massiga radiaatori mudelit iseloomustav summaarne vedeliku soojusmahtuvus

Alljärgneval pildil on toodud väärtused, millega tagati visuaalsel hindamisel võimalikult täpne karakteristikute kattuvus. Kordaja  $K$  ning eksponendi  $n$  väärtused on määratud katseliselt. Radiaatori geomeetria vastab reaalsele 4-sektsioonilisele katsekehale. Lisaks on määratud vooluhulk  $87,8 \text{ l/h}$ , mis vastab samuti katse alguses mõõdetud olukorrale. Soojusallikast radiaatorisse sisenev pealevoolu temperatuur on  $59,4 \text{ °C}$ , mis tagab vajaliku küttekeha pinnatemperatuuri  $53 \text{ °C}$ . Karakteristikute kattumiseks suurendati radiaatori massi  $11,4 \text{ kg}$ . Soojusülekandeegurite  $K_{\text{AIR}}$  ja  $K_{\text{LIQ}}$  väärtused on

lähedased kirjanduses toodule. Testkambris oli jahutus, millega tagati püsiv õhutemperatuur 20 °C ning see lisati samuti simulatsioonimudelisse. Tsoonimudelil puudusid välispiirded adiabaatsuse tagamiseks, kuna nii oli ka katse puhul. Reaalses kasutusotstarbes ei ole ruumid üldiselt sisepiirded ja konvektiivsed õhuvoolud ruumis on testkambri omast ilmselt erinevad.

Tähis	Väärtus	Ühik	Kirjeldus
K	22,68	W/(m·K)	Küttekeha konduktants ehk soojuseriväljastus
N	1,14	-	Küttekeha soojusväljastust iseloomustav eksponenttegur
STRIP_H	0,58	m	Katsekeha kõrgus
LENGTH	0,44	m	Katsekeha pikkus
CP_LIQ	4187	J/(kg·K)	Soojuskandja masserisoojus
RADMASS	11,4	kg	Katsekeha mass
HBACK	2	W/K	SoojusülekanDETegur küttekeha välispinnalt seinale
K_LIQ	250	W/K	SoojusülekanDETegur küttekeha soojuskandjalt küttekeha sisepinnale
K_AIR	9	W/K	SoojusülekanDETegur küttekeha välispinnalt ruumiõhule

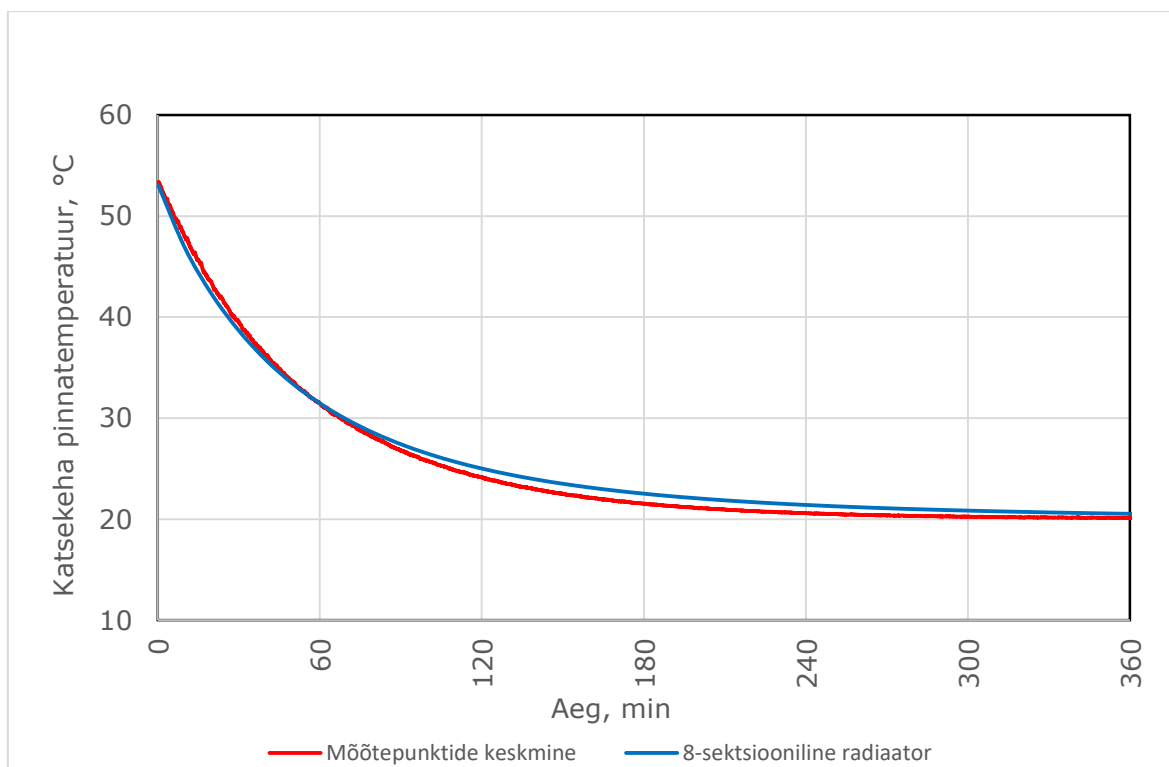
Tabel 13. Massiga radiaatori mudeli kalibreerimiseks kasutatud parameetrid



Joonis 9. Simuleeritud massiga radiaatori karakteristik koos mõõtepunktide keskmise väärtusega

Kalibreeritud mudelist saadi kätte ülekanDETegurid, mille juures on kõige paremini kirjeldatud reaalne olukord mõõtmise teostamise ajal.

Samuti analüüsi 8-sektsioonilise katsekeha jahtumist. Mudelisse sisestati suuremat radiaatorit kirjeldavad parameetrid nagu mass  $m=19,6$  kg, kordaja  $K=12,66$  W/(m·K), eksponent  $n=1,27$  ja pikkus on 0,88 m. Muu info pärines juba eelnevalt kalibreeritud mudelist. Eeldus oli, et saadav karakteristik kattub joonisel 9 tooduga või on vähemalt samalaadse langusnurgaga. Simulatsioonitulemus seda ka kinnitas. Suuremal katsekehal on massi rohkem, kuid proportsionaalselt on rohkem ka soojuste eraldumiseks pinda ning ruumitingimused on samad mõlemale olukorrale.



Joonis 10. 8-sektsioonilise katsekeha simuleeritud jahtumine

Katsekeha lekkeprobleemide tõttu ei teostatud suurema radiaatoriga jahtumise katset. Sellest tulenevalt järgnevas analüüsis seda infot ei kasutatud, kuna puudus võimalus kinnitada simulatsiooni teel saadud karakteristikut.

### 3.4 Simulatsioonid IDA-ICE programmis

#### 3.4.1 Küttegaafiku alandamine

Renoveerimata hoone simulatsioonimudeliga teostati küttevõimsuste arvutus. Selle jaoks lülitati vabasoojused korterites välja ning määrati kütte seadetemperatuuriks 21°C. Kõige kriitilisemad ruumid olid viimase korruse otsapealsed korterid. Maksimaalne küttevajadus oli neis 112 W/m<sup>2</sup>, mis tähendab 7047 W korteri kohta. Edasiseks analüüsiks kasutati ühte nendest korteritest (vt. pilt 6).

Saadud soojusvajaduse alusel dimensioneeriti korterisse vajalik kogus küttekehi, mis imiteeriks nõukogudeaegset lahendust vanade malmradiaatoritega. Küttekehade valikuks kasutati temperatuure 95/70/21 °C. Analüüsiks on kasutatud 4-sektsioonilise radiaatori katselisi tulemusi. Arvutuslikus olukorras saadud logaritmiline temperatuur oli  $\Delta t_{ln} = 60,6$ , mis annab katseliste K ja n väärtusega võimsuse 1062 W radiaatori kohta. Selleks, et katta korteri soojuskadusid tuleb lisada 7 4-sektsioonilist malmradiaatorit, mille puhul jääb ka 5% võimsuse varu. Vooluhulk läbi radiaatori on 34,5 l/h.

Edasiseks analüüsiks kasutati renoveeritud hoonete simulatsioonimudeleid küttevõimsuste arvutamiseks. Saadud tulemused soojuspumbaga lahenduse korral oli 63 W/m<sup>2</sup>, mis tähendab 3970 W korteri kohta. Soojustagastusega ventilatsiooni korral oli tulemus 40 W/m<sup>2</sup>, mis on 2497 W sama korteri kohta. Lahenduses, kus oli kasutatud väljatõmbeõhu soojuspumpa tuli värske õhu soojendamine täies mahus samuti küttega tagada, mistõttu on saadud küttevajadus oluliselt suurem.

Töö üheks eesmärgiks oli hinnata, kui palju oleks võimalik küttegraafiku temperatuure alandada. Selleks seadistati iga simulatsiooniga soojusallika temperatuure madalamaks, kuni jõuti minimaalse soojuskandja temperatuurini, mil ruumiõhu temperatuur oli arvutusliku välisõhu temperatuuri juures veel tagatud. Arvutusliku tagasivoolu temperatuuri leidmiseks kasutati renoveeritud lahenduste küttevõimsust ning renoveerimata olukorra vooluhulka. Väljatõmbeõhu soojuspumba lahenduse korral saadi korrigeeritud graafikuks 68/54 °C. Soojustagastusega ventilatsiooni korral saadi graafik 52/43 °C. Soojustagastusega ventilatsiooni korral oli küttevajadus ligi poole võrra väiksem, mistõttu on võimalik küttegraafikut madalamale viia.

Kaugküttega ühendatud hoonete korral on saadud temperatuurid hästi rakendatavad. Samas soojuspumbaga ei ole mõistlik -21 °C välisõhu temperatuuri juures 68 °C vett toota, kuna pumba kasutegur läheb liiga madalaks. Hoonetele, millel on kütteallikaks soojuspump, on 52 °C pealevool olema aktsepteeritav, kuna sooja tarbevee temperatuur on samalaadne.

### **3.4.2 Energiasimulatsioonid**

Simulatsioonimudelisse ehitati eelmises peatükis dimensioneeritud küttekehad. Massiga radiaatori mudeli lihtsustamiseks kasutati ühte küttekeha kõrgusega 0,58 m ja kogu pikkusega 3,08m, mis katab 7 radiaatori pikkused. Kasutati samu parameetreid, mis on toodud tabelis 13, kuid korrigeeriti vooluhulka  $G = 241,2$  l/h, küttekeha geometriat ja

massi  $m = 79,8$  kg. Termostaatventiili proportsionaalne juhtimine määrati vahemikuga 20...22°C.

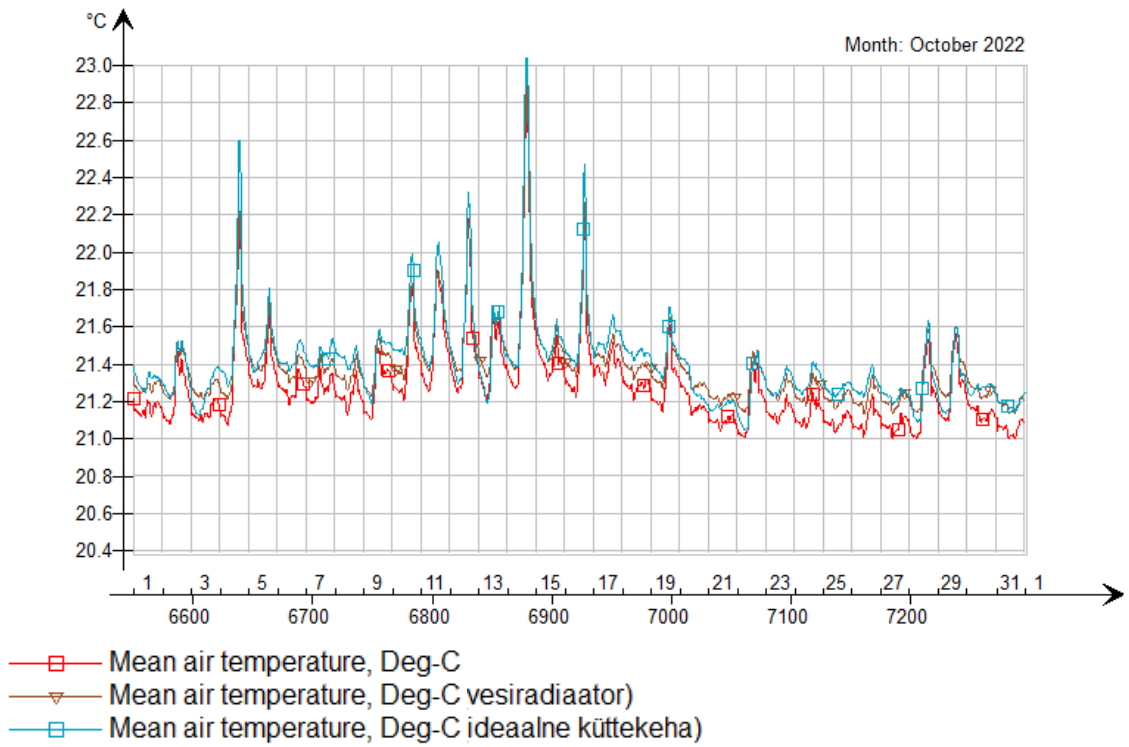
Kui esialgu uuriti temperatuuri alandamist staatilises olukorras, siis energiaanalüüsi teostamiseks viidi läbi aastane simulatsioon. Nendes simulatsioonimudelites lisati ruumidesse tagasi vabasoojused ning küttekehadele lisati eelnevalt saadud võimsused. Energiaanalüüsi eesmärgiks oli hinnata kui palju mõjutab massiga radiaator aastast kütte netoenergia tarvet võrreldes tavalise massita vesiradiaatori mudeliga. Nii arvutuslikus olukorras kui baasaasta simulatsioonis olid nõutud ruumitemperatuurid tagatud. Väike kõrvalekalle 21 °C oli tingitud temperatuuri juhtimise ebatäpsusest.

	Väljatõmbeõhu soojuspump	Soojustagastusega ventilatsioon
Massiga radiaator	7579	4231
Tavaline vesiradiaator	7641	4281
Ideaalne küttekeha	7581	4173

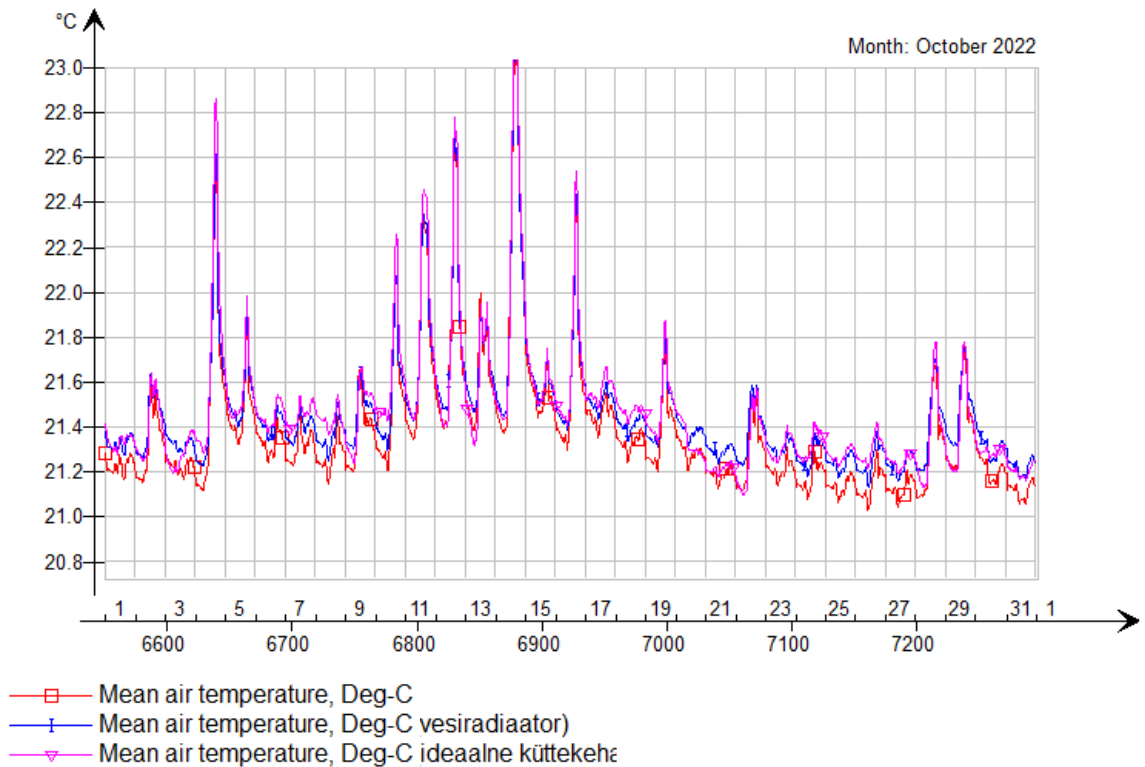
Tabel 14. Kütte netoenergiatarve, kWh

Saadud tulemuste põhjal võib väita, et energiatarbe mudeldamise mõistes pole oluline, kas kasutada massiga või massita radiaatori mudelit. Erinevused tunduvad olevat ainult reguleerimisetäpsusest mitte süsteemi stabiilsusest. Kõige suurem erinevus tekkis ideaalse küttekeha ja massita radiaatori vahel, kuid seegi on marginaalne. Erinevused olid vahemikus 60-100 W ning see võib olla tingitud sellest, et ideaalsel küttekehal ei ole täiendavat soojuskadu küttekeha taga olevasse seinale.

Hüpotees oli, et massiga radiaator reageerib temperatuuri muutustele aeglasemalt, kuid simulatsioonid sellele kinnitust ei andnud. Võimalus on, et kuigi küttekeha ise reageerib aeglasemalt oma massi tõttu, siis reguleerventiil tasandab seda mõju ehk avaneb või sulgub rohkem kui massita variandi puhul. Vaadeldi kogu kütteperioodi, kuid olulisemaks peeti just üleminekuperioodi, mil soojusvajadus on varieeruvam. Sel perioodil küttekeha inertsus ühtepidi tasandab temperatuurikõikumist, aga aeglustab ka reageerimist küttevajaduse ja selle puudumise vahel. Joonistel 11 ja 12 on näha, et kolme olukorra tulemused on peaaegu kattuvad ning see tendents vastas kogu kütteperioodile. Joonistel punasega toodud graafik kirjeldab massiga radiaatorit.



Joonis 11. Temperatuuripüsivus graafik soojuspumba lahenduse korral



Joonis 12 Temperatuuripüsivus graafik soojustagastusega ventilatsiooni korral

Termilise massi mõju radiaatorkütte korral, olenemata kas tegu oli massiga või massita mudeliga, ei olnud energiaarvutuses mingisuguse märkimisväärse mõjuga. Võib arvata, et põrandkütte korral mängib see suurt rolli, kuna siis on tegu oluliselt suurema termilise massiga.



## KOKKUVÕTE

Lõputöö eesmärgiks oli uurida nõukogudeaegse malmradiaatori soojusväljastust ning toimivust erinevatel temperatuuridel. Selleks ehitati Ehituse Mäemajas valmis küttesõlm ning testkambris teostati mõõtmised kahe kasutusest eemaldatud malmradiaatoriga. Mõõtmistulemuste põhjal sooviti luua simulatsiooniprogrammi IDA-ICE massiga radiaatori mudel ning selle põhjal hinnata programmis olevate erinevate küttekehade kasutamise mõju hoone kütte netoenergiatarbele. Samuti sooviti hinnata, kui madalale oleks küttegraafikuga võimalik renoveeritud hoones tulla. Selleks analüüsiti renoveerimata ja renoveeritud hoone lahendusi.

Katsetatud malmradiaatorid toimivad hästi nii kõrgetel kui ka madalatel temperatuuridel. Selle hinnangu tegemiseks leiti esmalt mõõtmistulemuste põhjal soojuseriväljastuse kordaja  $K$  ja eksponendi  $n$  väärtused. Väiksemal küttekehal oli eksponendi väärtus 1,14 ning suuremal 1,27. Mõlemad tulemused on sarnased kirjanduses toodule. Nendest lähtuvalt koostati graafik arvutuslike ja mõõdetud soojusväljastustega erinevatel temperatuurirežiimidel, millest selgus, et tulemuste kattuvus oli võrdlemisi hea - suhteline viga jäi maksimaalselt 16% piiresse, keskmine viga oli 5%. See tähendab, et leitud parameetrid on sobivad antud radiaatori soojusväljastuse kirjeldamiseks laias temperatuurivahemikus.

Arvestades katsetamise meetodikat, täpsust ja katsekehade arvu, ei saa väita, et erinevus saadud eksponentide väärtuste vahel tuleneb ilmtingimata mingist erinevusest soojusväljastuses. Iga sektsiooni juurde lisamine küttekehale hakkab olemasolevate soojuslikku käitumist mõjutama, mistõttu sektsioonide lisamisel ei pruugigi  $n$  väärtus konstantseks jääda, aga mõõtmisandmete vähesuse tõttu ei saa seda kinnitada ega ümber lükata. Antud katsekehi võiks katsetulemuste põhjal käsitleda kui eraldi tüüpe.

Käesolevas töös analüüsitud hoone simulatsioonimudelite kõige kriitilisema korteri esialgse soojuskao 7047 W sai renoveerimise meetmete rakendamisel vähendada kuni 2497 W-ni. Renoveerimine muudab võimalikuks küttegraafiku alandamise. Selleks et vältida hüdraulilisest erinevusest tekkivad kulused tuleks arvutusliku tagasivoolu temperatuuri valikul lähtuda vooluhulga samaks jätmisest. Töös saadud tulemused erinevate renoveerimislahenduste korral olid vastavalt 68/54 °C ja 52/43 °C, mis vastavad kaugkütte neljanda generatsiooni temperatuuridele.

Kui hinnata potentsiaali, siis ilma hoonet renoveerimata võib samuti olla võimalik soojuskandja temperatuure alandada. Hoone küttevajadus arvutatakse väga madala

välisõhu temperatuuriga ning ilma vabasoojusi arvestamata, mis tähendab, et reaalne soojusvajadus on tihtipeale väiksem kui arvutuslik.

Hoonete renoveerimisel on soojusväljastuse seisukohast võimalik malmradiaatoreid edasi kasutada. Iga piirde soojustamine tähendab madalamaid soojuskadusid, mida katta. Eeldusel, et küttesõlme temperatuurigraafik jääb renoveerimise eelseks, siis malmradiaatorid muutuvad üledimensioneerituks. Samas soojusväljastus ei ole ainuke aspekt, mida uurida malmradiaatorite taaskasutamisel. Olulist rolli mängib kindlasti ka nende lekkekindlus. Enne termostaatventiilide paigaldust on oluline süsteemi läbipesu. Radiaatorid võivad olla väga mustunud ning aja jooksul kogunenud setted võivad uues süsteemis ventiilid ära ummistada. Samuti võib radiaatori soojusväljastus olla märkimisväärselt langenud, kui sektsioone läbib ainult osaline vool. Visuaalse poole pealt võivad nad vajada ülevärvimist, kuid seegi eeldab vana värvi eemaldamist.

Töös teostatud energiasimulatsioonidest selgus, et katsetatud massiga radiaatorite mõju simulatsioonitulemusele on tühine. Kui eeldus oli, et suurema inertsiga küttekeha reageerib temperatuurikõikumistele aeglasemalt ning vajab rohkem soojust, siis radiaatorkütte korral see ei kajastunud.

Magistritöös uuritud mõõtmistulemuste põhjal leidis autor, et:

- malmradiaatorite säilitamine renoveerimisprotsessis on võimalik, kuna nad toimivad hästi ka madalamatel temperatuuridel. Säilitamise mõistlikkust tuleks aga hinnata mitme aspekti põhjal nagu lekkekindlus, süsteemi puhtus, küttekehade väljanägemine
- renoveerimise meetmete rakendamisel on võimalik küttegraafikut alandada
- analüüsis kasutatud IDA-ICE programmi küttekeha tüübid ei avalda märkimisväärt mõju hoone kütte netoenergiatarbe arvutusele.

Lõputöö edasi arendusena oleks põnev katsetada ja hinnata eksponendi  $n$  väärtust samatüübilise malmradiaatori suuremale valimile. Antud töö raames oleks võinud olla rohkem töökindlamaid katsekehi. See oleks andnud võimaluse enamatel vooluhulkadel katseid läbi viia.

## SUMMARY

The purpose of this master's thesis was to study the heat output and performance of a Soviet-era cast iron radiator at different temperatures. To achieve this goal, a heating unit was built in Ehituse Mäemaja and measurements were performed in the test chamber with two decommissioned cast iron radiators. Model consisting a radiator with mass in a simulation program IDA-ICE was created based on the measurement results to evaluate the effect on the heating net energy consumption of the building using different heaters. The author also wanted to assess how much would it be possible to lower the heating temperatures in a renovated building. For this purpose, the solutions of the non-renovated and renovated building were analyzed.

The tested cast iron radiators perform well at both high and low flow temperatures. To make an assessment, the values of the heat output coefficient  $K$  and the exponent  $n$  were first obtained on the basis of the measurement results. The smaller heater had an exponent value of 1,14 and the larger one 1,27. Both results are in accordance with values in the literature. Based on these, a graph with computational and measured heat outputs at different temperature regimes was found, which showed that the overlap of the results was relatively good - the relative error was within 16%, the average error was 5%. This means that the parameters found are suitable for describing the heat output of the radiator over a wide temperature range.

Given the test methodology, the accuracy and the number of test pieces, it cannot be said that the difference between the values of the exponents obtained is necessarily due to any difference in heat output. Adding a section to the heater affects the thermal behavior of the existing ones, which may not keep the value of  $n$  constant when adding sections, but it cannot be confirmed or disproved due to the lack of measurement data. These test pieces could be considered as separate types on the basis of the test.

The heat loss of 7047 W of the most critical apartments of the simulation models analyzed in this work could be reduced to 2497 W during the implementation of the renovation measures. Renovation makes it possible to lower the heating temperatures. In order to avoid hydraulic differences, the choice of the return temperature should be based on maintaining the flow rate. The results obtained for different renovation solutions were 68/54 °C and 52/43 °C, which correspond to the temperatures of the 4th generation district heating.

When assessing the potential, it may also be possible to lower the temperature of the heat transfer medium without renovating the building. The heating demand of a building is calculated with a very low outdoor temperature and without taking into account the heat load, which means that the real heat demand is often lower than calculated.

When renovating the buildings, it is possible to continue using cast iron radiators for heat output. Each insulation measurement means lower heat loss to cover. Assuming that the temperature curve of the heating remains the same as before renovation, the cast iron radiators will be over dimensioned. However, heat output is not the only aspect to be taken into consideration to reuse cast iron radiators. Their leakproofness certainly plays an important role. It is important to flush the system before installing the thermostatic valves. Radiators can be very dirty and sediment accumulated over time and that can clog the valves of the new system. It can also affect the heat output of the radiator if only a partial flow passes through the heating unit. On the visual side, they may need to be repainted, but it is also necessary to remove the old paint.

The energy simulations performed in the thesis revealed that the effect of using radiator with mass model in the simulation is negligible. The assumption was that a heater with a higher inertia would react more slowly to temperature fluctuations and need more heat, but this situation was not reflected in the graph for heating system with radiators.

Based on the measurement results studied in the master's thesis, the author found that:

- It is possible to keep cast iron radiators in the renovation process, as they work well even at lower temperatures. However, the reusage should be assessed on the basis of several aspects, such as leakproofness, system cleanliness, the appearance of the heaters
- It is possible to reduce the heating schedule when implementing renovation measures
- The IDA-ICE heater types used in the analysis do not affect significantly the calculation of the heating net energy consumption of the building.

As a further development of the dissertation, it would be exciting to test and evaluate the value of the exponent  $n$  for a larger sample of the same type of cast iron radiator. Also there could have been more reliable test samples for this work. This would have allowed more flows to be tested.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Euroopa Komisjon. Energia ja roheline kokkulepe. Loetud aadressil: [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/energy-and-green-deal\\_et](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/energy-and-green-deal_et) Kasutatud: 06.05.2022
- [2] Energiatalgud. Kaugküte. Loetud aadressil: <https://www.energiatalgud.ee/Kaugk%C3%BCte> Kasutatud: 09.05.2022
- [3] Tallinna Tehnikaülikool, „Hoonete rekonstrueerimise pikaajaline strateegia,” Majandus- ja kommunikatsiooniministeerium, 2020.
- [4] V. Tennisberg, Küte ja ventilatsioon, Tallinn: Kirjastus Valgus, 1979.
- [5] A. Volkova, E. Latõšov, V. Mašatin, I. Krupenski, A. Siirde, Jätkusuutlik kaugküte, Tallinn: digiõpik, 2021.
- [6] H. Averfalk, S. Werner, C. Felsmann, K. Rühling, R. Wiltshire, S. Svendsen. Transformation Roadmap from High to Low Temperature District Heating Systems: Annex XI final report. International Energy Agency, 2017.
- [7] Østergaard, D. S., Smith, K. M., Tunzi, M., & Svendsen, S, „Low-temperature operation of heating systems to enable 4th generation district heating: A review,” *Energy*, vol. 248, 2022.
- [8] Østergaard, D. S., & Svendsen, S, „Theoretical overview of heating power and necessary heating supply temperatures in typical Danish single-family houses from the 1900s,” *Energy & Buildings*, vol. 126, pp. 375–383, 2016.
- [9] Trüschel, A., Jangsten, M., Kensby, J., & Dalenb, J, „Survey of radiator temperatures in buildings supplied by district heating,” *Energy*, vol. 137, pp. 292–301, 2017.
- [10] Harrestrup, M., & Svendsen, S, „Changes in heat load profile of typical Danish multi-storey buildings when energy-renovated and supplied with low-temperature district heating,” *International Journal of Sustainable Energy*, vol. 34, pp. 232–247, 2015.

- [11] R. Gritzki, F. C., M. Rösler, A. Gritzki, M. Iivonen, and J. Naumann, "Can we still trust in EN 442?," *REHVA Journal*, no. August, pp. 47–54, 2021.
- [12] Liu, Z., Xu, W., Li, Z., Zhang, L., Li, J., Li, A., & Feng, A, „Research on heating performance of heating radiator at low temperature,” *Journal of Building Engineering*, vol. 36, 2020.
- [13] Radiaatorid ja konvektorid. Osa 2: Katsemeetodid ja hindamine, EVS-EN 442-2:2014 Loetud aadressil <https://www.evs.ee/et/evs-en-442-2-2014> Kasutatud 16.12.2021
- [14] T.-A. Kõiv ja A. Rant, Hoonete küte, Tallinn: TTÜ kirjastus, 2013.
- [15] A. B. ERDOĞMUŞ, „SIMULATION OF THE HEATER TEST ROOM DEFINED BY EN 442 STANDARD AND VIRTUAL TESTING OF DIFFERENT TYPE OF HEATERS,” 2011.
- [16] European Commission, „Energy performance of buildings directive,” Loetud aadressil: [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en) Kasutatud 05.06.2022
- [17] Volkova, A., Krupenski, I., Ledvanov, A., Hlebnikov, A., Lepiksaar, K., Latõšov, E., & Mašatin, V, „Energy cascade connection of a low-temperature district heating network to the return line of a high-temperature district heating network,” *Energy*, vol. 198, 2020.
- [18] Buildex techinfus, „What is the difference between steel radiators and cast iron,” Loetud aadressil: <https://buildex.techinfus.com/en/radiatory/chugunnye-otopleniya.html> Kasutatud 09.05.2022
- [19] R. Piir, „KOLMEKIHILISTE RAUDBETOONIST SEINAELEMENTIDE SOOJUSTUSE VUUKIDE SOOJUSLIK TOIMIVUS,” 2019.
- [20] Thalfeldt, M., Kurnitski, J., & Latõšov, E, „Exhaust air heat pump connection schemes and balanced heat recovery ventilation effect on district heat energy use and return temperature,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 128, pp. 402–414, 2018.
- [21] Edu Tehnoloogia, „KAN- therm süsteem juhend projekteerijatele ja töövõtjatele,” 2015.

[22] The Engineerig ToolBox. Metals – Specific Heats. Loetud aadressil:  
[https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-metals-d\\_152.htm](https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-metals-d_152.htm) Kasutatud  
11.05.2022