



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND  
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**VABAJAHUTUSE OPTIMAALSETE PARAMEETRITE  
MÄÄRAMINE EESTI TINGIMUSTES  
DETERMINATION OF FREE COOLING SYSTEM'S  
OPTIMAL PARAMETERS IN ESTONIAN CONDITIONS  
MAGISTRITÖÖ**

Üliõpilane: German Ladõgin  
/nimi/

Üliõpilaskood 183074 EAXM

Juhendaja: Peeter Parre, lektor  
Martin Thalfeldt, professor  
/nimi, amet/

*(Tiitellehe pöördel)*

## **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.

“21.” detsember 2023.

Autor: German Ladõgin

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“.....” ..... 201.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”.....201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

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

Mina German Ladõgin (sünnikuupäev: 11.02.1987 )

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose  
VABAJAHUTUSE OPTIMAALSETE PARAMETRITE MÄÄRAMINE EESTI TINGIMUSTES,

*(lõputöö pealkiri)*

mille juhendaja on Martin Thalfeldt ja Peeter Parre,

*(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.

\_\_\_\_\_ *(allkiri)*

22.12.2023 *(kuupäev)*

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** German Ladõgin 183074 EAXM

**Õppekava, peeriala:** EAXM15/15 küte ja ventilatsioon.

**Juhendaja(d):** Peeter Parre, lektor

Martin Thalfeldt, professor

**Konsultant:** .....(nimi, amet)

..... (ettevõtte, telefon, e-post)

### Lõputöö teema:

(eesti keeles) VABAJAHUTUS EESTI TINGIMUSTES

(inglise keeles) FREE COOLING SYSTEM IN ESTONIAN CONDITIONS

### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Analüüsida mõõtmistandmete põhjal toimiva hoone vabajahutussüsteemi.
2. Koostada lihtsustatud IDA ICE mudel ja võrrelda andmeid reaalsete mõõtmistandmetega ning projektiga.
3. Leida, millised parameetreid ja kuidas võiks kasutada Eesti tingimustes vabajahutuse projekteerimisel.

### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Teema püstitamine	08.2020
2.	Andmete kogumine	09.2020
3.	Andmete analüüs ja tabelite ning graafikute koostamine	11.2020
4.	KVJ inseneride küsitluse koostamine ja laiali saatmine	15.02.20 21
5.	Esialgne metoodika kirjeldus ja kirjanduse ülevaade	19.02.20 21
6.	KVJ inseneride küsitluse tulemuste analüüs ja kokkuvõtte kirjutamine	26.02.20 21
7.	Esialgse simulatsioonimudeli parameetrite määramine ja mudeli koostamine	05.03.20 21
8.	Lõputöö täpsustatud lähteülesande, lõputöö struktuuri, sh kirjanduse ülevaate ja metoodika lühikirjelduse ülevaatus	08.03.20 21

9.	Simulatsioonimudeli tulemuste võrdlemine projektiga ja tegelikkusega.	12.03.20 21
10.	Mudeli kalibreerimine võrreldes mõõtandaemetega.	19.03.20 21
11.	Optimaalsete vabajahutuse parameetrite määramine kalibreeritud mudeli ja mõõtandaemete järgi.	02.04.20 21
12.	Lõputöö esialgse versiooni (75 %) koostamine ja esitamine.	01.10.20 23
13.	Tulemuste lõplik vormistamine. Lõputöö lõpliku versiooni esitamine	15.12.20 23

**Töö keel:** Eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "22." detsember 2023 a

**Üliõpilane:** German Ladõgin ..... "22." detsember 2023 a  
/allkiri/

**Juhendaja:** Peeter Parre ..... "22." detsember 2023 a  
/allkiri/

**Juhendaja:** Martin Thalfeldt ..... "22." detsember 2023 a  
/allkiri/

**Konsultant:** ..... ".....".....2023 a  
/allkiri/

**Programmijuht:** ..... ".....".....2023 a  
/allkiri/

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

## SISUKORD

Ehituse ja arhitektuuri instituut .....	4
EESSÕNA.....	8
Lühendite ja tähiste loetelu .....	9
SISSEJUHATUS .....	10
KIRJANDUSE ÜLVAADE.....	12
1. METOODIKA .....	17
1.1 Metoodika lühikirjeldus.....	17
1.2 Inseneride küsitlus .....	18
1.3 Objekti kirjeldus .....	19
1.4 Mõõtandaemete kogumine.....	24
1.5 Mõõtandaemete analüüsi põhimõtted ja täpsus .....	24
1.6 Mõõtandaemete järgi arvutuste teostamine.....	28
1.7 Hoone mudeli koostamine.....	30
1.8 Mudeli muutujad .....	31
1.9 Mudeli, projekti ja mõõtandaemete analüüsimine ja võrdlemine.....	32
1.10 Optimaalsete parameetrite leidmine ja seadmete valik .....	33
2. TULEMUSED .....	36
2.1 Inseneride küsitluse tulemused .....	36
2.2 Vabajahutuse töösagedus vaadeldaval ajaperioodil .....	38
2.3 Mõõdetud süsteemi temperatuurid ja andmete parandamine.....	40
2.4 Vabajahutuse võimsus mõõtandaemete järgi.....	43
2.5 Võimsuse sõltuvus päikesekiirgusest katsemõõdistuse andmete järgi .....	44
2.6 Võimsuse sõltuvus välistemperatuurist katsemõõdistuse andmete järgi.....	45
2.7 Arvutusmudeli tulemused standardolukorras.....	46
2.8 Arvutusmudeli tulemused reaalsel ilmastiku tingimustel ja kasutusel .....	47

3. ANALÜÜS.....	49
3.1 Projekteeritud, mõõdetud ja modelleeritud vabajahutuse võimsuse võrdluse analüüs.....	49
3.2 Vabajahutuse optimaalse võimsuse määramise kriteeriumid.....	50
3.3 Vabajahutuse lülitustemperatuuri analüüs ja valik.....	51
3.4 Vabajahutuse primaar- ja sekundaarpoole temperatuuride analüüs valik.....	56
3.5 Akumulatsioonipaagi suuruse valik .....	57
3.6 Dry-cooleri dimensioneerimine .....	57
3.7 Primaarkontuuri pumbasõlme valik.....	60
3.8 Vabajahutuse kontuuri juhtimine .....	62
3.9 Kogutavate mõõtmisme täpsus .....	63
3.10 Külma varustuse süsteemi komponentide dimensioneerimise põhimõtete alternatiivid .....	63
KOKKUVÕTE.....	65
SUMMARY.....	67
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	69

## EESSÕNA

Käesoleva lõputöö teema valiti Martin Thaleldti (TalTech professor) ja Peeter Parre (TalTech lektor) poolt pakutud lõputöö teemade hulgast, mis tekkisid vajadusest lahendada reaalseid probleeme ventilatsiooni ja jahutuse valdkonnas. Nemad aitasid ka sõnastada teemat ja probleemi.

Lõputöö valmimisele aitasid kaasa ka järgnevad inimesed:

- Rene Klesment, Mainor Ülemiste AS halduspealik. Võimaldas ligipääsu Öpiku hoone tehnoruumidele ja mõõdistuste korraldamisele. Andmete väljavõtmine Öpiku A süsteemist.
- Andrei Engels, AS Pristis süsteemiinsener. Aitas kätte saada andmeid Öpiku A hoone BMS süsteemist.
- Are Habicht, Mainor Ülemiste AS ja Öpiku Majad OÜ haldusjuht. Võimaldas ligipääsu Öpiku hoone tehnoruumidele ja mõõdistuste korraldamisele.
- EKVÜ (Eesti kütte- ja ventilatsiooniinseneride ühendus). Aitas liikmetele küsimustikku laiali saata.

Lõputöö eesmärgiks on välja töötada võimalikud seosed vabajahutuse arvutuste teostamiseks hoonetes hoone mudeli, teoreetiliste järelduste ja reaalsete mõõdistusandmete abil.



## Lühendite ja tähiste loetelu

Lõputöös kasutatud lühendid nende selgitused:

CLO- Ruumis viibivate inimeste riietuse tegur;

EER- Seadme kasutegur jahutamisel maksimaalsel jahutusvõimsusel;

ETA- Pumaba kasutegur.

KM1- Jahutussüsteemi tähistus. Külmamasin nr.1;

KM2- Jahutussüsteemi tähistus. Külmamasin nr.2;

KVJ- Küte, ventilatsioon, jahutus;

MET- Metabolism;

NTC10- temperatuurianduri tüüp. Negative Temperature Coefficient, mis tähendab, et temperatuuri suurenedes takistus väheneb. Toatemperatuuril (25°C) on takistus 10 k $\Omega$ ;

P- Pumba tähistus;

PT1000- Anduri tüüp. Plaatina traadi põhjal andur;

PPV - primaarpoole pealevool soojusvahetis või süsteemis;

PTV - primaarpoole tagasivool soojusvahetis või süsteemis;

SEER - Sesoonne seadme kasutegur jahutamisel;

SPV - sekundaarpoole pealevool soojusvahetis või süsteemis;

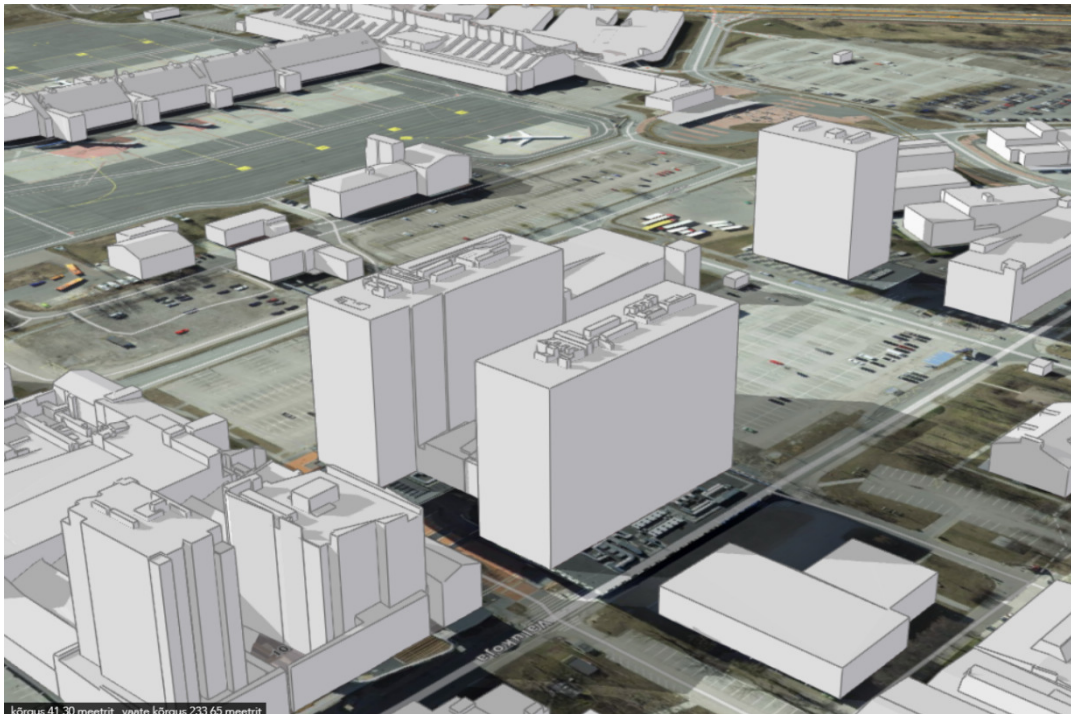
STV - sekundaarpoole tagasivool soojusvahetis või süsteemis;

VJ- vabajahutusega süsteemi välisjahuti.

## SISSEJUHATUS

Töö või eluruumide jahutamine inimese jaoks meeldivale tasemele on energiakulukas, kuid omab positiivset mõju inimeste vaimsele ja füüsilisele heaolule ning produktiivsusele. Ühiskonna suurema energiatõhususe poole püüdlemisel on soodsa või tasuta energia kasutamisel oluline roll. Ühe võimalustena kasutatakse jahutusenergia saamiseks ümbritsevat keskkonda, mis võib olla õhk, vedelik või maapind. Käesolev lõputöös vaadeldakse põhiliselt õhust saadavat jahutusenergiat. Sellise jahutusenergia saamise esmaseks tingimuseks on see, et välisõhu temperatuur on madalam, kui jahutatava ruumi temperatuur. Sellist jahutussüsteemi nimetatakse „vabajahutuseks“. Vabajahutuse projekteerimine ja ehitamine on üle maailma väga levinud ja paljudes piirkondades ka kohustuslik. Kuid väga vähestes piirkondades on kindlaks määratud optimaalseimad parameetrid ja seosed, millest tuleks lähtuda vabajahutusega süsteemi kavandamisel.

Eestis võib leida ka mõningal määral materjali vabajahutusest, kuid käesoleval hetkel ei ole selle maht piisav, et oleks võimalik võtta projekteerimise aluseks. Antud lõputööga püütakse anda panust vabajahutuse optimaalsemate parameetrite ja seoste väljaselgitamiseks Eestis, et oleks võimalik võtta neid süsteemide kavandamise aluseks või jätkata nende põhjal uuringuid ja analüüse, kui need ületavad magistritöö mahtu. Uurimisobjektina kasutati Õpiku 1 ärihoonet, mis asub aadressil Valukoja tn 8/1. Antud hoones on kaks toimivat jahutussüsteemi ja hoone asub ilmakaarte suhtes analüüsi seisukohalt soodsalt. Hoone on suhteliselt uus ja kaasaegsete sisekliima lahendustega. Lõputöö koostamiseks võeti hoone automaatikasüsteemist jahutussüsteemi andurite näitude väljavõtteid, teostati mõõdistusi objektil temperatuuriandurite ja logerite abil. Andmeid võrreldi ja analüüsiti ning saadi esialgseid andmeid, mida oli võimalik võrrelda teostusdokumentatsiooni andmetega. Koostati spetsiaalse tarkvara abil hoone standardset mudelit ja teostati arvutusi Eesti kliimafaili järgi. Lõplike järelduste saamiseks kalibreeriti koostatud mudelit reaalsete andmete järgi ja selgitati välja vabajahutuse optimaalsed parameetrid.



**Joonis 1** Öpiku 1 ärihoone Maa-ameti 3D kaardil

Lõputöö koostamiseks kasutati järgnevaid tarkvarasid: Autodesk Autocad, Ida Ice, Microsoft Excel, Microsoft Word, Hoboware, Grundfos valikuprogramm, Güntner valikuprogramm, BlueBox valikuprogramm.

Möödistusi teostati 8 temperatuurianduri ja kahe logeri abil.

Seletuskiri koosneb läbitöötatud kirjandusest, metoodikast, tulemustest, tulemuste analüüsist ja kokkuvõttest. Seletuskirja on lisatud iseloomustavad skeemid ja tabelid.

Lõputöö eesmärk:

- Leida vabajahutuse optimaalseid parameetreid Eesti tingimustes, mida on võimalik aluseks võtta vabajahutuse arvutamiseks projektides.

Uurimisküsimused:

- Millal on vabajahutust vaja Eesti tingimustes?
- Milline on vabajahutuse arvutuslik võimsus ja lülitustemperatuur Eesti tingimustes?
- Milline on vabajahutuse kontuuri temperatuurigraafik?
- Milline on vabajahutuse kontuuri seadmete optimaalsed valikud ja ühendusskeem?

## KIRJANDUSE ÜLEVAADE

Käesoleva töö raames otsiti sarnase sisuga lõputöid või teaduslikke artikleid. Samuti uuriti normatiivdokumente.

Eestis on koostatud kaks lõputööd, mis käsitlevad vabajahutuse teemat üldisemalt. Soomes on koostatud vähemalt üks sarnase eesmärgiga lõputöö, mis erineb antud lõputööst metoodika ja objekti asukoha poolest

Vastavalt teadusartiklile [1] "Free cooling feasibility of a typical commercial building in Pune city, India" peetakse Indias heaks sisekliimaks temperatuuride vahemikku  $25\pm 3^{\circ}\text{C}$ . Vaadeldavas linnas ei lange välistemperatuur üldjuhul alla  $20^{\circ}\text{C}$ . Sellised tingimused seavad vabajahutusele piire ehk minimaalsete kadudega on võimalik kasutada ventilatsioonisüsteemil põhinevat vabajahutust, näiteks õist ruumide jahutamist. Käesolevas lõputöös arvestatakse ka õhuga jahutamise mõju, kuid ainult ventilatsiooni külmapatareide töörežiimides. Kuna India ilmastiku tingimused on Eestist oluliselt erinevad, siis antud teadusartikli järeldusi ei ole võimalik kasutada lõputöö metoodikas.

Järgmises artiklis [2] "Determination of free cooling potential: A case study for İstanbul, Turkey" kirjeldatakse vabajahutuse võimalusi Türgis, kuid kontsentreerutakse ventilatsiooniõhuga jahutamisele ning aastasele välisõhutemperatuurile ning jäetakse vaatluse alt välja konkreetseid hooneid ja olukordi. Seetõttu antud artikkel ei ole abiks käesoleva lõputöö metoodika väljatöötamisel.

On leitud, et ainuke Eestis tehtud vabajahutuse uurimine on teostatud lõputöö [3] "Vabajahutuse potentsiaal Eesti kliimatingimustes" raames Ülar Palmiste poolt. Lõputöös on viidatud ka artiklitele [1] ja [2] ning analüüsimisel kasutati sarnast metoodikat. Antud lõputöö keskendus ilmajaamast saadud välistemperatuuridel ja vabajahutuse potentsiaalil aasta lõikes. Vaadeldi nii õhuga kui ka veekontuuriga vabajahutust. Antud lõputöös esitatud andmed on abiks vabajahutuse süsteemi potentsiaali esialgseks hindamiseks. Selle järgi on Eestis head tingimused vabajahutuse kasutamiseks. Täpseid soovitusi ja arvutusi vabajahutusega süsteemi dimensioneerimiseks ei esitatud.

Eestis on väga vähe materjali, mis käsitleb vabajahutuse projekteerimist. Kehtivad normatiivsed dokumendid vabajahutuse kohta puuduvad.

Juhendmaterjali võib leida näiteks RKAS juhendist [4]. Juhendis on märgitud, et kui jahutusvajadus esineb ka välistemperatuuridel kuni 10°C, siis on vajalik projekteerida vabajahutust. Täpsemaid nõudeid ei ole kirjeldatud.

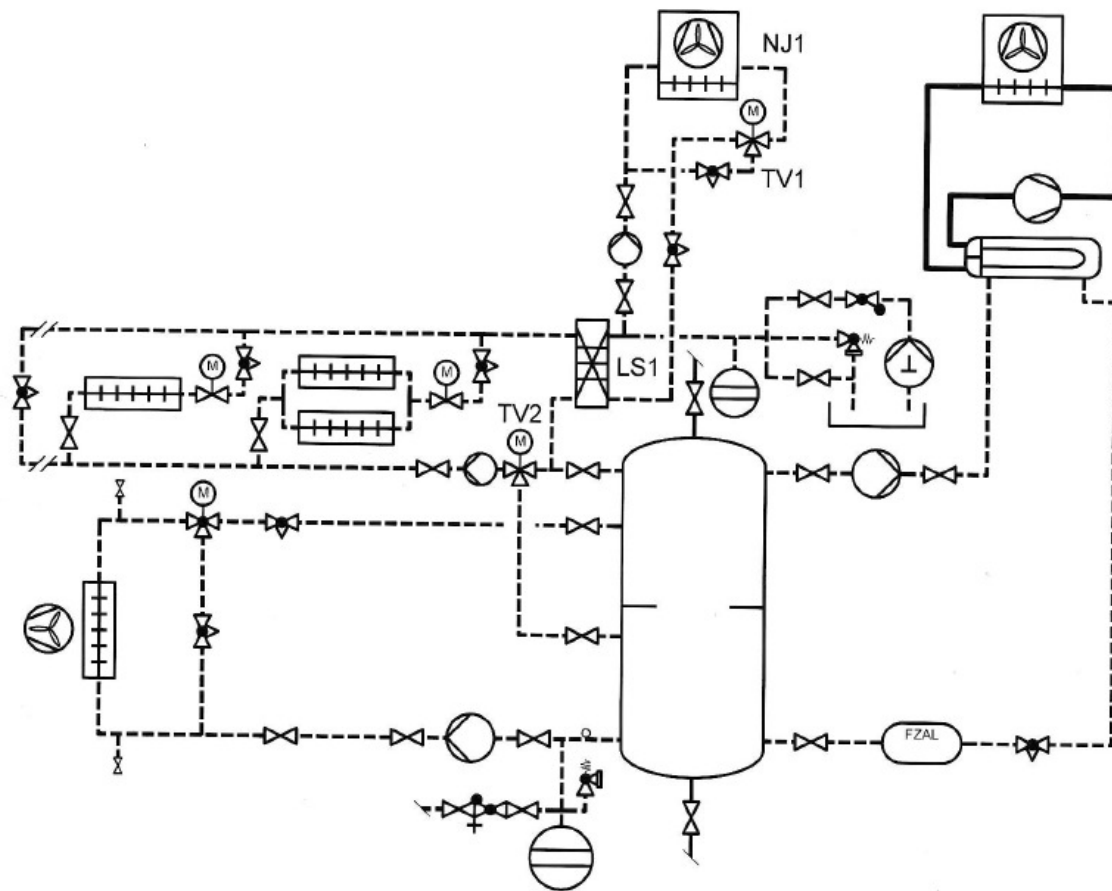
USA-s reguleerib vabajahutuse projekteerimist standard ASHRAE Standard 90.1.( Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings). Selle järgi on Ühendriigid jaotatud tsoonideks, mis määravad, millal ja mis tingimustel on vabajahutust vaja projekteerida. Standardi põhjal teevad omapoolseid uuringuid ja analüüse suuremad KVJ valdkonnas tegutsevad ettevõtted ning esitavad neid artiklitena või blogidena.

Soomes on võimalik leida infot vabajahutusest erialastest raamatutest. Info ei ole piisavalt detailne, kuna puuduvad täpsed soovitusel. On võimalik tutvuda põhiliste vabajahutuse skeemidega.

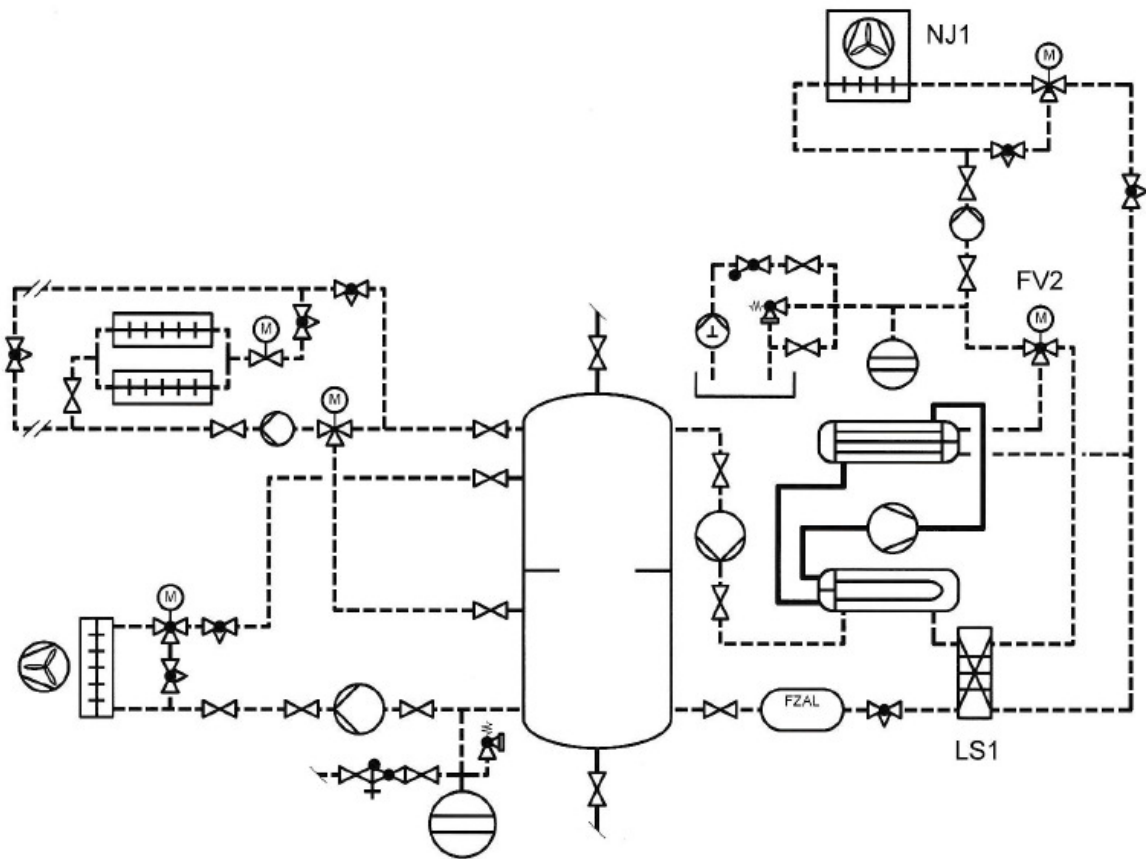
Rootsi seadmete tootjad annavad üldiseid soovitusi vabajahutuse valiku kohta, mida on võimalik kasutada ka Eestis, kuid täpsem analüüs ja juhised puuduvad.

Kõige sarnasema eesmärgiga töö on leitud Soome lõputööde hulgast. Timo Toivanen püüab bakalaureusetöös [5] „VAPAAJÄÄHDYTYKSEN TOIMINNAN TUTKIMINEN“ välja selgitada, kui palju elektrienergiat hoiab kokku vabajahutusega jahutussüsteem büroohoones. Vaadeldav büroohoone asus Jyväskyläs. Lõputöö metoodika põhines jahutussüsteemi kontuuride temperatuuride ja vooluhulkade salvestatud andmete töötlemises. Vabajahutuse kontuuride temperatuuride ning vooluhulkade järgi leiti süsteemi maksimaalsed, minimaalsed ja keskmised võimsused ning analüüsiti saadud tulemusi välistemperatuuride taustal. Vabajahutuse süsteemist saadud jahutusenergia järgi arvutati, kui palju elektrienergiat hoiti kokku ja milline on süsteemi tasuvusaeg. Lõputöö tulemustes esitatakse, milline on optimaalne vabajahutuse temperatuur ja periood Soome tingimustes. Vabajahutuse lülitustemperatuuriks oli valitud 8°C. Primaarpoole temperatuurideks oli mõõdetud 10,4/10,8. Uuringu tulemustest võib välja lugeda, et realselt saadud maksimaalse vabajahutuse võimsuse suhe projekteeritud võimsusesse oli esimese seadme korral 160/210 kW ja teise korral 55/54 kW. Mõlemad maksimaalsed väärtused olid saadud aprillis. Kõige efektiivsemalt toimis vabajahutuse süsteem temperatuuril kuni 5°C. Käesolevas magistris võetakse aluseks samuti büroohoone vabajahutuse kontuuri temperatuurid ja vooluhulkad ning vaadeldakse saadud jahutusvõimsusi koos välistemperatuuridega, kuid lisaks koostatakse reaalsete andmete põhjal simulatsiooni, mille abil leitakse optimaalseid arvutuslikke vabajahutuse süsteemi parameetreid. Nimetatud lõputöö eesmärk sarnaneb käesoleva lõputöö eesmärgiga, kuna leitakse optimaalset vabajahutuse süsteemi lahendust, kuid erineb metoodika poolest ja objekti asukoha poolest.

Kahest soomekeelsest raamatust [6]ja [7] on leitud üldist informatsiooni vabajahutuse kohta. Kirjeldatud vabajahutuse kasutamise vajadust ja võimalusi. Konkreetseid parameetreid ei toodud välja. Kuid tuuakse välja kaks vabajahutuse skeemi. Esimesel skeemil on jahutustalad ühendatud otse vabajahutuse soojusvaheti ja läbi 3T ventiili segatakse ka jahutusvee akumulatsioonimahutiga, mis on ühendatud kompressoriga. Teisel skeemil on vabajahutuse süsteem ühendatud külmamasinaga jadamisi. Teine skeem töötab sarnaselt Eestis laialt levinud vabajahutuse skeemiga, kus vabajahutus ja külmamasin on ühendatud paralleelselt.



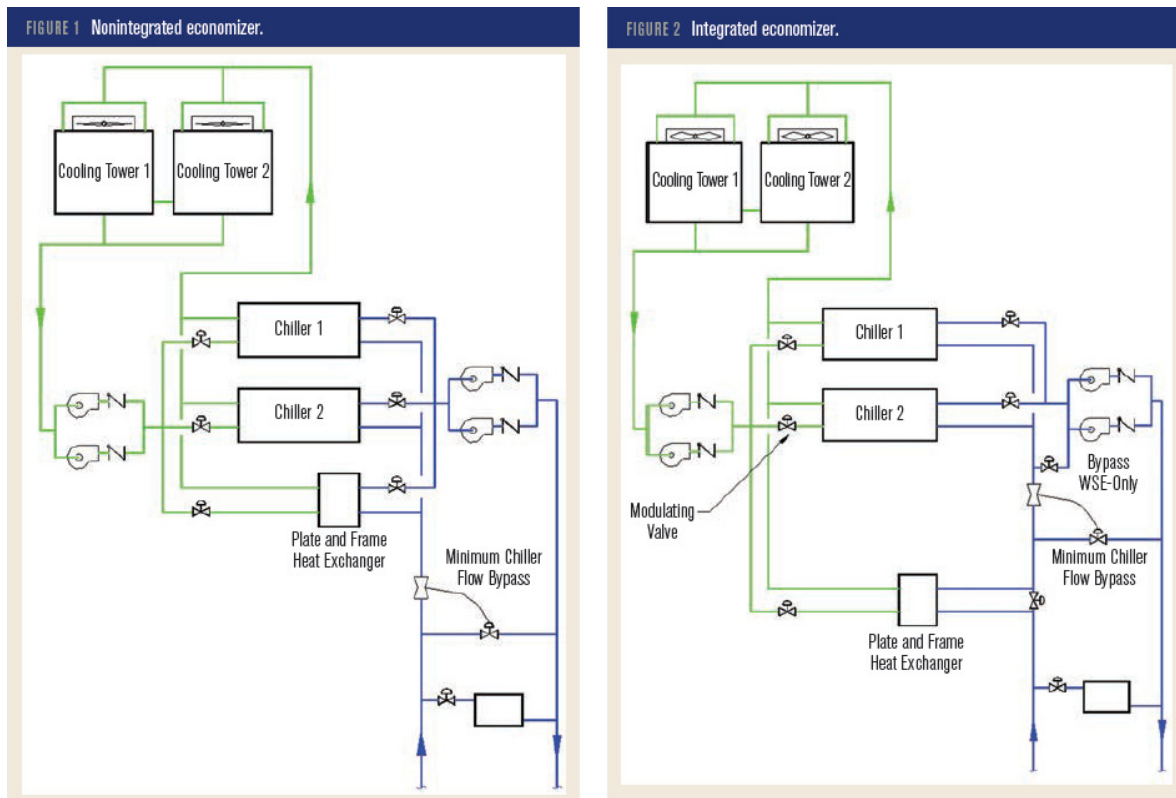
**Joonis 1.1** Integreerimata süsteem, kus jahutustalad on ühendatud otse vabajahutuse soojusvahetiga.



**Joonis 1.2** Integreeritud süsteem, kus vabajahutuse soojusvahetiga on kompressoriga jadamisi.

Suhteliselt palju kõrge kvaliteediga materjali vabajahutuse kohta on võimalik leida USA suuremate külmaseadmete tootjate inseneridele suunatud ajakirjadest või blogidest [8], [9], [10]. Suurem osa USA-s kirjutatud juhendeid toetuvad standardile ASHRAE Standard 90.1.( Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings). ASHRAE standard kohustab lisama õhu või vee baasil vabajahutust peaaegu igale jahutussüsteemile. Kuigi õhuga jahutamine on efektiivsem, soovitatakse paljudes olukordades kasutada siiski veepõhist vabajahutust. Näiteks paljudes hoonetes ei ole võimalik kasutada piisavalt õhuga vabajahutust torustike suuruse ja lõppelementide tõttu (jahutustalad). Artiklites [8], [9], [10] tuuakse välja, et vastavalt standardile peab vabajahutus olema integreeritud. See tähendab, et vabajahutus peab töötama ka siis, kui töötab compressor. Eestis ei ole selline lähenemine levinud, kuid vajab ka analüüsimist. Standardis käsitletakse nii "dry-cooler" põhist vabajahutust kui ka jahutustorniga vabajahutust, kus kasutatakse ära märja termomeetri temperatuuri. Jahutustorniga süsteemi korral peab vabajahutus tagama 100% jahutusvajadusest, kui välisõhutemperatuur on kuni 10°C või kuni 7°C õhu kuivendamise korral [9]. Artiklites [3], [10] vaadeldakse vabajahutuse erinevaid ühendusskeeme: ilma soojusvahetita, soojusvahetiga, eraldi jahutustorniga, ühe jahutustorniga. Selgitatakse, et ühe

jahutustorniga jahutamine ei ole efektiivne, kuna kompressori mootori soojus kandub jahutustornile. Ajakirjas [8] antakse soovitusi jahutustorni ja vabajahutuse soojusvaheti dimensioneerimiseks. Näiteks soojusvaheti ja kompressori temperatuuridevahed võiksid olla sarnased ning nende  $\Delta t$  võiks olla  $1,7^{\circ}\text{C}$ . Vabajahutuse jahutustorn võiks töötada maksimaalsel koormusel maksimaalse ajaperioodi vältel. Kirjeldatakse, et süsteemi tööks vajalikud suhtelise niiskuse andurid on ebatäpsed ja vajavad erilist tähelepanu. Nimetatud artikleid kasutati lõputöö meetodika välja töötamisel, et kindlaks määrata temperatuur, mille korral tagab vabajahutus 100% jahutusvajadusest.



**Joonis 1.3** Integreerimata ja integreeritud vabajahutuse skeem



# 1. METOODIKA

## 1.1 Metoodika lühikirjeldus

Käesolev lõputöö on koostatud eesmärgiga määrata vabajahutuse optimaalseid parameetreid Eesti tingimustes ning põhiseadmete dimensioneerimise metoodikat. Vabajahutust iseloomustavateks parameetriteks on süsteemi lülitustemperatuur, külmakandja sekundaar- ja primaarkontuuride temperatuurid ning vabajahutuse jahutusvõimsus. Optimaalsete parameetrite määramisel arvestati osaliselt seadmete maksumusi ja täpsemaid tehnilisi detaile. Samuti arvestati süsteemi elektrienergia tarbimisega. Vabajahutuse ühendusskeemide analüüsimisel piirduti vabajahutuse kontuuriga.

Vabajahutuse parameetrite optimaalsuse kriteeriumid on defineeritud järgnevalt:

- Minimaalne kogumaksumus süsteemi kogueluea jooksul, mis arvestab ehitusmaksumust, energia- ja hoolduskulu.
- Ääretingimuseks on see, et igal ajahetkel peab süsteem tagama arvutusliku jahutusvõimsuse.

Vaadeldavaks hooneks valiti Öpiku 1 ärihoone, mis asub Tallinna linnas aadressil Valukoja 8/1. Hoonel on kaks jahutussüsteemi koos vabajahutusega.

Koostati küsitlus vabajahutuse projekteerimise kohta ja saadeti laiali KVJ valdkonnas tegutsevatele inseneridele. Küsitluse põhjal tehti ülevaadet, kuidas projekteeritakse vabajahutusega süsteeme Eestis.

Järgnevalt tegeleti vaadeldava hoone andmete kogumisega ja analüüsimisega. Andmete põhjal teostati arvutusi ja saadi tulemusi, mis kirjeldavad reaalseid vabajahutuse parameetreid (kontuuride temperatuurid, võimsused, lülitustemperatuur) valitud hoones. Mõõdetud tulemusi kasutati edaspidi mudelis arvutatud tulemustega võrdlemiseks, et määrata, kas mudel on analüüsiks kasutatav.

Koostati IDA Ice tarkvaraga hoone mudel projektsete andmete ja EstonianTRY ilmastiku andmete järgi standardolukorra hindamiseks ja otsustamiseks, kas standardolukord on kasutatav vabajahutuse dimensioneerimiseks.

Võrreldi mudelis saadud tulemusi projektis antud suurustega ja reaalselt mõõdetud andmetega.

Koostati IDA Ice mudelit reaalsete muutujatega ning võrreldi saadud tulemusi projektiga, mõõdetud andmete järgi saadud tulemustega. Selgitati välja erinevuste põhjuseid ja optimaalsete tulemuste saamiseks võeti aluseks reaalsel tingimustel koostatud mudelit.

Optimaalsete parameetrite leidmiseks analüüsiti reaalsete muutujatega saadud mudeli võimsuste ja temperatuuride graafikuid/tulemusi, mille põhjal arvutati esialgseid kompressori, pumpade, ja dry-cooleri elektritarbimisi vastavalt valitud lülitusparameetritele. Hinnati tulemusi ja pakuti vabajahutuskontuuri optimeerimise lahendusi ning arvutati läbi erinevaid seadmeid. Vastavalt optimeeritud lahendustele arvutati seadmete parameetreid ja elektritarbimisi veel kord läbi kasutades tootjate programme. Võrreldi tulemusi ja valiti elektrikulu ja seadme hinna poolest optimaalseim lahendus. Toodi esile analüütilised ja arvutuslikud seosed vabajahutuse parameetrite määramiseks.

## 1.2 Inseneride küsitlus

Käesoleva lõputöö raames koostati küsimustik vabajahutuse arvutamise põhimõtete kohta ja edastati need Eestis töötavatele ventilatsiooni- ja jahutusinseneridele. Küsimustiku sisu on kirjeldatud metoodika punkti 2.1 all.

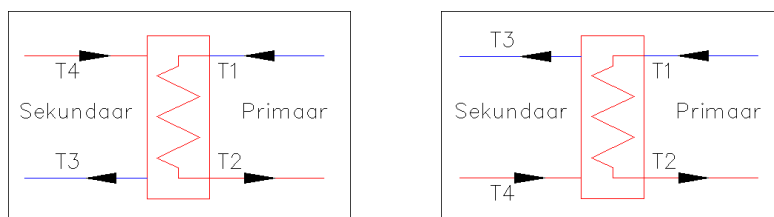
Tulemused on kirjeldatud tulemuste punkti 3.1 all. Kokkuvõttes võib tulemustest järeldada, et insenerid toetuvad vabajahutuse projekteerimisel erinevatele materjalidele ja kindlat mustrit ei esine.

Inseneridele mõeldud küsitlus oli teostatud Google Forms rakenduse abil. Küsimustikku aitas inseneridele laiali saata EKVÜ (Eesti Kütte-Ventilatsiooniinseneride Ühendus). Kokku on EKVÜ-s 408 liiget, kuid aktiivselt jahutuse projekteerimisega tegelevaid liikmeid on oluliselt vähem, hinnanguliselt alla 50 inimese. Küsimustik saadeti kõikide liikmete e-posti aadressidele ja koosnes järgmistest küsimustest.

- 1) Kas Te olete projekteerinud vabajahutusega jahutussüsteeme?
- 2) Mida olete projekteerimisel aluseks võtnud?
  - Eesti standardeid (EVS)
  - EN standardeid
  - RKAS nõudeid
  - Teiste riikide normdokumente või juhendeid
  - Seadmete tootjate soovitusi ja lahendusi
  - Teisi projekte
  - Iseseisvalt tuletatud seoseid ja kogemusi
  - Muu
- 3) Kui valisite eelmise küsimuse vastuseks "Muu", siis palun täpsustage.
- 4) Millist välistemperatuuri seadeväärtust olete kasutanud määramaks, millal lülitub vabajahutus sisse?

5) Millised on olnud vabajahutuse soojusvaheti primaarpoole ja sekundaarpoole temperatuurid?

6) Millist vabajahutuse soojusvaheti skeemi olete kasutanud?



### 1.3 Objekti kirjeldus

Käesolevas töös käsitletakse Öpiku 1 ärihoonet, mis asub Tallinna linnas aadressil Valukoja 8/1, jahutussüsteeme KM1 ja KM2.

Köetavaks pinnaks vastavalt Ehitisregistrile on 19 607 m<sup>2</sup>.

Hoone jahutussüsteem koosneb kahest jahutussõlmest KM1 ja KM2.

KM1 teenindab 2-8. korruse fancoile/jahutuspalke, 1. ja 2. korruse fancoile ja 0. korruse jahutuskalorifeere.

KM2 teenindab 9-13. korruse fancoile/jahutuspalke ja 9. korruse jahutuskalorifeere.

Projekti põhjal on hoone jahutuskooormused järgmised:

- Ventilatsiooniõhu jahutamiseks  
KM1 175 kW, KM2 405 kW või kokku 29,6 W/m<sup>2</sup>;
- Järeljahutuseks  
KM1 362 kW, KM2 209 kW või kokku 29,1 W/m<sup>2</sup>;
- Summaarselt  
KM1 537 kW, KM2 614 kW või kokku 58,7 W/m<sup>2</sup>;
- Vabajahutuseks  
KM1 250 kW, KM2 170 kW või kokku 21,42 W/m<sup>2</sup>.

Kompressorseadmed on valitud võimsustega: KM1 500 kW, KM2 610 kW.

Ümberlülitus vabajahutusele vastavalt toimivusskeemile KM1 korral 5°C juures ja KM2 korral 12°C juures, hüstereesiga 1°C.

**KM1 tööpõhimõte vastavalt teostusdokumentatsioonile.** Jahutussüsteemil on kaks välistemperatuurist sõltuvat režiimi: kompressorjahutus (suvi) ja vabajahutus (talv). Välistemperatuuri tõusmisel üle suverežiimi (nt. 12 °C, vähemalt 30 min) käivitub kompressor. Külmmasin seiskub töötamisloa lõppemisel. Seejärel läheb süsteem vabajahutuse režiimile. Töörežiimide vahel on näiteks 1 h.

Kompressorjahutuse süsteemi töö:

1. Pumbad P1.1 ja P2.1 käivituvad külmmasina käivitamisel. Veepaagi temperatuur hoitakse seadeväärtusel (+7°C).
2. Külmmasina automaatika hoiab väljuva vee temperatuuri (+7°C).

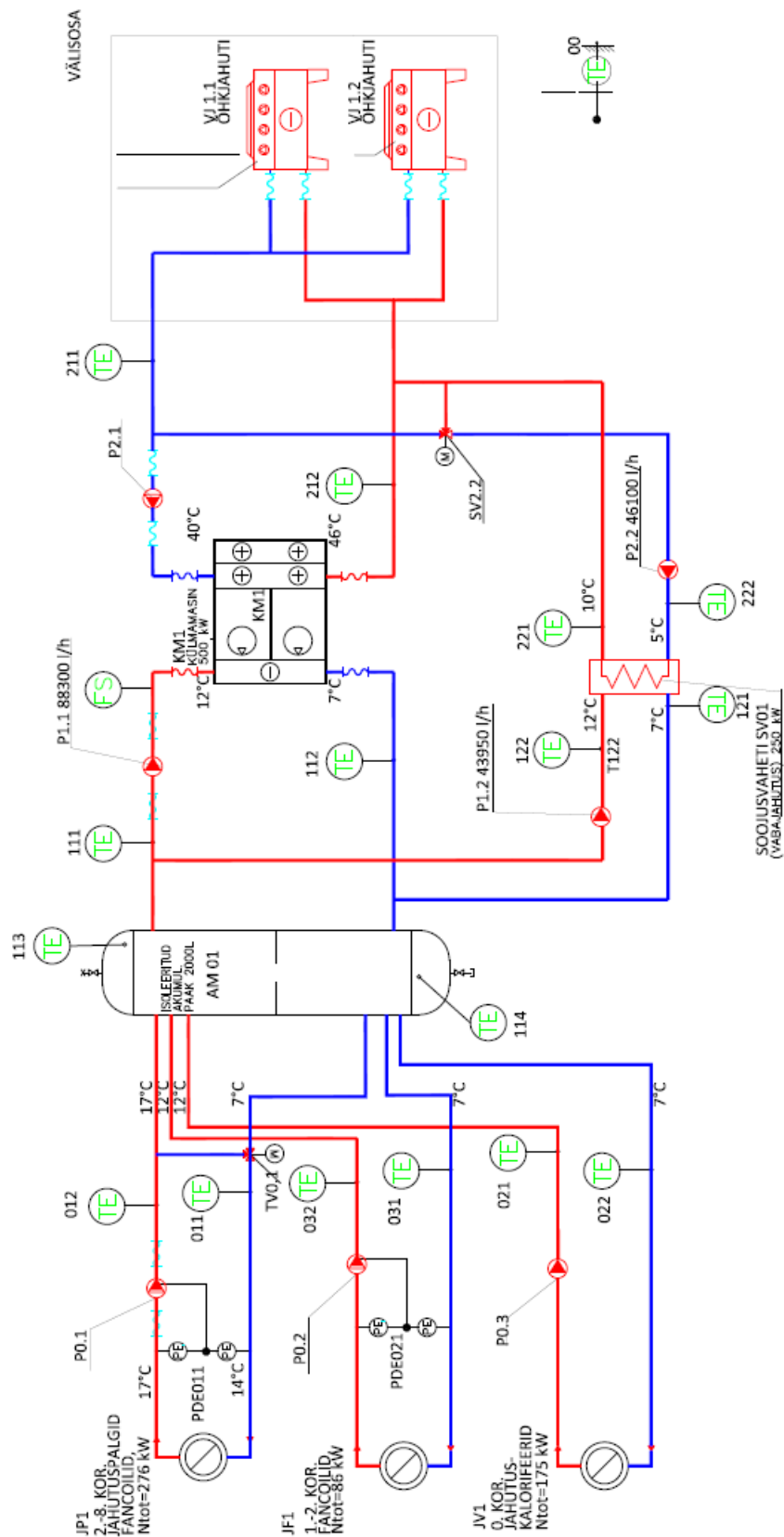
3. Juhtprogramm hoiab temperatuuri (nt. +40°C) ja temperatuuride vahet seadesuurusel välisjahutite VJ1.1 ja VJ1.2 ventilaatorite sujuva juhtimisega.
4. Jahutite seiskumisel vähendatakse primaarkontuuri vooluhulka sagedusmuunduriga pumba abil ning püütakse säilitada temperatuuride vahet.

#### Vabajahutuse süsteemi töö:

1. Pumbad P2.2 ja P1.2 käivituvad vabajahutusrežiimi aktiveerimisel. Külmmasin KM1 ja pumbad P2.1 ja P1.1 ei tööta.
2. Juhtprogramm hoiab vabajahutuse soojusvahetisse siseneva etüleenglükooli temperatuuri seadesuurusel juhtides proportsionaalselt ventiili SV2.2. ning sujuvalt välisjahutite VJ1.1 ja VJ1.2 ventilaatoreid.
3. Juhtprogramm hoiab vabajahutuse soojusvahetist väljuva jahutusvee temperatuuri seadesuurusel (+14°C) juhtides ventiili SV2.2.

#### Jahutuskontuurid

1. Pump P0.1 töötab pidevalt. Pump P0.3 käivitub siis, kui vähemalt üks ventilatsiooniseade vajab jahutust (jahutuse ventiil on avatud). Pump töötab vähemalt 5 min.
2. Juhtprogramm hoiab rõhkude vahet seadeväärtusel juhtides sagedusmuunduriga pumba P0.1 pöörlemiskiirust.



**Joonis 1.1.** Funktsionaalskeem, mis kirjeldab KM1 tööd:

**KM2 tööpõhimõtte vastavalt teostusdokumentatsioonile.** Jahutussüsteemil on kaks välistemperatuurist sõltuvat režiimi: kompressorjahutus (suvi) ja vabajahutus

(talv). Välistemperatuuri tõusmisel üle suvereežiimi ( nt. 12°C, vähemalt 30 min) käivitub kompressor. Külmmasin seiskub töötamisloa lõppemisel. Seejärel läheb süsteem vabajahutuse režiimile. Töörežiimide vahel on näiteks 1 h.

Kompressorjahutuse süsteemi töö:

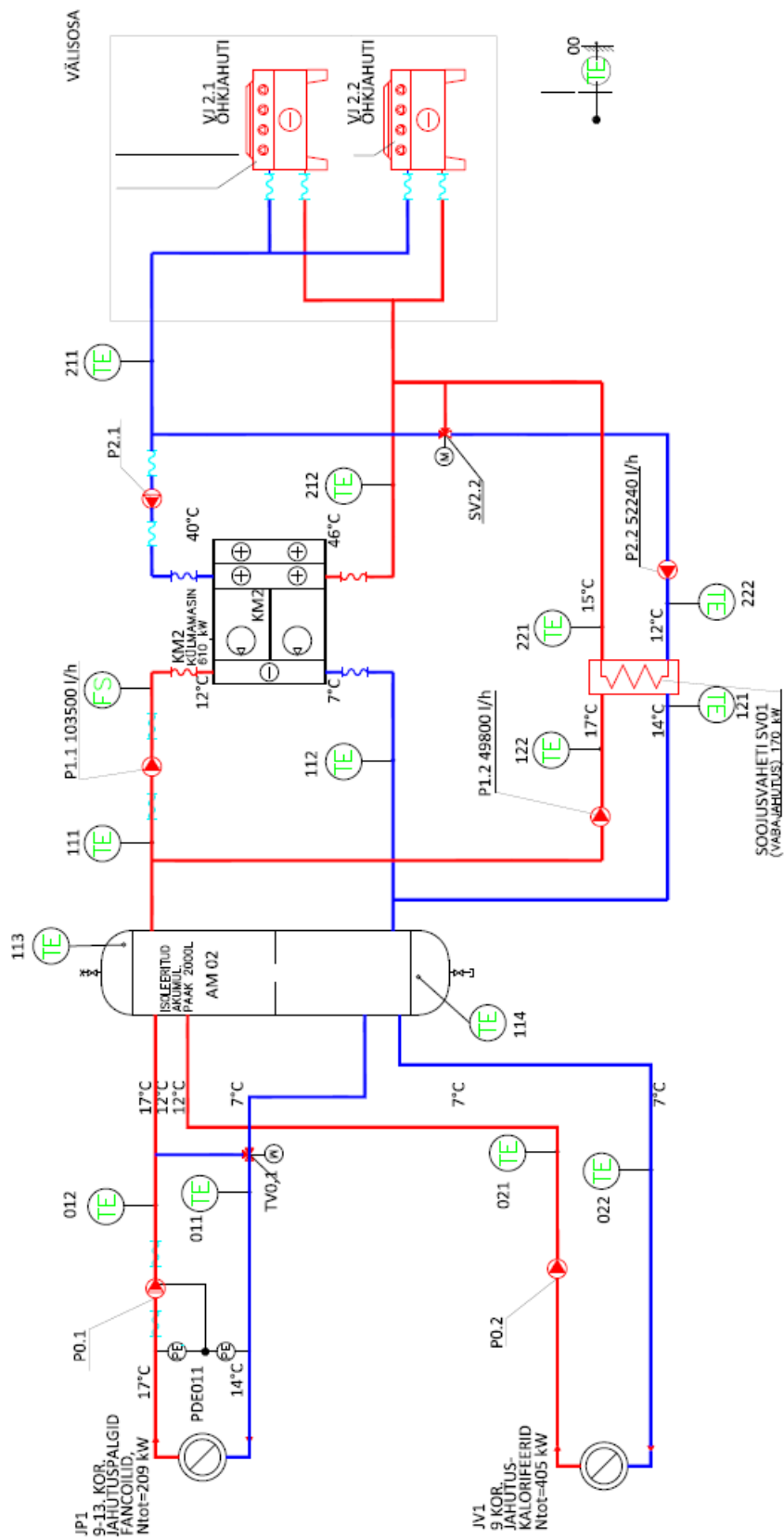
1. Pumbad P1.1 ja P2.1 käivituvad külmmasina käivitamisel. Veepaagi temperatuur hoitakse seadeväärtusel (+7°C).
2. Külmmasina automaatika hoiab väljuva vee temperatuuri (+7°C).
3. Juhtprogramm hoiab temperatuuri (nt. +40°C) seadesuurusel välisjahutite VJ1.1 ja VJ1.2 ventlaatorite sujuva juhtimisega.
4. Jahutite seiskumisel vähendatakse primaarkontuuri vooluhulka sagedusmuunduriga pumba abil ning püütakse säilitada temperatuuride vahet.

Vabajahutuse süsteemi töö:

1. Pumbad P2.2 ja P1.2 käivituvad vabajahutusrežiimi aktiveerimisel. Külmmasin KM2 ja pumbad P2.1 ja P1.1 ei tööta.
2. Juhtprogramm hoiab vabajahutuse soojusvahetisse siseneva glükooli temperatuuri seadesuurusel juhtides proportsionaalselt ventiili SV2.2. ning sujuvalt välisjahutite VJ2.1 ja VJ2.2 ventilaatoreid.
3. Juhtprogramm hoiab vabajahutuse soojusvahetist väljuva jahutusvee temperatuuri seadesuurusel (+14°C) juhtides ventiili SV2.2.

Jahutuskontuurid

1. Pump P0.1 töötab pidevalt. Pump P0.3 käivitub siis, kui vähemalt üks ventilatsiooniseade vajab jahutust (jahutuse ventiil on avatud). Pump töötab vähemalt 5 min.
2. Juhtprogramm hoiab rõhkude vahet seadeväärtusel juhtides sagedusmuunduriga pumba P0.1 pöörlemiskiirust.



**Joonis 1.2** Funktsionaalskeem, mis kirjeldab KM2 tööd:

#### **1.4 Mõõtmisme kogumine**

Enne andmete kogumist määrati, milliseid mõõtmismeid oleks vaja koguda. Peale seda pöörduti suurimate hoone tehnosüsteemi haldusega tegelevate asutuste poole, milledeks on RKAS ja Pristis AS.

Tööks piisavas mahus mõõtmismeid väljastas Pristis AS. Saadud andmed olid Öpiku 1 ärihoone kohta, mis asub Tallinna linnas aadressil Valukoja 8/1. Muid valikuid ei olnud.

Öpiku 1 hoone sobis uurimisobjektiks hästi, sest on lihtsa ja korrapärase kujuga ning fassaadid on paigutatud täpselt ilmakaarte järgi.

2020-2021 ilmajaama andmeid päikesekiirguse ja välisõhutemperatuuri kohta saadi Tallinn-Harku mõõtejaama andmebaasist.

Kogutavad andmed olid järgmised:

- Hoone jahutuse toimimise skeem;
- Hoone teostusdokumentatsioon;
- Jahutussüsteemi külmakandja primaarkontuuride ja sekundaarkontuuride temperatuurid;
- Jahutussüsteemi akumulatsioonimahuti temperatuurid;
- Jahutussüsteemi rõhud;
- Välistemperatuur ja õhu suhteline niiskus;
- Päikesekiirguse intensiivsus;
- Jahutussüsteemi pumpade elektriandmed;
- Ruumide vabasoojuste andmed.

#### **1.5 Mõõtmisme analüüsi põhimõtted ja täpsus**

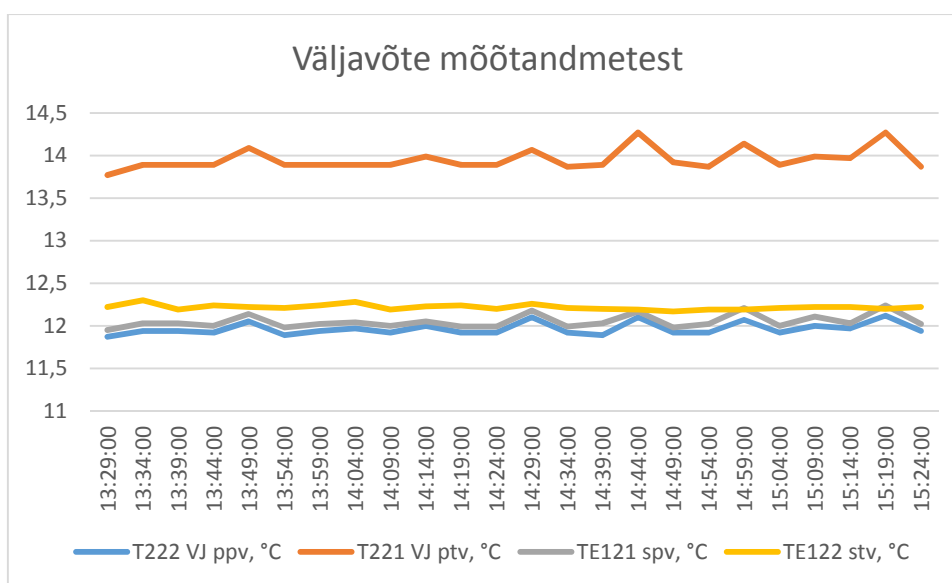
Süsteemist välja võetud andmete analüüs algas mõõtmisme ja skeemide kokku viimisest ja võrdlemisest. Sellele järgnes andmete sorteerimine ja filtreerimine vajalikule kujule.

Järgnevalt paigutati kontuuride temperatuuride andmed tabelitesse ja koostati arvutusvalemeid, mille järgi leiti vabajahutuse võimalikke võimsuste väärtusi ning kontrolliti tulemusi.



Seatud vabajahutuse tingimuste järgi määrati, millal vabajahutus töötab ning hinnati, milline on vabajahutuse tegelik võimsus ja kuidas see on seotud välistemperatuuriga, kuupäevaga ja päikesekiirgusega.

Süsteemi mõõtdandmete esmasel analüüsimisel selgus, et Öpiku 1 ärihoone andmed on osaliselt lünklikud ja andmete järgi vabajahutus ei toiminud, kuna vabajahutuse primaarpoole tagasivoolu temperatuur (T221) oli võrreldes teiste vabajahutuse soojusvaheti temperatuuridega (T222, T121, T122) liiga kõrge ja viitas sellele, et mõõtdandmed ei ole korrektsed (Joonis 1.3).



**Joonis 1.3.** Väljavõtte KM2 mõõtdandmetest

Sellela seoses korraldati objektil kontrollmõõtmisi, mille käigus koguti andmeid KM1 ja KM2 vabajahutuse soojusvahetite temperatuuridest, et oleks võimalik edaspidi parandada süsteemist välja võetud andmeid.

Enne katsemõõdistustööde algust kalibreeriti kontrollmõõdistuses kasutatavaid andureid. Selleks eesmärgiks on TalTech õppeasutuses spetsiaalne kast, milles on stabiilne temperatuur 17°C juures ja suhteliselt täpne logger nelja temperatuurianduriga. Kalibreeritavad andurid ja kalibreeritud andur paigutati ühte kasti ning alustati temperatuuride logimisega. Järgnevalt leiti täpsete andurite keskmist näitu iga mõõdetud ajavahemiku kaupa. Leitud keskmisi väärtusi võrreldi kalibreeritavate andurite näitudega ning arvutati keskmine viga iga anduri kohta.

Kellaeg	Täpsete andurite keskmine näit, °C	T1; °C	T2; °C	T3; °C	T4; °C	T1-Tkesk, °C	T2-Tkesk, °C	T3-Tkesk, °C	T4-Tkesk, °C
0:00	17,36	17,463	17,463	17,368	17,391	0,10	0,10	0,01	0,03
0:00	17,36	17,463	17,439	17,344	17,391	0,11	0,08	-0,01	0,03
0:01	17,36	17,439	17,439	17,344	17,368	0,08	0,08	-0,01	0,01
0:01	17,34	17,415	17,415	17,32	17,344	0,08	0,08	-0,02	0,01
0:02	17,34	17,415	17,415	17,32	17,344	0,08	0,08	-0,02	0,01
0:02	17,32	17,391	17,415	17,296	17,32	0,07	0,09	-0,02	0,00
0:03	17,32	17,391	17,391	17,296	17,296	0,07	0,07	-0,02	-0,02
0:03	17,30	17,391	17,368	17,296	17,296	0,09	0,07	-0,01	-0,01
0:04	17,30	17,368	17,368	17,296	17,296	0,07	0,07	-0,01	-0,01

Keskmine anduri viga	0,06	0,08	0,01	-0,01
----------------------	------	------	------	-------

**Tabel 1.1.** Vanema HOBO logeriga logitud mõõtmismeade vea leidmine



**Joonis 1.4.** KM2 vabajahutuse soojusvaheti



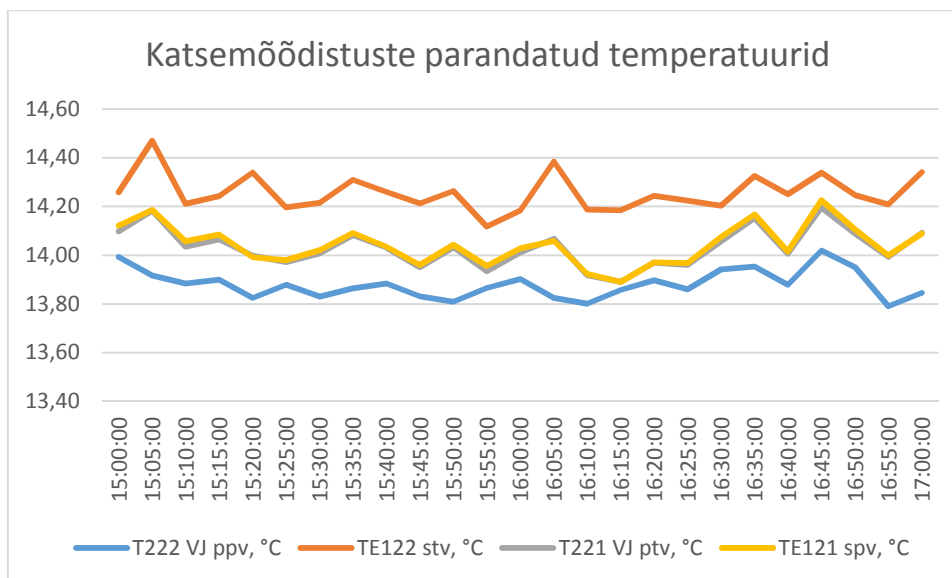
**Joonis 1.5.** Mõõdistuste teostamine KM1 vabajahutuse soojusvahetis

Katsemõõdistuste eesmärgiks oli välja selgitada, milliste andurite näidud on ebatäpsed ja kas on võimalik leida parandustegureid, millega parandada süsteemist välja võetud andmeid, et analüüsimisel oleks võimalik kasutada nii mõõdetud kui ka süsteemist saadud andmeid. Väljavõtte KM2 parandatud katsemõõtmistest on näidatud joonisel 1.6. Jooniselt on näha, et vabajahutuse soojusvaheti toimib õigesti, kuna sekundaarkontuuri tagasivoolu temperatuur on kõige kõrgem, sekundaarkontuuri pealevoolu temperatuur on suurem või võrdne primaarpoole tagasivoolu temperatuuriga ja primaarpoole pealevoolu temperatuur on kõige madalam.

Kontrollmõõdistuse andmete analüüs kinnitas, et hoone automaatikasüsteemiga ühendatud vabajahutuse soojusvaheti temperatuuriandurite edastatavad väärtused ei ole täpsed ja need tuleb võrrelda ja parandada vastavalt kontrollmõõdistuse andmetele, et andmeid oleks võimalik edaspidi kasutada.

Jahutussüsteemi TE121, 122 ja 222 andurid on ühendatud NTC10 anduritena ja andur TE221 on ühendatud jäätumiskaitse plokki (Produal JVS24) PT1000 andurina.

NTC10 anduritena ühendatud andurid näitavad väiksemat temperatuuri, kui on tegelik temperatuur. Selle põhjuseks võivad olla kalibreerimata andurid arvestades, et NTC10 andurid vajavad sagedasemat kalibreerimist kui PT1000 andurid.



**Joonis 1.6** Väljavõte parandatud katsemõõdistustest

Süsteemist saadud andmeid võrreldi parandatud kontrollmõõdistuste andmetega nende vahel leiti parandustegureid süsteemi andmetele (Tabel 1.2.) Leitud ebatäpsuste järgi parandati süsteemist varem välja võetud andmeid.

T222 VJ ppv, °C	TE122 stv, °C	T221 VJ ptv, °C	TE121 spv, °C
0,56	0,95	-0,85	0,96

Parandatud andmete põhjal teostati arvutusi, mida kirjeldatakse järgmises punktis.

### 1.6 Mõõtandaandmete järgi arvutuste teostamine

Mõõtandaandmete töötlus ja tulemuste arvutus teostati tabelarvutuse tarkvara abil.

Arvutustes kasutati parandatud süsteemist välja võetud temperatuurandmeid.

Tabelitesse kanti tabelis 1.2. antud teguritega parandatud primaar- ja sekundaarkontuuride pealevoolu ja tagasivoolutemperatuure ning süsteemist saadud mahuti temperatuure.

Nimetatud viie parameetriga määrati, millal vabajahutus töötas. Kontrolli teostati mitmes astmes:

1. Peab olema täidetud tingimus, et vabajahutuse primaarpoole pealevoolu temperatuur on madalam, kui sekundaarpoole pealevoolu temperatuur. Kui on madalam, siis on vabajahutuse esimene tingimus täidetud.
2. Peab olema täidetud tingimus, et sekundaarpoole pealevoolutemperatuur on madalam kui sekundaarpoole tagasivoolutemperatuur ja et sekundaarpoole pealevoolu temperatuur on arvutusliku temperatuuri piirkonnas.
3. Mahuti temperatuur peab olema üle 11,1°C. Madalama temperatuuri korral töötab kompressor.
4. Viimases kontrollastmes kontrolliti elektriarvestite andmete järgi, millal võis külmajaam töötada.

Primaarkontuuri pumba arvutusliku vooluhulga ja tabelist leitud temperatuuri järgi leiti vabajahutuse võimsus.

$Q_v = c \times \Delta t \times q \times \rho$ , kus

$\rho$ - külmakandja tihedus, kg/m<sup>3</sup>;

$\Delta t$ - tagasivoolu ja pealevoolu temperatuuride vahe, °C;

$q$ - pumba vooluhulk, m<sup>3</sup>/s;

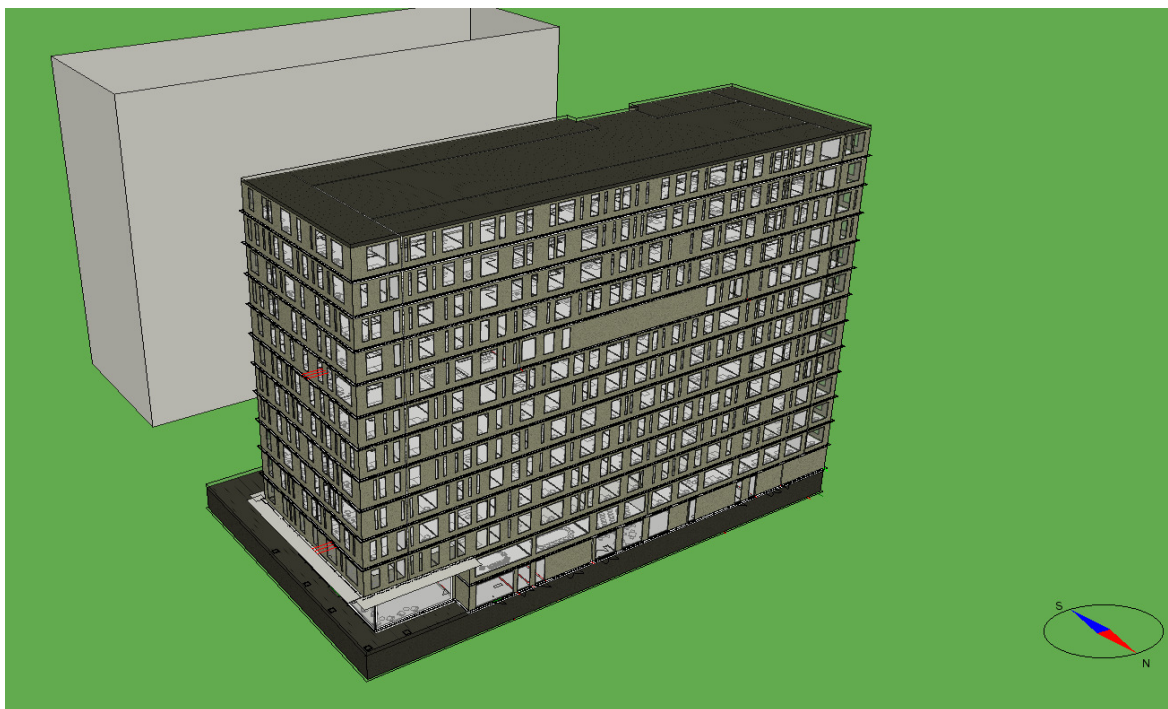
$c$ - külmakandja erisoojus, J/kg C.

Arvutuste teostamisel võeti pumpade vooluhulgaks teostusdokumentatsioonil näidatud vooluhulkasid. Sekundaarkontuuri pumbad töötavad pidevalt ja automaatika hoiab konstantset rõhkude vahet ehk pumba pöörlemissagedus muutub. Kuna süsteemis puuduvad täpsed pumpade pöörlemissagedused, siis antud töö raames kasutati arvutuslikku väärtust, sest süsteemi dimesioneerimise mõttes on olulisem suurim võimalik võimsus. Primaarkontuuri pumbad töötavad ühel kiirusel (ilma sagedusmuundurita ja astmeteta). Enne pumpa on ajamiga 3T-ventiil, mis reguleerib soojusvaheti tagasivoolu ja jahuti pealevoolu segunemist, kuid summaarne vooluhulk läbi soojusvaheti on sama. Primaarkontuuris on külmakandjaks vesiglükooli lahus 30 % ja sekundaarkontuuris on vesi. Külmakandjate tihedus ja erisoojus valiti vastavalt külmakandja tüübile ja temperatuurile.

Saadud võimsuste suurused võrreldi projektijärgsete andmetega.

## 1.7 Hoone mudeli koostamine

Hoone mudel (Joonis 1.7.) koostati tarkvaraga IDA ICE. Mudeli koostamise lähteandmeteks olid hoone plaanid, vaated, lõiked ja asendiplaan. Lisaks kasutati hoone jahutuse ja ventilatsiooni projekte, mis olid teostatud Projektide Agentuur OÜ poolt. Päikest varjavaks objektiks valiti Öpiku 2 hoonet, mis asub aadressil Valukoja 8/2.



**Joonis 1.7.** Mudeli 3D vaade

Mudel koostati lihtsustatud kujul (Joonis 1.8.). See tähendab, et sarnaste parameetritega tsoonid liideti kokku ilmakaarte kaupa. Akende parameetrid võeti projektist ja teostusdokumentatsioonist. Hoone välispiirded võeti U-arvu ja massiivsuse poolest võimalikult sarnaseks reaalsetele konstruktsioonidele:

- Välisseinad  $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;
- Katus  $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;
- Aknad  $0,85 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ; põhja pool  $g=0,5$ ; ida, lääne ja lõuna pool  $g=0,3$ ;
- Põrand pinnasel  $0,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;

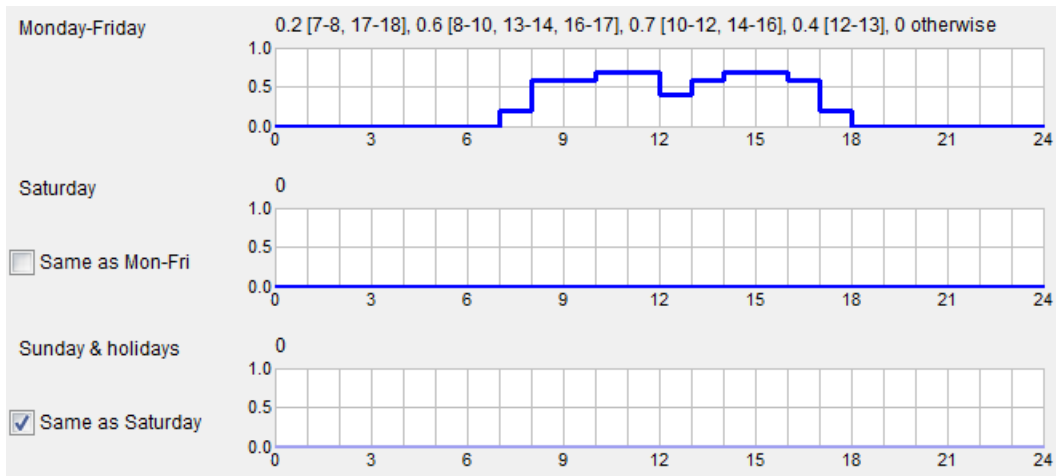
Standardmudeli jaoks kasutati "Ideal Cooler" (jahutusseade, millel on ainult jahutusvõimsuse parameeter) jahutusseadet ja esialgne arvutus teostati EstoniaTRY kliimafaili abil.



**Joonis 1.8.** Lihtsustatud mudeli korrusplaan

### 1.8 Mudeli muutujad

Standardmudeli muutujateks on tsoonide vabasoojused. Tsoonide vabasoojused koosnevad inimestest, valgustitest ja seadmetest, mis on rakendatud graafikute alusel (Joonis 1.9.). Standardmudeli inimeste, valgustite ja seadmete vabasoojused ning nende graafikud on võetud määruse nr. 58 järgi. Inimeste arv on võetud maksimaalse töökohtade arvu järgi. Muutujad on esitatud tabelis 1.3.



**Joonis 1.9.** Graafik, mis iseloomustab inimeste kohalolu hoones.

<b>Tabel 1.3. Standardmudeli muutujad</b>		
<b>Muutuja</b>	<b>Suurus</b>	<b>Ühik</b>
<b>Inimeste arv</b>	1/17	tk/m <sup>2</sup>
<b>Inimeste aktiivsustase</b>	1	MET
<b>Inimeste riietus</b>	0,85±0,25	CLO
<b>Seadmetest</b>	12	W/m <sup>2</sup>
<b>Valgustusest</b>	10	W/m <sup>2</sup>
<b>Ventilatsioonisüsteemi tüüp</b>	Konstantse õhuhulgaga	-
<b>Ventilatsiooni õhuhulk</b>	2	l/(sxm <sup>2</sup> )
<b>Ventilatsiooni sissepuhke temperatuur</b>	17	°C
<b>Jahutusseadme tüüp</b>	Elektriga/kompressoriga jahutusseade (Ideal Cooler)	-

Standardmudelis ei ole arvestatud COVID-19 tõttu toimunud muutusi graafikutes. Antud muutusi arvestati mudeli kalibreerimisel elektriarvestite näitude järgi.

Reaalsetel tingimustel mudeli saamiseks muudeti järgnevaid muutujaid:

- Sisestati reaalseid vabasoojusi vastavalt hoone haldurilt saadud elektriandmetele.
- Muudeti mudeli ilmastiku faili vastavalt ilmajaamast saadud andmetele. Muutujateks on päikesekiirguse intensiivsus ja välistemperatuurid piirkonnas.

Mudeli kalibreerimise eesmärgiks reaalset saadud andmetega oli saavutada sellist mudelit, mis oleks võimalikult lähedane reaalsele olukorrale. Kuna hiljem selgus, et hoone vabajahutussüsteem ei toimi nii nagu oli planeeritud, siis ei olnud võimalik kalibreerimist kontrollida ja arvutusi jätkati koostatud mudeli järgi.

### **1.9 Mudeli, projekti ja mõõtandaandmete analüüsimine ja võrdlemine**

Esiteks, analüüsiti teostusdokumentatsiooni ja võrreldi seda standardmudeli arvutuses saadud võimsuse näitajatega. Erinevuste ilmnemisel leiti erinevuse suurus ja põhjus.

Teiseks, vaadeldi standardmudeli arvutuse aruannet ja selgitati välja, kas andmed on kasutatavad ning on võimalik teha nende põhjal analüüsi ja järeldusi.

Parandatud mõõtandaandmete järgi valiti iseloomulikke päevi, mida jälgida ja kinnitada seoseid jahutusvõimsuse, päikesekiirguse ning välistemperatuuri vahel.

Iseloomulikke päevi valiti mitme kriteeriumi põhjal:



- Välistemperatuur kõigub vabajahutuse sisselülitumise piirkonnas (12°C);
- Välistemperatuur on alla vabajahutuse sisselülituse temperatuuri, kuid üle 0°C;
- Päikesekiirguse intensiivsuse suurus. Valiti äärmuslikud olukorrad.

Selgitati välja jahutusevajaduse muutust iseloomulikel päevadel ning selle võimalikku põhjust. Hinnati jahutusevajaduse sõltuvust temperatuurist ja päikesekiirgusest. Sellega kontrolliti, kas ja kuidas hoone vabajahutussüsteem reageerib välistele muutujatele.

Kolmandaks, kalibreeriti arvutusmudelit. Selleks valiti ilmastiku mõõdistusandmetest saadud muutujaid ja vabasoojuste muutujaid sisestati vastavalt reaalsele andmetele, mis olid saadud elektriseadmete töötamise aruannetest. Realse mudeliga saadud andmeid võrreldi projekti andmetega ja mõõdetud andmetega, et hinnata kalibreerimise edukust. Otsustati, kas mudeli arvutatud andmed on kasutatavad vabajahutuse optimaalsete parameetrite määramiseks.

Kalibreeritud mudeli järgi koostati temperatuuride ja võimsuste graafikuid ning tuletati graafikul optimaalset vabajahutuse leidmise lineaarset seost.

Kontrollarvutusena teostati jahutuskoormuste arvutust baasmudeli (IdaIce synthetic weather) järgi ning kanti tulemusi eelnevalt koostatud vabajahutuse võimsuse ja välistemperatuuri seosega graafikule. Hinnati, kas baasmudeli arvutusi on võimalik mingil määral arvutuste aluseks võtta.

### **1.10 Optimaalsete parameetrite leidmine ja seadmete valik**

Saadud andmete ja mudelite analüüsimisel otsustati, et reaalse andmetega mudelit (kalibreeritud mudel) on võimalik kasutada edaspidi optimaalsete vabajahutuse parameetrite määramiseks, mis on kirjeldatud punktis 1.1.

Eelnevalt leitud lineaarse vabajahutuse võimsuse ja välistemperatuuri seose järgi arvutati jahutusvõimsusi erinevate välistemperatuuride korral. Leitud vabajahutuse võimsust võrreldi projekteeritud süsteemi võimsusega ning mõõtandmetega saadud võimsustega.

Järgmisena, hakati tootjate valikuprogrammidega läbi arvutama jahutussüsteemi komponente, et määrata nende võimalikud suurused, töötingimused ning elektrivõimsused kontrollitavate vabajahutuse parameetrite korra. Arvutustega kontrolliti järgnevaid jahutussüsteemi komponente:

- Järeljahutuse seadmed ehk jahutustalad. Lülitustemperatuuri ülemist piiri panevad paika järeljahutuse seadmete pealevoolu ja tagasivoolutemperatuurid. Hinnati, millised on teoreetiliselt võimalikud järeljahutuse kontuuri temperatuurid ja sellest tulenevalt, milline saab olla soojusvahetiga eraldatud primaarkontuuri temperatuurigraafik. Kontrolli jaoks valiti lõunapoolne väiksem ruum, kuhu ei mahuks rohkem järeljahutuse seadmeid. Arvutusega kontrolliti, kui palju väheneb jahutustala võimsus, kui suurendada sekundaarpoole temperatuurigraafikut ning kas saadud võimsus on piisav vabajahutuse võimaliku lülitustemperatuuri korral. Analüüs näitas, kas on võimalik kasutada samu jahutustalad kõrgema temperatuurigraafiku korral.
- Kompressoriga külmamasin. Arvutati läbi, et saada külmamasina temperatuure, EER-i ja elektrivõimsusi 1 °C sammuga. Andmeid kasutati edaspidi elektritarbimise määramisel.
- Dry-cooler ehk õhkjahuti. Arvutati läbi õhkjahuteid sammuga 1 °C erinevatele jahutuskooormustele, et leida süsteemile sobivaid lahendusi, mis tagaksid nii kompressori tööd kui ka vabajahutuse tööd. Alguses leiti arvutuslik dry-cooler, mida ei kontrollitud korruga dry-cooleri ja kompressori režiimile, et saada esialgsed elektrivõimsused. Teises ringis arvutustulemuste täpsustamisel leiti konkreetseid tooteid, mis tagaksid nii kompressorjahutuse kui ka dry-cooleri tööd. Dry-cooleri valiku järgi määrati seoseid temperatuurigraafiku ja lülitustemperatuuri vahel. Seoste järgi leiti optimaalsed vabajahutuse lülitustemperatuurid ja primaar- ning sekundaarkontuuride temperatuurigraafikud.
- Külmamasina kontuuri pump. Pumba arvutuse järgi leiti elektrivõimsusi, mida kasutati aastase elektritarbimise arvutustes.
- Dry-cooleri kontuuri pump. Pumba arvutuse järgi leiti elektrivõimsusi, mida kasutati aastase elektritarbimise arvutustes.

Saadud seadmete elektriandmete järgi koostati aastase elektritarbimise graafikuid, kust on võimalik jälgida, kuidas muutub elektritarbimine sõltuvalt lülitustemperatuuri muutmisest. Kontrolliti, kas esinevad murdepunktid ja analüüsiti, kas on võimalik süsteeme optimeerida.

Kõige lõpus arvatati läbi elektritarbimised optimeeritud süsteemidega. Võrreldi süsteemide elektritarbimist ja maksumust ning valiti optimaalseim süsteem. Optimaalne süsteem defineerib optimaalseid vabajahutuse parameetreid.

- Analüüsiti akumulatsioonipaagi arvutamise võimalusi.

Jahutussüsteemi akumulatsioonipaagi eesmärk on siluda temperatuurierinevusi, et järeljahutuse seadmetesse jõuaks alati õige temperatuur. Paagi optimaalset suurust saab arvutada valemite (1) ja (2) abil. Valikukriteeriumiteks kompressoriga süsteemis on:

- Külmmasina tüüp ja tootlikkus. Mida suurem tootlikkus, seda suurem paagi maht. Mida rohkem võimsuste astmeid, seda väiksem maht.
- Külmakandja tüüp;
- Sekundaarkontuuri temperatuurid;
- Jahutuskomponentide ühendusskeem ja maht.

$$V_{mahuti} = V1 - V2, \text{ l} \quad (1)$$

$$V1 = \frac{Q \cdot 60 \cdot \tau}{m \cdot 4,19 \cdot \Delta t}, \text{ l.} \quad (2)$$

Q – külmmasina tootlikkus, kW;

$\tau$  – aja vahemik külmmasin sisselülituse ja väljalülituse vahel, min;

m – tootlikkuse astmete arv;

$\Delta t$  – sekundaarkontuuri temperatuuridevahe, °C

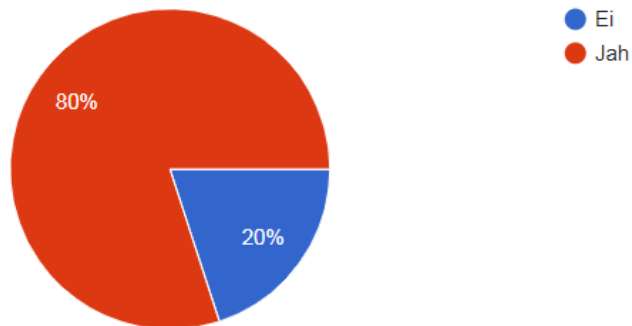
V2 – süsteemi summaarne math koos soojusvahetitega, jahutiga ja torustikuga.

Vastavalt valemitele (1) ja (2) on näha, et vabajahutuse osa mõjutab mahuti mahtu ainult jahuti suuruse valiku tõttu.

## 2. TULEMUSED

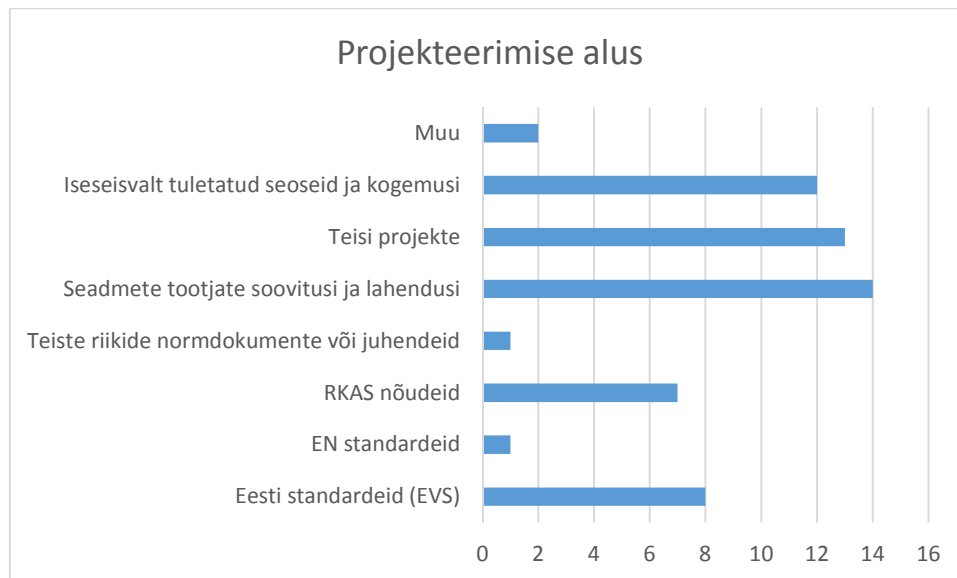
### 2.1 Inseneride küsitluse tulemused

EKVÜ liikmeid, kellele saadeti küsitlust, on kokku 408. Neist tegeleb aktiivselt jahutussüsteemide projekteerimisega kuni 50 inimest. Kokku osales küsitluses 25 inseneri, kellest 20 on projekteerinud vabajahutusega süsteeme ja 5 inseneri ei ole projekteerinud (joonis 2.1.).



**Joonis 2.1.** Küsitluse tulemus

Vabajahutuse projekteerimise aluseks on võetud (joonis 2.2.):



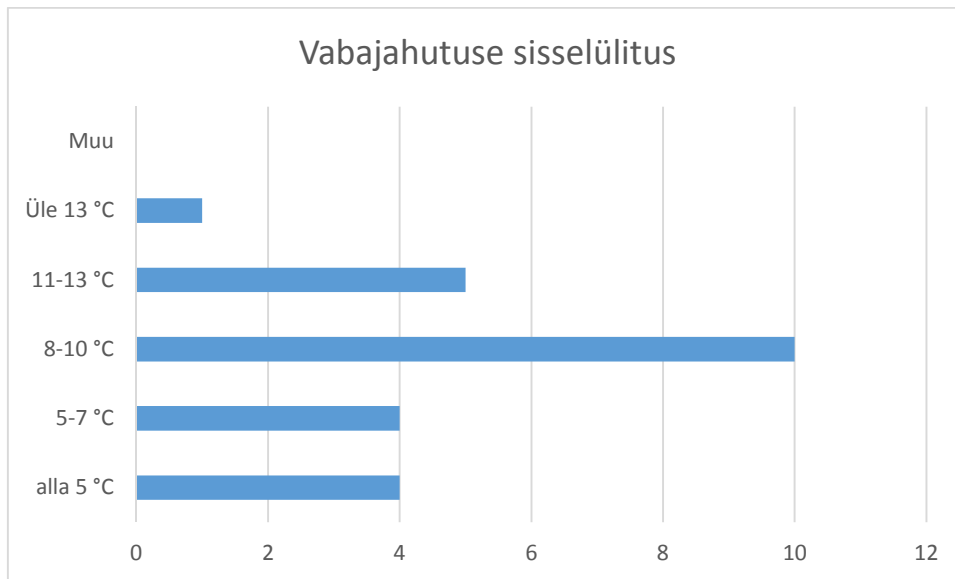
**Joonis 2.2.** Küsitluse tulemus

Vastavalt küsitlusele võtavad insenerid aluseks valdavalt seadmete tootjate soovitusi ja lahendusi, teisi projekte ning iseseisvalt tuletatud seoseid ja kogemusi.

Kõige vähem kasutatakse EN standardeid ja teiste riikide normdokumente või juhendeid.

Muu alla olid vastajad märkinud IDA ICE mudelit ja energiatõhususe projekti tulemusi.

Määramaks, millal lülitub vabajahutus sisse, kasutati järgnevaid välistemperatuuri seadeväärtusi (joonis 2.3.):



**Joonis 2.3.** Küsitluse tulemus

Valitud vabajahutuse soojusvaheti primaarpoole ja sekundaarpoole temperatuurid olid valitud järgnevalt (tabel 2.1).

PPV, °C	PTV, °C	SPV, °C	STV, °C	Skeemi tüüp	Lülitustemperatuur, °C
12	15	14	17	2	8-10
11	14	14	17	2	11-13
17	23	19	22	2	11-13
10	15	12	17	2	8-10
11	13	14	17	1	8-10
-	-	11	16	1	alla 5
5	10	7	12	2	alla 5
4	7	7	12	1	8-10
0	3	14	19	2	üle 13
12	15	14	17	1	8-10 ja 11-13
12	15	15	18	1	8-10 ja 11-13

8	11	10	15	1	8-10 ja 11-13
-	-	-	-	1	5-7
5	7	-	-	1	-
11	15	14	17	2	8-10
12	15	14	17	1	alla 5
12	15	14	17	2	8-10
10	13	14	17	1	5-7
12	15	14	17	1	8-10
10	15	12	15	1	alla 5 ja 5-7

**Tabel 2.1** Küsitluse tulemus

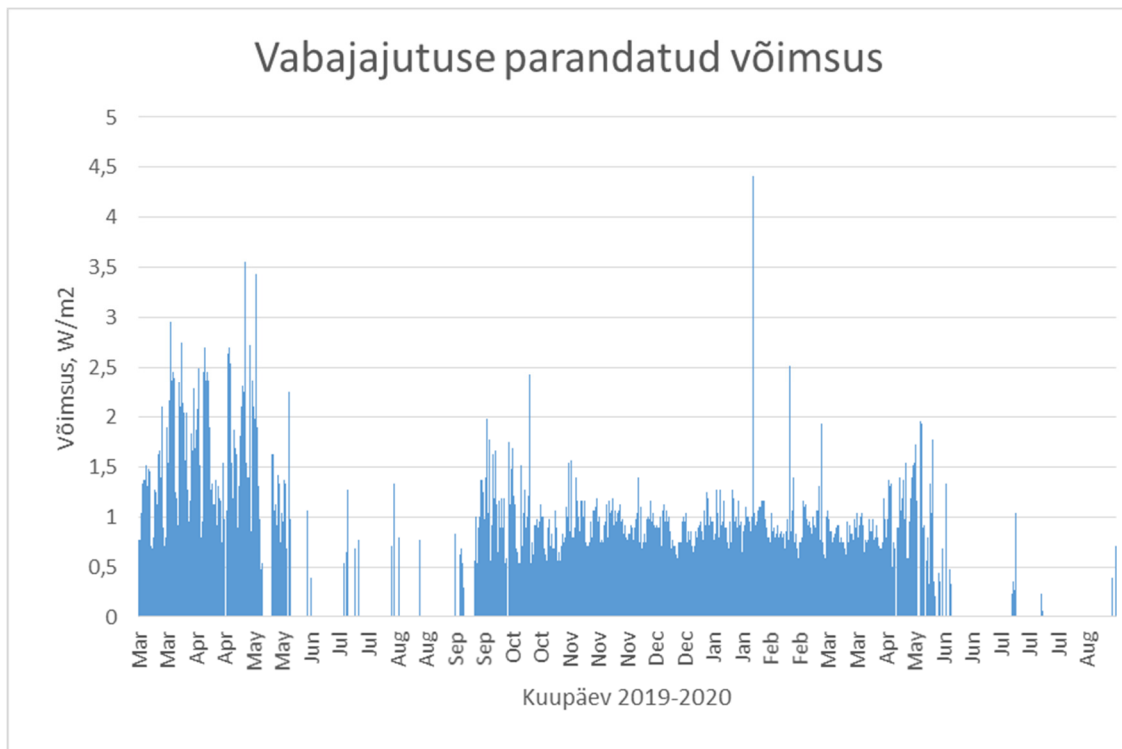
40 % vastanutest kasutas 2. soojusvahetiskeemi (vastuvoolne) ja 60 % vastanutest kasutas 1. soojusvahetiskeemi (punkt 1.2).

Kokkuvõttes võib küsitluse tulemustest järeldada, et vabajahutuse projekteerimisel on Eestis tegutsevatel inseneridel erinev lähenemine. Kui panna küsitluse põhjal kokku vabajahutuse projekteerimise lähteülesande, siis see kujuneks järgnevalt:

- Võtta aluseks seadmete tootjate soovitusi ja lahendusi;
- Valida vabajahutuse sisselülituse temperatuuriks 8-10°C;
- Kasutada pärioolset soojusvahetit;
- Valida primaarpoole ja sekundaarpoole temperatuurideks 12/15 ja 14/17 °C.

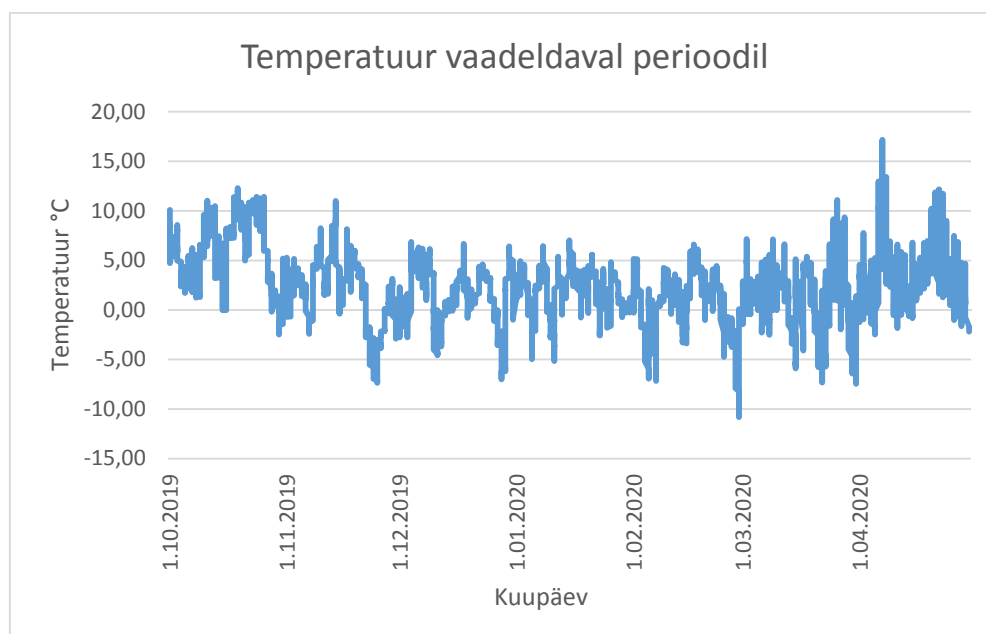
## **2.2 Vabajahutuse töösagedus vaadeldaval ajaperioodil**

Joonisel 2.4 on näidatud vabajahutuse töösagedus kogu vaadeldaval perioodil. Antud joonised on saadud süsteemi korrigeeritud mõõtmistulemuste analüüsil. Vabajahutus lülitus sisse kõige sagedamini ajavahemikul september kuni juuni. Selle järgi võib järeldada, et vabajahutuse kontuur toimis ka madalamatel välisõhutemperatuuridel, kuid vabajahutuse võimsused olid arvutuslikega võrreldes oluliselt väiksemad. Kõige suuremad vabajahutuse võimsused olid aprillis, mais ja septembris.



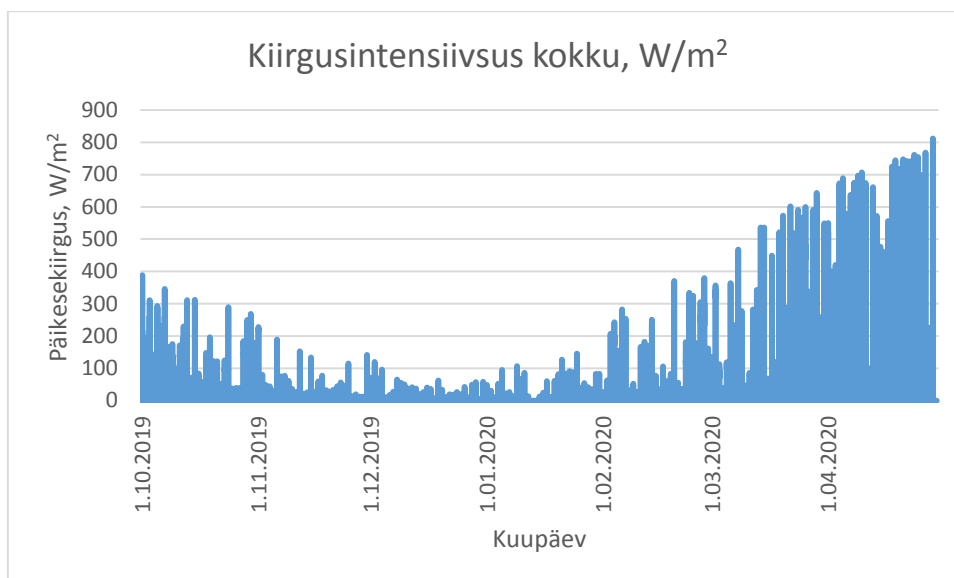
**Joonis 2.4.** KM2 vabajahutuse töösagedus vaadeldaval perioodil 03.2019 kuni 09.2020

Vabajahutuse tööle seavad piire välistemperatuur, vabasoojused ja päikesekiirgus. Vaadeldavat perioodi kitsendati vastavalt välisõhu temperatuurile. Joonisel 2.5. on näidatud vaadeldav periood 10.2019 kuni 05.2020.



**Joonis 2.5.** Välistemperatuuri näit vaadeldaval perioodil

Päikesekiirguse andmete järgi, mis on näidatud joonisel 2.6, kitsendati vaadeldavat perioodi veel. Järeldati, et kõige huvipakkuvam periood vabajahutuse võimsuse dimensioneerimiseks on aprill kuni mai.



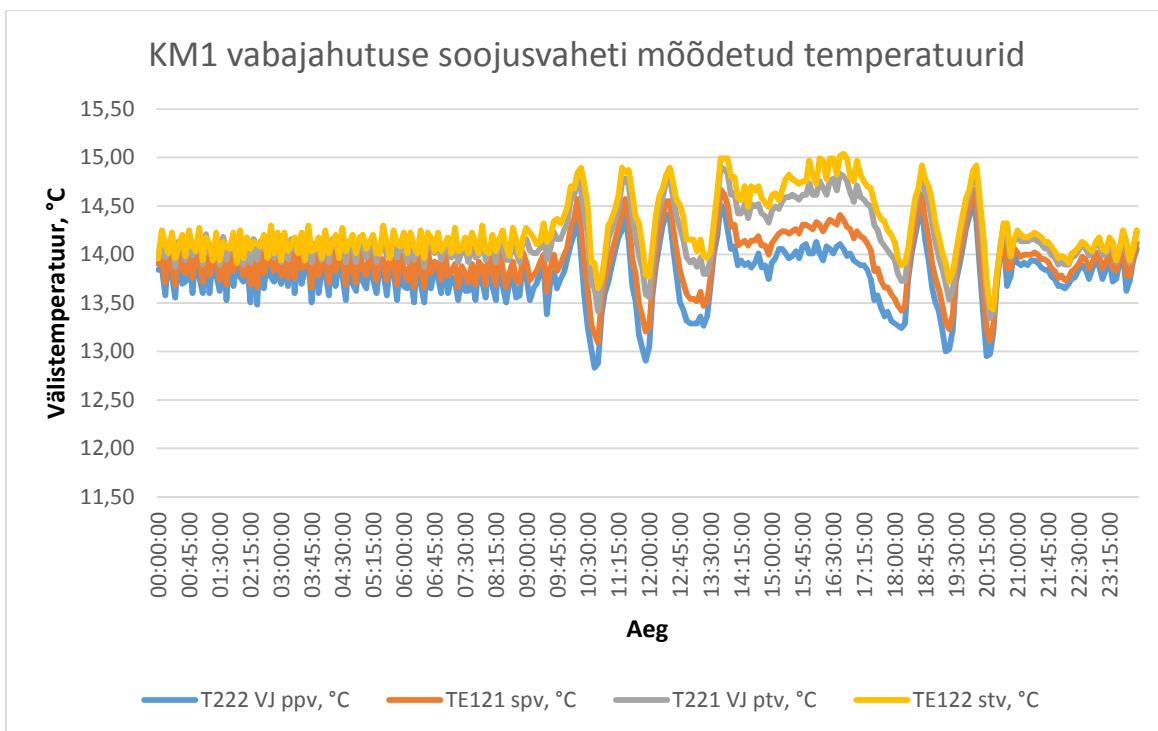
**Joonis 2.6.** Päikesekiirguse intensiivsus vaadeldaval perioodil

### 2.3 Mõõdetud süsteemi temperatuurid ja andmete parandamine

Joonistel 2.7. ja 2.8. on näidatud KM1 ja KM2 süsteemide vabajahutuse soojusvahetite kalibreeritud anduritega mõõdetud temperatuurid valitud ajavahemikul, kui soojusvaheti töötas. Andmed kinnitavad, et soojusvahetid töötavad ja nende järgi saab parandada süsteemist välja võetud andmeid.

Tabelites 2.2. ja 2.3. on toodud arvutatud temperatuuride keskmised väärtused, mis iseloomustavad kõige paremini KM1 ja KM2 soojusvahetite tööd ja teostusjoonistel antud arvutuslikud temperatuurid. KM1 mõõdistatud temperatuuridel ja arvutuslikel temperatuuridel puudub seos, tõenäoliselt on projektdokumentatsioonis viga ja temperatuurid peavad sarnanema KM2 süsteemi temperatuuridega. KM2 mõõdistatud temperatuure ja arvutuslikke temperatuure võib lugeda sarnasteks.

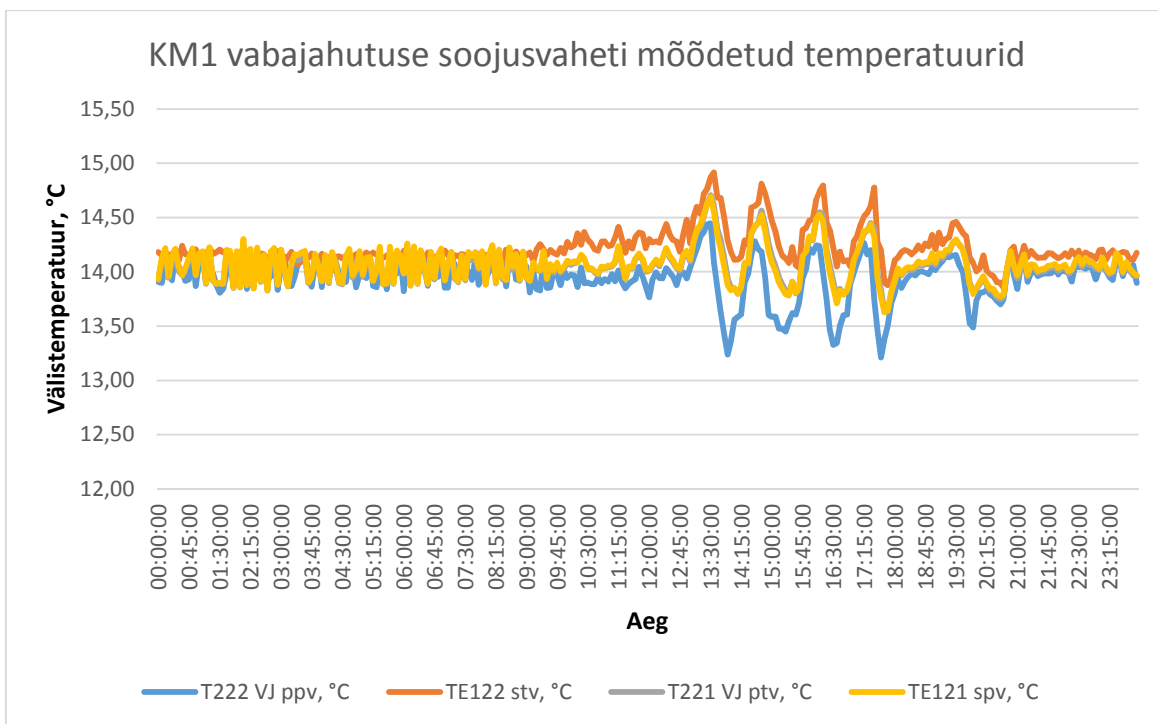




**Joonis 2.7.** KM1 vabajahutuse soojusvaheti mõõdetud temperatuurid

Temperatuur	T222 VJ ppv, °C	TE121 spv, °C	T221 VJ ptv, °C	TE122 stv, °C
Mõõdistatud	13,76	13,97	14,29	14,45
Teostusjoonistelt	5	7	10	12

**Tabel 2.3** KM1 soojusvaheti mõõdetud keskmised temperatuurid ja arvutuslikud temperatuurid.



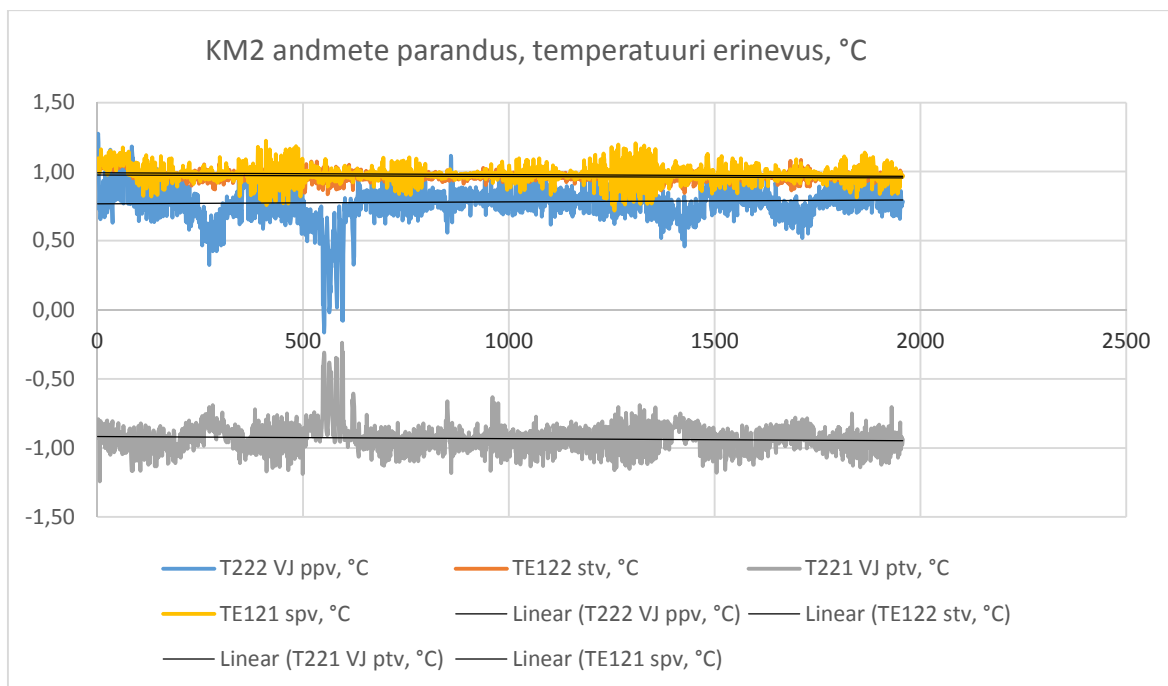
**Joonis 2.8.** KM2 vabajahutuse soojusvaheti mõõdetud temperatuurid

Temperatuur	T222 VJ ppv, °C	TE122 stv, °C	T221 VJ ptv, °C	TE121 spv, °C
Mõõdistatud	13,92	14,44	14,19	14,19
Teostusjoonistelt	12	17	15	14

**Tabel 2.3** KM2 soojusvaheti mõõdetud keskmised temperatuurid ja arvutuslikud temperatuurid.

Joonisel 2.9. on näidatud primaar- ja sekundaarkontuuride temperatuuridevahe graafikud, mis näitavad, kui palju erinevad kontrollmõõdistuste käigus paigaldatud mõõtandurite ja hoone automaatikasüsteemiga ühendatud andurite näidud. Graafikute järgi võib näha igal anduril on suhteliselt konstantne viga ning sellest järeldati, et andmeid võib kasutada parandustegurite määramiseks.

Tabelis 2.4 on toodud joonise 2.9 graafikute lineaarsed keskmised väärtused. Vastavalt nendele väärtustele parandati varem süsteemist välja võetud andmeid ning teostati edaspidiseid arvutusi vabajahutuse mõõdetud võimsuste määramiseks.



**Joonis 2.9.** KM2 Andmete keskmised parandustegurid

Temperatuur	T222 VJ ppv, °C	TE122 stv, °C	T221 VJ ptv, °C	TE121 spv, °C
Parandustegurid	0,56	0,95	-0,85	0,96

**Tabel 2.4** KM2 soojusvaheti temperatuuride parandustegurid

Temperatuuride erinevusi analüüsitakse kolmandas peatükis.

#### 2.4 Vabajahutuse võimsus mõõandmete järgi

Vabajahutuse toimimise ajal jäi KM1 vabajahutuse võimsus vahemikku 10-45 kW. KM2 vabajahutuse võimsus jäi vahemikku 20-50 kW. Kokku 1,53-4,85 W/m<sup>2</sup>.

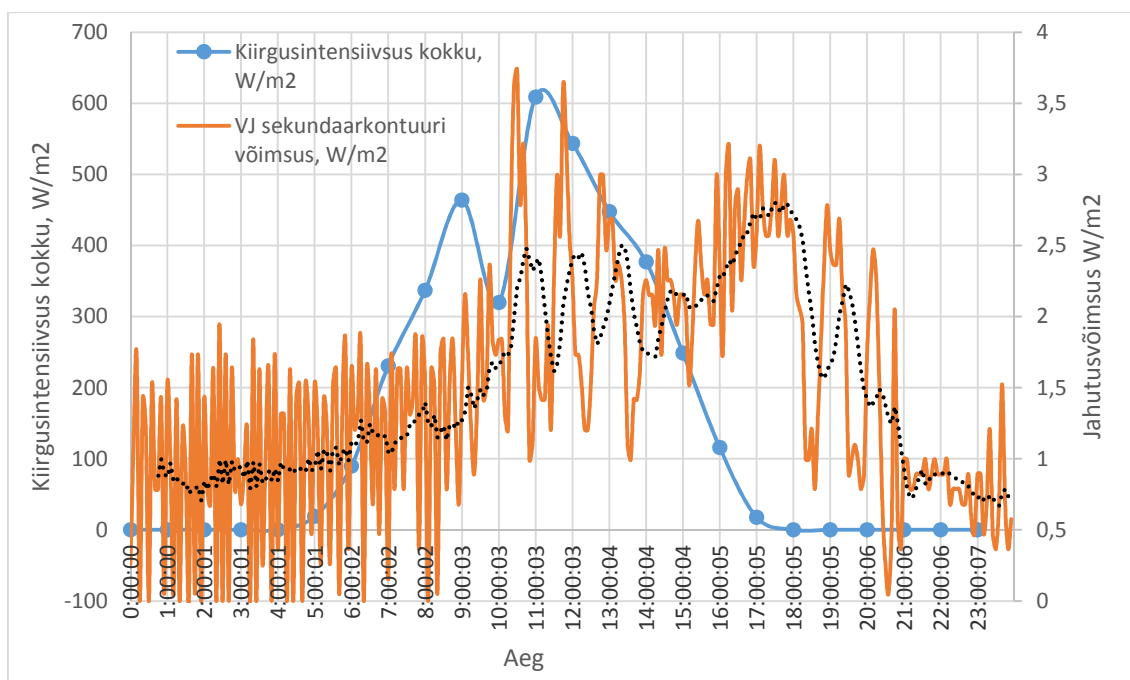
KM1 maksimaalne mõõdetud vabajahutuse võimsus moodustab jahutuspalkide arvutuslikust võimsusest  $45/276=16\%$ . KM1 süsteemis olevaid fancoile ei arvestatud, kuna nende temperatuurigraafik on projekteeritud 7/12°C, kuid mõõdistused näitavad, et vabajahutus toimis ka kõrgemal välistemperatuuridel kui 5°C. Võimalik, et fancoilid toimivad kõrgemal temperatuurigraafikul ning süsteem ei ole seadistatud vastavalt teostusdokumentatsioonile.

KM2 maksimaalne mõõdetud vabajahutuse võimsus moodustab arvutuslikust jahutuspalkide võimsusest  $50/209=24\%$ .

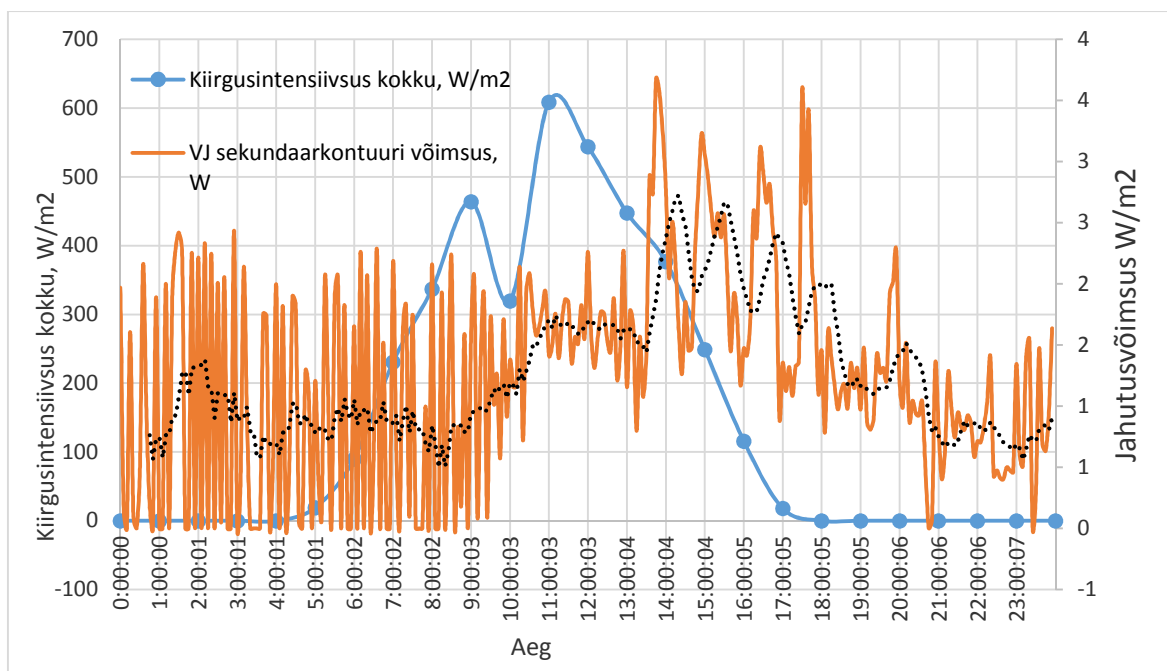
Suurte erinevuste põhjuseid analüüsitakse neljandas peatükis.

## 2.5 Võimsuse sõltuvus päikesekiirgusest katsemöödistuse andmete järgi

Jooniste 2.10. ja 2.11. järgi on näha, et intensiivsema päikesekiirguse korral suureneb vabajahutuse võimsus.



**Joonis 2.10.** KM1 vabajahutuse võimsuse sõltuvus päikesekiirgusest, 26.03.2021

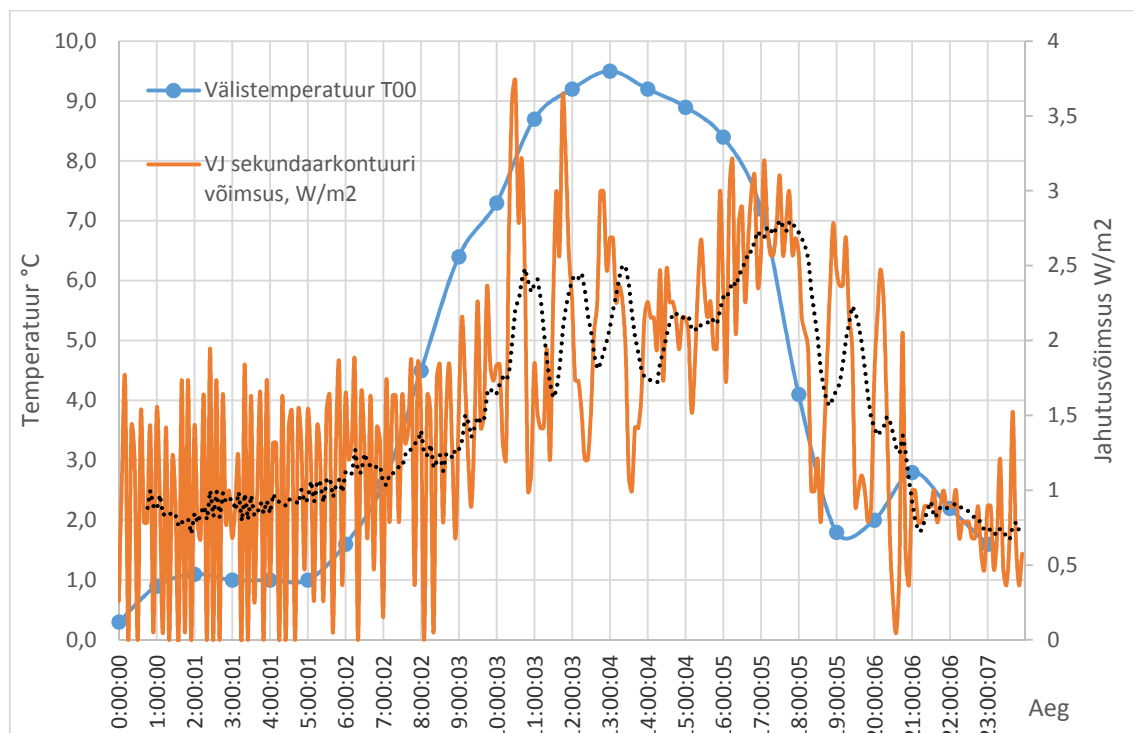


**Joonis 2.11.** KM2 vabajahutuse võimsuse sõltuvus päikesekiirgusest, 26.03.2021

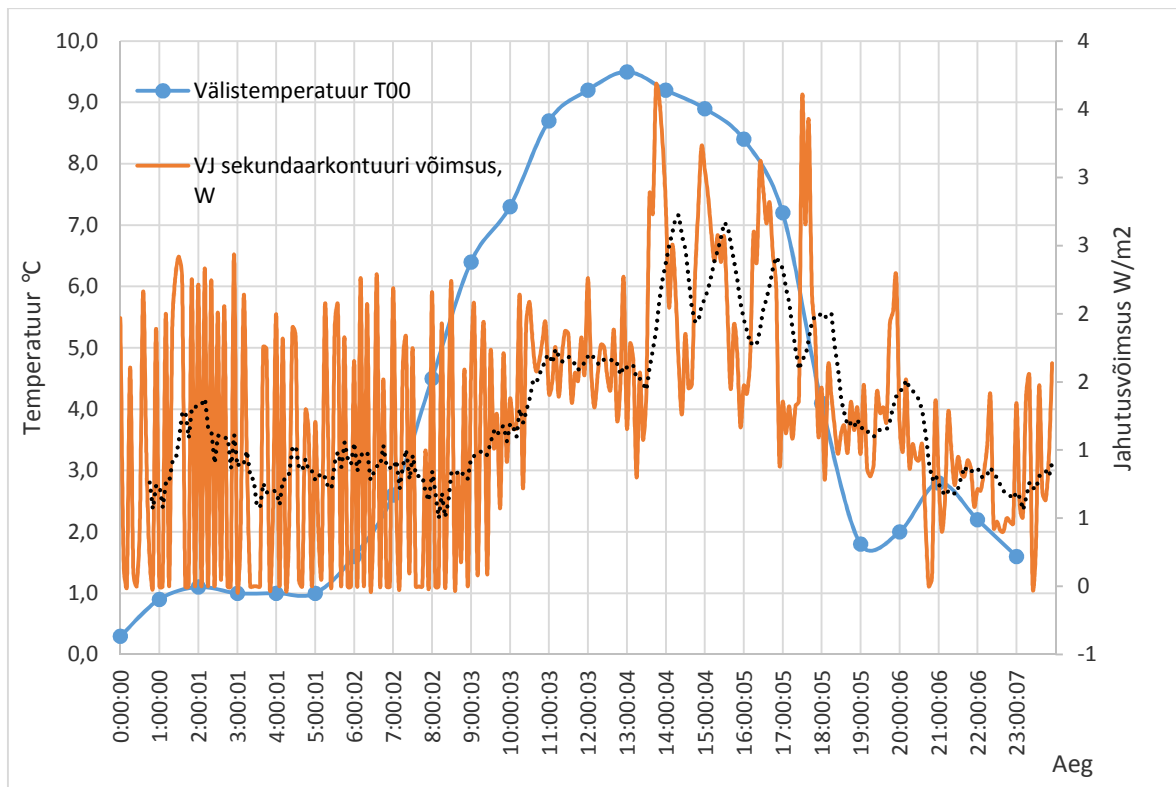
Väikeste jahutusvõimsuste tõttu oletati, et süsteem võibolla ei toimi üldse. Kuid antud graafikud näitasid, et vabajahutuse võimsus on korrelatsioonis päikesekiirgusega.

## 2.6 Võimsuse sõltuvus välistemperatuurist katsemöödistuse andmete järgi

Jooniste 2.12. ja 2.13. järgi on näha, et välistemperatuuri tõustes kuni vabajahutuse lülitustemperatuurini suureneb ka vabajahutuse võimsus. Antud möödistuste ajal mõjutas tulemusi ka päikesekiirgus (seost kontrollitakse ka teiste päevade järgi, kui päikesekiirgust on vähem).



**Joonis 2.12.** KM1 vabajahutuse võimsus ja välistemperatuur, 26.03.2021



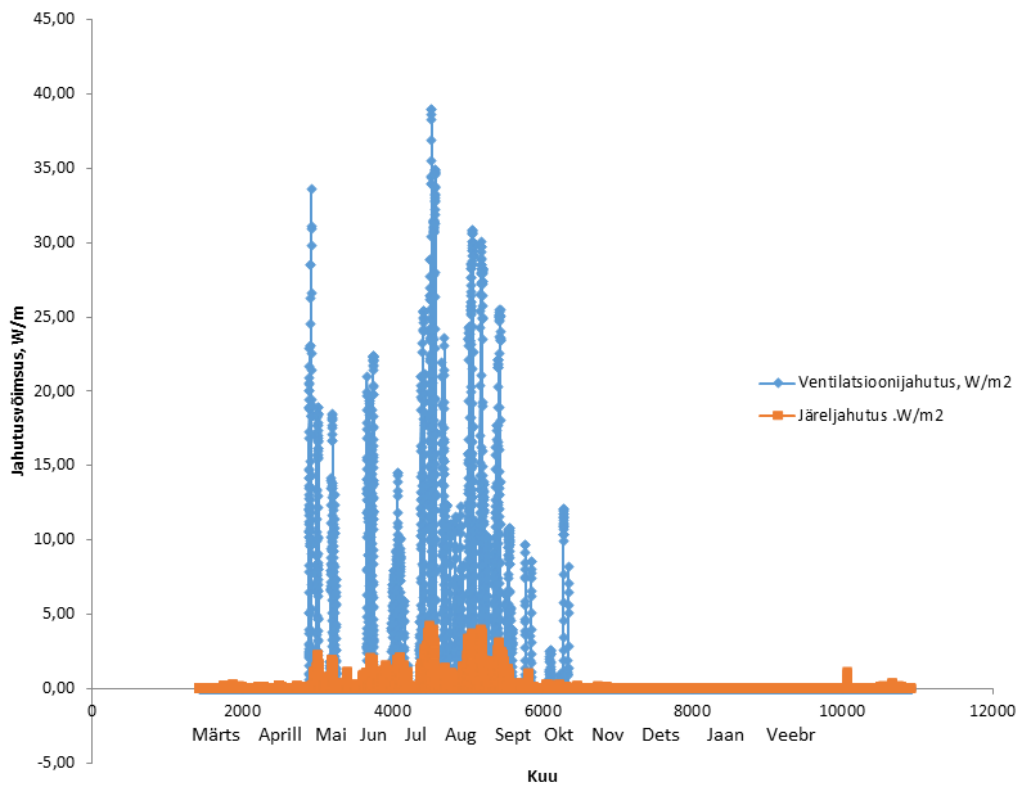
**Joonis 2.13.** KM2 vabajahutuse võimsus ja välitemperatuur, 26.03.2021

Peatükkide 2.5 ja 2.6 graafikud kinnitasid, et olemasolev süsteem toimib, kuid teadmata põhjusel on jahutusvõimsus väga väike.

## 2.7 Arvutusmudeli tulemused standardolukorras

Jooniselt 2.14. on näha, et hoone jahutusvajadus tekib mai alguses ja lõpeb septembri lõpus. Hoone maksimaalne jahutusvajadus on kokku ca 800 kW (ca 40,8 W/m<sup>2</sup>). Oktoobrist mai kuuni jahutusvajadus puudub.

### Jahutussüsteemide võimsus standardmudeli järgi

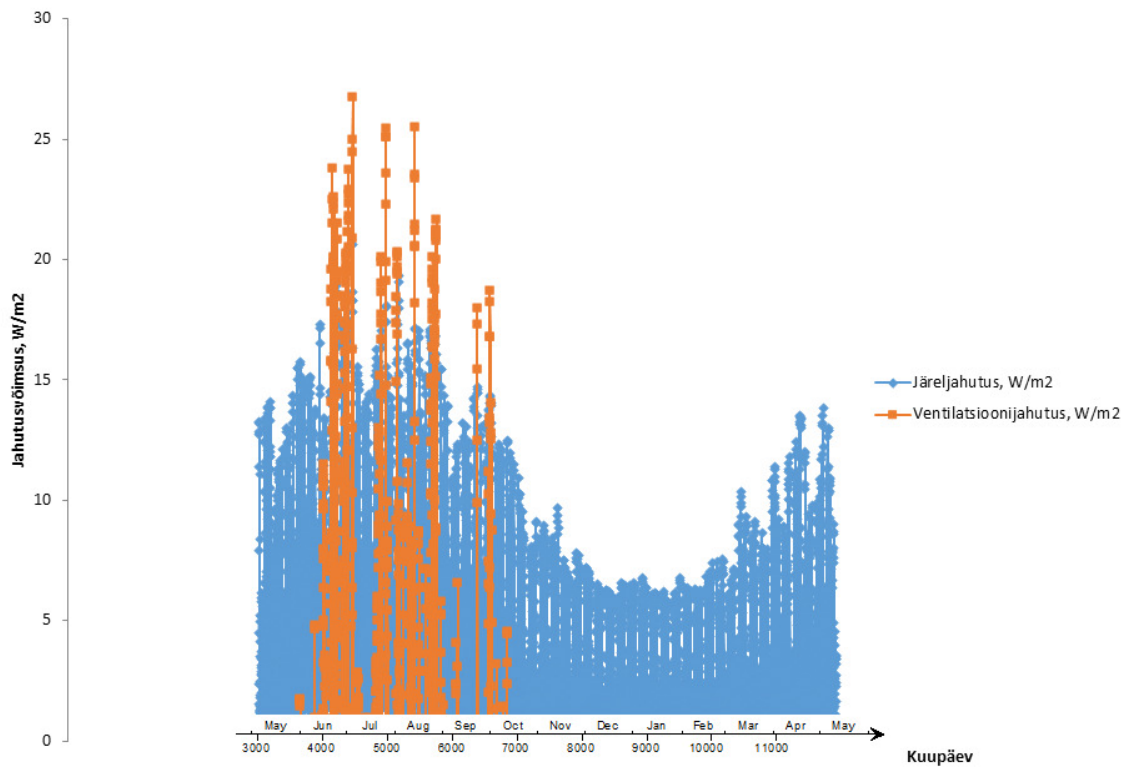


Joonis 2.14. Standardmudeli jahutusvõimsus

### 2.8 Arvutusmudeli tulemused reaalsetel ilmastiku tingimustel ja kasutusel

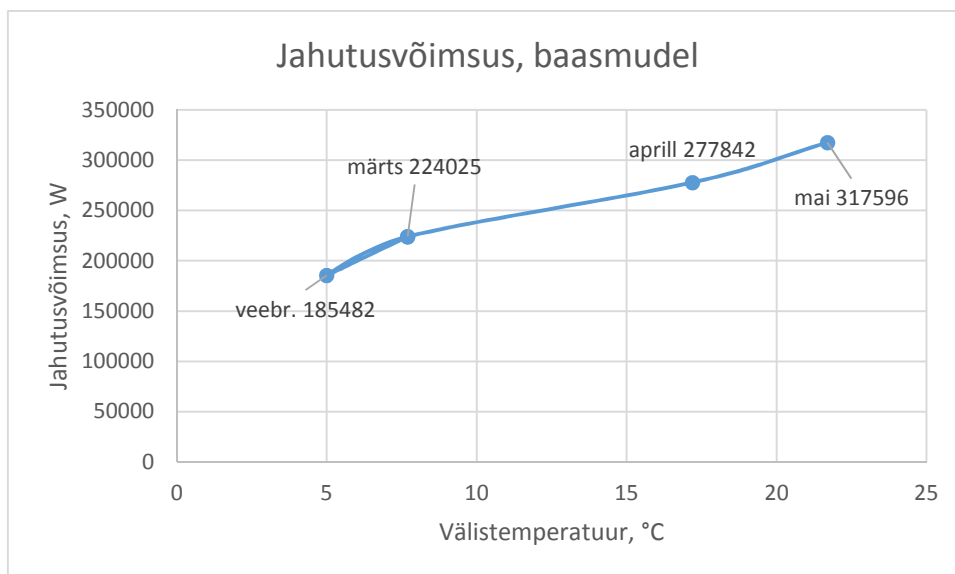
Jooniselt 2.15. on näha, et hoone jahutusvajadus on aasta ringi. Mai kuus hakkab järsult suurenema ja septembris vähenema. Hoone maksimaalne jahutusvajadus võib küündida kuni 900 kW-ni (45,9 W/m<sup>2</sup>) millest järeljahutus moodustab ca 400 kW (20,4 W/m<sup>2</sup>) ja ventilatsiooniõhu jahutus ca 500 kW (25,5 W/m<sup>2</sup>). Tulemusi analüüsitakse täpsemalt kolmandas peatükis.

### Ventilatsiooni- ja järeljahutusvõimsus



**Joonis 2.15.** Mudeli jahutusvõimsus reaalsel ilmastiku tingimustel ja hoone kasutusel

Joonisel 2.16. on näidatud arvutustulemused kasutades IdaIce tarkvaras sünteetilist ilma ehk arvutus baasmudeliga. Arvutus teostati veebruarist maini (neli punkti). Arvutustest selgub, et aprillis, kui vabajahutuse vajadus on kõige suurem, on vabajahutuse vajaduseks 278 kW ehk 14,2 W/m<sup>2</sup>.



**Joonis 2.16.** Jahutusvõimsus baasmudeli järgi



### 3. ANALÜÜS

#### 3.1 Projekteeritud, mõõdetud ja modelleeritud vabajahutuse võimsuse võrdluse analüüs

<b>Tabel 3.1.</b> Vabajahutuse maksimaalne võimsus, kW (W/m <sup>2</sup> )				
	Projekt/teostusdokumentatsioon	Modelleeritud standardtingimustel	Modelleeritud reaalingimustel	Mõõdistatud
KM1	250	0	165	45
KM2	170	0	110	50
Kokku	420 (21,42)	0	275 (14,03)	95 (4,85)

Tabelis 3.1 on esitatud esialgsed analüüsi tulemused graafikute põhjal. Järgmistes punktides teostatakse analüüsi nende andmete põhjal ka täpsustatakse tulemusi.

Standardolukorras modelleeritud mudeli tulemuste järgi ei ole vabajahutuse maksimaalne väärtus antud hoones määratav, kuna vabajahutusega määratud piirkond ei kata joonisel 2.13 näidatud piirkonda. Ehk süsteem toimib ainult kompressorjahutusena.

Reaalingimustel modelleeritud esialgsed maksimaalsed väärtused on tuletatud lähtuvalt joonisest 2.14 ja teostusdokumentatsiooni KM1 ja KM2 väärtuste suhtest, kuna mudelis ei ole eraldatud KM1 ja KM2 süsteeme.

Mudeliga leitud esialgne maksimaalne vabajahutuse võimsus moodustab modelleeritud hoone maksimaalsest jahutusvõimsusest  $275/900=31\%$ . Võrdluseks projektijärgne vabajahutuse võimsus hoone kogu jahutusvõimsusest on  $420/1151=36,5\%$ .

Mõõdetud vabajahutuse võimsus moodustab süsteemi projekteeritud maksimaalsest võimsusest  $95/1151=8,2\%$ .

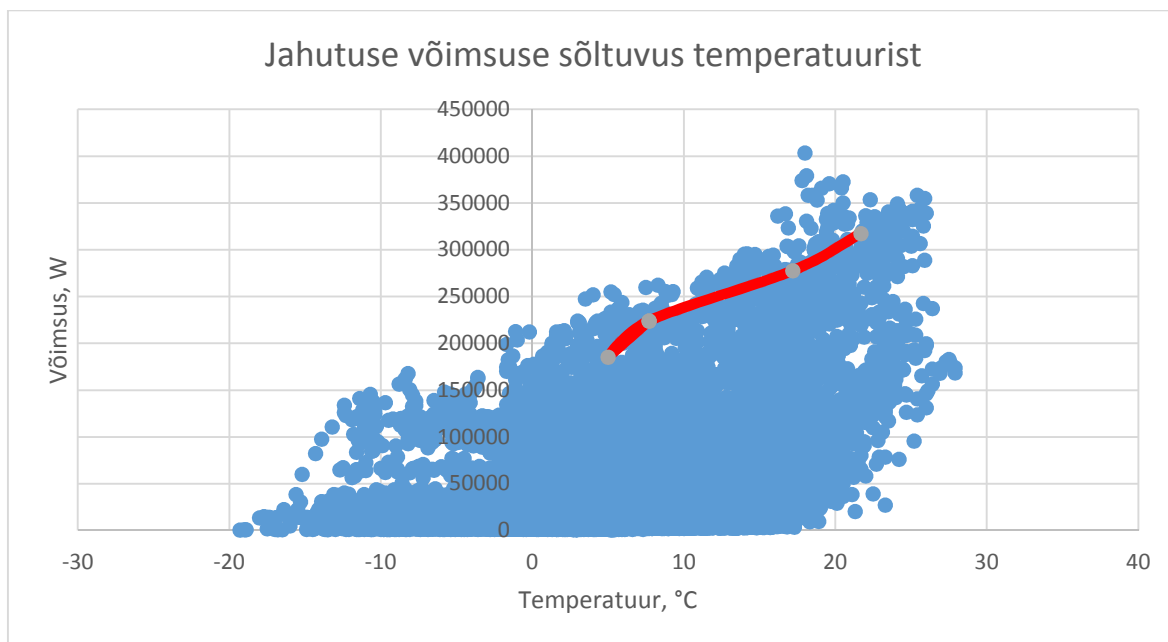
Vabajahutuse projektijärgne võimsus moodustab hoone maksimaalsest järeljahutuse võimsusest vastavalt projektile  $420/571=74\%$  ning mudelijärgne esialgne võimsus  $275/571=48\%$ .

Siit tehti esialgne järeldus, et normaalolukorras võib vabajahutuse maksimaalseks võimsuseks valida ca  $31\%$  projekteeritud koguvõimsusest.

Modelleeritud tingimustel on vaadeldava hoone vabajahutuse vajadus ligikaudu  $275/420=65\%$  projektiga ette nähtud vabajahutusest ja peaaegu kolm korda suurem, kui süsteem reaalselt (möödistatud) väljastab. Tulemus viitab sellele, et süsteem on projektis üledimensioneeritud ning väljaehitatud süsteem ei toimi eesmärgipäraselt. On tõenäosus, et süsteem ei toimi õigesti tehniliste probleemide või seadistuste tõttu. Modelleeritud süsteemi erinevus projekti lahendusest seisneb selles, et projektis on fancoilid temperatuurigraafikuga 7/12 ja summaarse jahutusvõimsusega 86 kW. See tähendab, et lülitustemperatuuriks on ette nähtud  $5^{\circ}\text{C}$ . Ehk süsteem on dimensioneeritud reaalistest ja modelleeritud tingimustest erinevalt.

### 3.2 Vabajahutuse optimaalse võimsuse määramise kriteeriumid

Punktis 3.1. toodud esialgsete vabajahutuse võimsuste analüüs ei kinnita lõplikult valikuid ja ei määra täpseid kriteeriume. Tulemuste hindamiseks on vajalik teostada vabajahutuse võimsuse analüüsi lähtuvalt lülitustemperatuurist, temperatuurigraafikutest, seadmete parameetritest, elektrikulust ja seadmete maksumusest. Koostati graafikut (joonis 3.1), mis kujutab mudeliga saadud järeljahutuse võimsusi sõltuvalt välistemperatuurist. Antud graafik on sisendiks järgnevates peatükkide analüüsitavale lülitustemperatuurile ja vabajahutuse võimsusele. Graafikule on kantud ka joonise 2.15. andmed punaste punktidenä.



**Joonis 3.1.** Reaalsetel tingimustel mudeli ja baasmudeli võimsused sõltuvalt temperatuurist

Jooniselt 3.1. on näha, et nii mudeli kui ka baasmudeli andmed on sarnased ja järelikult võib mõlemaid kasutada arvutuste teostamiseks. Käesolevas analüüsis kasutatakse reaalse mudeli andmeid

### 3.3 Vabajahutuse lülitustemperatuuri analüüs ja valik

Optimaalne lülitustemperatuur büroohoone puhul on piiritletud vajaliku jahutusvajadusega jahutusperioodil, järeljahutuse temperatuurigraafikuga, välistemperatuuriga, seadmete parameetritega ning seadmete kulutatava elektrienergiaga ja maksumusega.

Kui järeljahutuse seadmete pealevoolutemperatuur valida liiga kõrgeks, siis suurema jahutusvajadusega perioodil jääb jahutusvõimsusest puudu, kuna jahutustala väljastatav võimsus sõltub pealevoolutemperatuurist. Kui järeljahutuse pealevoolutemperatuur on liiga madal, siis kasutatakse vabajahutust lühema perioodi vältel ja süsteemi energiaefektiivsus ning rahaline tasuvus väheneb. Samal ajal, madalama temperatuuriga on võimalik vähendada järeljahutuse seadmeid ja vooluhulkasid.

Tabelis 3.2 on toodud ruumi 07-38 näitel jahutusvõimsus erinevatel õhutemperatuuridel. Jahutustalade arvutus teostati Fläktwoods rakenduse abil. Tabelist on näha, et projektijärgse pealevoolutemperatuuri 14 °C korral on tagatud jahutusvõimsus 1253 W, kuid kõrgema pealevoolutemperatuuri korral saadakse samadel tingimustel 973 W ehk 77% vajalikust võimsusest. Kõrgemat pealevoolutemperatuuri 17 °C on võimalik saavutada välistemperatuuril kuni 15 °C. Joonise 3.2 järgi on välistemperatuuril 15 °C vajalik järeljahutuse võimsus 300 kW, mis moodustab maksimaalsest järeljahutuse võimsusest  $300/400=75\%$ . Sellest järeldame, et tõstes vabajahutuse režiimis jahutustala pealevoolutemperatuuri 14 °C-lt 17 °C-ni, on võimalik tõsta lülitustemperatuuri maksimaalselt 15 °C-ni. Analüüsitakse järgmistes punktides, kas 15 °C lülitustemperatuur on sobilik ka muude tingimustega. Antud analüüs ei arvesta ruumi paiknemist ilmakaarte suhtes.

<b>Tabel 3.2</b> Kabinet 07-38 jahutusvõimsus erinevate jahutusandjate temperatuuridel			
Air temp	°C	17,00	17,00
Inlet water temp	°C	17,00	14,00
Power	W	973,00	1253,00
Coil power	W	699,00	979,00
Supply air power	W	274,00	274,00
Air flow	l/s	30,40	30,40
Outlet water temp	°C	20,30	18,70
Outlet air temp	°C	20,30	19,20

Delta water temp	°C	3,30	4,70
Ceiling temp	°C	24,50	24,50
Room temp	°C	24,00	24,00
Relative humidity	%	50,00	50,00

Joonisel 3.2 on välja toodud reaalseste parameetritega mudeli järeljahutuse võimsused erinevatel välistemperatuuridel. Ülemiste võimsuste väärtuste kaudu on võimalik leida järeljahutuse lineaarset seost välistemperatuurist.

Joonise 3.2 järgi tuletati arvutuslikku järeljahutuse võimsust sõltuvalt temperatuurist. Valemi (3) aluseks on võetud mudeliga arvatud arvutuslikku maksimaalset järeljahutuse võimsust, minimaalset välisõhu temperatuuri, mille korral on jahutuse vajadus ning suvist arvutuslikku temperatuuri.

$$\Phi_{arv} = \frac{\Phi_{maks} \times (tarv - t_{min})}{(t_{maks} - t_{min})} \quad (3), \text{ kus}$$

tarv – valitud välistemperatuur, °C

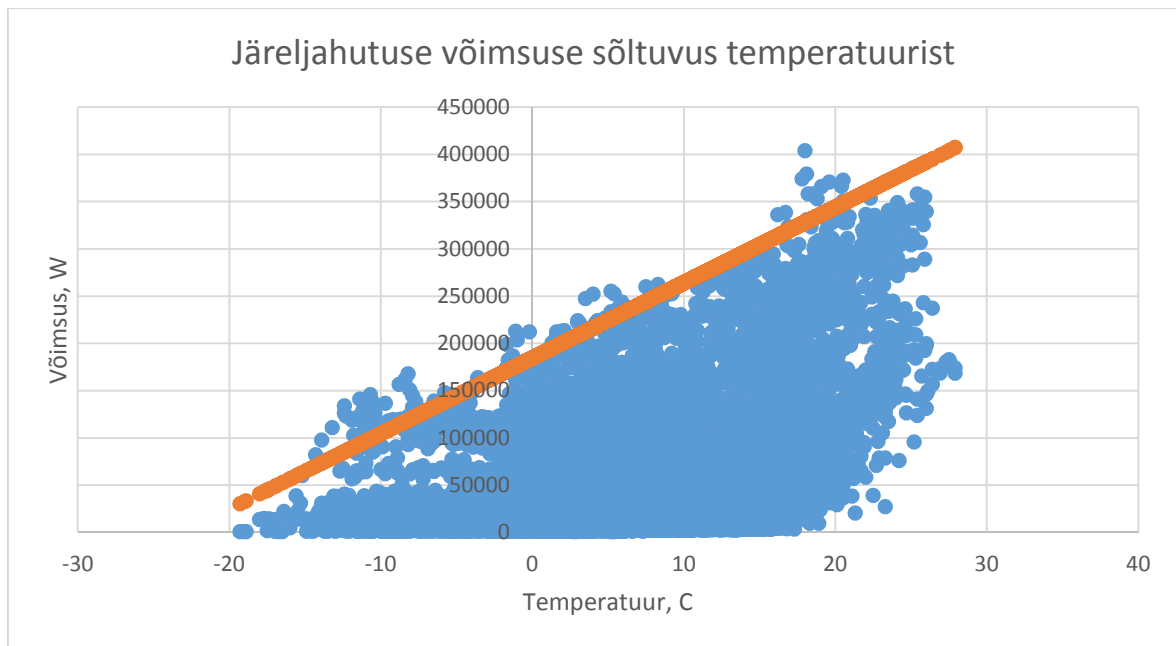
t<sub>min</sub> – minimaalne välistemperatuur, mille korral on jahutusvajadus °C

t<sub>maks</sub> – arvutuslik suvine välistemperatuur, millele dimensioneeritakse jahutust, 27 °C

Φ<sub>arv</sub>– arvutuslik võimsus valitud temperatuuri korral, W

Φ<sub>maks</sub>– arvutuslik võimsus arvutusliku välistemperatuuri korral , 400 000 W

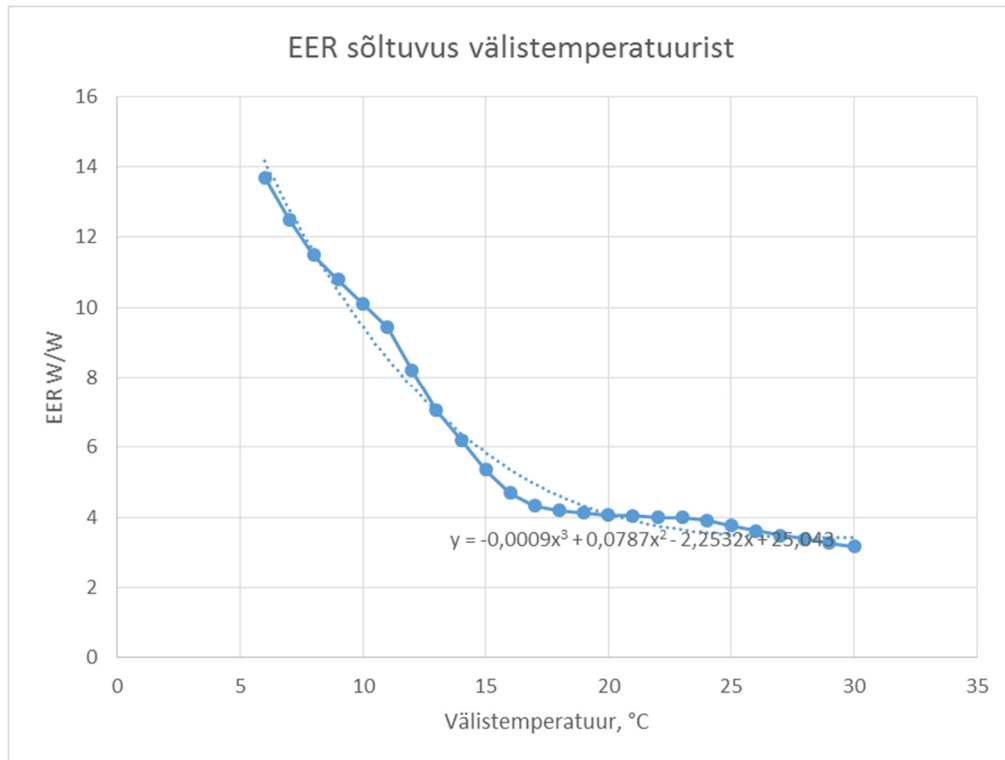
Saadud jahutuse võimsuse lineaarne sõltuvus temperatuurist on kantud joonisele 3.2. Kirjeldatud sõltuvuse järgi on võimalik määrata vabajahutuse võimsust iga lülitustemperatuuri korral. Või määrata vajalikku jahutusvõimsust määratud temperatuuril. Järgnevates analüüsides kasutatakse selle graafiku võimsuse ja lülitustemperatuuride sõltuvusi.



**Joonis 3.2** Jahutusvõimsuse sõltuvus välistemperatuurist

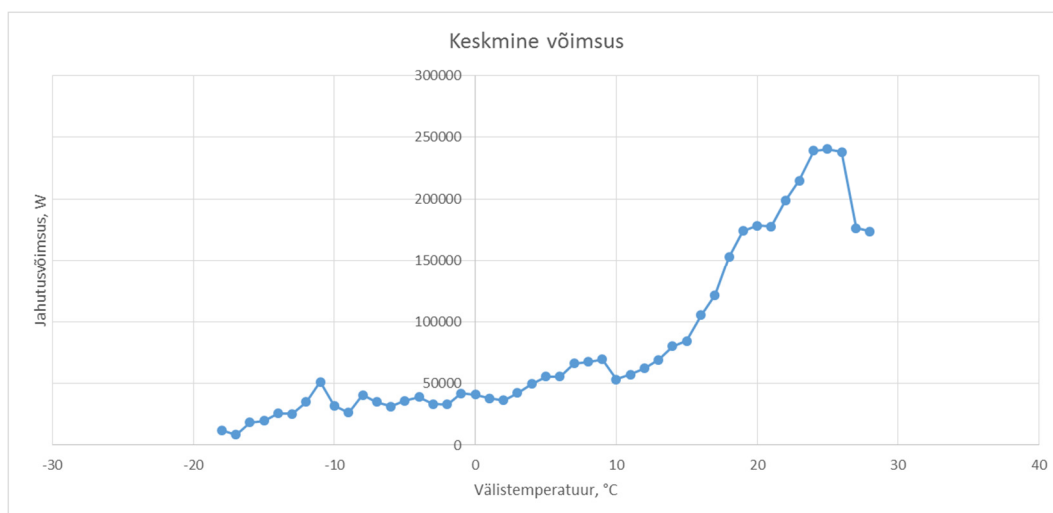
Käesolevas peatükis on tuletatud vabajahutuse lülitustemperatuuri ülemist piiri. Edaspidi on vaja kontrollida, mis toimub kogu süsteemi energiatarbimisega, kui valida madalamat lülitustemperatuuri ehk kas on otstarbekas lülitustemperatuuri alla poole viia. Samuti kontrollida, kuidas toimivad seadmed erinevates tingimustes ja kas on võimalusi optimeerimiseks.

**Külmamasina arvutused.** BlueBox programmiga valiti compressor, mis vastaks projekteeritud arvutuslikule võimsusele. Joonisel 3.3 on näidatud valitud kompressori EER erinevatel koormustel ja temperatuuridel. Kompressorseadme ja primaarkontuuri arvutamisel tuleb arvestada, et inverteriga, pumbaga ja dry-cooleriga süsteem ei saa toimida väikestel võimsustel sujuvalt, kuna seadmed ei võimalda. Käesolev arvutus määras, et süsteem toimib sujuvalt koormuse vahemikus 41-100 %. Alla 41 % koormustel tuleb arvestada sõltuvalt kompressori tüübist lülituste arvuga tunnis, mis tootjate soovitude järgi ei peaks ületama 10 lülitust tunnis.



**Joonis 3.3.** EER sõltuvus välistemperatuurist

Välistemperatuuril tagatavat jahutusvõimsust graafikul näidatud EER-iga kontrolliti joonisel 3.4 näidatud graafikuga. Keskmine võimsus konkreetsel välistemperatuuril peab olema väiksem, kui kompressori tagatav võimsus samal temperatuuril. See tingimus oli eelduseks, et antud EER-iga kompressorit võib kasutada arvutustes.



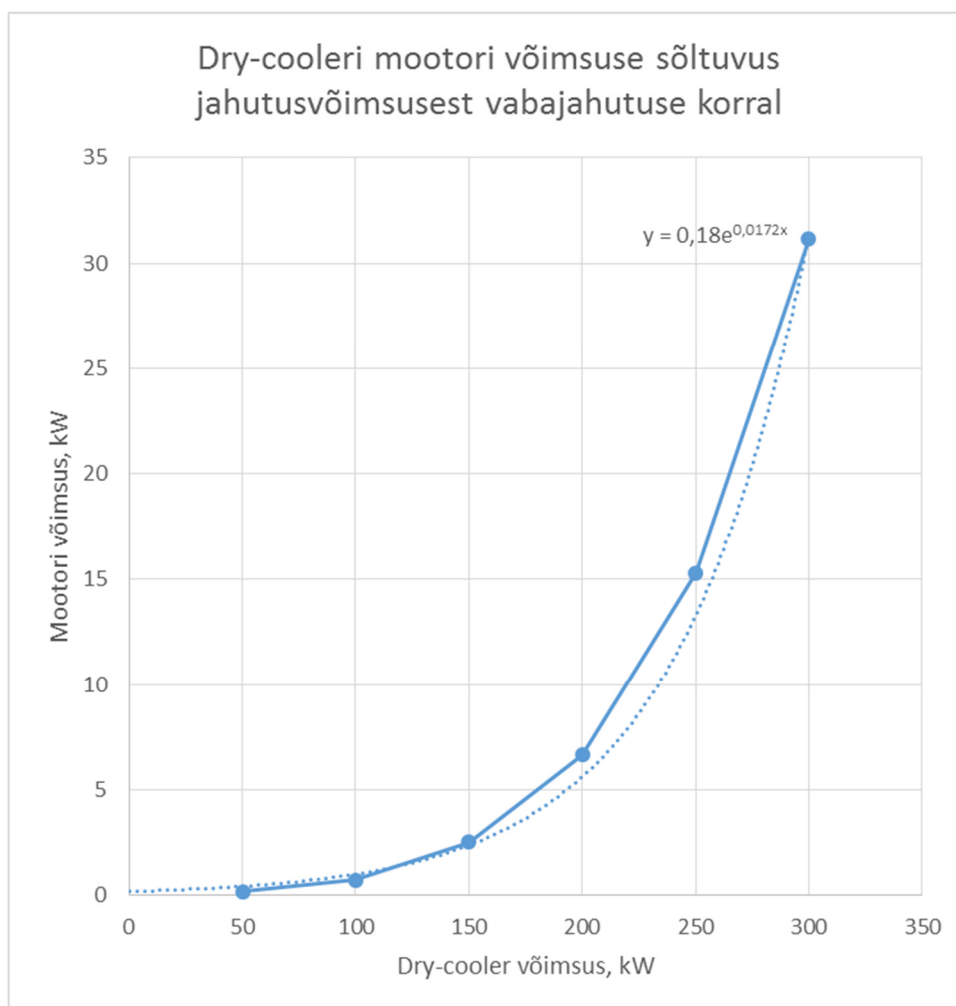
**Joonis 3.4.** Keskised võimsused välistemperatuuril

Joonisel 3.4 näidatud graafikut on lisaks võimalik kasutada vabajahutuse võimsuste optimeerimisel, et süsteem oleks dimensioneeritud mitte suurimate väärtuste järgi vaid

kõige tõenäolisemate võimsuste järgi. Kuid antud töös jäädakse maksimaalsete väärtuste juurde ja antud graafikut edaspidi ei kasutata.

**Dry-cooleri arvutused.** Guntner programmiga valiti dry-cooler, mis sobiks eelnevalt leitud vabajahutuse võimsuse tagamiseks leitud temperatuuril. Dry-cooleri esialgne valik ei arvestanud kõikide võimalike tööolukordadega, vaid oli valitud esialgsete elektrivõimsuste määramiseks. Edaspidi teostati täpsemaid arvutusi, et valida selliseid dry-coolereid, mis sobiksid iga töörežiimiga.

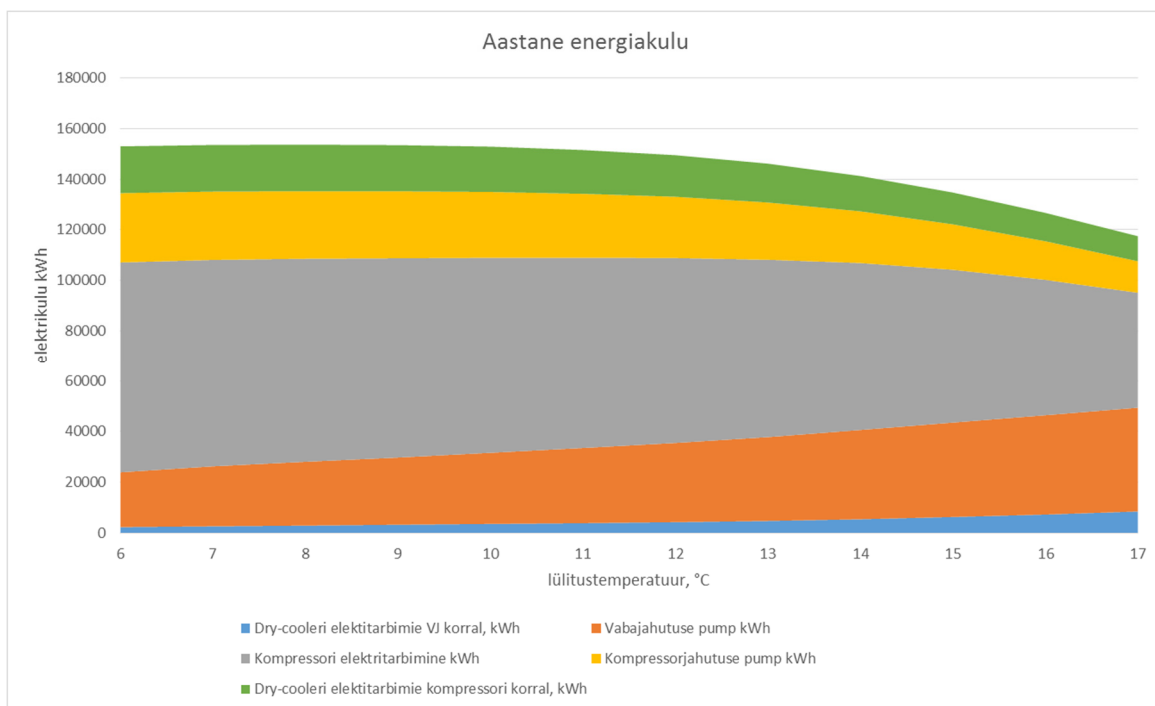
Vabajahutuse režiimis on dry-cooleri esialgne elektritarbimine vastavalt joonisel 3.5 näidatule. Samamoodi leiti dry-cooleri elektritarbimist kompressorjahutuse režiimi jaoks.



**Joonis 3.5.** Dry-cooleri elektrivõimsus jahutusvõimsusel

Kogu aastase elektrienergia saamiseks summeeriti kompressori, dry-cooleri ja primaarpumpade elektritarbimist ja saadi joonisel 3.6 näidatud tulemust. Graafikult on näha, et lülitustemperatuuri langetamisel elektrienergia suureneb. Sellest järeldati, et

konkreetses ülesehituses süsteemi korral peab lülitustemperatuur olema võimalikult kõrge. Täpsem lülitustemperatuur määrati järgnevatel punktides teiste parameetrite abil.



**Joonis 3.6.** Aastase energiatarbimise sõltuvus lülitustemperatuurist

Jahutussüsteemi aastaseks elektritarbimiseks lülitustemperatuuriga 12 °C saadi 6,78 kWh/m<sup>2</sup> ja SEER 4,63.

Suure osa tarbitavast energiast moodustavad pumbad ja külmamasin. Käesolevas töös pakuti muuta vabajahutuse pumba jutimisskeemi ja konstantse voluhulgaga pump asendada sagedusmuunduriga pumba vastu. Täpsem pumbasõlme kirjeldus ja analüüs on punktis 3.8.

### 3.4 Vabajahutuse primaar- ja sekundaarpoole temperatuuride analüüs valik

Sekundaar- ja primaartemperatuuride valik on seotud lülitustemperatuurist ja jahutusvajadusest perioodil ning valitud seadmetest.

Toetudes peatükile 3.3, kus vabajahutuse sekundaarkontuuri temperatuuriks on saadud maksimaalselt 17/20, võib järeldada, et primaarkontuuri temperatuur on 15/18, mis on saavutatavad lülitustemperatuuriga kuni 14°C. Antud temperatuurid on otseselt seotud dry-cooleri valikust. Seega, temperature täpsustatakse järgnevatel peatükkides.



Antud temperatuurid on otseselt seotud dry-cooleri valikust. Seega, temperature täpsustatakse järgnevates peatükkides

### 3.5 Akumulatsioonipaagi suuruse valik

Akumulatsioonipaagi dimensioneerimist käsitleti metoodikas ja tuldi järeldusele, et selle mahtu on otstarbekas arvutada lähtuvalt kompressorjahutusest, kuna selle parameetrid mõjutavad kõige rohkem valitava paagi suurust. Vabajahutus mõjutab mahuti ainult dry-cooleri suuruse osas. Seega, käesolevas vabajahutuse analüüsis mahuti täpsemat valikut ei käsitleta.

### 3.6 Dry-cooleri dimensioneerimine

Täpsema dry-cooleri suuruse määramiseks tehti arvutusi Güntner valikuprogrammiga. Arvutati läbi mitukümmend konstruktsioonide, ventilaatorite ja soojusvahetite poolest erinevat dry-coolerit. Arvutuskriteeriumiteks olid võimsus, välistemperatuur, dry-cooleri väljastav temperatuur ning kontuuri temperatuurivahe. Selgus, et praktiliselt ei ole võimalik leida selline dry-cooler, mis sobiks nii kompressori maksimaalsele võimsusele kui ka vabajahutuse maksimaalsele võimsusele 14 °C juures. Teoreetiliselt selline dry-cooler eksisteerib, kuid selle hind, suurus ja elektritarbimine on suurem, kui oleks kahe eraldi dry-cooleriga süsteemi korral. Sellist lahendust edaspidi ei vaadeldud.

<b>Tabel 3.3. Dry-cooleri valik</b>						
Välistemperatuur, °C	Dry-cooleri võimsus, kW	Temperatuurigradifik primaarpoolel, °C	Pinna varu %	Ventilaatorite arv	Hind, Eur	Ühe ventilaatori võimsus, kW
kontrollseade 1, kompressori järgi						
<b>27</b>	<b>575/759</b>	<b>40/46</b>	<b>0,9</b>	<b>6</b>	<b>40375</b>	<b>2,4</b>
11	135	15/18	>0	6	40375	0,88
11	135	14/17	>0	6	40375	0,91
10	130	13/16	>0	6	40375	0,86
9	125	12/15	>0	6	40375	0,88
kontrollseade 2, maksimaalse vabajahutuse võimsuse järgi						
<b>27</b>	<b>575/759</b>	<b>40/46</b>	<b>53,1</b>	<b>8</b>	<b>47500</b>	2,79
14	150	15/18	-	-	-	-
13	145	15/18	>0	8	47500	2,3
12	140	14/17	>0	8	47500	1,89
11	135	13/16	>0	8	47500	1,79
10	130	12/15	>0	8	47500	1,71

Kui loobuda maksimaalse võimsuse ja lülitustemperatuuri saavutamisest ning lasta lülitustemperatuur alla ja primaarpoole temperatuurid üles, siis on võimalik leida mõistliku suurusega ja hinnaga seadet, mis tagaks töötingimused mõlemas olukorras. Tabelis 3.3 on näidatud kontrollarvutus kahe kontrollseadmega. Kontrollseade 1 on valitud kompressori järgi ja kontrollseade 2 on valitud lähtuvalt vabajahutuse vajadustest. Arvutustes on arvestatud, et hoones on kaks ühesugust süsteemi, sellest ka võimsused jaotatud kahega.

Selgub, et valides dry-coolerit kompressori järgi, on võimalik tagada lülitustemperatuuriks 11°C ning sellele vastavat vabajahutuse võimsust  $135\text{kW} \cdot 2 = 270$  kW. Primaarpoole temperatuurigraafikuks tuleks 14/17 °C ning sekundaarpoolel 16/19 °C. Vastavalt eelnevalt tehtud jahutustalade kontrollarvutusele on selline sekundaarpoole temperatuur võimalik, kuid vajab iga hoone korral eraldi kontrollimist, kuna kõrgema temperatuuriga on väiksem jahutustala jahutusvõimsus.

Kui võrrelda tulemusi projekti andmetega, siis sekundaartemperatuuri 14/17 °C tagamiseks tuleb valida primaartemperatuur 12/15 °C ja lülitustemperatuur 9 °C. Sellistel parameetritel tuleb vabajahutuse maksimaalne suurus  $125 \cdot 2 = 250$  kW. Moodustab projektijärgsest võimsusest  $250/420 = 60\%$ .

Vabajahutuse järgi dry-coolerit arvutades selgus, et maksimaalseks lülitustemperatuuriks saab valida 13 °C ja primaarkontuuri temperatuurigraafikuks 15/18 °C. Liiga kõrge sekundaarpoole temperatuuri tõttu tuleks lülitustemperatuuri ja primaarkontuuri temperatuuri langetada vähemalt 1 °C võrra ehk vastavalt 12°C ja 14/17°C. Sellisel juhul on sekundaarpoole temperatuurigraafik 16/19° C ning vabajahutuse võimsuseks  $140 \cdot 2 = 280$  kW, mis moodustab projektijärgsest võimsusest  $280/420 = 67\%$ .

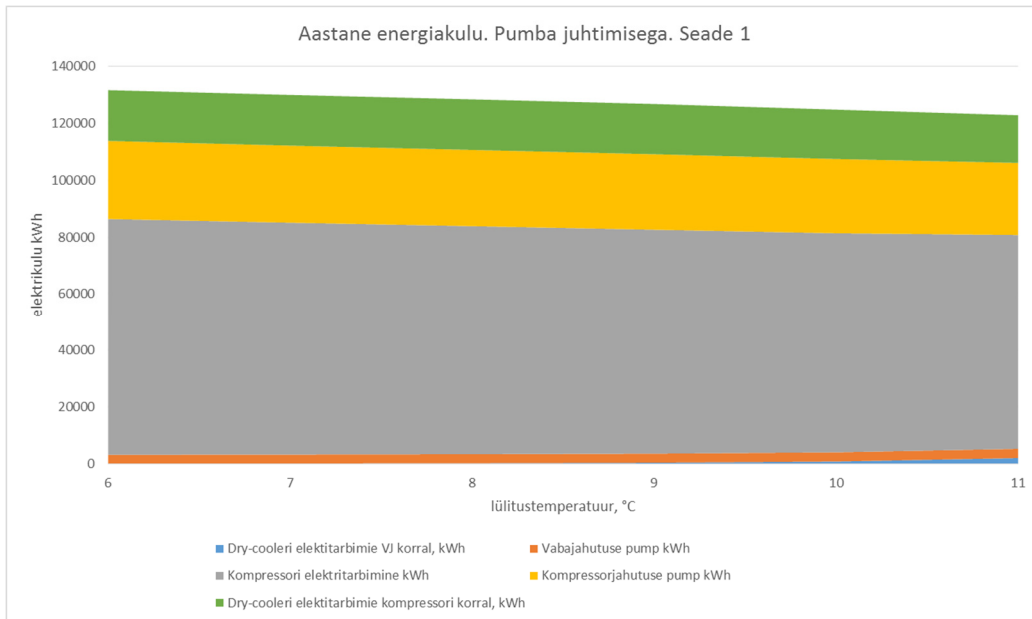
Lisaks tabelist selgub, et suurema ühise dry-cooleri valikuga suureneb ka ventilaatorite elektrivõimsus kõikides tööolukordades.

Järgnevas punktis kirjeldatud pumba sõlme lahendusega arvestades võrreldi aastast elektritarbimist kontrollseadme 1 ja kontrollseadme 2 korral. Joonisel 3.7 ja 3.8 on vastavalt näidatud graafiliselt elektritarbimise muutumine sõltuvalt lülitustemperatuurist.

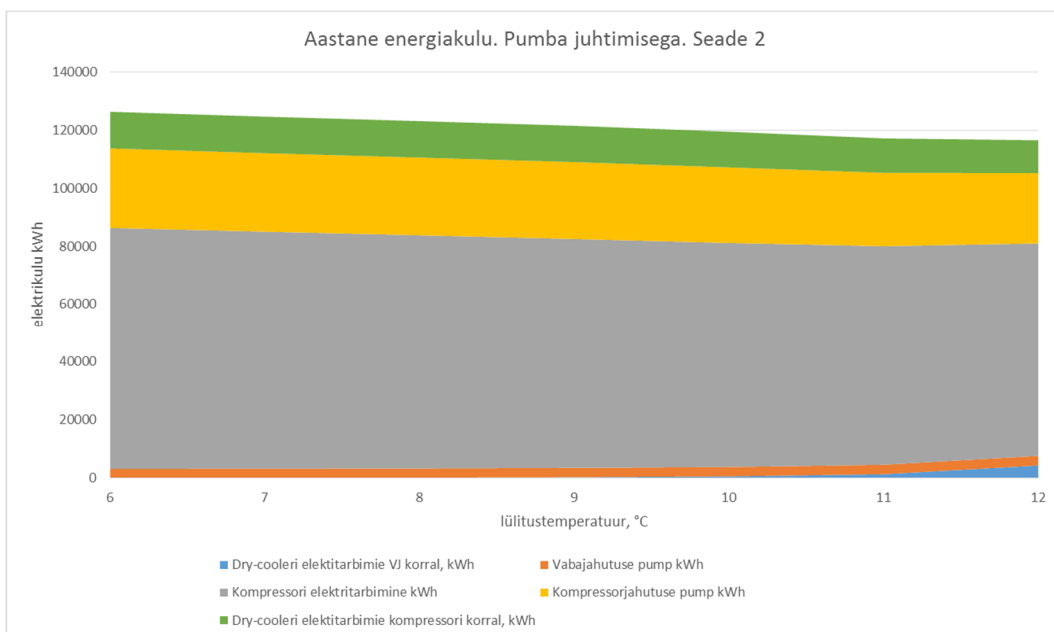
Aastane elektritarbimine on väiksem kontrollseadme 2 korral. Vahe on 5% lähedal ehk ligikaudu 6000 kWh/a. Tabeli 4.3 järgi on seadmete hinnavaheks 7 000.- EUR. Kui arvestada, et 2023. aasta keskmine elektrihind on 0,12 EUR/kWh, siis aastas on elektri

kokkuhoid 720.- EUR. Inflatsiooni arvestamata tasub suurem seade ära 10 aastaga. Antud analüüsiga on süsteemi dry-cooler dimensioneeritud:

- Suuruse valik lähtuvalt vabajahutuse võimsusest 12 °C juures. Konkreetse hoone puhul 140 kW.
- Lülitustemperatuur on 12 °C;
- Primaarkontuuri temperatuurigraafik 14/17 ° C.



**Joonis 3.7.** Aastase energiatarbimise sõltuvus lülitustemperatuurist sagedusmuunduriga pumba korral. Seade 1.



**Joonis 3.8.** Aastase energiatabimise sõltuvus lülitustemperatuurist sagedusmuunduriga pumba korral. Seade 2.

Tabelis 3.4. on toodud aastane elektrienergia kulu ja aasta keskmine jahutustegur seadme 1 ja seadme 2 korral.

<b>Tabel 3.4.</b> Tulemuste võrdlus		
nr	Energiatarbimine, kWh/m <sup>2</sup> aastas	Jahutustegur SEER
Seade 1	5,41	5,81
Seade 2	5,36	5,86

### 3.7 Primaarkontuuri pumbasõlme valik

Jooniselt 3.6 selgus, et suure osa aastasest elektrikulust moodustab dry-cooleri pumba elektrikulu vabajahutuse režiimis. Otsustati teha arvutusi kontrollimaks, kas on võimalik süsteemi optimeerida, muutes pumba juhtimise loogikat.

Arvutusliku pumba rõhukadu on ruutsõltuvuses pumba dünaamilisest rõhust vastavalt Bernoulli seadusele:  $\Delta P = R * \frac{\rho * v^2}{2}$  (4), kus

$\Delta P$ - süsteemi rõhukadu, Pa;

R- süsteemi takistustegur, Pa·s/m<sup>3</sup>;

v- külmakandja kiirus, m/s;

$\rho$ - külmakandja tihedus, kg/m<sup>3</sup>

Elektrivõimsus on vooluhulk korda rõhulang jagatud efektiivsusega  $P_e = Q * \frac{\Delta P}{\eta}$  (5), kus

$P_e$ - elektrivõimsus, W;

Q- vooluhulk, m<sup>3</sup>/s;

$\eta$ - pumba efektiivsustegur eta.

Sellest järeldub, et  $P_e = Q * \frac{(R * \rho * v^2)}{2 * \eta}$  (6), ehk kui pumba efektiivsus ja takistustegur on konstantne, siis pumba elektrivõimsus on sõltuvuses vooluhulgast ja voolukiirusest.

Projektis on vabajahutuse primaarpumbal konstantne vooluhulk ja kontuuri reguleeritakse 3T ventiiliga, segades kokku dry-cooleri pealevoolu soojusvaheti tagasivooluga.

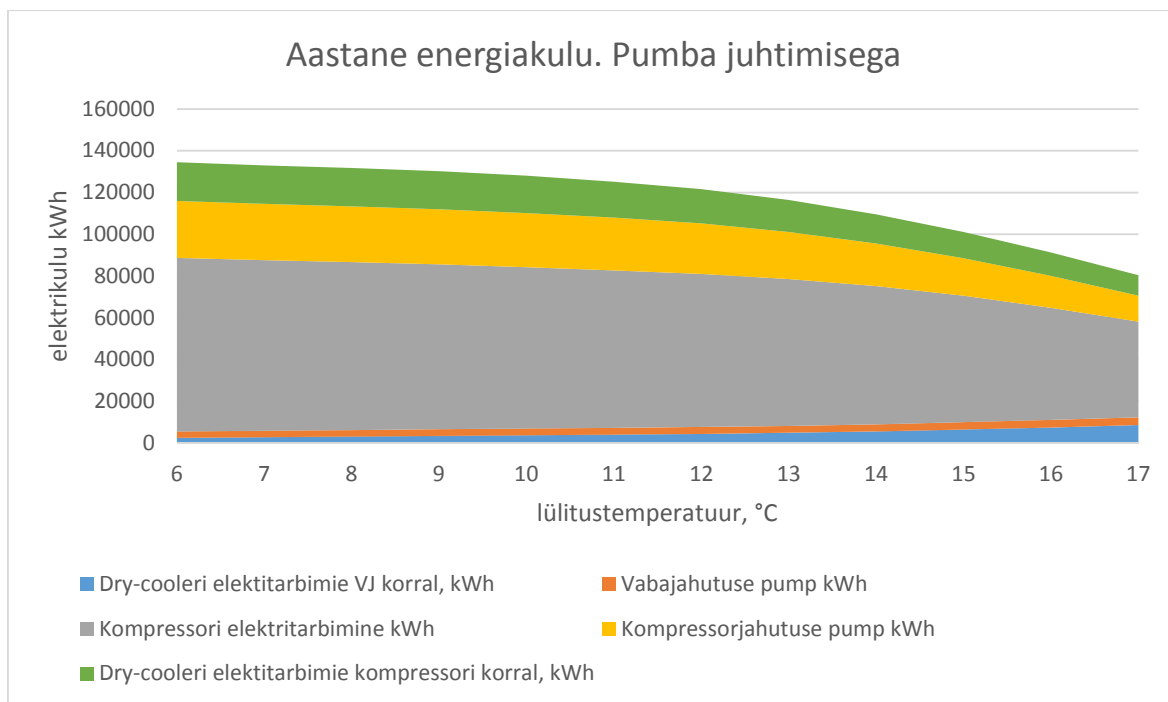
Käesolevas töös tehti ettepanekut, et peaks paigaldama sagedusmuunduriga pumpa ja reguleerima primaarkontuuri esialgu pumba vooluhulga kaudu. Kui pumba vooluhulk on minimaalse seadistatud vooluhulga juures, kuid vaja veel vähendada, siis reguleeritakse edasi 3T ventiiliga. Minimaalseks vooluhulgaks on valitud Grundfos valikuprogrammi järgi selline vooluhulk, mis on pumba töökõvera minimaalse väärtuse juures ette antud parameetritega. Selliseks suuruseks on 10 l/s ehk 35 % arvutuslikust vooluhulgast. Tabelis 3.5 on esitatud vastavalt eespool antud valemitele (4), (5), (6) arvutatud pumba iseloomustavad parameetrid erinevatel vooluhulkadel. Kasutegur on võetud Grundfos arvutusprogrammi kõveralt. Arvutuslikud andmed on kontrollitud Grundfos arvutusprogrammi tulemustega.

<b>Tabel 3.5.</b> Pumba teoreetiline karakteristik TPE pumba näitel				
Q, l/s	dP, Pa	v, m/s	Pe, W	Kasutegur
28,9	110000	0,60	5298	0,60
25	82315	0,52	3430	0,60
20	52681	0,42	1881	0,56
15	29633	0,31	872	0,51
10	13170	0,21	347	0,38
5	3293	0,10	46	0,36

Joonisel 3.9 on esitatud aastase elektrienergia tarbimise graafik juhul, kui dry-cooleri kontuuri pumpa juhitakse sagedusmuunduriga. Selgus, et kõige suurema osa elektritarbimisest moodustab kompressoriga kontuur ning vabajahutuse kontuuri energiatarbimist on võimalik kontrollitud juhtimisega viia miinimumini.

Järeldati, et lülitustemperatuuri alandamisega ei ole võimalik elektritarbimist vähendada kompressori töö režiimis ning mida kõrgem on lülitustemperatuur, seda väiksem on aastane elektritarbimine. Ehk lülitustemperatuur on määratud punktis 3.6.

Jahutussüsteemi aastaseks elektritarbimiseks lülitustemperatuuriga 12 °C saadi 5,36 kWh/m<sup>2</sup> ja SEER 5,86.



**Joonis 3.9.** Aastase energiatarbimise sõltuvus lülitustemperatuurist sagedusmuunduriga pumba korral

### 3.8 Vabajahutuse kontuuri juhtimine

Punktis 3.6 ja 3.7 tehtud pumba ja dry-cooleri arvutuste järgi määrati vabajahutuse primaarkontuuri juhtimise põhimõtet.

Pumba dimensioneerimise programmist vaadeldakse pumba tööpiirkonda ja eta kõveraid. Leitakse punkt, millest alates hakkab eta oluliselt vähenema. Leitud piirkonnas määratakse pumba tööpunkt, millest alla ei ole otstarbekas minna. Käesolevas töös oli see 35% (eta<0,4) arvutuslikust vooluhulgast ehk vabajahutuse arvutuslikust võimsusest. Järelikult piirkonnas 0-35% on pumbal konstantne vooluhulk ja vooluhulgajaotumine soojusvaheti ning dry-cooleri vahel reguleeritakse 3Tee ventiiliga.

Dry-cooleri dimensioneerimise programmis saadu andmete järgi määrati, et vahemikus 70-100% vabajahutuse võimsusest toimub jahutuskoormuse reguleerimine nii dry-cooleri ventilaatoritega kui ka pumba vooluhulga muutmisega. 70 % piiri juures lülitused kõik ventilaatorid välja. Ventilaatorite väljalülitumine toimus erinevate dry-coolerite korral välistemperatuuril 2-4°C. Antud vahemikus reguleerimine kolmes astmes. Pumba vooluhulk soojusvaheti temperatuuride järgi. Järgnevalt juhitakse dry-coolerite ventilaatoreid, et saavutada vajalikku temperatuuri väljundil. Kui ventilaatorite kiiruse muutmisega seda ei saavutata, siis muudetakse jälle pumba vooluhulka.

Vahemikus 35-70% vabajahutuse võimsusest on võimalik süsteemi juhtida ainult sagedusmuunduriga pumba abil.

Käesolevast analüüsist järeldati, et juhtimisskeemi täpse määramise jaoks on vaja kontrollida pumba karakteristikat ja teostada dry-cooleri arvutusi erinevate välistemperatuuride korral.

Kuna suurem osa automaatika ja juhtimissüsteemidest ei võimalda reguleerida süsteemi võimsuste järgi, siis võimsus tuleks defineerida temperatuuridena ja vooluhulkadena. Kaaluda programmeeritud juhtimissüsteemi kasutusvõimalusi.

Optimeeritud kontuuriga teostatud arvutused näitasid, et vabajahutuse kontuuri optimeeritud juhtimisega on võimalik aastast jahutuseks mõeldud energiat kokku hoida ca 19 % võrra. SEER näitajad muutuvad vastavalt 4,63-lt 5,86 le.

### **3.9 Kogutavate mõõtmiste täpsus**

Käesoleva lõputöö raames korraldatud mõõtmiste käigus saadud andmed olid kalibreerimise tõttu täpsed ja nende abil määrasime, et süsteemist välja võetud andmed olid ebatäpsed.

Mõõtmiste ebatäpsus oli tingitud erinevatest temperatuurianduritest.

TE121, 122 ja 222 andurid on ühendatud NTC10 anduritena ja andur TE221 on ühendatud jäätumiskaitse ploki (Produal JVS24) PT1000 andurina.

Selgus, et NTC10 anduritena ühendatud andurid näitavad väiksemat temperatuuri, kui on tegelik temperatuur. Selle põhjuseks võivad olla kalibreerimata andurid arvestades, et NTC10 andurid vajavad sagedasemat kalibreerimist kui PT1000 andurid. Täpsuse huvides on eelistatud kasutada PT1000 andureid, mis on stabiilsemad, vajavad vähem kalibreerimist, kuid on kallimad. Samuti oleks soovitatav kasutada ühest tüübist andureid ja näha ette andurite kalibreerimist vastavalt tootja soovitusle.

### **3.10 Külmavarustuse süsteemi komponentide dimensioneerimise põhimõtete alternatiivid**

Külmavarustuse süsteemi komponente saab dimensioneerida järgnevate põhimõtete järgi, mis on saadud erinevates projektide vaatlusest. Antud meetodid on on kiireks esialgseks hindamiseks ja ei oma arvutuslikke kinnitusi.

- 1) Vabajahutuse elementide määramise ligikaudse võimsuse meetod:
  - Mudeli abil määratakse hoone maksimaalne jahutuse võimsus.

- Maksimaalse jahutusvõimsuse abil dimensioneeritakse hoone külmajaam.
- Külmajaamale valitakse sobiva suurusega dry-cooler, et oleks tagatud külmajaama väljundvõimsus.
- Vabajahutuse soojusvaheti valitakse ligikaudselt näiteks 30% süsteemi maksimaalsest võimsusest või vastavalt sarnastele hästi toimivatele objektidele. Oluliselt erineva lahendusega hoonete puhul taandatakse näidishoone vabajahutuse võimsus pinnaühiku peale ning arvestatakse järeljahutuse osakaaluga hoones.
- Leitakse järeljahutuse elementide võimsus ruumide kaupa. Kondensaadivaba järeljahutuse levinud temperatuurigraaviku 14/17 °C (või muu, kui on teada) järgi tuletatakse Primaarkontuuri temperatuurigraafik 12/15 °C. Primaarkontuuri temperatuurigraafiku järgi saadakse lülitustemperatuur 10 °C. Erinete keskkondade temperatuuridevaheks on üldjuhul 2 °C, et soojusvahetus saaks normaalselt toimida.
- Veepaagi maht valitakse ligikaudselt vahemikus 1000-2500 l või vastavalt sarnastele hästi toimivatele objektidele. Paagi suurus on sõltuvuses kompressori võimsusest. Paagi suuruse valikuks erinevatel objektidel taandatakse näidisobjekti võimsus pinnaühikule.

## 2) Vabajahutuse elementide määramine baasmudeli järgi:

- Erineb esimeses punktis kirjeldatud meetodist vabajahutuse maksimalse võimsuse leidmise poolest.
- Baasmudeli (IDAICE synthetic) abil määratakse hoone maksimaalne jahutuse võimsus aprilli kuus. Aprilli kuu jahutusvõimsuste näitajad on vastavalt baasmudelile kõige sarnasemad tegelikele vabajahutuse maksimaalsetele võimsustele ning keskmine välistemperatuur alla 10°C ehk alla valitud lülitustemperatuuri.



## KOKKUVÕTE

Käesolev töö võeti ette, kuna Eestis ja mujal maailmas puuduvad täpsed seosed vabajahutuse süsteemide dimensioneerimiseks. Seda kinnitas ka käesoleva töö raames korraldatud inseneride küsitlus.

Dimensioneerimise seoste tuletamiseks koguti hoone süsteemis mõõtmisandmeid, korraldati kohapeal mõõtmisi, teostati arvutusi saadud andmetega, koostati simuleerimistarkvaraga standardmudelit ja reaalsetel kliima- ning kasutusandmetel põhinevat mudelit. Saadud tulemusi analüüsiti ja leiti võimalikke seoseid vabajahutusega süsteemi dimensioneerimiseks.

Hoone mõõtmisandmete analüüsimisel selgus, et vabajahutuse süsteem Öpiku 1 hoones ei toimi selliselt nagu oli planeeritud projektiga ja kasutatavad temperatuuriandurid ei olnud täpsed. Seega, hoone süsteemi ja mõõtmisandmete kasutamine arvutusseoste tuletamisel ja mudeli kalibreerimisel ei olnud õigustatud ja mudel loeti vaikimisi kalibreerituks ning teostati arvutust reaalse mudeli andmete põhjal.

Töö tulemusi mõjutas ka COVID-19 pandeemia. Vaadeldaval perioodil oli büroohoone täituvus väiksem, kui ette nähtud.

Optimaalsete parameetrite määramisel lähtuti süsteemi piiritlemisest. Ülemiseks piiriks võeti järeljahutuse seadmete temperatuur ja võimsus ning alumist piiri kontrolliti seadmete energiatarbimise ning tehniliste võimaluste järgi. Lõpliku otsuse tegemiseks arvestati ka komponentide hinda. Pakuti vabajahutuse kontuuri optimeerimise võimalusi.

Kokkuvõttes, võib vabajahutuse parameetrite määramiseks Eesti tingimustes lähtuda järgnevatest tingimustest:

- lülitustemperatuur valida kuni 12 °C;
- vabajahutuse võimsus valida baasmudeli aprilli kuu jahutuskoormuse järgi, arvestades leitud seostega 14,3 W/m<sup>2</sup> ja 31 % hoone maksimaalsest jahutuskoormusest;
- primaarpool: 14/17 °C. Võib langetada säilitades temperatuuride vahet lülitustemperatuuriga.
- sekundaarpool: 16/19 °C. Võib langetada säilitades temperatuuride vahet primaarkontuuriga.

- akumulatsioonimahuti suurus valitakse sõltuvalt kompressojahutuse süsteemist vastavalt punktis 1.10 kirjeldatud seostele.
- Dry-cooleri suurus valida lähtudes vabajahutuse määratud parameetritest ja kontrollida sobivus kompressojahutuse režiimil. Kompressorjahutuse režiimis on dry-cooleri pinnavaru kuni 50%.
- Vabajahutuse kontuuri eneriatarbimise vähendamiseks valida sagedusmuunduriga pumpa. Sagedusmuunduriga pumbaga on võimalik aastast jahutuseks mõeldud energiat kokku hoida ca 19 % võrra. SEER näitajad muutuvad vastavalt 4,63-lt 5,86 le.

Käesolevat tööd on võimalik arendada edasi järgmises etapis, et kinnitada saadud seoseid ja leida uusi erinevate olukordade hidamiseks. Selleks tuleks leida rohkem erineva lahedusega hooneid, millel on toimiv vabajahutus ja kust on võimalik andmeid kätte saada. Samuti koostöös dry-cooleri tootjatega teostada detailseid arvutusi dry-coolerte töö täpsemaks hindamiseks erinevatel parameetritel, kuna dry-cooler on vabajahutuse arvutamisel määrava tähtsusega.

## SUMMARY

The current work was undertaken because there are no precise correlations for dimensioning free cooling systems in Estonia and elsewhere in the world. This was confirmed by an engineering survey conducted as part of this work.

To derive dimensioning correlations, measurements were taken in the building system, on-site measurements were conducted, calculations were performed with the obtained data, a standard model was created with simulation software, and a model based on real climate and usage data was developed. The results were analyzed, and potential correlations for dimensioning the free cooling system were identified.

Analysis of building measurements revealed that the free cooling system in the Öpiku 1 building did not operate as planned in the project, and the temperature sensors used were not accurate. Therefore, using building system and measurement data in deriving calculation correlations and calibrating the model was not justified. The model was considered implicitly calibrated, and calculations were carried out based on real model data.

The results of the work were also influenced by the COVID-19 pandemic. During the observed period, the occupancy of the office building was lower than anticipated.

When determining optimal parameters, the system was defined by setting upper limits based on the temperatures and capacities of post-cooling devices and checking lower limits according to equipment energy consumption and technical capabilities. The final decision also took component prices into account. Options for optimizing the free cooling circuit were proposed.

In conclusion, the following conditions can be considered for determining free cooling parameters in Estonian conditions:

- Select a switch-off temperature up to 12°C.
- Choose the free cooling capacity based on the base model's cooling load in April, taking into account correlations found (14.3 W/m<sup>2</sup> and 31% of the building's maximum cooling load).
- Primary circuit: 14/17°C. It can be lowered while maintaining the temperature difference with the switch-off temperature.

- Secondary circuit: 16/19°C. It can be lowered while maintaining the temperature difference with the primary circuit.
- Select the size of the accumulation tank depending on the compressor cooling system, as described in point 1.10 correlations.
- Choose the size of the dry cooler based on the parameters defined for free cooling and check suitability in compressor cooling mode. In compressor cooling mode, the dry cooler's capacity is up to 50%.
- To reduce the energy consumption of the free cooling circuit, choose a frequency converter pump. With a frequency converter pump, it is possible to save approximately 19% of the energy intended for cooling annually. SEER indicators change from 4.63 to 5.86 accordingly.

This work can be further developed in the next stage to confirm the obtained correlations and find new ones for different situations. To achieve this, more buildings with varying sizes that have operational free cooling systems and from which data can be obtained need to be identified. Additionally, detailed calculations on dry cooler performance at different parameters should be carried out in collaboration with dry cooler manufacturers, as the dry cooler is crucial in calculating free cooling.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] N. K. M. R. R. V. M. Thambiduraia, „Free cooling feasibility of a typical commercial building in Pune city, India,“ *International Journal of Applied Engineering Research*, January 2015.
- [2] H. Bulut ja M. A. Aktacir, „Determination of free cooling potential: A case study for İstanbul, Turkey,“ *Applied Energy*, pp. 680-689, 2011.
- [3] Ü. Palmiste, „Free cooling potential of airside economizer in Estonia,“ nr [https://www.researchgate.net/publication/303848800\\_Free\\_cooling\\_potential\\_of\\_airside\\_economizer\\_in\\_Estonia](https://www.researchgate.net/publication/303848800_Free_cooling_potential_of_airside_economizer_in_Estonia), 2016.
- [4] RKAS, „Tehnilised nõuded mitteeluhoonetele 2021. Nõuded ühiskondlike hoonete projekteerimiseks ja ehitamiseks.,“ 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://nouded.rkas.ee/>.
- [5] T. Toivanen , „bakalaureusetöö „VAPAAJÄÄHDYTYKSEN TOIMINNAN TUTKIMINEN“,“ 2010.
- [6] E. Sandberg, Ilmastointiteknikka : osa 1 : sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät, 2016.
- [7] O. Seppänen, Ilmastoinnin suunnittelu, 2004.
- [8] S. T. Taylor, „How to Design & Control Waterside Economizers,“ *ASHRAE Journal*, pp. 30-36, 2014.
- [9] S. Hanson, „Free" cooling using Water Economizers,“ *Trane Engineers Newsletter*, 2008.
- [1 C. Edmondson, „How To Size A Waterside Economizer Part 1: How ASHRAE 90.1
- 0] Updates Have (Or WILL) Change Chilled Water Design,“ *JMP Company blog*, 2020.