



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND  
Mehaanika ja tööstustehnika instituut

## **LAEKÜTTE- JA -JAHUTUSPANEELI ARENDUS**

### **DEVELOPMENT OF A CEILING HEATING AND COOLING PANEL**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Jaanus Schönberg

Üliõpilaskood: 203954MATM

Juhendaja: Toivo Tähemaa, teadur

(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.

"....." ..... 20.....

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." ..... 20.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....." .....20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

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

Mina Jaanus Schönberg (sünnikuupäev: 22.10.1995 )

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Laekütte- ja -jahutuspaneeli arendus“,

mille juhendaja on Toivo Tähemaa,

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)

\_\_\_\_\_ (kuupäev)

**Mehaanika ja tööstustehnika instituut**  
**LÕPUTÖÖ ÜLESANNE**

**Üliõpilane:** Jaanus Schönberg, 203954MATM  
Õppekava, peeriala: MATM02/18 - Tootearendus ja tootmistehnika  
**Juhendaja(d):** Toivo Tähemaa, teadur, 620 3252

**Lõputöö teema:**

Laekütte- ja -jahutuspaneeli arendus  
Development of a ceiling heating and cooling panel

**Lõputöö põhieesmärgid:**

1. Anda ülevaade paneelide tööpõhimõtetest ning saadaval olevatest lahendustest
2. Tutvustada töö teoreetilist tausta ning testida selle toimimist arendataval tootel
3. Luua arendatava laekütte- ja -jahutuspaneeli kontseptsioon
4. Esmase prototüübi testimine
5. Analüüsida saadud tulemusi ning teha vastavad täiendused

**Lõputöö etapid ja ajakava:**

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Ülesande püstitus, teoreetilise tausta ülevaade	28.03.2021
2.	Kontseptsiooni loomine ning esmane prototüüp	01.05.2021
3.	Esmase prototüübi testimine	20.10.2021
4.	Tulemuste analüüs ning täiendavad muudatused	20.12.2021

**Töö keel:** eesti keel

**Lõputöö esitamise tähtaeg:** 3 jaanuar 2022 a

**Üliõpilane:** Jaanus Schönberg ..... ".....".....20.....a  
/allkiri/

**Juhendaja:** Toivo Tähemaa ..... ".....".....20.....a  
/allkiri/

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

# SISUKORD

Lühendite ja tähiste loetelu.....	7
1. SISSEJUHATUS.....	8
2. LAEKÜTTE- JA JAHUTUSE LAHENDUSED .....	9
2.1 Tööpõhimõte .....	9
2.1.1 Aktiivpalgid.....	9
2.1.2 Passiivsed kütte- ning jahutuspaneelid .....	10
2.2 Turul pakutavad lahendused.....	11
2.2.1 Zehnder Carboline .....	12
2.2.2 Lindab Atrium Plana HC.....	13
2.2.3 Halton Rex 600 .....	14
2.2.4 FläktGroup iQ STAR LYRA II.....	15
2.2.5 Kütte- ja jahutusvõimsuste võrdlus.....	16
3. PANEELI PROJEKTEERIMINE .....	17
3.1 Arendatava toote eesmärk ning funktsioonid .....	17
3.2 Paneeli arendus .....	18
3.2.1 Õhu suunamine .....	18
3.2.2 Täiendavad muudatused.....	21
3.2.3 Paneeli korpus.....	23
3.2.4 Paneeli sisemus .....	24
3.3 Paneeli kombineeritud teoreetiline jahutusvõimsus .....	25
3.3.1 Kiirguslik võimsus.....	25
3.3.2 Konvektiivne ja kombineeritud võimsus .....	26
3.4 Esmane prototüüp .....	27
4. PANEELIDE KATSETAMINE.....	30
4.1 Õhujoa liikumine ja kiirus .....	31
4.2 Kiirguslik jahutusvõimsus .....	33
4.2.1 1200 mm pikk paneel .....	33
4.2.2 1800 mm pikk paneel .....	34
4.3 Kombineeritud jahutusvõimsus.....	35
4.3.1 1200 mm pikk paneel .....	35
4.3.2 1800 mm pikk paneel .....	36
4.4 Vedeliku rõhulang .....	37
4.4.1 1200 mm pikk paneel .....	37
4.4.2 1800 mm pikk paneel .....	38
4.5 Mürasummutus .....	39

5. KATSETUSTE TULEMUSTE JÄRELDUSED .....	40
5.1 Konvektsiooni mõju jahutusvõimsusele.....	40
5.2 Tulemuste võrdlus konkureerivate toodetega .....	41
5.2.1 Kiirgusliku ning kombineeritud jahutusvõimsuse võrdlus.....	41
5.2.2 Rõhulangu võrdlus .....	42
5.2.3 Mürasummutuse võrdlus .....	42
5.3 Ruumide näidisarvutused.....	43
5.3.1 Avatud büroo .....	44
5.3.2 Kabinet .....	45
5.3.3 Haigla ruum .....	46
6. PANEELI EDASINE ARENDUS .....	47
6.1 Kiirguslik paneel .....	47
6.2 Sissepuhkemooduliga paneel.....	48
KOKKUVÕTE .....	50
SUMMARY.....	51
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	52
LISAD .....	54
Lisa 1 Avatud büroo ruumi plaan.....	55
Lisa 2 Kabineti ruumi plaan .....	56
Lisa 3 Haigla ruumi plaan.....	57
GRAAFILINE OSA.....	58

## Lühendite ja tähiste loetelu

HVAC – küte, ventilatsioon ja jahutus (ingl k *Heating, ventilation, and air conditioning*)

$\Delta t$  – kütte- või jahutuselementi läbiva vee keskmise temperatuuri ning ruumi õhutemperatuuri vahe

# 1. SISSEJUHATUS

Tänapäeva hoonete projekteerimisel lähtutakse kütte ning jahutuse lahenduste valikul paljudest omadustest. Eelkõige on määravaks lahenduste esmase paigaldamisega ning nende kasutamisega seotud kulud tööperioodil ning vastava sisekliima loomine ruumis viibijatele. Üheks tootegrupiks antud valdkonnas on lakke paigaldatavad kütte ning jahutuse elemendid. Need jagunevad laias laastus omakorda kaheks, mis erinevad üksteisest peamise soojusülekanne liigi poolest – sundkonvektsioon ning soojuskiirgus.

Käesolevas töös tuuakse välja mõlema lahenduse tööpõhimõtte täpsem ülevaade ning eelised ja puudused nende kasutamisel. Vastavalt sellele, antakse ülevaade mõlemat tüüpi toodete näidetest, mida erinevad tootjad hetkel pakuvad.

Töö teoreetiline taust põhineb varasemalt avaldatud uurimusel, kus uuriti kiirgusliku ning konvektiivse soojusülekanne kombineerimisel saadavat tulemust. Magistritöö peamiseks eesmärgiks on testida antud teoreetilise tausta toimimist reaalistest tingimustest ning selle põhjal vastava tööpõhimõttega laekütte- ja -jahutuspaneeli projekteerimine. Sellest lähtuvalt luuakse esmane kontseptsioon arendatavast tootest, mille eesmärgiks on kiirguslikule laepaneelile lisada ruumi ventilatsiooni sissepuhutav õhk, et suurendada paneeli kütte- ning jahutusväljastust.

Esmase lahendus põhjal tehakse valmis erinevas moodsus prototüübid, mida seejärel labori tingimustes testitakse. Paneeli testimisel veendutakse sellest välja suunatava õhujoa liikumistrajektooris ning mõõdetakse selle liikumiskiirust, jahutusvõimsust ning võimet summutada müra. Seejärel analüüsitakse saadud tulemusi ning võrreldakse vastavaid väärtusi konkureerivate toodetega. Tehtavate järelduste põhjal täiendatakse paneeli vastavate muudatustega.



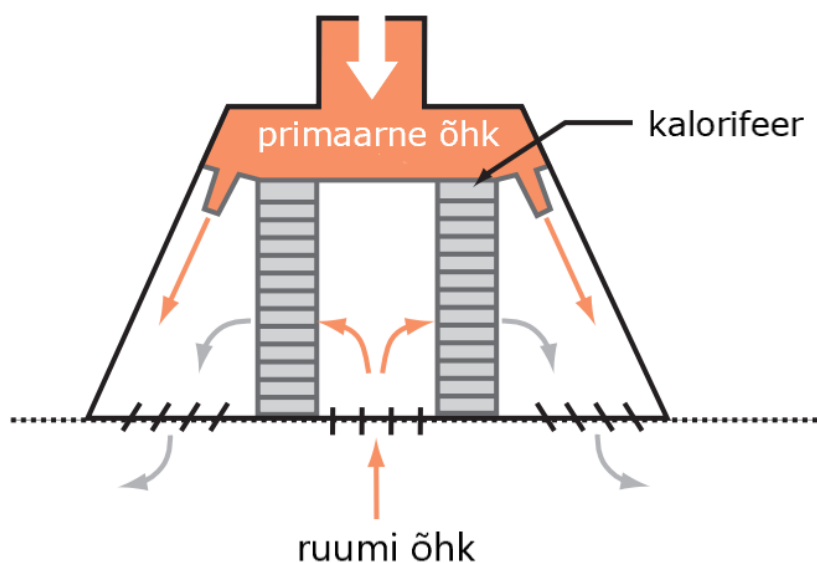
## 2. LAEKÜTTE- JA JAHUTUSE LAHENDUSED

### 2.1 Tööpõhimõte

Lakke paigaldatavad tooted on üks alternatiiv tänapäeval pakutavatele lahendustele, kuidas kütta ning jahutada ruume ning pakkuda ruumis viibijatele meeldivat sisekliimat, mille teguriteks on nii ruumi temperatuur kui tuuletõmbuse efekt [1]. Seeläbi suudetakse vähendada energia tarbimist ning ventilatsiooni paigaldamisega seotud kulusid [2]. Lahendusi on võimalik paigaldada nii otse lae alla kui eraldiseisvana rippuma, samuti saab neid integreerida ripplae süsteemiga. Soojusenergia edastamiseks kasutatakse vett, mille soojusülekandeegur on tunduvalt suurem õhu omast [3]. Saadaval olevatest laekütte- ning jahutuse lahendustest saab soojusülekande liigi alusel eristada kahte – aktiivpalgid ning passiivsed laepaneelid.

#### 2.1.1 Aktiivpalgid

Aktiivpalgid töötavad eelkõige sundkonvektsiooni põhimõttel. Sundkonvektsioon on soojusülekande liik, milles õhk pannakse liikuma välise teguri abil, et suurendada soojusülekannet. Väliseks teguriks võib olla näiteks ventilaator [4]. Antud juhul soojendab või jahutab õhku toote sisse paigaldatud kalorifeer. Lae alla kerkiv ruumi õhk suunatakse selle sisse läbi perforeeritud kate, kust see edasi liigub läbi kalorifeeri, mis seda vastavalt soojendab või jahutab. Seejärel seguneb see primaarse ventilatsiooni sisse puhutava õhuga, mis suunatakse edasi ruumi.



Joonis 1 Aktiivse jahutuspalgi tööpõhimõte [5]

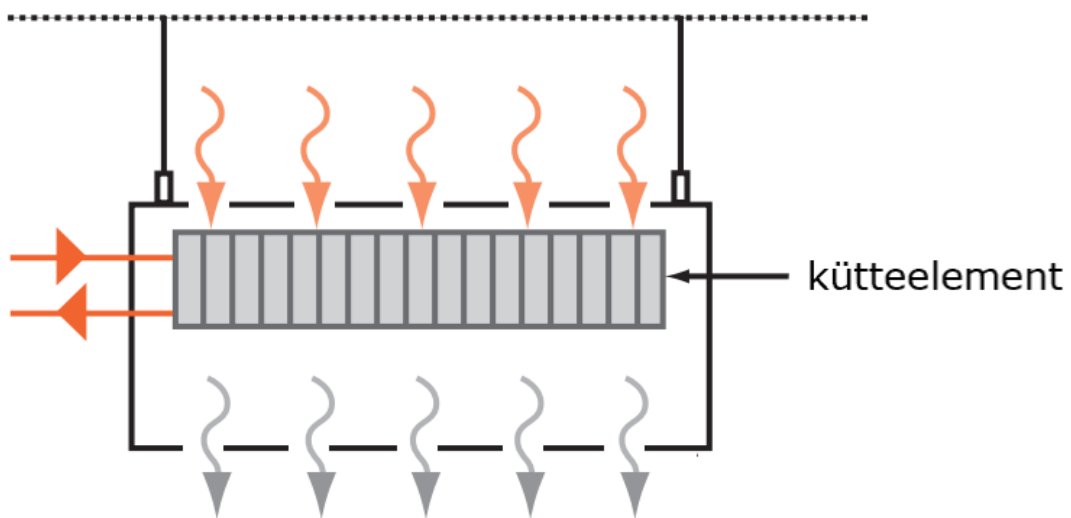
Antud lahenduse eeliseks passiivse paneeli ees on parem temperatuuri hajutavus ning suurem kütte- ning jahutusvõimsus. Lisaks ruumi kütmisele ning jahutamisele, toimib antud toode samaaegselt mingil määral sissepuhke elemendina, suunates ruumi värsket õhku [5]. Samuti tänu liikuvate osade puudumisel on antud süsteem vaiksem ning hooldusvajadus väiksem kui õhupõhistel HVAC süsteemidel.

Üks problemaatilisemaid kohti aktiivpalkide kasutamise juures on kondensaadi tekkimise kontrollimine. Jahutuse puhul võib kondensaat tekkida kalorifeerile ning sealt sissepuhutava õhu kaudu edasi ruumi sattuda [6]. Üheks puuduseks võib lugeda ka filtri puudumist lahenduse konstruktsioonis. Sekundaarne ruumi õhk, mis lae alla kerkib ning läbi elemendi liigub saadetakse ringlusesse ilma filtreerimata. Mõningate ruumide puhul võib määravaks saada ka lahenduse piiratud küttevõimsus. Suurte ruumide korral ei pruugi köetav või jahutatav õhk ühtlased ruumis jaotuda ning tuleb lisaks kasutusele võtta alternatiivsed lahendusi [5].

### **2.1.2 Passiivsed kütte- ning jahutuspaneelid**

Passiivsed paneelid on oma ehituselt võrreldes aktiivpalkidega lihtsamad. Toode koosneb õhukesest korpusest, mille sisse on paigaldatud kütteelement – vasktorustik või kalorifeer ning mõningatel lahendustel katab torustikku korpuse sees isolatsioon. Jahutusvõimsuse tõstmise eesmärgil on peamiselt jahutamiseks kasutatavad paneelid ilma isolatsioonita [7]. Torustikust liigub läbi vesi, mis vastavalt kütmisele või jahutamisele erineb ruumi temperatuurist. Torult kandub energia üle paneeli korpusele, millelt see omakorda kiirgab ruumi [2]. Soojusülekanne ruumi toimub suuremal määral soojuskiirguse mõjul. Soojuskiirgus on soojusülekanne vorm, mille käigus osakesed levivad elektromagnetilise kiirgusena kiirgavalt kehale neelduva keha suunas [8]. Seetõttu soojendatakse otseselt ruumis viibijaid, mitte ruumi õhku.

Otsese kiirguse mõjul on kütta või jahutada vaja ainult juhul, kui keegi antud hetkel ruumis viibib. Soojuskiirguse abil saavutatakse sarnaselt tuntav temperatuur madalama õhutemperatuuri juures ning seetõttu on antud meetod ka energiasäästlikum. Lisaks võib eelisena välja tuua kiire reageerimisaja temperatuuri muudatustele [7]. Ruumi mõõtmete seisukohalt annab antud lahendus olulise eelise. Paneelid on üsna õhukesed ning nendeni on vaja tuua vaid väikese läbimõõduga küttestorustik. Sellest lähtuvalt on vaja lae alla projekteerida vaid primaarne ventilatsiooni torustik, mille tulemusel saab kokku hoida ruumi kõrguse arvelt [9].



Joonis 2 Passiivse kiirguspaneeli tööpõhimõte [5]

Suuremad takistused kiirguspaneelide integreerimisel ruumi kütte ning jahutusüsteemi on seotud üldjuhul suuremate paigalduskuludega, mis on eeskätt tingitud vajadusest ühte ruumi paigaldada mitmeid paneele, et saavutada soovitud kütte- või jahutusväärtus. Kondensaadi ärajuhtimise süsteemi puudumise tõttu on vaja tähelepanu pöörata ka selle mitte tekkimisele. Seetõttu peab tubane kastepunkt olema madalam kui paneeli pinnatemperatuur, et vältida kondensaadi teket. Lisaks peab tähelepanu pöörama kõikvõimalikele liitmikele, mis süsteemi torustikul on suurema arvu ühenduste tõttu, et vältida lekkeid [5]. Tööpõhimõtete erinevuste tõttu on passiivsed paneelid võrreldes aktiivpalkidega kuni 85% vähem efektiivsemad ruumi õhutemperatuuri tõstmisel või langetamisel [10].

## 2.2 Turul pakutavad lahendused

Suurema tootevalikuga on esindatud passiivsed kiirguspaneelid, eeldatavasti lihtsama ehituse tõttu. Samas on erinevad tootjad oma paneeli arendades välja tulnud erinevate uudsete lahendustega, et konkurentsieelist säilitada paremate omadustega. Vastavalt tootjale, on saadaval ka erinevaid aktiivpalkid. Peamised erinevused on seotud ruumi puhutava õhu hulga ning suuna reguleerimisega. Allpool on välja toodud mõned pakutavatest lahendustest koos kirjelduse, tööpõhimõtte ning peamiste erinevustega võrreldes konkureerivate toodetega mõlema lahenduse tüübi kohta.

### 2.2.1 Zehnder Carboline

Zehnderi Carboline tooteseeriat pakutakse vaid passiivsete kütte- ja jahutuspaneelidena. Toote puhul pannakse rõhku energiatõhususele ning diskreetsele disainile, et sobituda igasse ruumi. Paneelid sobivad kasutamiseks suurem osades siseruumides, sealhulgas haridusasutustes, büroodes ning haiglates.



Joonis 3 Zehnder Carboline paneel [7]

Toode koosneb tsingitud terasest valmistatud korpusest, mille sisse on paigaldatud vask toru. Saadaval on kahe erineva külje geomeetriaga paneelid, vastavalt paigaldamisviisile. Torud on pealt poolt kaetud isolatsiooniga. Zehnderi Carboline eripäraks ja eeliseks teiste kiirguspaneelide ees on paneeli sisepinnale paigaldatud naturaalgrafiidi kiht, mis tagab parema temperatuuri jaotumise paneeli pinnal ning kiirema reageerimise temperatuuri vahetusele, et vältida ülekütmist ja -jahutamist ning sellest lähtuvalt tagades energiatõhusama lahenduse ruumide kütmiseks ja jahutamiseks. Mürasummutuse eesmärgil saab paneele tellida ka perforeeritud pinnaga ning vastava isolatsiooniga.

Paneele pakutakse erinevas pikkuses, laius on vastavalt paigaldusmeetodile alati sama. Toodet saab paigaldada ripplae moodulina nii suletud lae kui vabalt rippuvate moodulite korral. Paneeli projekteerimisel on arvestatud erinevate kinnitamisvõimalustega ning vastavalt vajadusele on saadaval ka erinevad kinnitusvahendid. Kinnitamise järel ühendatakse paneeli torustik otse süsteemiga või jadamisi teise paneeliga kuni üheksa meetrise rivina [7].

## 2.2.2 Lindab Atrium Plana HC

Lindabi Atrium Plana HC puhul on samuti tegemist passiivse ning eelkõige kiirguse põhimõttel töötava kütte- ja jahutuspaneeliga, pakumaks efektiivset lahendust ruumi sisekliimale. Paneeli disainimisel on üritatud sarnaneda ripplae paneeliga, et paneel võimalikult vähe eristuks ülejäänud laest, hoides tagasihoidlikumat joont paneeli üldvälimusel. Samas on paneeli võimalik paigaldada ka eraldiseisvana lakke rippuma või otse vastu lage. Toodet on võimalik kasutada erinevates ruumides, sealhulgas kõrgete lagede korral.



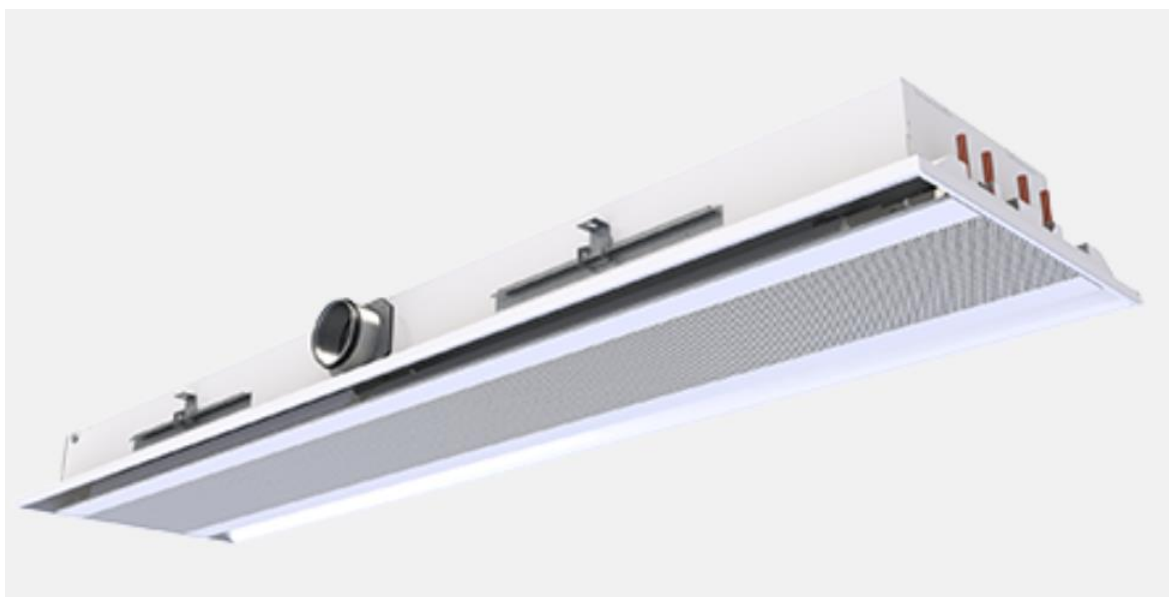
Joonis 4 Lindab Atrium Plana HC paneel [11]

Paneel koosneb 35 mm paksusest alumiiniumist korpusest, mille sees on vasest laserkeevitatud torustik, optimaalsema soojusülekanne eesmärgil. Kütte ja jahutuse eraldiseisva kasutamise mõttel on samasse paneeli paigaldatud mõlemale süsteemile omaette torustik, mis on omakorda isoleeritud polüstüreenvahuga, et vältida soojuse kiirgumist ruumi lae suunas. Lisadena pakutakse erineva tiheduse ja mõõtudega perforatsiooni paneeli pinnal ning spetsiaalset akustiliste omadustega isolatsiooni, et summutada ruumi müra.

Paneelid on saadaval erinevas laiuses ja pikkuses. Paigaldamiseks rippuva lahendusena saab kasutada nii keermelatte, trosse kui spetsiaalseid tootja poolt pakutavaid riputusvardaid, et lihtsustada paigaldamist. Samuti pakutakse kinnituskronsteine paneeli kinnitamiseks vastu ruumi lage. Paneeli konstruktsiooni toetab kõiki eelpool toodud paigaldusmeetodeid. Paneeli kinnitamisel järel ühendatakse torustik süsteemiga. Lindab reklaamib oma toodet, kui kõige kergemat ja efektiivsemat kiirguspaneeli turul [11].

### 2.2.3 Halton Rex 600

Antud Haltoni toode on vaid üks nende tooteseerias olevatest kütte ning jahutusega kombineeritud aktiivpalkidest. Peamine erinevus eelnevate toodetega on see, et antud tootel on kombineeritud lisaks kütte ning jahutus funktsioonile ka õhu sissepuhe, vajadusel on saadaval ka väljatõmbe funktsioon. Samuti on see võrreldes eelnevatega tunduvalt suurema kütte- ning jahutusväljastusega. Sobib kasutamises eelkõige kontori- ning koosoleku ruumides ripplae osana. Samuti sobib ruumidesse, kus on kasutusel vajadusepõhine ventilatsioon.



Joonis 5 Halton Rex 600 [12]

Toode koosneb korpusest, mille sisse on paigaldatud kalorifeeri. Korpuse küljel on sissepuhke sadul, mille kaudu puhutakse primaarne õhk sisse. Korpuse sees liigub õhk läbi kalorifeeri, mis seda vastavalt vajadusele kütab või jahutab ning seejärel suunatakse see düüside kaudu paneeli kahest pikemast servast välja. Õhuhulka kontrollitakse manuaalse või automaatse klapiga, samuti saab manuaalselt kontrollida välja puhutava õhujoa kiirust paneeli mõlemal küljel, kui peaks ruumi paigutusest lähtuvalt tekkima selleks vajadus. Paneeli alumise perforeeritud pinna kaudu juhitakse korpusesse sekundaarne õhk.

Paigaldamiseks on tootele lisatud spetsiaalsed liigutatavad kinnituskronsteinid, mille abil saab selle kinnitada otse lae pinnale või keermelattidega ripplae osana. Kalorifeeri toruühendused asuvad paneeli otsas. Paneel on eelkõige mõeldud paigaldamiseks paralleelselt ruumi välisseinaga [12].

## 2.2.4 FläktGroup iQ STAR LYRA II

Lyra II puhul on samuti tegemist aktiivpalgiga, mis on mitmeti reguleeritav ning võimaldab sidumist vajaduspõhise ventilatsiooni lahendustega. Tänu nendele omadustele sobib see paljudesse ruumidesse paigaldamiseks. Toodet saab kinnitada osana ripplae süsteemist või üksikult lakke riputatuna.

Toode koosneb tsingitud terasest korpusest, mille sisse on paigaldatud sarnaselt eelmise lahendusega kalorifeer. Õhk puhutakse sisse läbi korpuse küljel asuva sadula, mille järel liigub see kalorifeeri kaudu korpuse alaserva ja eesmise pinna vahele jääva ava kaudu ruumi. Enne kalorifeerini jõudmist, liigub õhk läbi reguleeritavate avade, millega reguleeritakse rõhu muutusi süsteemis. Aktiivpalgi eesmine perforeeritud pind on reguleeritav, et muuta jahutamise ning kütmise efektiivsust vastavalt seda läbivale õhuhulgale. Lisaks on korpuse sisekülgedele kinnitatud labad, mille abil saab muuta ruumi puhutava õhu suunda.



Joonis 6 FläktGroup iQ STAR LYRA II [13]

Paigaldamiseks pakutakse erinevaid lahendusi, vastavalt kinnitusmeetodile. Vastu lage kinnitamiseks on mõeldud kronstein, mis kinnitub ümber korpuse ning mida saab omakorda otse lae külge kinnitada või kasutada selleks keermelatte. Samuti saab paigaldamiseks kasutada trosse, mis kinnituvad korpuse küljes olevate kronsteinide külge. Kalorifeeril on eraldi toruühendused jahutamiseks ja kütmiseks, mis asuvad erinevatel mudelitel vastavalt sissepuhke sadulaga samal küljel või kõrval küljel. Toode on mõlema kinnitusmeetodi puhul saadaval kahes suuruses. Pikemal variandil on valikus kahes erinevas mõõdus sissepuhke sadul [13].

## 2.2.5 Kütte- ja jahutusvõimsuste võrdlus

Allpool toodud tabelis on välja toodud varasemalt kirjeldatud toodete kütte- ning jahutusvõimsuste võrdlus, kui toote keskmise temperatuuri ja ruumi temperatuuri erinevus  $\Delta t$  on jahutuse korral 10 °C ning küttes 20 °C. Kõikide toodete puhul on lähtutud samast pikkusest 1200 mm ning paigaldusmeetodiks on valitud osana ripplaest. Kiirguspaneelide puhul on valitud väärtused, mis kirjeldavad perforeeritud pinnaga ning isolatsiooniga paneelide antud väärtusi. Lindabi toote kohta olid andmed välja toodud vaid eraldi kütte ning jahutuse jaoks mõeldud paneeli jaoks. Aktiivpalkide puhul valiti graafik, mis kirjeldas 125 mm läbimõõduga sisepuhke torustikuga kasutatava paneeli kütte- ning jahutusväärtusi.

Tabel 1 Kütte- ja jahutusvõimsuste võrdlus

Toode	Küttevõimsus, W	Jahutusvõimsus, W
Zehnder Carboline [7]	123	79
Lindab Atrium Plana HC [11]	144	78
Halton Rex 600 [12]	386	554
FläktGroup iQ STAR LYRA II [13]	306	507

Tabelis toodud väärtusest on näha, et aktiivpalkide jahutusvõimsus on tööpõhimõttest tingituna tunduvalt suurem küttevõimsusest ning kiirguslike paneelidega võrreldes on vahe mitmekordne. Kiirguslikud paneelid, mille kütte- ning jahutusväljastus on madalam aktiivpalkidest, erinevad üksteisest väiksema suurusjärgu võrra.

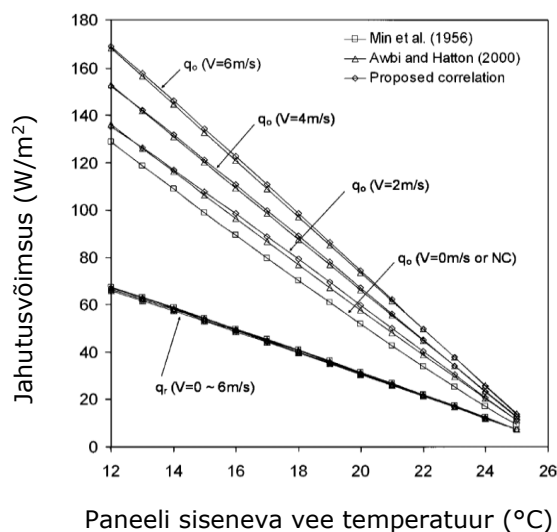


## 3. PANEELI PROJEKTEERIMINE

### 3.1 Arendatava toote eesmärk ning funktsioonid

Lähtepunktiks antud toote arendamisel oli soov turule tuua uudne kütte- ning jahutuspaneel, mille juures oleks kombineeritud passiivse ning aktiivse laekütte ning -jahutuse elemente, kuid samas erinedes olemasolevatest kiiruslikest paneelidest ka peamise tööpõhimõtte poolest. Arendatav toode asetuks omaduste poolest kahe lahenduse vahele, eelkõige oleks tegemist passiivse paneeli edasiarendusega, mis peaks pakkuma suuremat kütte- ning jahutusvõimsust võrreldes turul pakutavatega. Paneeli väljatöötamisel võetakse aluseks eelkõige passiivne kütte- ning jahutuspaneel, mis koosneb õhukesest korpusest, kuhu sisse on paigaldatud vasktorustik ning mis on pealt kaetud isolatsiooniga. Aktiivse elemendi lahenduse poole pealt lisatakse sellele omakorda sissepuhke sadul, millega tagatakse võimalus paneeli varustamiseks sissepuhke õhuga.

Paneeli küttevõimsuse tõstmiseks kombineeritakse soojuskiirgust konvektsiooniga. Lähteidee kohaselt soojendab või jahutab paneeli pinda selle sisse paigaldatav vasktorustik. Paneeli välispind omakorda kiirgab seda edasi ruumi, mis töötab seega soojuskiirguse toimetel. Läbi paneeli sissepuhutav õhk suunatakse välja selle välispinna kaudu, misjärel see liigub mööda paneeli pinda ning haarab kaasa soojendatud või jahutatud õhu, lisades konvektsiooni toime paneelile. Teoreetiline taust põhineb 2003. aastal avaldatud teadusartiklil, kus uuritakse konvektsiooni mõju jahutusliku kiiruspaneeli võimsusele, olukorras, kus mööda paneeli pinda liigub ruumi sissepuhutav värske õhk.



Joonis 7 Uurimistöö tulemusel väljapakutud kombineeritud jahutusvõimsus erineva õhukiiruse (V) juures:  $q_r$  – kiirusvoog,  $q_o$  – kogu soojusvoog [14]

Artikli tulemustest järeldub, et alates õhujoo kiirusest 2 m/s, avaldab see märgatavat mõju paneeli võimsusele. Jahutusvõimsuse suurenemine võib olla kuni 35 % tavapärase jahutustemperatuuri juures [14].

Paneeli mõõtmete puhul lähtutakse ripplae süsteemist, et neid oleks võimalik omavahel kombineerida. Lühema külje pikkus on fikseeritud 600 mm juures, teise külje pikkus kasvab 600 mm sammuga alates 1200 mm mõõdust. Disaini poole pealt on eesmärgiks projekteerida paneel, mis ruumi sisekujundus lahenduste ning ülejäänud laepaneelide hulgast võimalikult vähe välja paistaks.

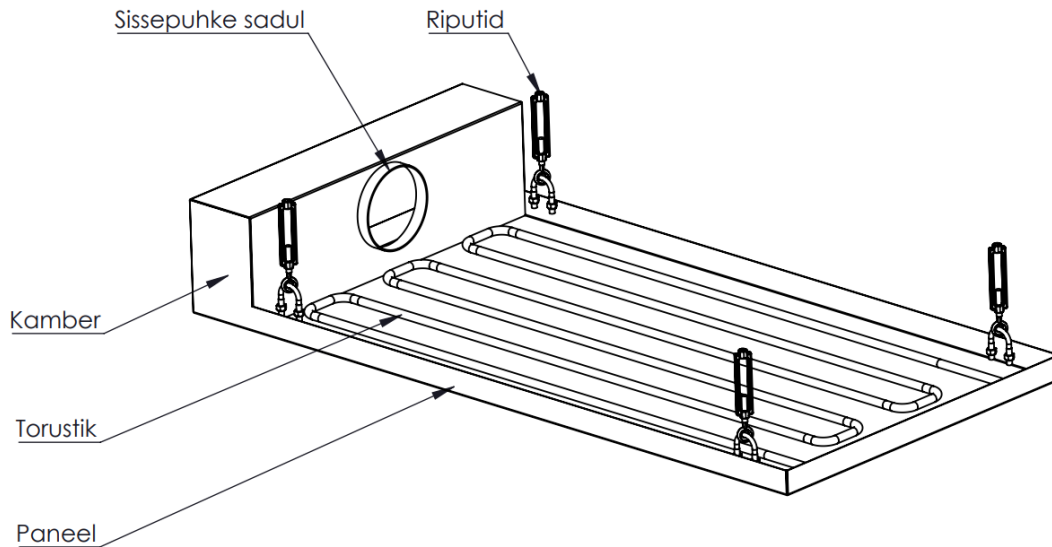
Sarnaselt turul pakutavatele passiivsetele paneelidele, testitakse paneeli arendamise käigus omaduste poolelt selle võimet summutada ruumis tekkivat müra. Sel otstarbel paigaldatakse torustiku peale, paneeli sisse vastav isolatsioon, mis lisaks lae suunas soojuse kiirguse vähendamisele summutab ka müra.

## **3.2 Paneeli arendus**

### **3.2.1 Õhu suunamine**

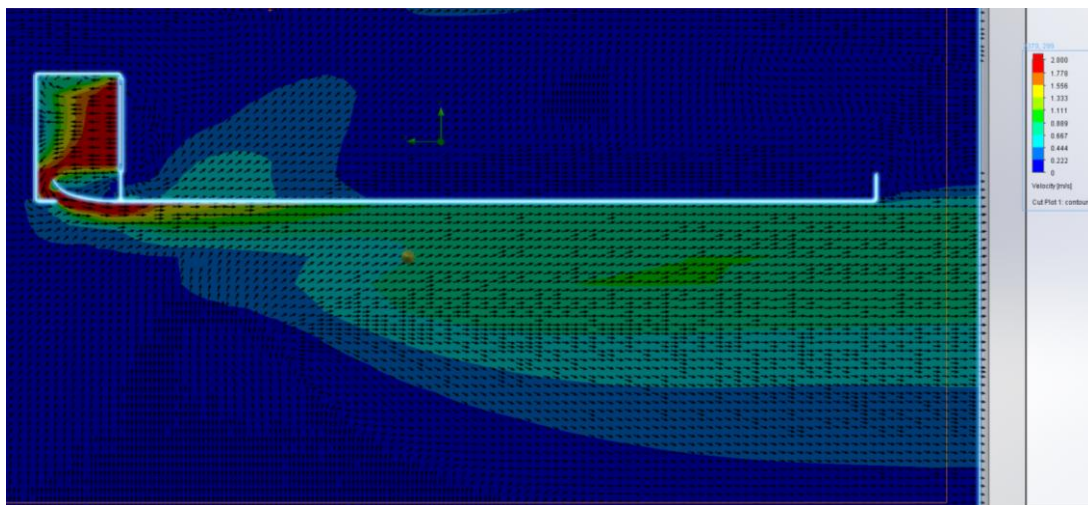
Paneeli projekteerimisel lähtuti eelkõige ventilatsiooni kaudu sissepuhutava õhu liikumisest läbi paneeli. Kuna eesmärgiks oli õhk panna liikuma mööda paneeli välispinda, tuli õhk suunata välja paneeli lühemast servast, et õhu liikumine pikki paneeli pinda oleks teostuv maksimaalses võimalikus ulatuses. Sissepuhutava õhu paneeli pinnale suunamiseks lisati paneeli otsa kamber. Paneeli kambrit ventilatsiooni torustikuga ühendav sadul lisati paneeli sisekülje poole, et toruühendus oleks visuaalselt vähem märgatav, juhul kui paneel paigaldatakse eraldiseisvana lakke. Horisontaalse toruühenduse eeliseks pealt ühenduv lahendusega on väiksem laeruumi vajadus.

Esmaseks ideeks õhu suunamiseks kambrit paneeli välispinnale oli kasutada juba ettevõtte tootevalikus kasutatavaid plastist düüse, mis on lihtsasti paigaldatavad ning võimaldavad reguleerida õhujoo suunda. Antud düüside kasutamine paneeli välispinnal ei ühtiks samas varasemalt paneeli välimusele seatud omadusega, et see eristuks võimalikult vähe ülejäänud ripplae paneelidest. Paneeli suhtes asümmeetrilise paigutusega düüsid oleksid visuaalselt lihtsasti eristuvad. Sellest lähtuvalt olid sekundaarseks võimaluseks kasutada ära paneeli korpuse pinda. Korpuse detaile tehtav sisselõige võimaldaks sellest painutada kumera pinna, mida saaks kasutada õhu suunamiseks paneeli välispinnale.



Joonis 8 Paneeli esmane kontseptsioon

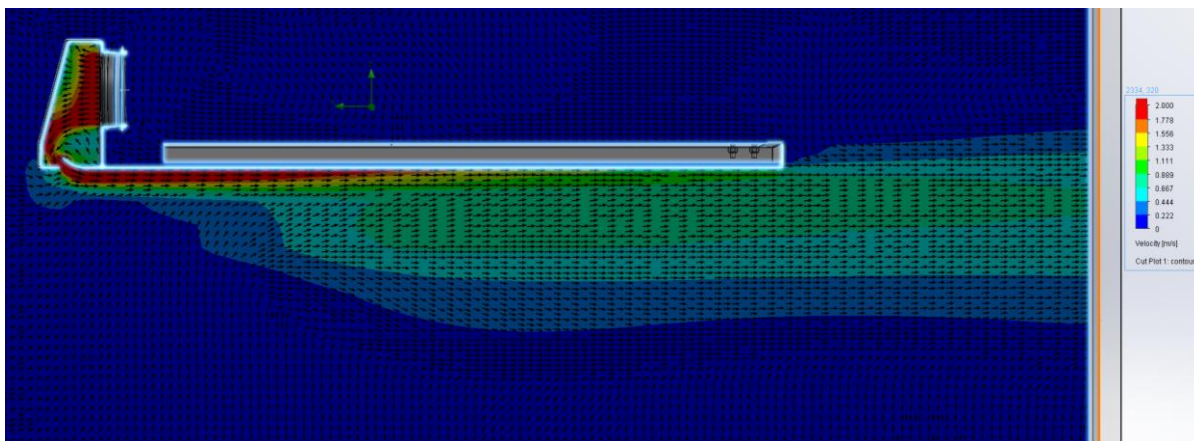
Antud idee edasiviimiseks arendusprotsessis testiti seda esmalt simulatsiooni keskkonnas, et saada esialgne aimdus selle toimimisest reaalsetes tingimustes. Vastavad analüüsid viidi autori poolt läbi Solidworks Flow Simulation keskkonnas. Simulatsiooni tingimuseks oli paneeli suunatav optimaalne õhuhulk 30 l/s.



Joonis 9 Esialgse idee simulatsioon

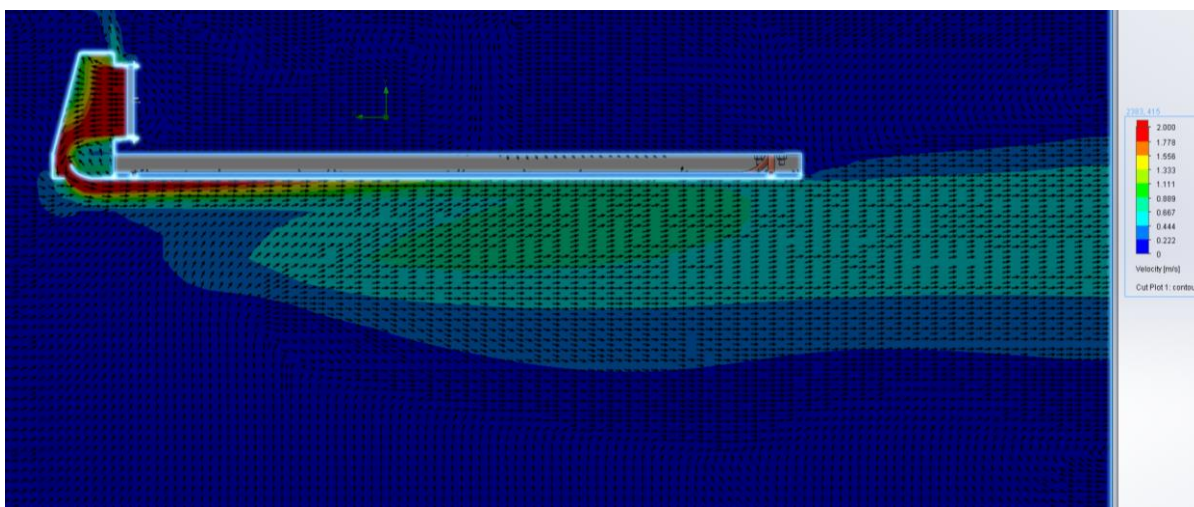
Esmase simulatsiooni jaoks kasutati lihtsustatud 3D mudelit 1200 mm pikast korpusest ning kambri, et üldpildis näha antud idee toimimist. Simulatsiooni tulemuse lõikest on näha, et õhk liigub läbi kambri ning välja suunatav õhujuga liigub mööda paneeli välispinda. Suurim õhukiirus on kambri väljumisel läbi ava, kus on ka kõige kitsam koht õhu liikumisele. Simulatsiooni tulemusest saab järeldada, et kõige suurem mõju mööda paneeli välispinda liikuvale õhujoale on seotud eelkõige korpuse ja kambri vahelise ava mõõtudega ja kujuga.

Saadud tulemustest lähtudes projekteeriti paneeli täpsem 3D mudel, kus viidi väljaviske ava mõõdud vastavusse reaalsele materjali hulgaga, mida korpuse sisselõike puhul kasutada saab. Lisaks lisati kambri sissepuhke sadul ning muudeti kambri kuju, et parandada õhu liikumist. Väljaviske ava kumera pinna kuju projekteeriti esmalt võimalikult suure raadiusega, et vähendada selle väljapaistmist paneeli üldvälimusest ning et ava kaudu oleks võimalikult vähe näha kambri sisse. Pinna kumeruse suurima maksimaalse raadiuse fikseeris ettevõtte tootmises kasutatava paneeli painutuspingi parameetrid.



Joonis 10 Simulatsioon esmasele 3D mudelile

Simulatsiooni tulemust analüüsid on näha, et õhu liikumine kambri sees paranes seoses kambri kuju muutmisega ning kaldpinna lisamisega kambri tagumisse seinale. Väljaviske ava mõõtmete täpsustamisega vähenes ava suurus ning seetõttu kasvas märgatavalt ka õhujoo kiirus paneeli välispinnal. Sellest lähtuvalt pikenes ka õhujuga, mis mööda välispinda liigub. Eesmärgiks oleks saavutada tulemus, kus õhujoo kiirus paneeli lõpus oleks piisavalt väike, et sissepuhutav õhk hakkaks paneeli ulatuses hajuma ning seguneks ruumi õhuga.



Joonis 11 Täiendatud mudeli simulatsioon

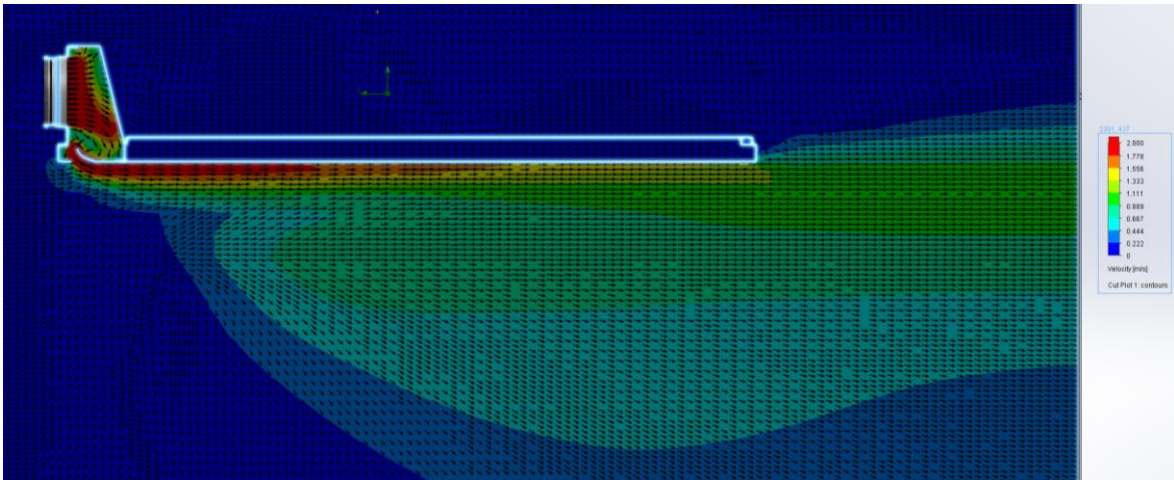
Õhujoa kiiruse vähendamise eesmärgil suurendatakse kambri ning paneeli korpuse vahelise väljaviske ava mõõtmeid. Väljalõike ava suurus paneeli korpuses jääb samaks, kuid raadiuse vähendamisega pinna otsas kumerus suureneb.

Võrreldes eelneva simulatsiooniga on näha, et sisseviidud muudatused väljaviske ava mõõtmetes ja kujus avalduvad õhujoa kiiruses paneeli välispinnal väljaviske ava juures. Õhujoa kiirus on selles punktis vähenenud ning sellest lähtuvalt on vähenenud ka kiirus paneeli lõpus.

### **3.2.2 Täiendavad muudatused**

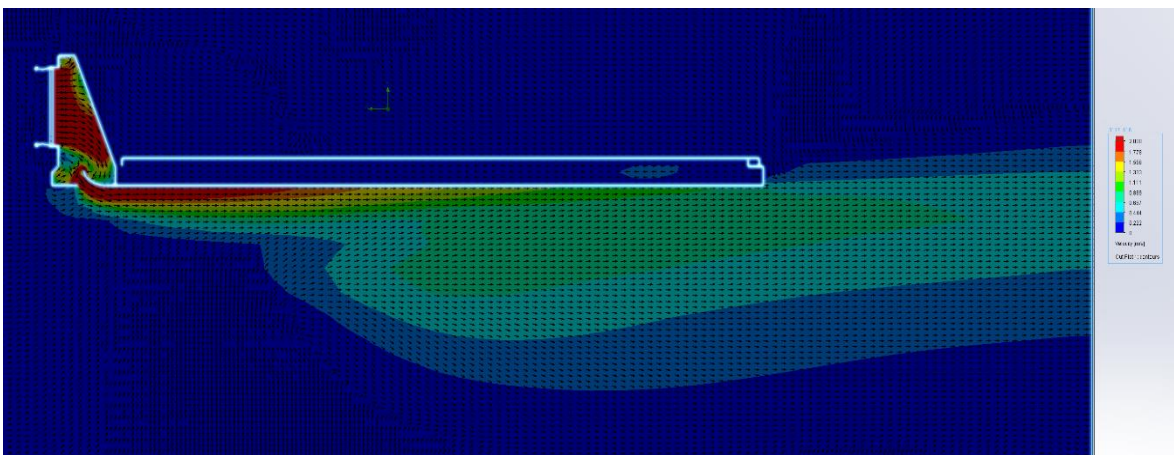
Paneeli arendamise käigus jõuti teoreetilisel teel arusaamale, et antud lahendus sissepuhke kambri ning ventilatsiooni torustiku ühendamiseks võib osutada problemaatiliseks paneeli paigaldamise seisukohalt. Esialgse lahenduse järgi on kambrit ning ventilatsiooni torustiku ühendav sadul suunaga paneeli keskosa poole. Antud lahenduse eeliseks on torustiku ühenduste mingi määral varjamine ruumis viibijatele, juhul kui paneel on paigaldatud ripplaest eraldiseisvana. Paigaldamismeetodite ning paneeli kasutuse otstarbe täpsustamisel selgus, et mõistlikum oleks paigutada sissepuhke sadul suunaga paneelist välja ehk vastupidiselt algele lahendusele. Väljapoole suunatud sadul lihtsustab üldjuhul ühendamist ventilatsiooni torustikuga kuna on vaja kasutada vähem erinevaid liitmike ning ühendusi võrreldes esialgse lahendusega. Samuti on lihtsustatud ühenduskohale juurdepääs paigaldamisel. Antud valiku kasuks rääkis ka asjaolu, et paneeli peamiseks otstarbeks saab olema kasutamine osana ripplae süsteemist ning eraldiseisvana kasutamisenä on pigem erandlik. Lisaks sellele, saab vähendada paneeli üldmõõtmeid kambri kõrguse arvelt. Kambri kõrgus on määratud sissepuhke sadula asetusega, mis omakorda oli varasemalt piiratud paneeli korpuse pealmise detailiga. Sadula teisele poole viimisega saab seda madalamale tuua ning sellest lähtuvalt ka kambrit. Samuti lihtsustab sadula asetuse muutmist üsna väike õhuhulk, mis kambrit läbib.

Vastavalt autori poolsetele ettepanekutele, viidi sisse muudatused. Sissepuhke sadula teise poole kinnitamiseks projekteeriti ümber paneeli külge kinnitatav kamber. Kaldpind kambri seinas asendati vastasküljel asunud vertikaalne küljega kuhu kinnitub sadul. Kuna õhu liikumise suund paneeli pinnale jäi samaks, siis tuli simulatsiooni näol läbi proovida uus lahendus, kuna õhu liikumise trajektoor muutus. Peale kambrisse jõudmist ning paneeli pinnale suunamist tuleb õhujoal läbida nii-öelda S- kujuline kurv.



Joonis 12 Esmane simulatsioon muudetud sadula asetusega paneelile

Esmase simulatsiooni tulemusest on näha märgatavat erinevust viimase lahendusega, kus sadul asus vastasküljel. Takistus õhu liikumisel läbi kambri suurenes ning sellest lähtuvalt on suurenenud ka õhujoo kiirus paneeli pinnal. Tulemuste analüüsist on näha, et õhujoo kiiruse kasvu põhjus on sarnaselt varasemate lahendustega tingitud väljaviske ava mõõtudest ning paigutusest. Kitsaim kohta kambri on korpuse ja kambri ühenduskoha ning kumerat pinna vahe. Õhu liikumise takistuse vähendamiseks läbi kambri, muudetakse kambri ning korpuse liite kohta ning kumerat pinda väljaviske avas liigutatakse paneeli keskosa poole.

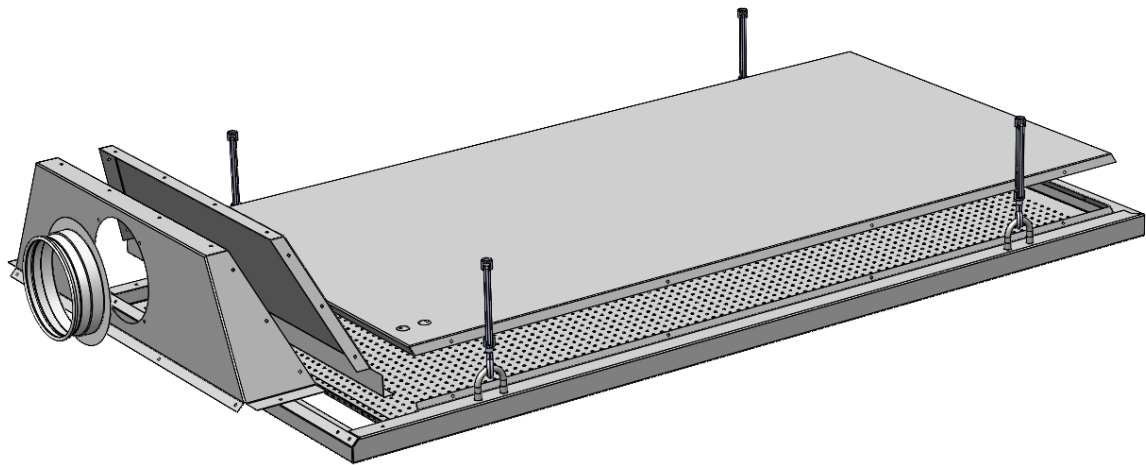


Joonis 11 Simulatsioon viimasele lahendusele

Oodatult paranes õhu liikumine läbi kambri ning kiirus paneeli välispinnal kahanes. Esialgse ning praeguse lahenduse võrdluses võib pidada antud tulemust piisavaks, võttes arvesse kahe lahenduse õhujoo liikumistrajektoori erinevust. Reaalsete tulemuste saamiseks testitakse antud lahendust edaspidiselt esmase prototüübil peal tegelikes tingimustes.

### 3.2.3 Paneeli korpus

Vastavalt varasemalt kirjeldatule, koosneb paneeli korpus neljast põhiliselt lehtmetailist valmistatavast detailist. Korpuse alumisest ning pealmiselt osast ning kambrit, mis omakorda koosneb kahest detailist. Paneeli korpuse projekteerimisel lähtuti koostamise keerukusest, saadaval olevast tootmisvõimekusest ning suurel määral õhu liikumisest läbi paneeli. Samuti võeti tähelepanu alla paneeli visuaalne välimus, mis paigaldamise järgselt näha jääb. Seetõttu projekteeriti detailid paneeli alumisest osast ülespoole vastavalt võimalusele nurga all, et ruumis viibijale oleks võimalikult vähe alt poolt näha.



Joonis 12 Paneeli korpuse detailid

Paneel põhineb korpuse alumisel detailil, mille külge kinnitatakse ülejäänud osad. Alumine detail on kujult karp, mille põhja pind on perforeeritud ning on ühest küljes kumeralt üles painutatud, tekitades pinna õhu liikumiseks ning varjates vaadet paneeli kambriks. Ülejäänud detailid kinnituvad karbi külgedel olevate painetele. Kambri poolsed külgmised painded kinnitatakse nurgast omavahel neetidega ning vastasküljes olevad painded seob omavahel korpuse peamine detail. Antud detaili eesmärgiks lisaks eelpool toodule on korpuse sisse paigaldatavate osade katmine. Kamber on jaotatud kaheks eelkõige tootmisvõimekuse tõttu ning koosneb eesmisest ning tagumisest detailist, mis omavahel kinnituvad neetidega. Need omakorda kinnituvad samuti neetidega korpuse alumise detaili painete alla. Detailide lahutuspinna valitud vastavalt, et lihtsustada detailide painutamist ja paneeli koostamist ning et kamber oleks piisavalt õhutihe.

Lisaks paneelile spetsiaalselt valmistavatele detailidele, sisaldab paneel mõningaid standardseid tooteid. Üheks neist on sissepuhke sadul, mis ühendab kambri ventilatsiooni torustikuga. Antud juhul kasutatakse 125 mm läbimõõduga sadulat, mis on valitud vastavalt kambrit läbivale õhuhulgale. Paneeli paigaldamiseks on sellele

lisatud U- kujulised kinnitusaasad koos riputitega, mis võimaldab paneeli paigaldada keermelattidega lae külge. Riputite eemaldamisel saab kasutada ka teisi paigaldusmeetodeid. Kinnitusaasad asuvad paneeli külgedest võrdsetel kaugustel. Kambri poolsete aasade asukoht on määratud kambri enda ning vask torustiku ühenduskohtade asukohaga. Kinnitusaasad kinnitatakse kambrist eemale kuna vastasel juhul jääks aasade kinnitus läbi paneeli avause näha ning samuti oleks raskendatud koostamisel nende kinnitamine.

### 3.2.4 Paneeli sisemus

Paneeli sisemuses paikneb selle kõige olulisem osa toimise seisukohalt, küttekeha, milleks sarnaselt passiivsete kütte- ning jahutuspaneelidega on vask torustik. Selle eesmärgiks on esmalt paneeli pinda vastavalt vajadusele, kas kütta või jahutada, mille tulemusel omakorda muutub temperatuur antud ruumis.

Vask toru geomeetria on valitud vastavalt, et jaotada sellelt kiirguv soojus- ning jahutusenergia ühtlaselt paneeli pinnale. Torustik koosneb pikki paneeli pinda suunatud torudest, mis on otstest omavahel liitmikega ühendatud, moodustades edasi- ning tagurpidise ahela paneeli sees. Esmase prototüübi jaoks valiti vastavalt ettevõtte tootmises saadaval olevatele materjalidele 1/2" mõõdus välisdiameetriga vasktoru koos samas mõõdus U- kujuliste liitmikega.



Joonis 13 Küttestorustik

Kütteahela ühenduskoht hoone süsteemiga muutus vastavalt sissepuhke sadula asetusega kambri. Algse idee järgi toodi ühenduskoht välja sadulaga samas suunas paneeli alumise detaili külgmise painde kaudu. Pärast sadula asendi muutmist, liigutati ühenduskoht vastasküljele kambri taha, tuues selle välja läbi paneeli korpuse pealmise



detaili. Antud asukoht on ajutine, lähtudes eelkõige tingimustest, kus paneeli esmast prototüüpi testima hakatakse.

Lisaks torustikule, paigaldatakse paneeli sisse isolatsioonimaterjal. Selle eesmärgiks on vähendada soojuse kiirgust lae suunas ning samas summutada ruumis tekkivat müra. Samal eesmärgil perforeritakse ka alumise korpuse detaili välispind. Isolatsioonimaterjalina on kasutusel 30 mm paksune Isoveri Isotec Climliner Slab Cleantec FI paneel. Antud toode on omaduste poolest nii hea soojusisolaator kui ka omab helisummutusomadusi. Lisaks on seda kerge töödelda ning paigaldada [15].

### 3.3 Paneeli kombineeritud teoreetiline jahutusvõimsus

Paneeli kombineeritud jahutusvõimsuse arvutamisel lähtutakse J.W. Jeongi ja S.A. Mumma 2003. aastal avaldatud uurimustööst. Töös täiendatakse varasemaid avaldatud arvutuskäike, et kombineerida kiirguslikku ning konvektiivset soojusülekanne summaarse soojusvoo arvutamiseks.

#### 3.3.1 Kiirguslik võimsus

Paneeli tegeliku ja maksimaalse võimaliku soojusülekanne suhe

$$F_R = \frac{M \cdot C_p \cdot (T_{fo} - T_{fi})}{A_p \cdot U_o \cdot (T_a - T_{fi})} \quad (3.1)$$

kus  $M$  – massivoolukiirus, kg/s,

$C_p$  – vee erisoojusmahtuvus, kJ/kg K,

$T_{fo}$  – vee väljumistemperatuur, °C,

$T_{fi}$  – vee sisenemistemperatuur, °C,

$A_p$  – paneeli pindala, m<sup>2</sup>,

$U_o$  – üldine soojusülekande tegur, W/m<sup>2</sup> K.

$$F_R = \frac{0,04 \cdot 4,187 \cdot (16 - 15)}{0,72 \cdot 400 \cdot (25 - 15)} = 5,82 \cdot 10^{-5}.$$

Paneeli pinna keskmine temperatuur

$$T_{pm} = T_{fi} + \frac{M \cdot C_p \cdot (T_{fo} - T_{fi})}{A_p \cdot F_R \cdot U_o} \cdot (1 - F_R), \quad (3.2)$$

$$T_{pm} = 15 + \frac{0,04 \cdot 4,187 \cdot (16 - 15)}{0,72 \cdot 5,82 \cdot 10^{-5} \cdot 400} \cdot (1 - 5,82 \cdot 10^{-5}) = 15 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Koefitsient  $z$

$$z \cong \frac{7}{(T_{oa} - 45)} \text{ juhul kui } 26 \text{ } ^\circ\text{C} \leq T_{oa} \leq 36 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (3.3)$$

kus  $T_{oa}$  – välisõhu temperatuur,  $^\circ\text{C}$ ,

$$z \cong \frac{7}{(26 - 45)} = -0,37.$$

Jahutamata pindade kaalutud keskmine temperatuur,

$$AUST \approx T_a - d \cdot z, \quad (3.4)$$

kus  $T_a$  – ruumi õhutemperatuur,  $^\circ\text{C}$ ,

$d$  – ruumi positsiooni indeks, ühe välisseinaga ruum,

$$AUST \approx 25 - 2 \cdot (-0,37) = 25,74 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Kiirguslik soojusülekanne

$$h_r = 5 \cdot 10^{-8} \cdot [(AUST + 273)^2 + (T_{pm} + 273)^2] \cdot [(AUST + 273) + (T_{pm} + 273)], \quad (3.5)$$

kus  $T_{pm}$  – paneeli pinna keskmine temperatuur,  $^\circ\text{C}$ ,

$$h_r = 5 \cdot 10^{-8} \cdot [(25,74 + 273)^2 + (15 + 273)^2] \cdot [(25,74 + 273) + (15 + 273)] = 5,05 \text{ W/m}^2 \text{ K}.$$

Kiirguslik võimsus

$$q_r = h_r \cdot (AUST - T_{pm}), \quad (3.6)$$

$$q_r = 5,05 \cdot (25,74 - 15) = 54,23 \text{ W/m}^2.$$

### 3.3.2 Konvektiivne ja kombineeritud võimsus

Korrektsoonifunktsioon

$$F_c = f(\Delta T, V, W) = \alpha_0 + \alpha_1(\Delta T) + \alpha_2(V) + \alpha_3(W) + \alpha_4(V \cdot W), \quad (3.7)$$

kus  $\Delta T$  – ruumi õhutemperatuuri ja paneeli pinna temperatuuri erinevus, °C,

$V$  – väljapuhutava õhu kiirus, m/s,

$W$  – väljaviske ava laius, m,

$\alpha_0; \alpha_1; \alpha_2; \alpha_3; \alpha_4$  – korrektsioonifunktsiooni koefitsient,

$$F_c = 0,28021 - 0,13931 \cdot 10 + 0,11416 \cdot 2 + 1,25013 \cdot 0,55 + 1,22058 \cdot 2 \cdot 0,55 = 1,16 \text{ W/m}^2 \text{ K.}$$

Konvektiivne soojusülekande tegur

$$h_c = F_c + 2,13 \cdot \Delta T^{0,31}, \quad (3.8)$$

$$h_c = 1,16 + 2,13 \cdot 10^{0,31} = 5,51 \text{ W/m}^2 \text{ K.}$$

Konvektiivne võimsus

$$q_c = h_c \cdot (T_a - T_{pm}), \quad (3.9)$$

$$q_c = 5,51 \cdot (25 - 15) = 55,1 \text{ W/m}^2.$$

Kombineeritud võimsus

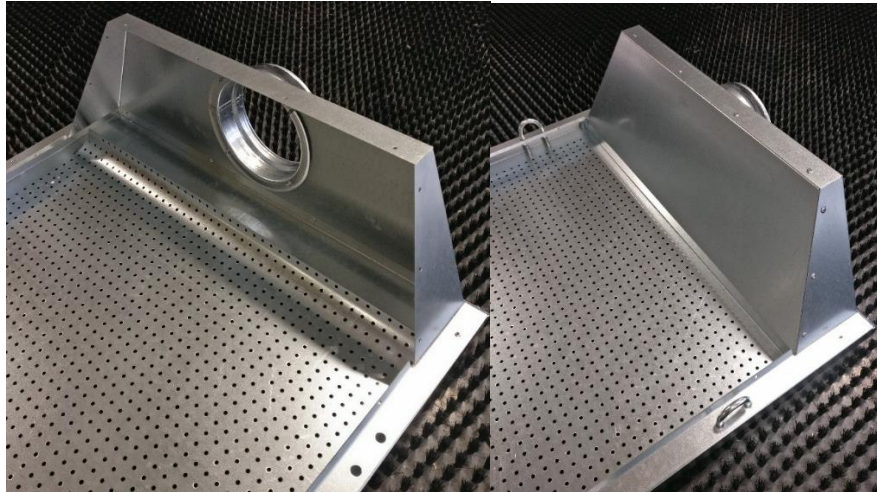
$$q_o = q_c + q_{rr}, \quad (3.10)$$

$$q_o = 55,1 + 54,23 = 109,33 \text{ W/m}^2.$$

Antud arvutuste põhjal võib teoreetiliselt järeldada, et jahutusvõimsuse suurenemine konvektiivse ning kiirgusliku soojusülekande kombineerimisel on väiksem kui algul eeldatud. Saadud tulemus on samas suurusjärgus ainult kiirguslikul põhimõttel töötavate paneelide jahutusvõimsusega. Teoreetiliste väärtuste kinnitamiseks viiakse läbi reaalsed mõõtmised labori tingimustes.

### 3.4 Esmane prototüüp

Paneeli esialgseks katsetamiseks tehti valmis neli erinevat esmast prototüüpi vastavalt autori joonistele. Kaks neist on 1200 mm pikad ning teised kaks 1800 mm. Mõlemat pikkust on nii perforatsiooniga kui ilma. Antud valiku alusel testitakse nii kütte- kui jahutusvõimsust erineva pikkusega paneelidel ning mürasummutuse toimimist ning selle mõju kütte- ning jahutusväljastusele. Erineva pikkusega paneelide mõõtmise järel saab teha eeldusliku seose võimsuse ning paneeli pikkuse vahel edasise arenduse eesmärgil.



Joonis 13 Paneeli kambri koostamine

Paneeli peamised detailid tehti kuumtsingitud kattega 1 mm paksusest teras lehtmaterjalist. Koostamine algas kambri detailide ühendamise. Esmalt kinnitati kambri eesmise külje külge 125 mm läbimõõduga sadul ventilatsiooni torustikuga ühendamiseks ning seejärel neediti need omakorda paneeli alumise korpuse detaili külge. Peale seda lisati kambri tagumine külge, mis kinnitus omakorda eesmise külge. Kambri detailide ühenduskohad tihendati silikooniga parema õhukindluse saavutamiseks. Samuti lisati korpuse külge riputusaaasad, mis kinnitusid seest poolt.



Joonis 14 Küttetorustiku kinnitamine

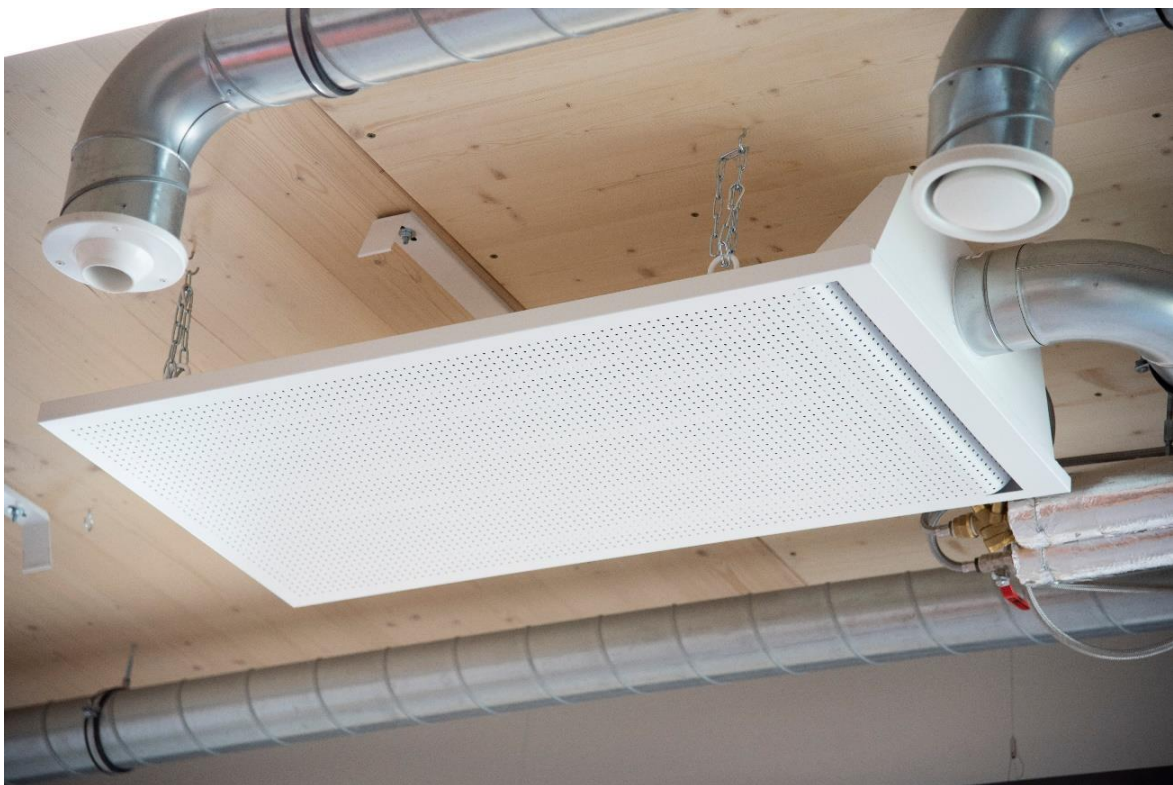
Järgmise sammuna paneeli koostamisel kinnitati korpuse sisse küttestorustik. Torustik oli kokku joodetud 1/2" mõõdus vask torudest ning mõlemasse toru otsa oli lisatud samas mõõdus väliskeere. Torustiku konstruktsiooni jäigemaks muutmise eesmärgil oli torude vahele lisatud samas mõõdus torust jupid, et spiraali torusid üksteise külge kinnitada. Vahejupid polnud seest poolt ühenduses põhi torustikuga. Torustik kinnitati korpuse alumise detaili sisse alumiiniumiteibiga, mis lisaks torustiku paigal hoidmisele isoleerib seda mõningal määral villa paneelist ning vähendab torult tulenevat kiirgust lae suunas.

Torustik kaeti pealt poolt Isoveri isolatsiooni paneeliga ning selle peale omakorda lisati korpuse pealmine detail, mis kinnitati neetidega alumise detaili külge. Koostamise järgselt kaeti paneel pulbervärviga.

## 4. PANEELIDE KATSETAMINE

Paneelide ventilatsiooni ning jahutusväljastusega seotud katsetused viidi läbi Tallinna Tehnikaülikooli sisekliima laboris ajavahemikus 14.10- 20.10.2021, ülikooli personaali poolt. Katsetused toimusid kolmes järgus. Esmalt viidi läbi suitsukatse, et näha paneelist väljuva õhujoa liikumist mööda paneeli pinda ja selle hajumist ruumi ning mõõta õhujoa kiirust paneeli pinnal lae all ning ruumi erinevates punktides. Teises ning kolmandas järgus teostati mõlemale paneeli pikkusele jahutusvõimsuse mõõtmised, mille käigus mõõdeti nii kiirguslikku kui kombineeritud jahutusvõimsust. Mõõdeti ainult jahutusvõimsust, kuna ruumide jahutusvõimsus on üldjuhul suurem küttevõimsusest, mistõttu piisava jahutusvõimsuse olemasolul saab eeldada vajaliku küttevõimsusega.

Labori lakke kinnitati järgemööda mõlemas pikkuses paneelid, korraga mõõdeti sama pikki paneele nii perforatsiooniga kui perforatsioonita välispinnaga. Paneelid ühendati ventilatsiooni- ning jahutussüsteemiga. Ventilatsiooni kaudu paneeli puhutav õhuhulk reguleeriti 30 l/s peale ning paneeli torustikku läbiva vedeliku vooluhulk oli 140 l/h.



Joonis 15 Paneel labori laes

1200 mm pikkade paneelide jahutusvõimsuse mõõtmise ajal oli ruumi keskmine õhutemperatuur 25,5 °C ning 1800 mm pikkade paneelide korral 26,9 °C. Sellest lähtuvalt tehti 1800 mm paneeli tulemustele ümberarvutus, kus logaritmilist

temperatuuride vahet ning astendustegurit kasutades saadi sarnaselt 1200 mm pikkadele paneelidele eeldatav jahutusvõimsus 25,5 °C juures. Astendustegurina kasutati Zehnderi Carboline-i tooteseeria spetsifikatsioonides väljatoodud väärtust.

Võttes arvesse eelnevat ning mõõteseadmete võimalikku ebatäpsust paneeli läbiva vedeliku alla 1 °C peale- ja tagasivoolude temperatuuride erinevuse mõõtmisel, siis kasutatakse saadud mõõtmistulemusi eelkõige lähtepunktina paneelide arendusprotsessis, saamaks tagasisidet konvektsiooni mõju kohta paneeli jahutusvõimsusele ning esialgseks võrdluseks turul konkureerivate lahendustega.

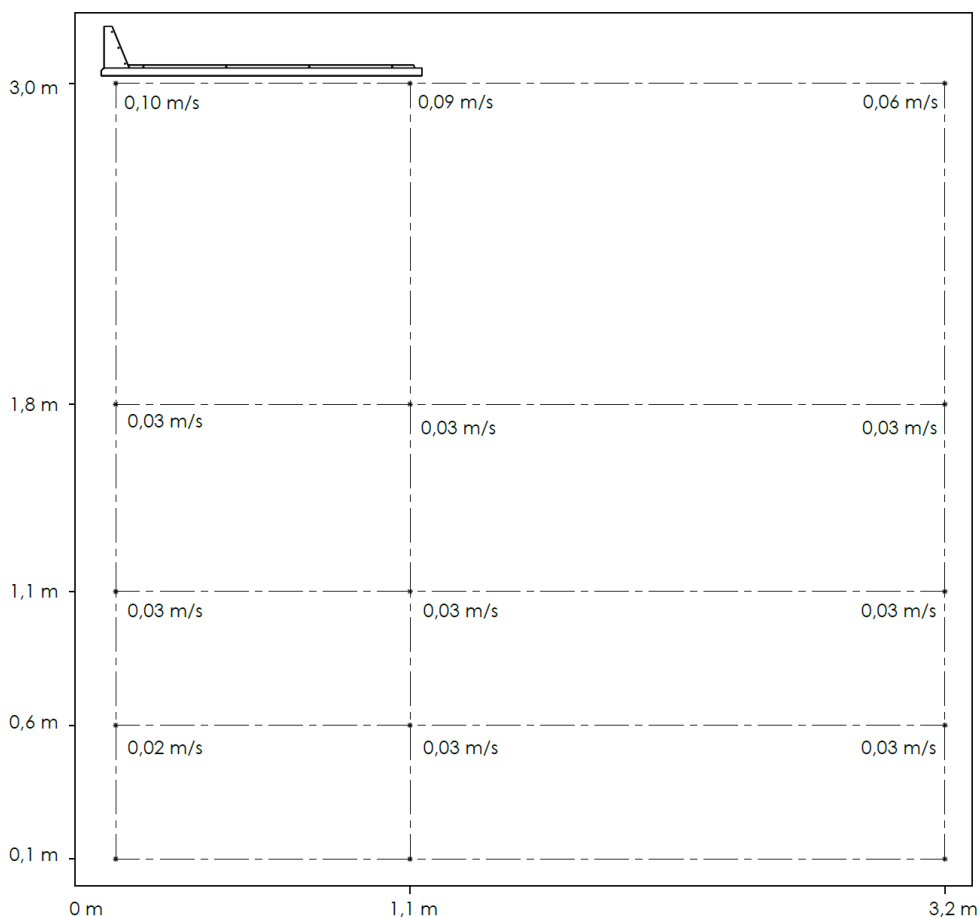
## **4.1 Õhujoa liikumine ja kiirus**

Esmases katsetamise järgus viidi paneelil läbi suitsukatse. Labori lakke kinnitatud paneel ühendati ventilatsiooni süsteemiga, mille kaudu puhuti õhk koos suitsuga paneeli, mis omakorda paneeli pinnale suunati. Suitsu eesmärgiks oli visualiseerida õhu liikumist paneelist väljumisel.

Katse käigus selgus, et peale paneelist väljumist liibus õhujuga edasi mööda selle välispinda. Kuna paneeli oli kinnitatud eraldiseisvana lakke, ilma kõrvaliste paneelideta, siis hakkas õhujuga samuti kiiruse languse toimetel peale paneeli pinna ületamist ruumi hajuma. Katse tulemused kinnitasid antud aspekti toimimist paneeli juures, mille eesmärgiks oli panna õhujuga liikuma mööda paneeli pinda ning hajutada peale seda ühtlaselt ruumi.

Katse teise poole eesmärgiks oli mõõta õhujoa kiirust paneelist väljumisel erinevates ruumi punktides. Nõute kohaselt on sisekliimaparameetritega ette nähtud õhu liikumise maksimaalne kiirus töö- ning õpikeskkondadele nii kütte kui jahutuse korral kolmele sisekliimaklassile. Jahutusolukorras on antud näitaja I klassi korral vastavalt 0,19 m/s ning kütte puhul 0,14 m/s. Samuti on antud näitajad kehtestatud eluruumidele, mille korral on vastav näitaja jahutusel 0,20 m/s ning küttel 0,10 m/s.

Õhu liikumise kiirust piiravate parameetrite eesmärgiks on vältida ruumides tõmbuse tunnet. Tõmbust kirjeldatakse kui lokaalset soojuslikku ebamugavust ning see on üheks ruumi sisekliimat kujundavaks teguriks. Eelpool toodud parameetrit on kehtestatud ruumi viibimistsoonile, mille all mõistetakse kõrguse mõistes ala, mis jääb põrandast vähemalt 1,8 m kõrgusele [16].



Joonis 16 Paneelist väljuva õhujoa kiirus ruumi erinevates punktides

Ülal toodud graafikul on esitatud õhu liikumise kiiruste mõõtmisel saadud tulemused. Väljatoodud kiirused on keskmised väärtused mõõteperioodi jooksul saadud tulemustest. Iga mõõtepunkti juures fikseeriti tulemused viiel erineval kõrgusel. Esimene punkt asetseb paneeli kinnituskõrgusel 3 meetri juures. Järgnevad punktid fikseerisid õhu liikumise kiirust viibimistsoonis, alates 1,8 meetrist. Paneeli pikkuse mõistes asetsesid mõõtepunktid kolmel erineval kaugusel. Esimene punkt oli paneeli välispinna avause juures, milles õhk välja puhutakse, järgmine paneeli otsas ning viimane mõni meeter paneelist eemal. Sellest lähtuvalt oli õhu liikumise kiirust mõõtvaid punkte kokku 15.

Vastavalt oodatule oli õhu liikumise kiirus suurim paneeli avause juures, vastavalt 0,10 m/s. Paneeli lõpus oli kiirus vähenenud vaid 0,01 m/s võrra ning mõni meeter eemal juba ligi poole võrra. Viibimistsoonis olid õhu liikumise kiirused üsna võrdsed, 0,2- 0,3 m/s vahel, mille erinevus võis tingitud olla mõõtetäpsusest niivõrd madala kiiruse juures. Mõõtmise tulemustest võib järeldada, et antud õhuhulga juures on õhu liikumise kiirused madalamad ettenähtud normidest. Samuti ei ületanud piirväärtust ka kõrgeim mõõdetud tulemus paneeli avause juures, mistõttu pole antud omaduse tõttu määrav ka paneeli paigaldamiskõrgus.



## 4.2 Kiirguslik jahutusvõimsus

### 4.2.1 1200 mm pikk paneel

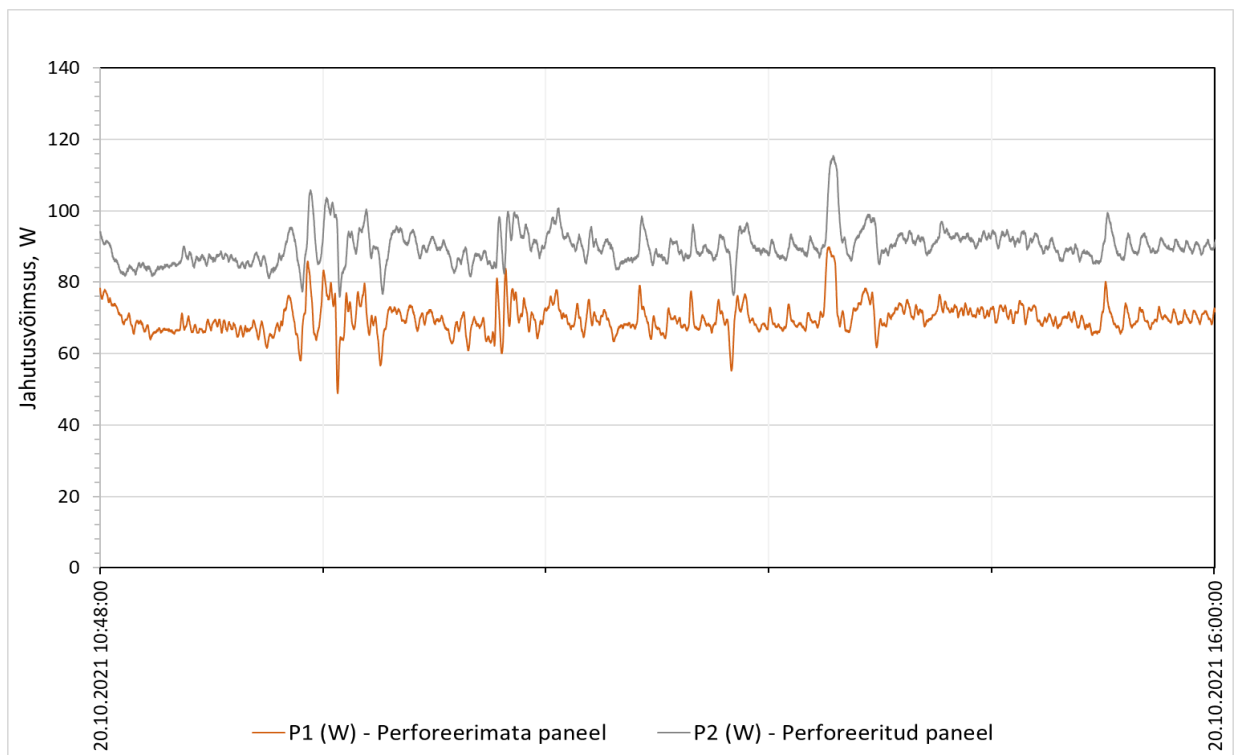
Paneeli kiirgusliku jahutusvõimsuse mõõtmise ajaks peatati ventilatsiooni õhuvool paneeli pinnale ning seda läbis vaid jahutusmasinast tulev vesi.

Jahutusvõimsuse mõõtmisel lähtuti valemist:

$$P = M \cdot C_p \cdot \rho_v \cdot (T_{fo} - T_{fi}) \quad (4.1)$$

kus  $\rho_v$  – vee tihedus, kg/m<sup>3</sup>.

Läbi selle arvatati, kui suur oli soojusenergia vahetus ruumiga vedeliku paneelist läbi voolamise jooksul. Kuna suurem osa tegureid oli mõõtmise ajal konstantsed, siis kõikumised jahutusvõimsuses olid põhjustatud paneeli läbiva vedeliku temperatuuri muutustest.



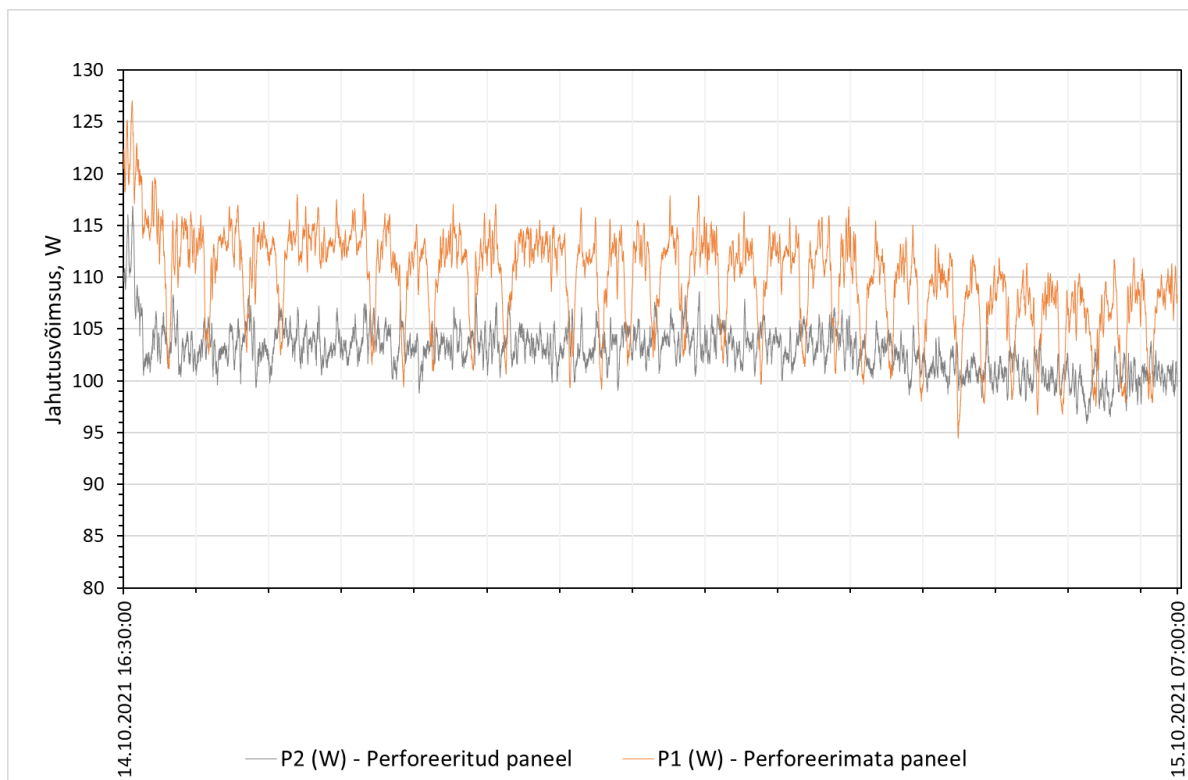
Joonis 17 1200 mm pika paneeli kiirgusliku jahutusvõimsuse mõõtmine

1200 mm pikkade paneelile graafikult on näha, et jahutusvõimsus muutus mõningal määral kogu mõõteperioodi jooksul. See võis olla tingitud nii jahutusmasinast, kui ka mõõteseadmetest, mis vedeliku temperatuuride erinevust tuvastasid paneeli sisenemisel ja väljumisel. Selgelt on eristatav perforeeritud ning perforeerimata

välispinnaga paneelide jahutusvõimsuste erinevus. Samuti on graafikult näha, et jahutusvõimsus muutus paneelides sama aegselt. Keskmine jahutusvõimsus perforeerimata välispinnaga paneelil mõõteperioodi jooksul oli 69,9 W ning perforeeritud paneelil 89,9 W, mis on vastavalt 97,1 W/m<sup>2</sup> ning 124,9 W/m<sup>2</sup> kohta paneeli peale- ja tagasivoolava vee keskmise temperatuuri ning ruumi õhutamperatuuri erinevuse  $\Delta t=10$  °C juures.

#### 4.2.2 1800 mm pikk paneel

Mõlema paneeli mõõtmisel mõõdeti esmalt kombineeritud jahutusvõimsust ning seejärel ainult kiiruslikku. Sellest lähtuvalt on antud graafikul eristatav ventilatsiooni väljalülitamise aeg, millest alates paneeli jahutusvõimsus langema hakkas. Mõned minutid peale seda jahutusvõimsus graafik stabiliseerus antud suurusjärgus. Perforeeritud paneeli jahutusvõimsuse muutumine mõõteperioodi jooksul oli antud mõõtmisel väiksem võrreldes perforeerimata paneeliga, mille mõõtmisel on näha suuremaid kõikumisi, mis ei ühti teise paneeliga. Perforeerimata paneeli jahutusvõimsuse graafikult on samuti märgata perioodilist kõikumist, mille ajal paneelide jahutusvõimsus on samas suurusjärgus.



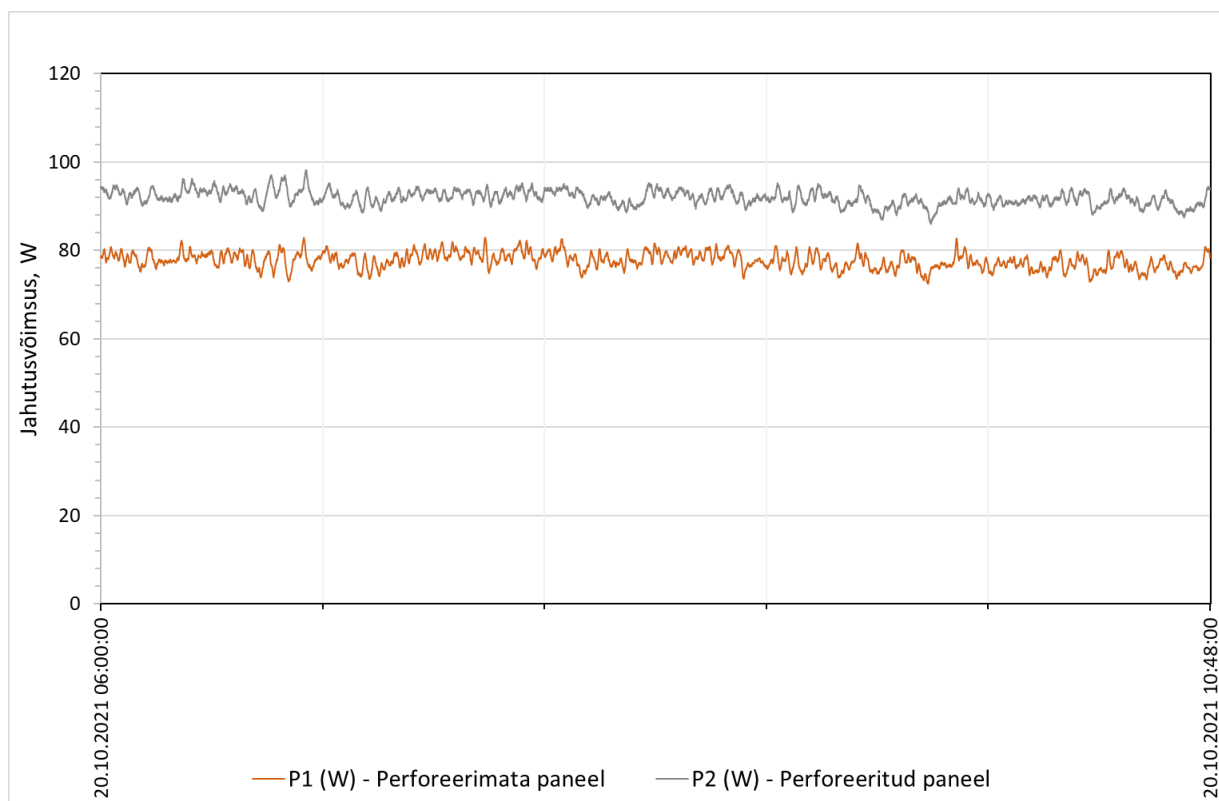
Joonis 18 1800 mm pika paneeli kiirusliku jahutusvõimsuse mõõtmine

Antud mõõtmisel oli suurem jahutusvõimsusega perforatsioonita paneel, mille keskmine jahutusvõimsus kogu mõõteperioodi jooksul oli 110 W, perforatsioonitud paneelil oli sama näitaja 102,9 W  $\Delta t = 11 \text{ }^\circ\text{C}$  juures. Antud suurused on paneeli pindalast lähtudes vastavalt  $101,9 \text{ W/m}^2$  ning  $95,3 \text{ W/m}^2$ .

## 4.3 Kombineeritud jahutusvõimsus

### 4.3.1 1200 mm pikk paneel

Kombineeritud jahutusvõimsuse mõõtmiseks lülitati sisse ventilatsioon, mille kaudu puhuti õhuvool paneeli pinnale, et suurendada selle soojusülekanne. Mõõtmise perioodil oli paneeli sisepuhutava õhu keskmine temperatuur mõne kraadi võrra madalam ruumi õhutemperatuurist, vastavalt perforatsioonita paneelil  $22 \text{ }^\circ\text{C}$  ning perforatsioonitud välispinnaga paneelil  $21,7 \text{ }^\circ\text{C}$ .



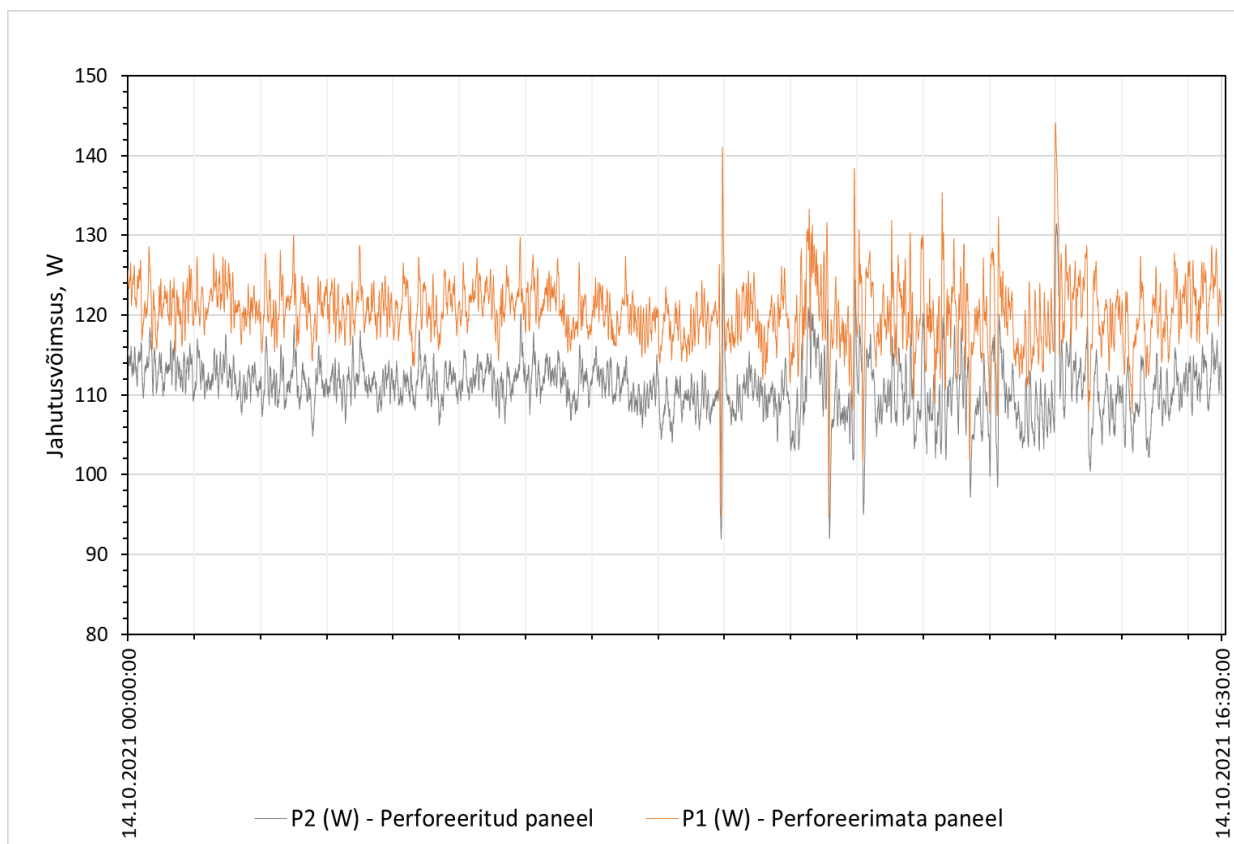
Joonis 19 1200 mm pika paneeli kombineeritud jahutusvõimsuse mõõtmine

Mõlema paneeli jahutusvõimsuste graafik oli kogu mõõteperioodi jooksul võrdlemiseni stabiilne võrreldes sama paneeli ainult kiirusliku jahutusvõimsuse mõõtmisega ning sarnaselt eelmisele mõõtmisele oli kõrgema jahutusvõimsusega perforatsioonitud paneel. Keskmine mõõdetud jahutusvõimsus antud perioodi kestel oli perforatsioonita paneelil

77,7 W ning perforereeritud paneelil 91,9 W, mis on vastavalt  $107,9 \text{ W/m}^2$  ning  $127,6 \text{ W/m}^2 \Delta t = 10 \text{ }^\circ\text{C}$  juures.

### 4.3.2 1800 mm pikk paneel

1800 mm pikkade paneelide kombineeritud jahutusvõimuste mõõtmisel oli sissepuhutava õhu keskmine temperatuuri samas suurusjärgus, perforereerimata paneelil  $22,3 \text{ }^\circ\text{C}$  ning perforereeritud paneelil  $21,7 \text{ }^\circ\text{C}$ .



Joonis 20 1800 mm pika paneeli kombineeritud jahutusvõimsuse mõõtmine

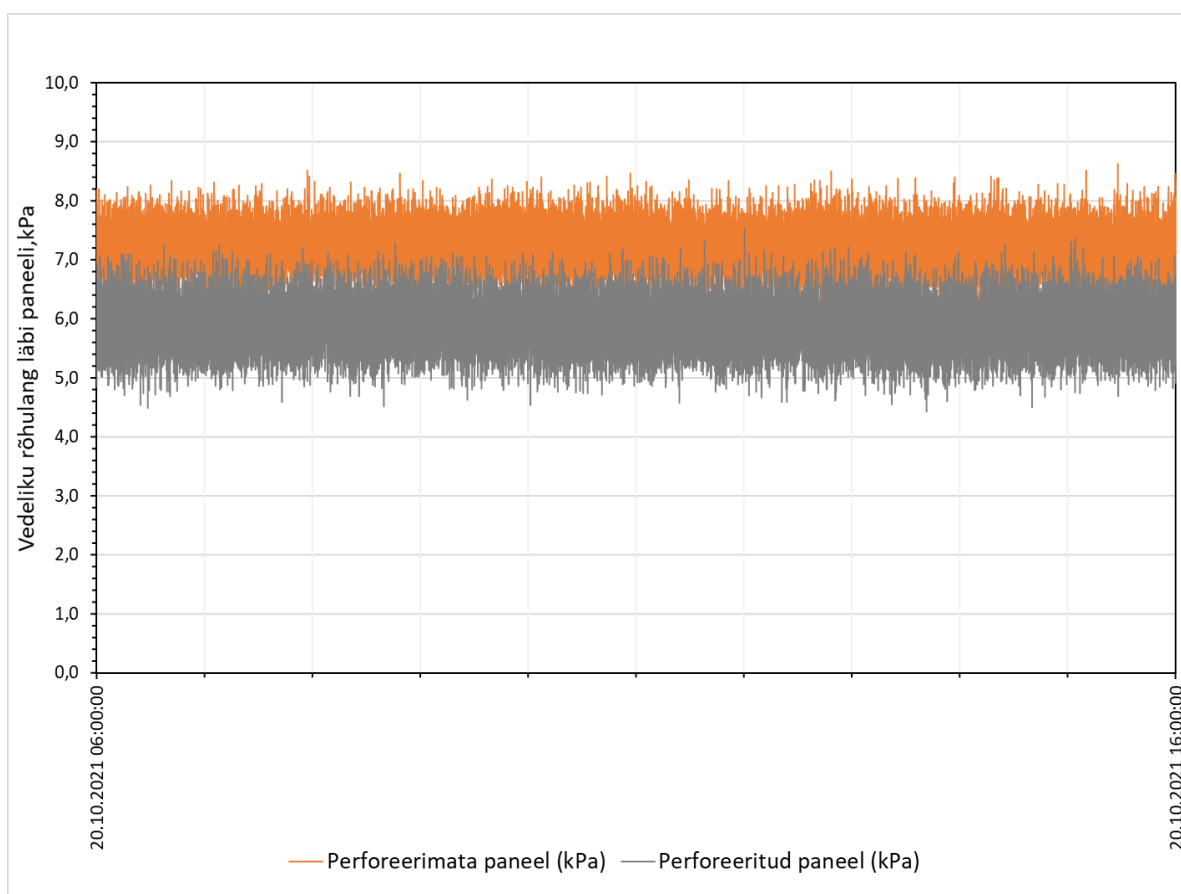
Mõõteperioodi keskel oli paneelide jahutusvõimsuses suuremad kõikumised sarnaselt samade paneelide kiirgusliku jahutusvõimsuse mõõtmisele. Samuti on mõõteperioodi teises pooles märgata paneelide jahutusvõimsuste hetkelist kattumist. Sarnaselt kiirguslikule jahutusvõimsuse mõõtmisele oli suurema keskmise jahutusvõimsusega antud mõõtmisel perforereerimata paneel, vastavalt  $120,4 \text{ W}$  ning perforereeritud paneel  $110,9 \text{ W}$ . Viies antud suurused seosesse paneeli pindalaga on need vastavalt  $111,5 \text{ W/m}^2$  ning  $102,7 \text{ W/m}^2 \Delta t = 11 \text{ }^\circ\text{C}$  juures.

## 4.4 Vedeliku rõhulang

### 4.4.1 1200 mm pikk paneel

Paneeli sees olev torustiku spiraal kontuur koosneb 1/2" läbimõõdus vask torust, mis on kogupikkusega 6,8 m 1200 mm pika paneeli korral. Mõõtmise perioodil oli torustikku läbiva vedeliku vooluhulk 140 l/h, mille jooksul fikseeriti ka paneeli läbiva vedeliku rõhulang.

Mõõtmistulemustest on näha, et rõhulang püsis mõlemas paneelis mõõtmisperioodi jooksul ühtlasena ning kõikumised toimusid samas vahemiku. Samas paneelide rõhulang erines teineteisest ligikaudu 1,5 kPa võrra, kuigi mõlemas paneelis oli identne torustik. Erinevus oli suure tõenäosusega tingitud mõõteseadmetest tulenevast ebatäpsusest. Allpool toodud graafikul on esitatud paneelide rõhulang jahutusvõimsuse mõõtmise ajal.



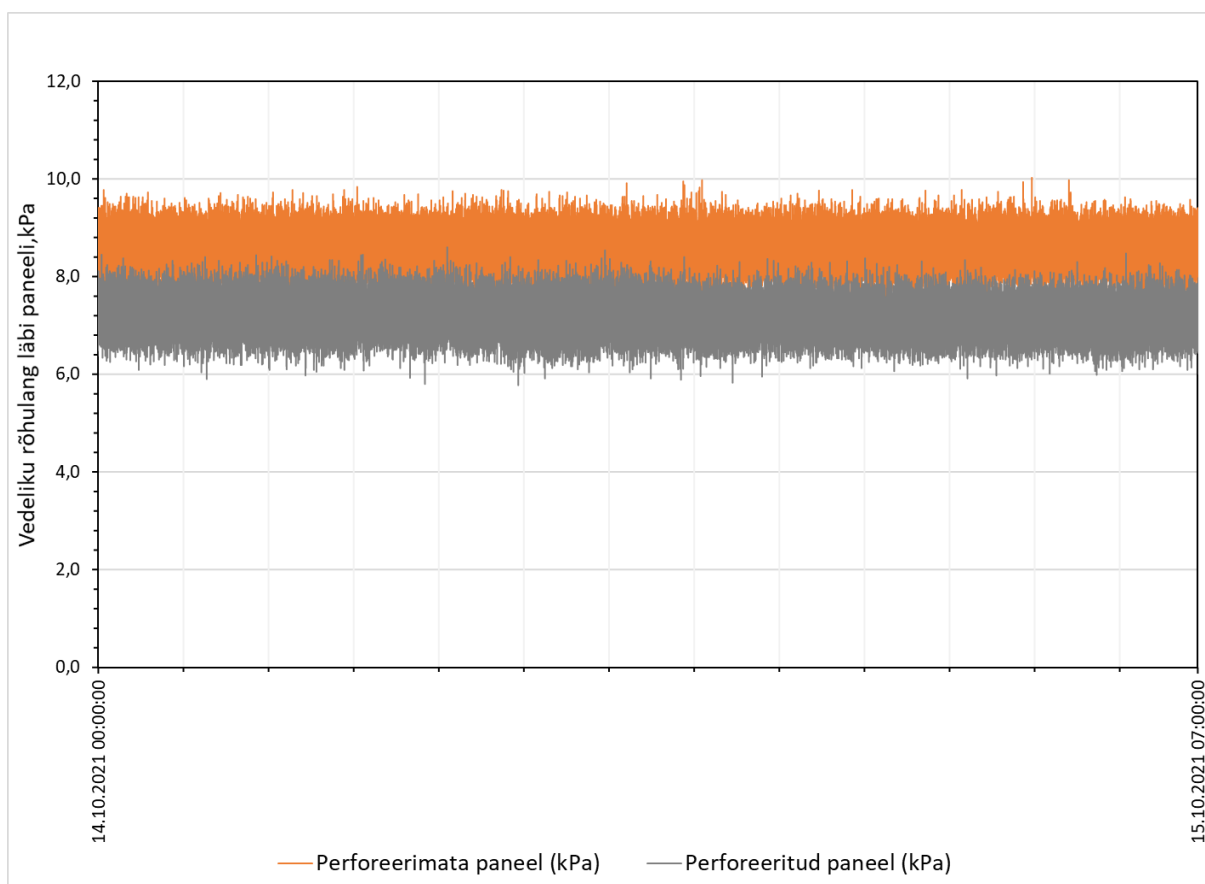
Joonis 21 1200 mm pikka paneeli läbiva vedeliku rõhulangu mõõtmine

Paneelide keskmine summaarne vedeliku rõhulang paneeli läbides oli 6,6 kPa kogu mõõteperioodi kestel.

#### 4.4.2 1800 mm pikk paneel

1800 mm pika paneeli jahutusvõimsuse mõõtmisel mõõdeti sarnaselt eelmisele paneelile ka rõhulangu. Paneeli torustikku läbiva vedeliku voolhulk oli samuti 140 l/h ning torustiku diameeter identne eelnevaga. Vask kontuuri kogupikkus antud paneelil oli 10,4 m.

Vedeliku rõhulang mõlemas paneelis oli võrdlemiseni ühtlane, kõikudes kindlas vahemikus kogu mõõteperioodi jooksul, sarnaselt lühema paneeliga. Samuti erinesid paneelide rõhulangud teineteisest sama suurusjärgu võrra nagu eelmise paneeli mõõtmisel. Perforeerimata paneeli vedeliku rõhulang oli ligikaudu 1,5 kPa kõrgem, mis kinnitab eelneva paneeli tulemustest tehtud järeldust mõõtetulemuste erinemisest identsete torustikega paneelidel, mis on tingitud mõõteseadmetest tulenevast ebatäpsusest.



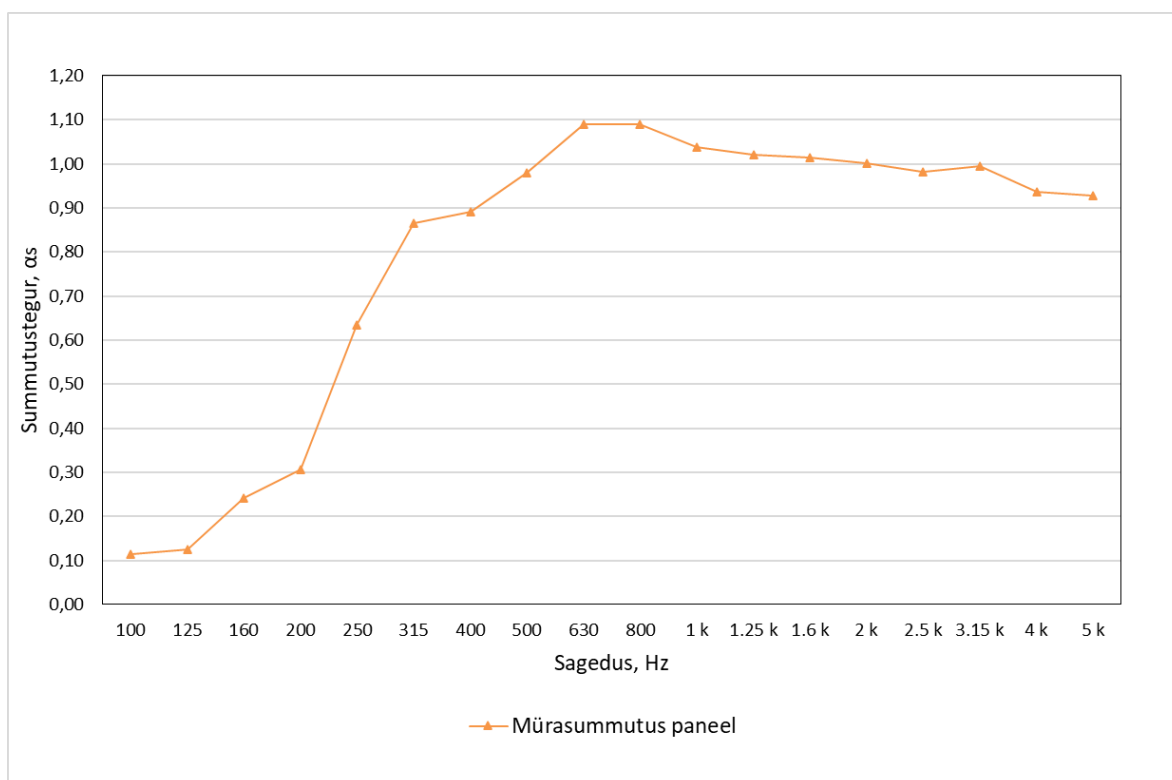
Joonis 22 1800 mm pikka paneeli läbiva vedeliku rõhulangu mõõtmine

Graafikul on esitatud mõlema paneeli rõhulangu mõõtmistulemused antud perioodi jooksul. Antud paneelide keskmine summaarne vedeliku rõhulang läbi paneeli oli 7,9 kPa kogu mõõteperioodi jooksul.

## 4.5 Mürasummutus

Lisaks paneeli jahutusvõimsuse ning ventilatsiooni mõõtmistele, võeti tähelepanu alla ka paneeli võime summutada müra. Paneeli välispinna perforatsiooni ning selle sisemusse lisatud villapaneeli eesmärgiks oli lisada paneelile mürasummutav omadus. Selle toimimise kindlaks tegemise ning hetke olukorra määramiseks viidi läbi vastav mõõtmine. Paneeli mürasummutuse mõõtmine teostati Tallinna Tehnikaülikooli akustikalaboris.

Mõõtmiseks kasutati antud paneelile identsete mürasummutavate omaduste ning konstruktsiooniga paneele. Laboris katsetati korraga kolme 1500x500 mm mõõdus paneeli, mis moodustasid 2,25 m<sup>2</sup> ala. Mõõtmisel määrati summutustegur  $a_s$  kolmandikoktaavi kesksagedustel 100- 5000 Hz ning sellest lähtuvalt kaalutud summustegur  $a_w$ . Paneeli välispind oli perforeeritud 3 mm läbimõõduga avadega, mis asetsesid 30 mm kaugusel paneeli servast. Perforeering moodustas 49% vaba ristlõike pindala. Paneeli sisemusse oli paigaldatud helisummutavate omadustega Isoveri klaasvillaplaat.



Joonis 23 Summutustegur erinevate sageduste juures

Graafikul esitatud tulemustest on näha saavutatud mürasummutustegurite väärtusi vastavate sageduste juures. Mõõtmistulemuste põhjal määrati kaalutud summutustegur  $a_w$ , mille väärtus antud paneelid on 0,9.

## 5. KATSETUSTE TULEMUSTE JÄRELDUSED

### 5.1 Konvektsiooni mõju jahutusvõimsusele

Töö üheks eesmärgiks oli katsetada konvektsiooni mõju kiirguslikel kütte- ning jahutuspaneelidel kombineerides seda kiirgusliku soojusülekandega eesmärgiga suurendada kütte- ning jahutusvõimsust. Lähtudes saadud jahutusvõimsuste ning õhu liikumise kiiruse mõõtmistulemustest saab teha praktilised järeldused eelnevale teoreetilisele taustale.

1200 mm pikkade paneelide jahutusvõimsuse mõõtmisel oli perforeeritud ja perforeerimata paneelide jahutusvõimsuste erinevus üle 20 W/m<sup>2</sup>. Perforeerimata paneelil korral kasvas jahutusvõimsus ventilatsiooni lisamisel 11%. Kuigi perforeeritud paneeli jahutusvõimsus oli kõrgem, siis kiirgusliku ning kombineeritud jahutusvõimsuse erinevus oli vaid ligikaudu 2%. Kokkuvõtlikult oli antud pikkuses paneelidel keskmine kasv jahutusvõimsuses 6,7% konvektsiooni lisamisel  $\Delta t = 10$  °C juures.

1800 mm pikkade paneelide korral olid mõõtmistulemused mõnevõrra ühtlasemad. Sarnaselt eelmisele paneelil, suurenes ventilatsiooni lisamisel rohkem perforeerimata paneeli jahutusvõimsus, mis antud mõõtmisel sai ka üldpildis kõrgema tulemuse. Kasv jahutusvõimsuses oli sellel paneelil 9,4%. Perforeeritud paneeli korral kasvas jahutusvõimsus 7,8%, mis teeb kahe paneeli keskmiseks jahutusvõimsuse tõusuks 8,6%  $\Delta t = 11$  °C juures.

J.W. Jeongi ja S.A. Mumma 2003. aasta uurimustöös välja toodud graafikul on antud  $\Delta t$  ning esialgse õhu liikumise kiiruse juures konvektsiooni mõju jahutusvõimsuse kasvule ligikaudu 7- 8% [14]. Võttes arvesse kõikumisi mõõtmistulemustes, võib sellest lähtuvalt järeldada, et saadud tulemused on samas suurusjärgus uurimistöös esitatuga. Märkimisväärne on, et antud tulemuste saavutamisel oli õhu liikumise kiirus paneeli pinnal tunduvalt madalam simulatsioonidel saadud väärtustega sama õhuhulga juures. Sellest lähtuvalt võib järeldada, et õhu liikumise kiirus paneelist väljumisel väheneb tunduvalt kiiremini, kuid püsib samas suurusjärgus paneeli pinda ületades. Samuti oli märgata konvektsiooni suuremat mõju perforeerimata paneelide jahutusvõimsuse kasvul.

Saadud tulemustest lähtudes saab kinnitada varasemas uurimustöös väljatoodut ning kiirgusliku ning konvektiivse soojusülekande kombineerimisel saadud kasvu kütte- ning jahutusvõimsuses. Üldpildis polnud saadud konvektiivse jahutusvõimsuse osakaal siiski



märkimisväärne paneeli summaarse jahutusvõimsuse juures. Lähtudes paneeli kaudu ruumi sisse puhutavast õhuhulgast ning toote eeldatavast paigaldamisest ja õhu liikumise kiirustest viibimistsoonis, ei saa nii õhuhulka kui liikumise kiirust märgatavalt muuta konvektsiooni osakaalu tõstmise eesmärgil. Tehtud järeldusest võetakse arvesse paneeli edasi arenduse planeerimisel.

## 5.2 Tulemuste võrdlus konkureerivate toodetega

Laekütte- jahutuspaneeli katsetamise üheks eesmärgiks oli saada esialgsed tulemused, millega võrrelda arendatavat paneeli juba turul saadaval olevate lahendustega ning sellest lähtuvalt teha edasised otsused, mis omadused vajaksid täiustamist. Võrdluseks võetakse töö alguses välja toodud kiiruslikud paneeli Zehnder Carboline ning Lindab Atrium Plana HC, mis ühtivad eelkõige arendatava tootega. Võrdluse all on eelkõige jahutusvõimsus, kuid ka vedeliku poole rõhulang ning paneelide võime summutada ruumi müra.

### 5.2.1 Kiirusliku ning kombineeritud jahutusvõimsuse võrdlus

Zehnder Carboline jahutusväljastuse andmete tabeli puhul polnud välja toodud paneeli pealispinna tüüpi, mistõttu võrreldakse paneelide jahutusväljastust perforatsioonita paneelide korral. Kuna töös käsitlemist leidvate paneelide jahutusvõimsuste mõõtmise korral erines  $\Delta t$  väärtus, siis on võrdluses välja toodud jahutusvõimsused mõlema väärtuse korral. Samuti on võrdluses esitatud andmed nii kiirusliku kui kombineeritud jahutusvõimsuse kohta antud paneelil.

Tabel 2 Jahutusvõimsuste võrdlus

Toode	Jahutusvõimsus, W/m <sup>2</sup> ( $\Delta t = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ )	Jahutusvõimsus, W/m <sup>2</sup> ( $\Delta t = 11 \text{ }^\circ\text{C}$ )
Zehnder Carboline [7]	109,7	121,3
Lindab Atrium Plana HC [11]	108,3	120
Kiiruslik soojusülekanne	97,1	101,9
Kombineeritud soojusülekanne	107,9	111,5

$\Delta t = 10 \text{ }^\circ\text{C}$  korral erinevad konkureerivad paneelid üksteisest vaid ligikaudu  $1 \text{ W/m}^2$  võrra. Paneeli kiirusliku jahutusvõimsuse mõõtetulemus on neist omakorda ligi 11% madalam, see- eest kombineeritud jahutusvõimsus antud  $\Delta t$  juures on samas suurusjärgus kahe eelneva kiirugspaneeliga.  $\Delta t = 11 \text{ }^\circ\text{C}$  korral on turul saadaval olevad lahendused oodatult sama võrdsed jahutusväljastuselt. Töös kajastatav paneeli erinevus on seekord juba suurem, erinedes ligikaudu 15% võrra eelnevatest. Kombineeritud jahutusvõimsuse erinevus on ligi 7%.

## 5.2.2 Rõhulangu võrdlus

Kiirguspaneelide korral määrab rõhulang ära paneelide hulga, mida tohib üksteise järel ühendada, mistõttu on selle väärtus määrava tähtsusega paneelide projekteerimisel ning valikul. Rõhulangude võrdluseks on tabelis välja toodud kõigi kolme paneeli rõhulangud 140 l/h vooluhulga juures mõlemal paneeli pikkusel. Konkureerivate paneelide puhul on vask torustik 10 mm läbimõõduga võrdluseks arendavatele paneelidele, mille puhul oli esimese prototüübi juures kasutusel 1/2" ehk 12,7 mm läbimõõdus toru. Torustiku pikkusi pole võrdlevatel paneelidel välja toodud, kuid toodete graafilistelt materjalidelt võib eeldada, et torustiku kontuurid ühtivad.

Tabel 3 Rõhulangu võrdlus

Toode	Rõhulang, kPa (1200 mm pikk paneel)	Rõhulang, kPa (1800 mm pikk paneel)
Zehnder Carboline [7]	3,5	6,5
Lindab Atrium Plana HC [11]	3,9	5,7
Arendatav laekütte- jahutuspaneel	6,6	7,9

1200 mm pikkadel paneelidel on Zehnderi ning Lindabi toodete rõhulang antud vooluhulg

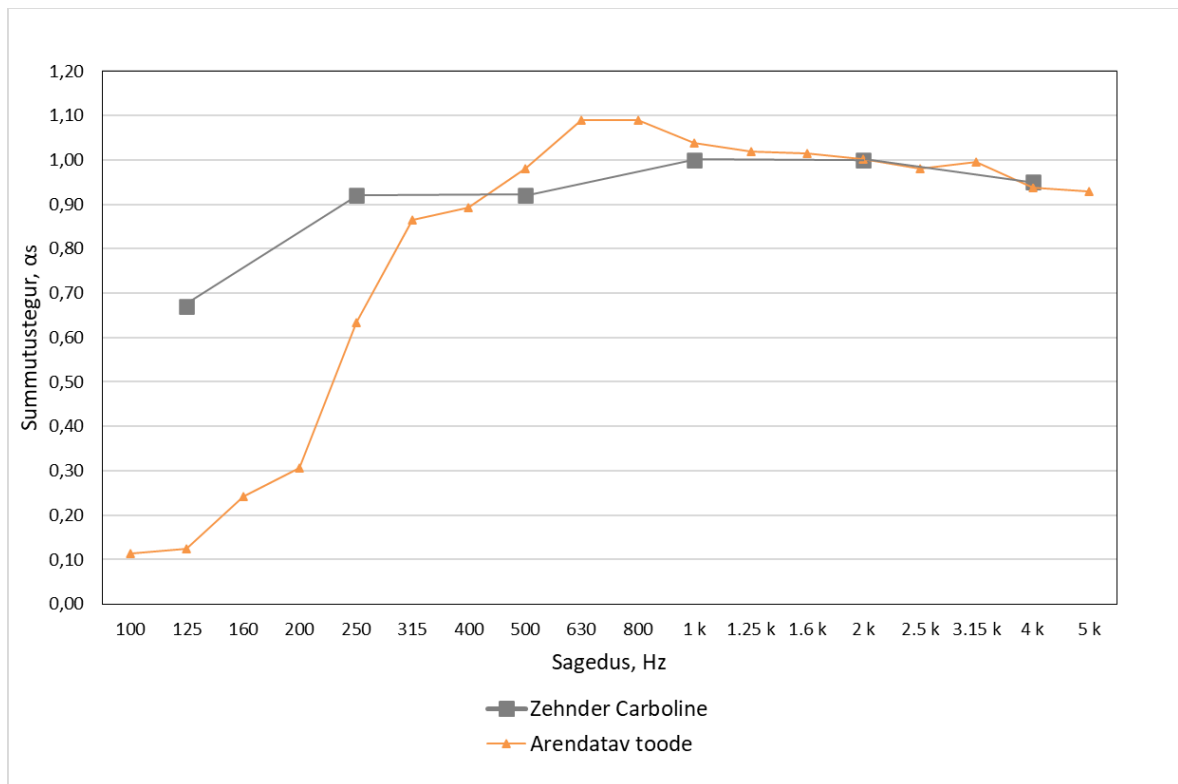
a juures samas suurusjärgus 3,5- 4 kPa vahemikus. Arendatava toote mõõdistamisel saadud keskmiseks tulemuseks oli 6,6 kPa, mis erineb eelnevatest ligikaudu poole võrra. 1800 mm paneeli puhul erinevad konkureerivad lahendused teineteisest ligi 1 kPa võrra ning töös kajastatav paneel on neist omakord vastavalt 1,4 ning 2,2 kPa kõrgem.

## 5.2.3 Mürasummutuse võrdlus

Mürasummutavate omaduste võrdluseks olid vastavad andmed välja toodud vaid Zehnderi tootelehel, mistõttu on allpool toodud graafikul võrdluseks esitatud vaid selle väärtused. Võrdluseks on valitud kõige sarnasema perforatsiooni ning konstruktsiooniga variant. Antud paneeli perforatsioon koosneb 1,5 mm läbimõõduga avadest, mis asetsevad 10 mm kaugusel paneeli servast ning moodustavad 22% vaba ristlõike pinna. Isolatsiooniks on kasutatud fooliumil mineraalvilla [7].

Zehnderi poolt välja toodud andmetel oli summutustegurid esitatud vaid teatud vahemike tagant. Graafikult on näha, et madalamate sageduste juures on selle summutustegur tunduvalt kõrgem mõõdetud paneelist. Alates sagedusest 500 Hz võrdsustuvad paneelide summutustegurid ning mõningate sageduste juures on antud

paneeli summutusteguri väärtus isegi kõrgem. Eeskätt madalamate sageduste tõttu on konkureeriva paneeli üldine kaalutud summutustegur 0,1 võrra kõrgem ehk  $a_w = 1,00$ .



Joonis 24 Summutustegurite võrdlus [7]

### 5.3 Ruumide näidisarvutused

Töös arendavate paneelide jahutusvõimsuste tulemustest lähtuvalt on antud alapeatüki eesmärgiks teha mitme erineva ruumi põhjal näidisarvutus, võrdlemaks antud paneelide paigaldamisega seotud kulusid alternatiivsete lahendustega ruumide kütmiseks ja jahutamiseks ning ventilatsiooni sissepuhkeks. Töö esimese peatüki lõpus väljatoodud jahutusvõimsuste võrdlusest oli näha aktiivpalkide tunduvalt suuremat kütte- ning jahutusväljastust. Sellest lähtuvalt tehakse antud töö osas näidisarvutus kolme konkreetse ruumi põhjal, mille kütte- ja jahutusvõimsus, ventilatsiooni sissepuhke õhuhulk ning eeldatav kütte ja jahutuse lahendus on teada, selgitamaks, kus antud paneele oleks majanduslikumalt mõistlikum kasutada alternatiivsete toodete ees. Arvutused sisaldavad konkreetse kütte- või jahutuselemendi hinda ning selle kasutamiseks vajalikke lisasid. Paneelide puhul lähtutakse eeldatavast toote hinnast. Esimese ruumi puhul on tegemist avatud büroo pinnaga, mille aknad asetsevad ruumi lõunaküljel. Teise ruumi puhul on tegemist hoone põhjaküljel paikneva kabinetiga ning kolmas ruum asetseb haigla keskel, millel aknad välisfassaadile puuduvad.

### 5.3.1 Avatud büroo

Esimene ruum on pindalalt 75 m<sup>2</sup> suurune avatud büroo ruum (Lisa 1), mis paikneb hoone lõunaküljel. Ruumi asetuse tõttu on selle jahutusvõimsus ligi kaks korda suurem küttevõimsusest, vastavalt 7200 W ning 3360 W, mis lähtudes ruumi pindalast on 96 W/m<sup>2</sup> ning 44,8 W/m<sup>2</sup>. Ruumi sisse puhutav õhuhulk on arvestuslikult 150 l/s. Antud ruumi puhul on töös käsitlemist leidvate paneelidega võrreldavaks lahenduseks valitud kütte puhul radiaatorid ning jahutusel aktiivpalk.

Tabel 4 Avatud büroo kütte radiaatoriga ning jahutus aktiivpalgiga [17] [18] [19]

Toode	Ühiku hind	Kogus	Maksumus, €
Radiaator 1120 W	251,5	3	754,6
Radiaatori termostaat ventiil	16,9	3	50,7
Ajamiga termostaat	35,5	3	106,5
Radiaatori H-ventiil	11,4	3	34,2
Tasakaalustusventiil	60	1	60
Aktiivpalk 1200 W	960	5	4800
Ventiil AB-QM	119	5	595
Sulgventiil	14,4	5	72
Reguleerklapp	30,8	5	30,8
Ruumitermostaat	93,5	1	93,5
			<b>6597</b>

Tabel 5 Avatud büroo kombineeritud paneeliga kütte ja jahutus [17] [18]

Toode	Ühiku hind	Kogus	Maksumus, €
Kiirgur 600x3000	320	34	10880
Ventiil AB-QM	119	1	119
Sulgventiil	14,4	34	489,6
Tasakaalustusventiil	60	4	240
Reguleerklapp	30,8	5	154
Ruumitermostaat	93,5	1	93,5
			<b>11 976,1</b>

Ülalpool tabelis väljatoodud arvutuse põhjal võib järeldada, et suurema jahutusvõimsusega ruumide korral on alternatiivse lahendusega seotud esmased kulud tunduvalt madalamad kombineeritud laepaneelist, vahe on ligikaudu kaks korda. Määravaks omaduseks antud näite puhul on nii ruumi paiknemine kui selle suurus. Antud jahutusvõimsuse jaoks on vaja kasutada 34 etteantud mõõdus paneeli, mis omakorda eeldavad vastavas koguses lisa komponente. Samuti on antud lahenduse korral määravaks laepinna protsentuaalne katvus, mis paneelide kasutamisel oleks ligikaudu 80%.

### 5.3.2 Kabinet

Teiseks kolmest ruumist on neist mõõtmelt väikseim kabinet (Lisa 2), mille pindala on 11,6 m<sup>2</sup>. Ruumil on kõrged aknad ning see paikneb hoone põhjaküljes. Kütte- ning jahutusvõimsus on 280 W ning 360 W, mis on vastavalt kabineti pindalale 24,1 W/m<sup>2</sup> ja 31 W/m<sup>2</sup>. Sissepuhke õhuhulk on 23,2 l/s. Kütte ning jahutuse lahenduseks on sarnaselt esimese ruumiga määratud radiaatorid ning aktiivpalk.

Tabel 6 Kabineti küte radiaatoriga ning jahutus aktiivpalgiga [17] [18] [19]

Toode	Ühiku hind	Kogus	Maksumus, €
Radiaator 280 W	77,9	1	77,9
Radiaatori termostaat ventiil	16,9	1	16,9
Ajamiga termostaat	35,5	1	35,5
Radiaatori H-ventiil	11,4	1	11,4
Tasakaalustusventiil	60	1	60
Aktiivpalk 360 W	540	1	540
Ventiil AB-QM	119	1	119
Sulgventiil	14,4	1	14,4
Reguleerklapp	30,8	1	30,8
Ruumitermostaat	93,5	1	93,5
			<b>999,5</b>

Tabel 7 Kabineti kombineeritud paneeliga küte ja jahutus [17] [18]

Toode	Ühiku hind	Kogus	Maksumus, €
Kiirgur 600x3000	320	2	640
Ventiil AB-QM	119	2	238
Sulgventiil	14,4	2	28,8
Reguleerklapp	30,8	1	30,8
Ruumitermostaat	93,5	1	93,5
			<b>1031,1</b>

Antud ruum on võrreldes kahe teisega jahutusvõimsuse poolest keskmisel kohal. Ruumi ruutmeetri põhine jahutusvõimsus on ligikaudu kolm korda madalam eelnevast ruumist. Näidisarvutusest selgus, et kahe võrreldava lahendusega seotud esmased kulud on antud ruumi puhul üsna võrdsed, mistõttu tuleks antud ruumi kütte- ning jahutuse lahenduse valikul puhul lähtuda ka teistest omadustest. Arvesse tuleks võtta nii mõlema lahendusega kaasnevat soojuslikku mugavust kui ka üldkulusid, mis kaasnevad nende kasutamisega. Laepaneelide kasutamisel korral oleks laepinna hõlmatud ala ligi kolmandik kogu pindalast.

### 5.3.3 Haigla ruum

Järgnev ruum asetseb hoone keskel ning sellest lähtuvalt on selle kütte- ning jahutusvõimsus tunduvalt madalam eelnevast ruumist (Lisa 3). Ruumi pindala on 19,6 m<sup>2</sup> ning sissepuhke õhuhulk on 39,2 l/s. Antud ruumi kütte- ning jahutusvõimsus on 200 W, mis on vastavalt 10,2 W/m<sup>2</sup>. Arvutuses välja toodud võrreldavaks lahenduseks on järelküttena kasutatavad kalorifeerid nii kütte kui jahutuse korral.

Tabel 8 Haigla ruumi järelküte kalorifeeriga [17] [18]

Toode	Ühiku hind	Kogus	Maksumus, €
Küttekalorifeer 200 W	416,1	1	416,1
Jahutuskalorifeer 200 W	461,9	1	461,9
Ventiil AB-QM	119	2	238
Sulgventiil	14,4	2	28,8
Ruumitermostaat	93,5	1	93,5
Sissepuhke element	133,2	1	133,2
Rõhualanduskast	117,2	1	117,2
Reguleerklapp	30,8	1	30,8
			<b>1519,5</b>

Tabel 9 Haigla ruumi kombineeritud paneeliga küte ja jahutus [17] [18]

Toode	Ühiku hind	Kogus	Maksumus, €
Kiirgur 600x1200	200	3	600
Ventiil AB-QM	119	1	119
Sulgventiil	14,4	1	14,4
Reguleerklapp	30,8	1	30,8
Ruumitermostaat	93,5	1	93,5
			<b>857,7</b>

Viimase ruumi puhul oli määravaks faktoriks selle paiknemine hoones, millest lähtuvalt oli selle nii kütte- kui jahutusvõimsus madalam teistest võrreldavatest näidisruumidest. Tabelites väljatoodud arvutustest on näha, et antud ruumi puhul on paneeli kasutamine õigustatud seoses esmaste kuludega. Põhiliseks eeliseks alternatiivse lahenduse ees on paneeli hind ning sissepuhke elemendi vajaduse puudumine, mis võrreldes alternatiivse lahendusega annab märgatava vahe esmase maksumuse juures. Antud ruumi korral oleks paneelidega kaetav laepind kümnendik kogu pindalast.

Antud alapeatükis väljatoodud näidisarvutuse põhjal võib eelduslikult järelda teise ning kolmanda ruumi näitel, et antud paneele on esmaste paigaldamisega seotud kulude põhjal mõistlik kasutada ruumides, kus jahutusvõimsus on madalam. Samuti on määravaks ruumi pindala, mille tõttu kasvavad paneelide paigaldamisega seotud lisakulud.

## **6. PANEELI EDASINE ARENDUS**

Paneeli esmase mõõtmise tulemustest tehtud järeldustest lähtudes tehakse paneeli lahendusse vastavad täiendused. Jahutusvõimsuse mõõtmine kinnitas mõõtmisele eelnenut arvutust, millega arutati kombineeritud soojusülekanega paneeli jahutusvõimsus. Mõlemal juhul oli paneeli jahutusvõimsus samas suurusjärgus juba turul saadaval olevate ainult kiirguslike paneelidega ning kiirgusliku ja konvektiivse soojusülekande kombineerimine antud kujul märgatavat edu ei andnud.

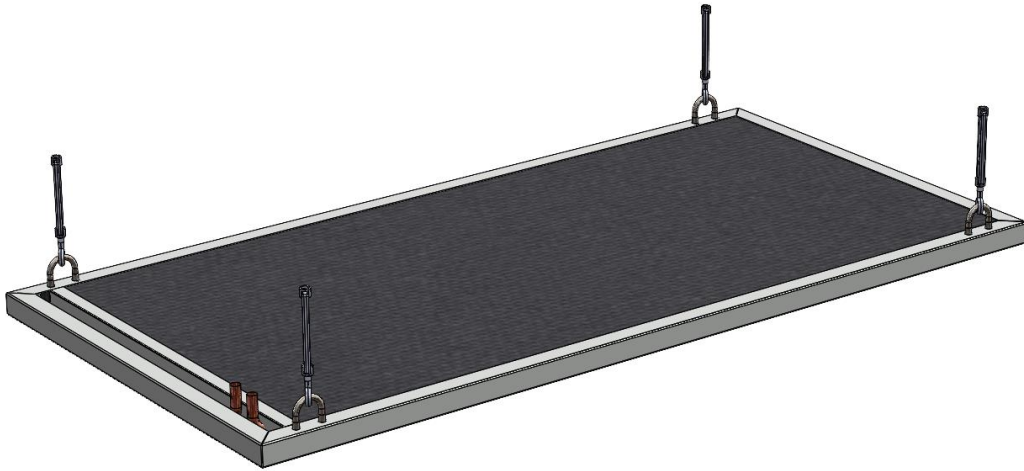
Paneeli arenduse alguses oli selle peamisteks argumentideks suurem kütte- ning jahutusväljastus võrreldes tavapärase kiirguslike paneelidega. Samuti oli üheks eeliseks sissepuhke elemendi kombineerimine kiirgusliku paneeliga, mistõttu puuduks lisavajadus nende eraldiseisvaks paigaldamiseks ruumi ventilatsioonile. Lähtudes saadud mõõtmistulemustest, puudub esimese argumendi näol eelis konkureerivate lahenduste ees. Seetõttu jätkub paneeli arendustegevus lähtudes paneeli teisest eelisomadusest.

Paneeli edasine arendus jätkub kahes suunas. Esialgsest paneeli konstruktsioonist lähtudes luuakse kaks erinevat lahendust – kiirguslik ning kombineeritud paneel. Eelnevas osas tehtud näidisarvutusest selgus, et üldjuhul on vajaliku jahutusvõimsuse saavutamiseks vaja paigaldada ruumi mitmeid paneele. Olenevalt ruumist, tähendaks see praeguse lahenduse põhjal, et iga paneeli kaudu ruumi suunatav õhuhulk oleks 30 l/s või poleks mõningate paneelide puhul sissepuhke kasutusel, mis poleks omakorda mõistlik ruumi õhuvajaduse või tootehinna seiskohalt. Sellest lähtuvalt jaguneb lahendus kaheks. Ruumi paigaldatakse eeskätt sissepuhkega kombineeritud paneelid, mille kaudu tagatakse ruumi vajalik sissepuhke õhuhulk ning suuremal määral kütte- ning jahutusvõimsus ja ülejäänud vajadus kaetakse tavapärase ainult kiirguslike paneelidega.

### **6.1 Kiirguslik paneel**

Kiirgusliku paneeli peamine soojusülekanne ruumi toimub soojuskiirgus toimel. Antud tüüpi paneeli arenduseks eemaldatakse kõik selle toimiseks ebavajalik ning lihtsustatakse praeguse paneeli konstruktsiooni. Selleks eemaldatakse nii paneeli otsas paiknev sissepuhke kamber koos sadulaga ning samuti paneeli välispinnal paiknev kumer avaus, kust õhk eelnevalt välja suunati. Sissepuhke mooduli eemaldamise järel pikendatakse selle arvelt paneeli sees paiknevat vasktorustikku kontuuri, mille

üldpikkus suureneb ligikaudu 10% ning eelduslikult tagab suurema kütte- ning jahutusvõimsuse.



Joonis 25 Kiirgusliku paneeli lahendus

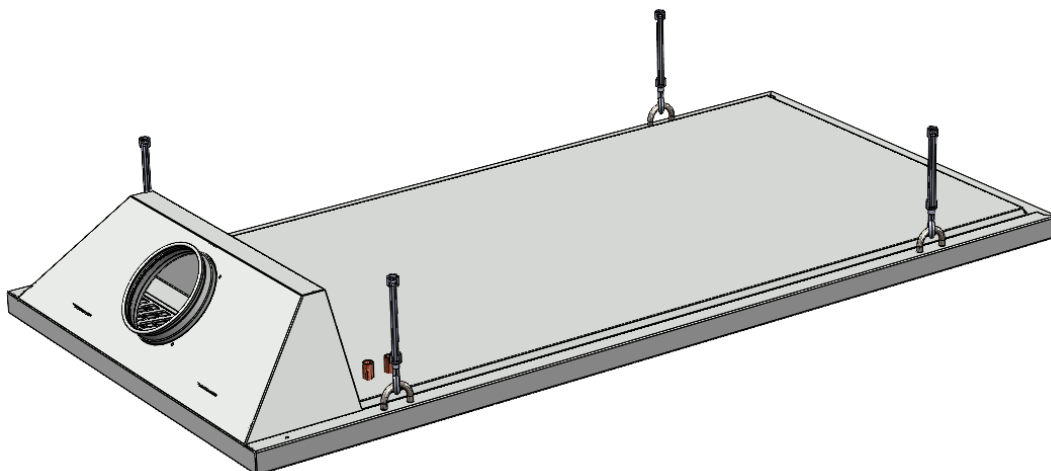
Paneeli soojusülekanne parendamise eesmärgil lisatakse paneeli korpuse sisemise pinna ning torustiku vahele sarnaselt mõne alternatiivse turul saadaval oleva lahendusega paisutatud naturaalgrafiidi kiht. Esialgsel lahendusel toimus soojusülekanne vasktorustikult paneeli tsingitud terasest korpusele eelkõige kahe komponendi puutepinna vahendusel, mille soojusülekande tegurid erinevad üksteisest märgatavalt [20]. Paisutatud naturaalgrafiidi eeliseks on terasest suurem soojusülekande tegur, mis võimaldab suuremat soojusülekannet vasktorustiku vahel ning ühtlasemalt jaotumist paneeli korpusele [21]. Sarnaselt esialgsetele paneelidele, saab kiirguslikku paneeli saadaval olema mitmes erinevas konfiguratsioonis. Lisaks erinevatele pikkustele on valikus nii isolatsiooni kui ka perforeeritud välispinnaga paneelid, millel on mürasummutav omadus.

## 6.2 Sissepuhkemooduliga paneel

Laekütte- ning -jahutuspaneelide teine lahendus sarnaneb suuremal määral esialgse lahendusega, kus on kombineeritud kiirguslik paneel sissepuhke mooduliga, millega omakorda kombineeritakse kiirguslikku ning konvektiivset soojusülekannet. Paneelile tehakse mõned täiendavad muudatused selle paigaldamise ning toimimise parendamiseks. Visuaalselt enim märgatav erinevus võrreldes esialgse lahendusega on kambri kuju muutus. Paneeli sisemise külje poole jääv kambri sein on viidud vertikaalseks ning selle vastasküljel olev sein on viidud 45° nurga alla koos sissepuhke sadulaga. Antud muudatuse eesmärgiks on muuta ventilatsiooni toruühendus vähem

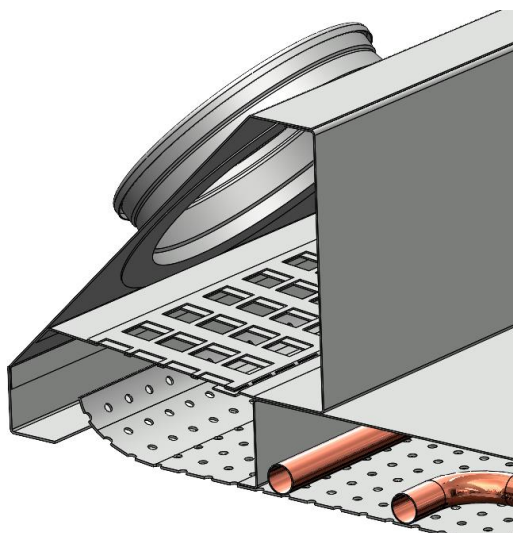


märgatavamaks teatud paigaldamismeetodite korral ning eelkõige lihtsustada toruühendust paneeli servas, kuhu ripplae korral lisandub karkassi moodustav liist.



Joonis 26 Kombineeritud paneeli lahendus

Sarnaselt kiirgusliku paneeliga, lisatakse antud lahendusele paisutatud naturaalgraafiidi kiht, et suurendada soojusülekannet. Vastavalt peatüki algul väljatoodule on paneeli kasutamise seisukohalt oluline õhuhulga reguleerimise võimalus. Eraldiseisvaid sissepuhke mooduleid on võimalik reguleerida vastavusse ruumi õhu vajadusega, mistõttu lisatakse antud võimalus ka arendatavale paneelile. Sissepuhke moodulisse projekteeritakse avadega vahesein, mille külge kinnitub reguleerosa, mida vastavalt ruumi suunatavale õhuhulgale saab reguleerida.



Joonis 27 Paneeli sissepuhke mooduli reguleerosa

Käesoleva magistritöö järgselt tehakse valmis järjekordsed prototüübid mõlemale paneeli lahendusele. Mõlema paneeli juures testitakse paisutatud naturaalgraafiidi kihi toimimist ning selle mõju kütte- ning jahutusvõimsusele. Samuti testitakse sissepuhke mooduliga paneeli õhuhulga reguleerimisvõimalust ning õhujoa liikumist läbi kambri paneeli pinnale muudatuste järgselt.

## KOKKUVÕTE

Magistritöö peamisteks eesmärkideks oli testida reaalses tingimustes töös välja toodud teooriat soojuskiirguse ja sundkonvektsiooni kombineerimisest ning selle põhjal vastava tööpõhimõttega laekütte- ja -jahutuspaneeli projekteerimine.

Töö alguses anti ülevaade erinevat tüüpi lakke kinnituvatest kütte ja jahutuse lahendustest ning nende toimimisest. Samuti toodi välja neli erinevat konkreetset näidet müügil olevatest lahendustest ning võrreldi nende kütte- ning jahutusvõimsusi. Paneeli projekteerimisele eelnevalt toodi välja varasemas uurimuses esitatud teoreetiline taust soojuskiirguse ja sundkonvektsiooni kombineerimise kohta ning selle eelduslik mõju paneeli jahutusvõimsusele.

Paneeli esmase kontseptsiooni loomisel võeti lisaks arvesse paigaldamise, disaini ning üldiste omadustega seatud kriteeriumeid. Projekteerimisel lähtuti eeskätt simulatsioonidest saadud tulemustest, määramaks optimaalse suuruse paneeli väljaviske avale ning sissepuhke mooduli jaoks. Esmase lahenduse valmimise järel tehti neist neljas erinevas konfiguratsioonis prototüübid, mida reaalses tingimustest testiti.

Paneeli jahutusvõimsus määrati nii arvutuslikult, kui ka reaalsete mõõtmiste tulemusel. Mõõtmised viidi läbi Tallinna Tehnikaülikoolis, kus määrati lisaks jahutusvõimsusele ka rõhulang, õhu liikumiskiirus paneeli pinnal ja viibimistsoonis ning summutustegur. Mõlemal teel leitud jahutusvõimsuste väärtused olid samas suurusjärgus. Saadud tulemuste võrdlemisel eeskätt kiiruslikul põhimõttel töötavate paneelidega, polnud näha kiirusliku ning konvektiivse soojusülekanne kombineerimisel saadud tulemuse ülekaalu. Eelduslikult oli saadud tulemuse põhjuseks madal õhu liikumiskiirus paneeli pinnal.

Saadud tulemustest lähtuvalt tehti näidisarvutus kolme näidisruumi põhjal, kus võrreldi antud paneele alternatiivsete kütte ning jahutuse meetoditega, mille põhjal tehti järeldus, kus antud paneele mõistlikum kasutada oleks. Mõõtmistulemuste ning näidisarvutuse põhjal otsutati jätkata paneeli arendust kahes suunas, milleks üheks on eeskätt kiiruslikult soojusülekannele töötavad paneelid ning teiseks esialgse kontseptsiooni järgi kombineeritud soojusülekanne paneelid. Mõlema paneeli lahendust täiendati vastavalt mõõtmistulemustest tehtud järeldustele ning nende arendus jätkub magistritöö järgselt järjekordsete prototüüpide testimisega.

## SUMMARY

The main objectives of the master's thesis were to test in real conditions the theory of the combination of thermal radiation and convection, and on the basis of this, to design a ceiling heating and cooling panel with the corresponding operating principle.

At the beginning of the work, an overview of different types of ceiling heating and cooling solutions and their working principle was given. Four different specific examples of commercially available solutions were also presented and their heating and cooling capacities compared. Prior to the design of the panel, the theoretical background of the combination of thermal radiation and convection presented in the previous study and its expected effect on the cooling capacity of the panel were presented.

In addition, the criteria for installation, design and general characteristics were taken into account when creating the initial concept of the panel. The design was based primarily on the results of simulations to determine the optimal size of the outlet for the panel and the supply air module. After the completion of the initial solution, prototypes were made in four different configurations, which were tested under real conditions.

The cooling capacity of the panel was determined both by calculation and by actual measurements. The measurements were performed at Tallinn University of Technology, where, in addition to the cooling capacity, the pressure drop, the air velocity on the panel surface and the noise absorption factor were determined. The values of the cooling capacities found in both ways were of the same order of magnitude. When comparing the obtained results, especially with the panels operating on the thermal radiative principle, the predominance of the result obtained by combining thermal radiant and convective heat transfer could not be seen. The result was presumably due to the low air velocity on the panel surface.

Based on the obtained results, the sample calculation was performed on the basis of three sample rooms, where the given panels were compared with alternative heating and cooling methods, on the basis of which it was concluded where the given panels would be the most reasonable to use. Based on the measurement results and the sample calculation, it was decided to continue the development of the panel in two directions, one of which is primarily the panels operating in thermal radiant heat transfer and the other panels with combined heat transfer according to the initial concept. The solution of both panels was supplemented according to the conclusions made from the measurement results, and the development will continue with the testing of further prototypes after the master's thesis.

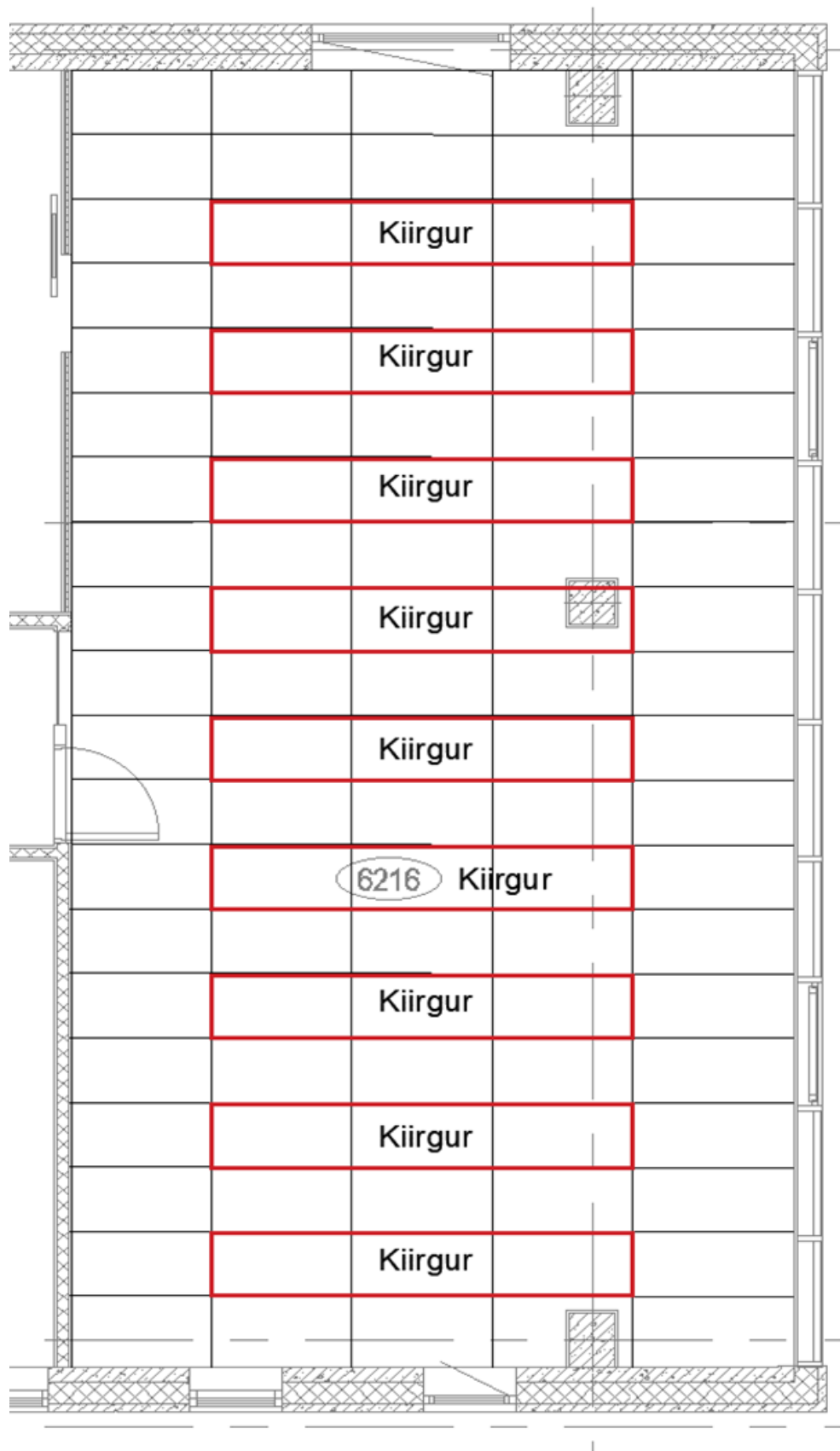
## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] „Indoor climate,” University of Bergen, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.uib.no/en/hms-portalen/79904/indoor-climate>.
- [2] S. C. M. Hui ja J. Y. C. Leung, „Thermal comfort and energy performance of chilled ceiling systems,” The University of Hong Kong, Fuzhou, 2012.
- [3] P.Kosky, R.Balmer, W.Keat ja G.Wise, Exploring Engineering, Cambridge: Academic Press, 2013.
- [4] B.Afework, J.Hanania, F.Rogers, K.Stenhouse, J.Toor ja J.Done, „Forced convection,” University of Calgary, [Võrgumaterjal]. Available: [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Forced\\_convection](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Forced_convection).
- [5] „Chilled Beam Systems,” Trane Engineers Newsletter, [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.trane.com/content/dam/Trane/Commercial/global/products-systems/education-training/engineers-newsletters/airside-design/adm\\_apn034en\\_1209.pdf](https://www.trane.com/content/dam/Trane/Commercial/global/products-systems/education-training/engineers-newsletters/airside-design/adm_apn034en_1209.pdf).
- [6] „Chilled Beams and Chilled Ceilings,” Archtoolbox, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.archtoolbox.com/materials-systems/hvac/chilled-beam-ceiling.html>.
- [7] „Zehnder Carboline,” Zehnder Baltics OÜ, [Võrgumaterjal]. Available: [https://zehnder.ee/wp-content/uploads/Z-EE-V1018-RHC-Carboline-PLU-et\\_screen-1.pdf](https://zehnder.ee/wp-content/uploads/Z-EE-V1018-RHC-Carboline-PLU-et_screen-1.pdf).
- [8] „Thermal radiation,” The Editors of Encyclopaedia Britannica, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.britannica.com/science/thermal-radiation>.
- [9] S. Badenhorst, „CHILLED CEILINGS & BEAMS,” [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.smartair.asia/resource/products/83/resources/article-temp-1-spec-radiant-chilled-chilled-ceilings-chilled-beams.pdf>.
- [10] „Chilled Beams vs. Chilled Ceiling,” The Severn Group , [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.theseverngroup.com/chilled-beam-vs-chilled-ceiling/>.
- [11] „Atrium Plana,” Lindab AB, [Võrgumaterjal]. Available: [https://itsolution.lindab.com/LindabWebProductsdoc/pdf/Documentation/Comfort/Lindab/Technical/Atrium\\_Plana.pdf](https://itsolution.lindab.com/LindabWebProductsdoc/pdf/Documentation/Comfort/Lindab/Technical/Atrium_Plana.pdf).
- [12] „Rex 600 (RE6) – Chilled beam,” Halton, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.halton.com/products/ceiling-integrated-beam-halton-rex-600-re6-gb/>.

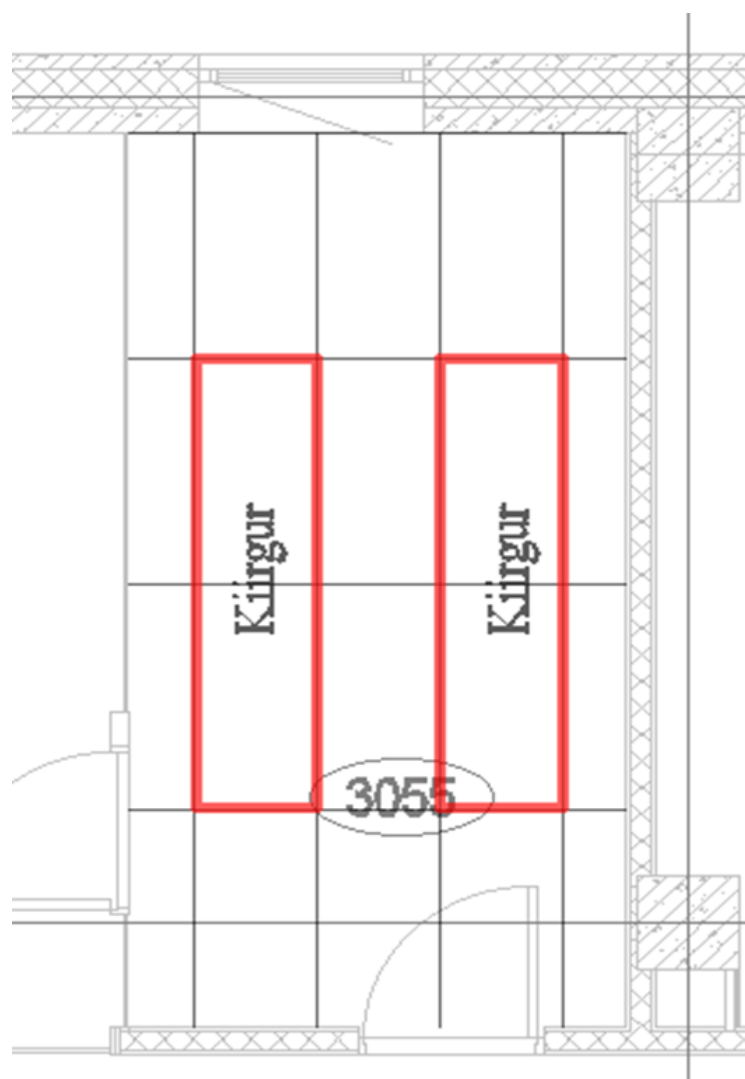
- [13] „iQ STAR LYRA II CHILLED BEAM,” FläktGroup Holding GmbH, [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.flaktgroup.com/en/products/air-diffusion/chilled-beams/cassette-chilled-beams/lyra-ii-chilled-beam/>.
- [14] J.-W. Jeong ja S. A. Mumma, „Ceiling radiant cooling panel capacity enhanced by mixed convection in mechanically ventilated spaces,” Department of Architectural Engineering, The Pennsylvania State University, University Park, 2003.
- [15] „ISOTEC CLIMLINER SLAB CLEANTEC FI,” Saint-Gobain Eesti AS, [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.isover.ee/tooted/isotec-climliner-slab-cleantec-fi>.
- [16] „Hoonete sisekliima ja õhustuse nõuded,” Eesti Kütte-Ventilatsiooniinseneride Ühendus, [Vörgumaterjal]. Available: [https://ekvy.ee/attachments/article/17/Hoonete%20sisekliima%20ja%20%C3%B5hustuse%20n%C3%B5uded\\_t%C3%B6%C3%B6version.pdf](https://ekvy.ee/attachments/article/17/Hoonete%20sisekliima%20ja%20%C3%B5hustuse%20n%C3%B5uded_t%C3%B6%C3%B6version.pdf).
- [17] Küttemaailm OÜ, [Vörgumaterjal]. Available: <https://radiaatorikeskus.ee/>.
- [18] ETS NORD AS, [Vörgumaterjal]. Available: <https://etsnord.ee/>.
- [19] AS Onninen, [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.onninen.ee/>.
- [20] T. E. ToolBox, „Thermal conductivities of common metals, metallic elements and alloys,” Engineering ToolBox, [Vörgumaterjal]. Available: [https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-metals-d\\_858.html](https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-metals-d_858.html).
- [21] J.Norley, J.Klug, G.Getz ja J.J.-W.Tzeng, „The Development of a Natural Graphite Heat-Spreader,” 2001.

**LISAD**

# Lisa 1 Avatud büroo ruumi plaan

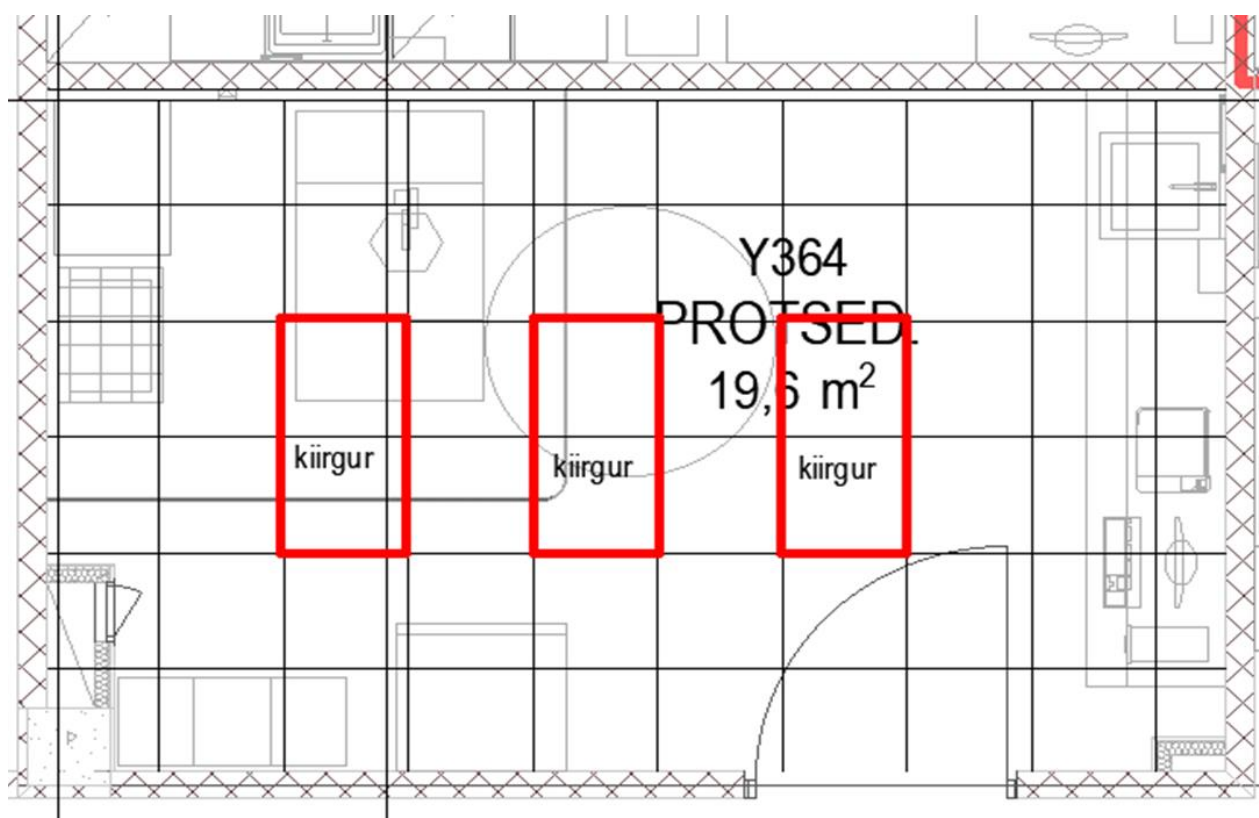


## Lisa 2 Kabineti ruumi plaan





### Lisa 3 Haigla ruumi plaan



## **GRAAFILINE OSA**