

SARS-COV-2 LEVIKU HINDAMINE CO₂ MÄRKEGAASI MEETODIGA KOOSOLEKURUUMI, KLASSIRUUMI JA AVATUD KONTORI NÄITEL

ASSESSMENT OF SARS-COV-2 TRANSMISSION WITH CO₂ TRACER GAS METHOD ON THE EXAMPLE OF MEETING ROOM, CLASSROOM AND OPEN OFFICE

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Andre Kesküll

Üliõpilaskood: 153929 EAKI

Juhendaja: Martin Kiil, doktorant

Alo Mikola, nooremteadur

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Andre Kesküll, 153929
Õppekava, peeriala: EAKI02/15
Juhendaja: Doktorant, Martin Kiil, 518 9963
Kaasjuhendaja: Nooremteadur, Alo Mikola, 6202510

Lõputöö teema:

SARS-COV-2 LEVIKU HINDAMINE CO2 MÄRKEGAAS MEETODIGA KOOSOLEKURUUMI, KLASSIRUUMI JA AVATUD KONTORI NÄITEL

ASSESSMENT OF SARS-COV-2 TRANSMISSION WITH CO2 TRACER GAS METHOD ON THE EXAMPLE OF MEETING ROOM, CLASSROOM AND OPEN OFFICE

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Teostada märkegaasi meetodite abil viiruste leviku hindamise alaste kirjandusallikate analüüs ja leida varasemalt teostatud uuringute baasil sobiv rakenduslik meetod SARS-COV-2 leviku uurimiseks siseruumides
2. Hinnata viiruste levikut aktiivjahutustaladega koosolekuruumi, klassiruumi ja avatud kontori näitel
3. Hinnata aktiivjahutustalade mõju ruumis lendlevate väikeste piiskade eemaldamisele ventilatsiooniga
4. Analüüsida viirusega nakatunud inimese paiknemise mõju viiruspiiskade jaotusele siseruumis

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Töö temaatika kaardistamine juhendajatega	09.2020
2.	Mõõtmiste kava plaani koostamine	09.2020
3.	Katse termiliste mannekenide ehk „Dummy“-de ehitamine	09.2020
4.	Mõõtmised näidis koosolekuruumis (TalTech U03-214)	10-11.2020
5.	Kirjanduse ülevaate koostamine	02.2021
6.	Metoodika kirjelduse koostamine	03.2021
7.	Koosoleku ruumi tulemuste töötlemine ja visualiseerimine	03.2021
8.	Täpsustavad mõõtmised õhujaotuslaboris erinevate õhuvahetuste ja õhujaotusmeetodide korral (CON 214)	04.2021
9.	Õhujaotuslabori mõõtmistulemuste analüüs	04.2021
10.	Esmased järeldused, kokkuvõte ja postri koostamine	04.2021
11.	Lõputöö 75% ülevaatus	04.2021
12.	Täiendavad mõõtmised õhujaotuslaboris ja lõputöö täiendamine	04.2021
13.	Lõputöö lõplik viimistlus	05.2021
14.	Ettekande ja plakati koostamine	05.2021
15.	Lõputöö esitamine ja kaitsmine	06.2021

Töö keel: **Lõputöö esitamise tähtaeg:** ".....".....20.....a

Üliõpilane: ".....".....20.....a

/allkiri/

Juhendaja: ".....".....20.....a

/allkiri/

Konsultant: ".....".....20.....a

/allkiri/

Programmijuht: ".....".....20.....a

/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

Eessõna	1
Tähiste loetelu	2
1. Sissejuhatus	3
2. Kirjanduse ülevaade	5
3. Teooria	7
3.1. Teoreetilised alused.....	7
3.1.1. Sisekliima, õhukvaliteet	7
3.1.2. Piisknakkuste levik ja Covid-19.....	9
3.1.3. Märkegaas	10
3.1.4. Nakatumise riski vähendamine	11
3.1.5. Aktiiv jahutustala.....	11
3.2. Arvutus meetoodika.....	14
3.2.1. Saasteaine hindamise indeks.....	14
3.2.2. Nakatumise hindamine	15
3.2.3. Ventilatsiooni efektiivsus hindamine	17
4. Töö meetoodika	19
4.1. Katseinstrumendid.....	20
4.1.1. Lisaküttekehad	20
4.1.2. CO ₂ allikas	22
4.1.3. Mõõteseadmed	23
4.2. Koosolekuruum	24
4.3. Koosolekute ruumi mõõtmiste kirjeldus	26
4.4. Klassiruumi ja avatud kontoriruum	27
4.5. Klassiruumi ja avatud kontori mõõtmiste kirjeldus	29
4.7. Mõõtmistulemuste töötlemine.....	31
5. Analüüs ja diskussioon	33
5.1. Koosolekuruum	33
5.1.1. Viiruse levik ja nakatunu paiknemine ruumis.....	33

5.1.2.	Aktiivjahutustalade mõju viiruse levikule	38
5.1.3.	Nakatamise risk.....	43
5.2.	Klassiruum.....	48
5.2.1.	Viiruse levik ja nakatunu paiknemine ruumis	48
5.2.2.	Ruumi õhujäätuse mõju viiruse levikule	54
5.2.3.	Nakatamise risk.....	55
5.3.	Avatud kontor	59
5.3.1.	Viiruse levik ja nakatunu paiknemine ruumis.....	59
5.3.2.	Ruumi õhujäätuse mõju viiruse levikule	65
5.3.3.	Nakatamise risk.....	66
6.	Järeldused	69
	Kokkuvõte.....	71
	Summary	73
	Viidatud kirjandus	75
	LISAD	Error! Bookmark not defined.

EESSÕNA

Viimastel aastatel on kogu maailmale suurt mõju avaladanud koroonaviirus (COVID-19). Kinnistes keskkondades, nagu seda on siseruumid, kõrgendavad võimalust selle viirusega kokku puutuda. Suhteliselt vähe on uuritud jahutuse, täpsemalt aktiivjahutuspaikide mõju ruumi sisekliimale õhusaastatuse vaatenurgast. Magistritöö teema autor on Tallinna Tehnikaülikooli professor Jarek Kurnitski

Autor tänab juhendajat Martin Kiili ja kaasjuhendajat Alo Mikolat magistritöö valmimise ja katsetuste koostamise ning läbiviimise eest, doktorant-nooremteadurit Karl-Villem Võsa katsetulemuste visualiseerimise eest, kasutades programmeerimiskeeles Python tarkvarateeki SciPy ja matplotlib, professor Jarek Kurnitskit aktuaalse töö teema idee eest.

TÄHISTE LOETELU

REHVA – Federation of European Heating and Air-Conditioning Associations

CRE - Contaminant Removal Effectiveness (saasteainete eemaldamise efektiivsus)

1. SISSEJUHATUS

Nakkus haigused ja viirused on mõjutanud inimkonda läbi ajaloo. 2019. aasta detsembris Hiinast Wuhan linnast alguse saanud koroonaviirus (COVID-19, SARS-CoV-2) levis mõnede kuudega üle maailma. COVID-19 kuulub koroonaviiruste perekonda, mis enamasti tekitavad inimestel ülemiste hingamisteede infektsioone (palavik, köha, väsimus), kuid selles perekonnas on kaks väga ohtliku koroonaviirust: MERS-CoV ja SARS-CoV, mis võivad olla surmavad.[1] Maailma terviseameti andmetel on 2021. aasta aprilli seisuga COVID-19 juhtumeid maailmas olnud ligi 145 miljonit, millest üle kolme miljoni on lõppenud surmaga [2]. Viiruse pandeemia ohjeldamiseks on üle maailma erinevates riikides kehtestatud eriolukordasid, mis on negatiivset mõju avaldanud nende majandusele, ettevõtted on pidanud muutma oma toimivust ning inimesed pidanud muutma oma käitumistavasid[3].

SARS-CoV-2 võib kanduda edasi inimeste vahelise kokkupuutumise, kaudse kontakti korral, nakatunud inimeselt köhimise või aevastamise teel piiskade sattumisel teise inimese organismi ja ka pisikeste lendlevate piiskade sissehingamisel [4]. Et inimene viibib siseruumides ligi 90% ööpäevast, siis on oluline, et sissehingatavas õhus oleks võimalikult vähe viirust kandvaid piisku [5]. Elamu- ja büroohonetele puudub praegustes ehitusstandardites nõue ruumi õhule tahkete lendlevate osakeste kontsentratsiooni osas. Samad standardid näevad aga ette, et tehnosüsteemid tagaksid ettenähtud maksimaalsed süsihappegaasi kontsentratsioonid ning soojuslikumugavuse aspektid. [6] Õhust soovimatute gaaside või osakeste eemaldamiseks on tähtis piisav õhuvahetus, kuid kui on ka vajalik keskkonnast liigset soojust eemaldada, siis energiaaspektist pole see väga soodne. Ruumi ülekuumenemise vältimiseks ja inimese soojuslikumugavuse tagamiseks on laialt levinud meede ette antud temperatuuri tagamiseks on jahutustalade installeerimine ruumi, mis retsirkuleerivad õhku, tekitades õhuvoole, mis võivad tahkete osakeste kulgu ruumis oluliselt mõjutada.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on:

- Teostada märkegaasi meetodite abil viiruste leviku hindamise alaste kirjandusallikate analüüs ja leida varasemalt teostatud uuringute baasil sobiv rakenduslik meetod SARS-CoV-2 leviku uurimiseks siseruumides
- Hinnata viiruse levikut aktiivjahutustaladega koosolekuruumi, klassiruumi ja avatud kontori näitel
- Hinnata aktiivjahutustalade mõju ruumis ledlevate väikeste piiskade eemaldamisele ventilatsiooniga

- Analüüsida viirusega nakatunud inimese paiknemise mõju viiruspiisakde jaotusele siseruumis

2. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

Inimese tervist mõjutab suuresti keskkond, kus ta viibib. Tänapäevane inimene veedab palju aega siseruumides [5] [7], mistõttu on ka sisekliimal suur mõju inimese tervisele. Üheks sisekliima komponendiks keskkonna mõju hindamisel inimesele on õhukvaliteet. Õhukvaliteet väljendab õhus olevate saasteainete hulka, mis võivad olla kahjulikud inimesele. [8] Kvaliteeti võivad mõjutada ruumis toimuvad protsessid, mööbel, ruumi sissepuhutav õhk ja ka inimene ise. Kuna antud töös on vaadeldud õhuteel levivate viiruste levikut, siis on õhukvaliteet õhus sisalduvate saasteainete seisukohalt.

Olemasoleva kirjanduse kohaselt levib SARS-CoV-2 piisknakkuse teel[9][10][11], analoogselt varasemalt maailmas esinenud SARS COV-1-le[10], MERS-le [10], tavalisele gripile [12]. Koroonaviirusesse on võimalik nakatuda puutudes otse kokku nakatunuga, pinnale sadestunud osakeste kaudu või ka pisikeste aerosoolosakeste kaudu. [4][10][13] Viirusosakeste levikule aitab kaasa madal suhteline õhuniiskus, juba madalam kui 40% suurendab leviku võimalust. [9]Mida kuivem õhk, seda kiiremini aurustuvad veepiisad, seda kiiremini muutub piisk aerosooliks, mis jääb õhku hõljuma. [14]

Nakatumise riski hindamisel leiab laialdast kasutust Wells-Riley piisknakkuse mudel. [15] [16] [17] See mudel sobib enamike piisknakkuste nakatumise hindamiseks, ruumides kus on tagatud hea õhu segunemine. Antud valem kasutab riski hindamiseks hinnangulist viirusosakeste eraldumise hulka, mida pole teadlased veel üheselt paika pannud, kuid juba mitmed uurimised põhinevad just nendel arvudel. [18] Tulenevalt viiruste ohtlikusest, kasutatakse praktilistes katsetes,viiruse leviku hindamisel märkegaasi meetodi. Kõige paremini sobitub inimese mõju hindamisel CO₂, mis tõttu on see variant laialdaselt soovitatud. [19] [20]

Varasemad uurimused on kõik jõudnud ühisele arvamusel: viiruse aerosoolse leviku mõju vähendamiseks on tähtis toimiv ventilatsioon [9] [14] [21]. Mida suurem on ruumi õhuvahetus, seda kiiremini eemaldatakse ruumist viiruste aerosoolosakesed. [22] Suure õhuvahetustega ruumid on kasutusel näiteks nakkushaiglates, kus kehtib ruumide õhuvahetuse nõue $\geq 12\text{h}^{-1}$ [22] võrdluseks tavaliste üldkasutatavate hoonetega kehtib kõrgem klass umbes 5h^{-1} [23]. Isegi sellisest õhuvahetusest alati ei piisa[9], oluline on ka õhuvoolude liikumine ruumis, nakatunu, potentsiaalsete nakatujate ja ventilatsioonisüsteemi komponentide asukoht. Seda kinnitab Hiinas läbiviidud mudel, kus oli näha nakatumise riski suurenemist vastavalt õhuvooludele. [13] Oluline on ka asjaolu, et õhuliikumisel tekkivad keerised võivad olla potentsiaalseteks osakeste ladustamis paikadeks, suurendades pindadelt nakkumise riski konkreetses asukohas [13] .Tõrjuva ventilatsiooni puhul on viirusosakestega kokkupuute risk väiksem, kui seda seguneva

õhuvahetuse korral, aga kuna segunev õhujaotus on laialdaselt kasutusel üldkasutatavates hoonetes ja ruumides (bürood, nõupidamisruumid jne), jääb käesoleva töö fookus segunevale õhujaotusele.

Aktiivjahutustalade mõju COVID-19 levikule publitseeritud kirjanduse osas ei leidu või on väga vähe. Antud töös on põhikohal aktiivjahutustalade mõju viiruse levikule. Osalist mõju võib eeldada tulenevalt aktiivjahutustalade tööpõhimõttest. Nimelt tekitades ruumis aktiivse õhusegunemise ja liikumise, võivad ülespidiste õhuvoolude toimetel viiruse osakesed kiirelt ruumi laiali kanduda.[24] Teiseks võib õhu tsirkuleerimine pikendada saasteosakeste viibimisaega ruumis, samas lisavad aktiivjahutustalad pidevalt ruumi värsket õhku, mis võib selle probleemi tasakaalustada. [24]

Bürooruumide liigsoojuse eemaldamiseks on aktiivjahutustalade kasutamine energia kokkuhoiu aspektist suhteliselt levinud. Kuigi aktiivjahutustalade kasutamine jahtutamiseks on praktikas levinud, pole viirusosakeste leviku kohta veel piisavalt teadusartikleid avaldatud. Sellest tulenevalt on asjakohane uurida, millist mõju võivad aktiivjahutustalad saasteainete levikule ja nakatumise riskile avaldada.

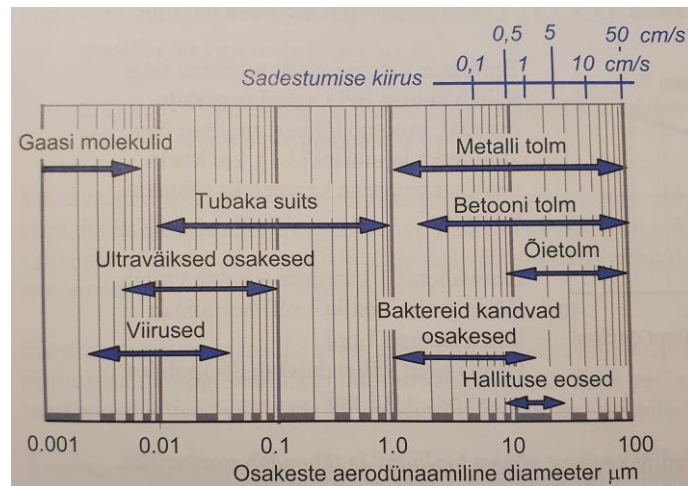
3. TEOORIA

Väga suure osa oma elust veedab moderne inimene just siseruumides. Tulenevalt tänapäevase inimese olemusest on tähtis, et keskkond kus inimene viib oleks võimalikult meelepärane ja tervisele võimalikult ohutu, teisisõnu peab olema tagatud hea sisekliima. [7] Käesolevas peatükis annabki autor teoreetilise ülevaate sisekliima komponendi, õhukvaliteedi, COVID-19 seisukohast hindamiseks.

3.1. Teoreetilised alused

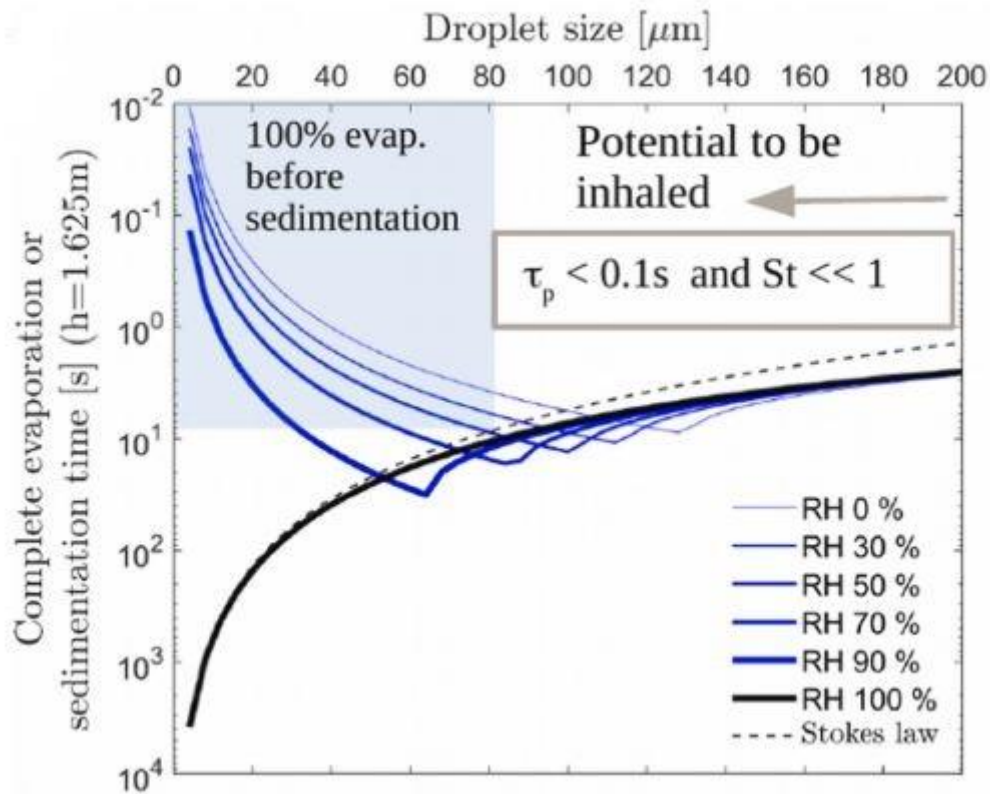
3.1.1. Sisekliima, õhukvaliteet

Selleks, et paremini hinnata sisekliimat, jaotatakse see eraldi komponentideks: soojuslik sisekliima, õhu kvaliteet ja õhu puhtus [8]. Büroohonetes on väga tähtsad soojuslik sisekliima ja õhu kvaliteet [6]. Need sisekliima komponendid sõltuvad omakorda üksikutest alakomponentidest. Soojuslik sisekliima sõltub siseõhu temperatuurist, operatiivsest temperatuurist ning pindade temperatuurist, siseõhu niiskusest ja siseõhu liikumisest. Õhukvaliteet sõltub saasteainete määrast, mis võivad olla inimesele ohtlikud või ärritavad ning saasteained jagunevad omakorda gaasilisteks ja tahketeks. Gaasilised saasteained siseõhus pärinevad üldjuhul inimestelt ja põlemisprotsessidest ning mingil määral ka ehitusmaterjalidest ja ruumi sisustuselt. Siseõhus leidub järgmisi gaase: CO₂, CO, NO_x, SO_x, O₃ ja gaasistunud orgaanilisi aineid (VOC). Kuna gaaside osakaal õhus on väga väike, siis väljendatakse nende kogust ühikutes: µg/m³ või ppm (ppb). Siseõhku satuvad tahked saasteosakesed üldiselt inimeselt. Kõige rohkem leidub naha ja riide osakesi, vähemal määral ka mikroorganisme nagu baktereid ja viiruseid. Kuna osakesed on erikujulised, siis kasutatakse nende võrdlemiseks mõistet – aerodünaamiline diameeter, mida mõõdetakse mikromeetrites.[8] Ruumi saasteainete osakeste suurused on toodud joonisel 1:



Joonis 1 – Siseroomis leiduvate saasteosakeste suurused [7]

99,9% õhus olevatest osakestest on väiksema aerodünaamilise diameetriga kui 1 µm. Kuni 10 µm läbimõõduga osakesed hõljuvad õhus väga pikka aega. [8] Näiteks soomlaste poolt koostatud teadusartiklis toodi välja veepiiskade suuruse (inglise k. „droplet size”) järgi nende sadestumise aeg (inglise k. „sedimentation time”) 1,625 meetri kõrguselt (Joonis 2). Antud artiklist järeldus, et piisad mille diameeter jääb vahemiku 10...20 µm, võivad õhus hõljuda 20 minutit kuni 1 tund ning alla 10 µm piisad püsivad õhus minimaalsed ühe tunni [14]. Viidatud artikli graafikud olid koostatud puhaste veetilkade kohta ning ei saa üksühele rakendada viiruste levikule, kuid annab aimu selle võimalusest. Osakesed, millede aerodünaamiline diameeter jääb üle 10 µm, takerduvad inimese ülemistesse hingamisteedesse, väiksemad osakesed võivad aga jõuda kopsu alveoolidesse, mis aja jooksul võivad põhjustada tervisehäireid. Näiteks viirused, mis ise on üliväikse läbimõõduga <0,05 µm, kuid paiknevad kolooniatena suuremate osakeste [8], või piiskade küljes, võivad sattuda üpris suure tõenäosusega ühest organismist teise, nakatades niimoodi ümbritsevaid inimesi. Sellisel teel levivaid viiruseid tuntakse ka kui piisknakkuste nime all [14].



Joonis 2 – Eri suuruses piisakeste sadestumise kõver 1,625 m kõrguselt (inimese hingamisteede kõrgus). *Droplet size* – Piisakeste suurus *Complete evaporation or sedimentation time* – Täielik aurustumise või maha langemise aeg, *Potential to be inhaled* ehk tõenäosus osakeste sissehingamiseks suureneb graafikul paremalt vasakule. Sinisega värvitud ala tähistab antud joonisel 50% suhtelise niiskuse juures, et kõik tilgad $\leq 80 \mu\text{m}$ jõuavad enne maha langemist aurustuda. Siniste kõverjoontega on välja toodud tilkade

3.1.2. Piisknakkuste levik ja Covid-19

Piisknakkused põhjustavad igal aastal hulgaliselt haigestumisi. Enamus juhte mööduvad kergete või mõõdukate sümptomitega, nagu palavik, kuiv köha väsimus, ülemiste hingamisteede vaevused jne, kuid mitte alati [25]. Levinumad hingamisteede haigusi põhjustavad viirused on gripp, RSV (respiratoor-süntsütaalne viirusnakkus), koroonaviirus, adenoviirus ja rinoviirus. Need viirused ei möödu alati kergete külmetusnähtudena, vaid võivad põhjustada raskemaid kopsuvaevusi ja ka surma. [11] Neist ühed nakkavamad on koroonaviirused [11], mille viimane pandeemia sai alguse 2019 aastal Hiinast ning kannab nime SARS-2-CoV-19. Nüüdseks on viirus levinud üle maakera ning on põhjustanud juba üle kolme miljoni surma [2]. Väiksemaid koroonaviiruste levikuid on ka olnud varem, näiteks Hiinas SARS-CoV näol 2002. aastal ja 2012. aastal MERS-CoV näol [26], tänu millele on tänased teadlased suutnud selle viirustüve kohta palju välja selgitada.

Inimene eritab pidevalt ümbritsevasse keskkonda tahkeid osakesi, veeauru ja erinevaid gaase [27]. Hingamisel, rääkimisel, köhimisel ja aevastamisel erituvad inimese hingamisteedest piisad, mis nakatunud inimese puhul kannavad kaasas patogeene. Piisad jagunevad kaheks: suured piisad ja väiksed piisad. Need eristuvad settimisaja poolest, suured piisad langevad peale inimkehast väljumist maha sekundite jooksul, väiksed piisad jäävad hõljuma õhku pikemaks ajaks (kümned sekundid, minutid). Mida väiksem on osake ja väiksema suhtelise niiskusega on ümbritsev keskkond, seda kiirem on piiskade aurustumine, ehk suurem võimalus lendlevate viirusosakeste tekkeks (joonis 2). Piisa kuivades hakkab patogeene kandev osake liikuma keskkonnas õhuvoolude toimele. Olenevalt õhuvoolude suunast, kanduvad osakesed mööda ruumi laiali ning lõpuks kas sadestuvad pindadele, satuvad inimeste organismi või eemalduvad ruumist ventilatsiooni kaudu. [14].

Täpselt viiruste osakeste hulka, mida inimene eritab aerosoolide teel, pole teadlased ega ka viroloogid veel suutnud üheselt paika panna. G. Buonanno poolt läbiviidud uurimises kasutati viiruse nakatumise tõenäosuse arvutamisel eeldatavat inimese poolt eraldatavat viiruste hulka tunnis (quanta h^{-1}). [28] Nende arvutustes lähtuti hüpoteesist, et piiskade patogeenide sisaldus vastab samale hulgale, mis on inimese rögas. [28] Selle põhjal arvutati välja nakatumise tõenäosus sõltuvalt ajast, eeldades et ruumi õhk oli täielikult segunenud. Nakatumise tõenäosus oli seda suurem, mida suurem kontsentratsioon ja selles veedetud aeg. Et viiruste kasutamine praktilistes katsetustes on väga ohtlik, kasutatakse nende kontsentratsioonide hindamiseks märkegaase [29] [30] [31]. Üheks levinumaks märkegaasiks on CO_2 selle tõttu, kuna see on õhule väga lähedase tihedusega, mis tähendab, et segunemine õhuga on lihtsam, mis iseloomustab patogeenide hajuvust ruumi õhus [30].

3.1.3. Märkegaas

Viiruste osakeste hindamiseks kasutatakse üldiselt ohutuid gaase, niinimetatud märkegaasimeetodi. Antud töös kasutatakse märkegaasina CO_2 . Et inimene eraldab pidevalt endast gaase ja osakesi jne, manustatakse ruumi gaasi konstantsel vooluhulgal ja vaadeldakse olukordi ühe „nakatunuga“. CO_2 eraldused erinevatel tegevustel varieeruvad, tulenevalt inimese poolt hingatavast õhu mahust, mida aktiivsem tegevus, suurem on hingatava õhu maht. Vastavalt varasemale kirjandusele on istuva inimese hingamismaht 540 l/h, mis vastab CO_2 eraldusele keskmiselt 24 l/h. Käesoleva töö puhul katseteks valitud ruumid oli nii väikse gaasi eralduse jaoks liiga suure õhuvahetusega, samuti oli mõõteseadmete veapiir liiga suur (tabel 3), et nii väikseid mahte mõõta.

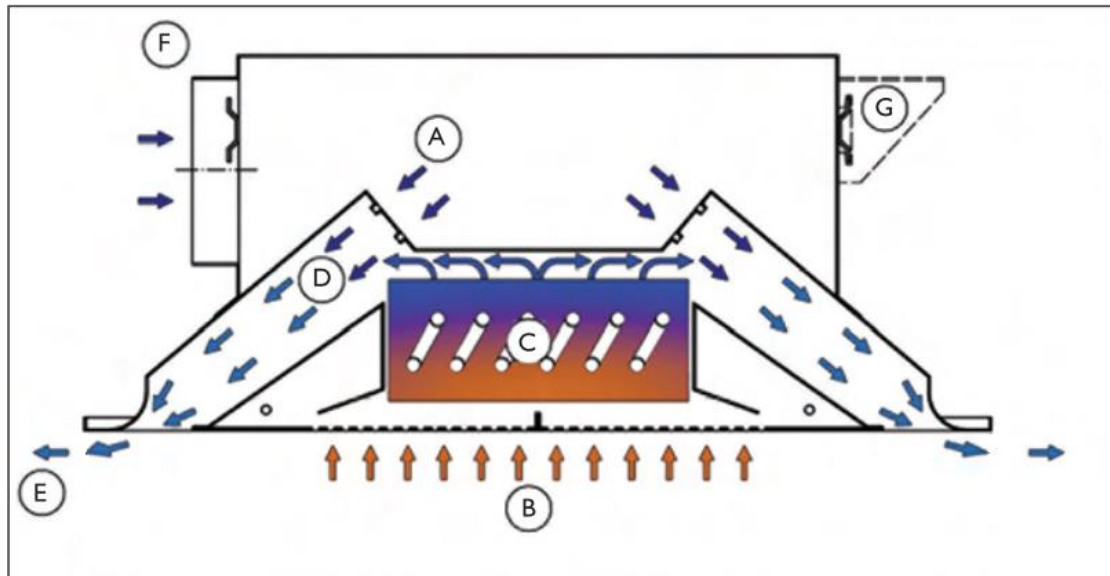
Paremaks mõõtmistulemuste hindamiseks suurendati CO₂ manustamise mahtu ning kontrollimiseks kaaluti iga katse jooksul gaasi mass, mis ruumi lasti.

3.1.4. Nakatumise riski vähendamine

Siseruumide õhust saasteainete kontsentratsiooni vähendamiseks on oluline ruumis piisav õhuvahetus [9] [14] [32]. Käesolevas töös on keskendunud nõupidamisteruumi olukorra näite hindamisele. Vastavalt EVS 906:2018 on koosolekusaalidel, sealhulgas nõupidamisruumide minimaalne nõue õhuvahetusele 4 l/(s m²) ning CO₂ maksimaalne kontsentratsioon 800ppm suurem antud asukoha välisõhu tasemest [23]. Õhuvahetus 4 l/(s m²) vastab 52,5 m² põrandapinnaga ja 2,7m kõrguses ruumis 5,3 kordsele õhuvahetusele tunnis. Võrdluseks haiglad, milles on piisknakkustega patsientidele eriruumid, õhuvahetusega 6-12 h⁻¹ [22] [33]. Kõrge õhuvahetus tagab väga hea õhukvaliteedi, kuid taoliste süsteemide töötamine on küllaltki energiakulukas, mistõttu on sellised süsteemid kasutusel ainult erijuhtudel. Oluline aspekt saasteainete levikule ruumis on ka õhujaoitus viisil. Olemasolev kirjandus näitab, et suurt rolli ruumi õhukvaliteedis mängib sissepuhke ja väljatõmbe paiknemine [34] [35], paremaks variandiks viibimistsoonis õhu kvaliteedi tagamisel on näiteks tõrjuv õhuvahetus [33]. Samuti mõjutab ruumi antava õhujoa liikumine ehk sissepuhke difuuserite omadused [13] [33] [34].

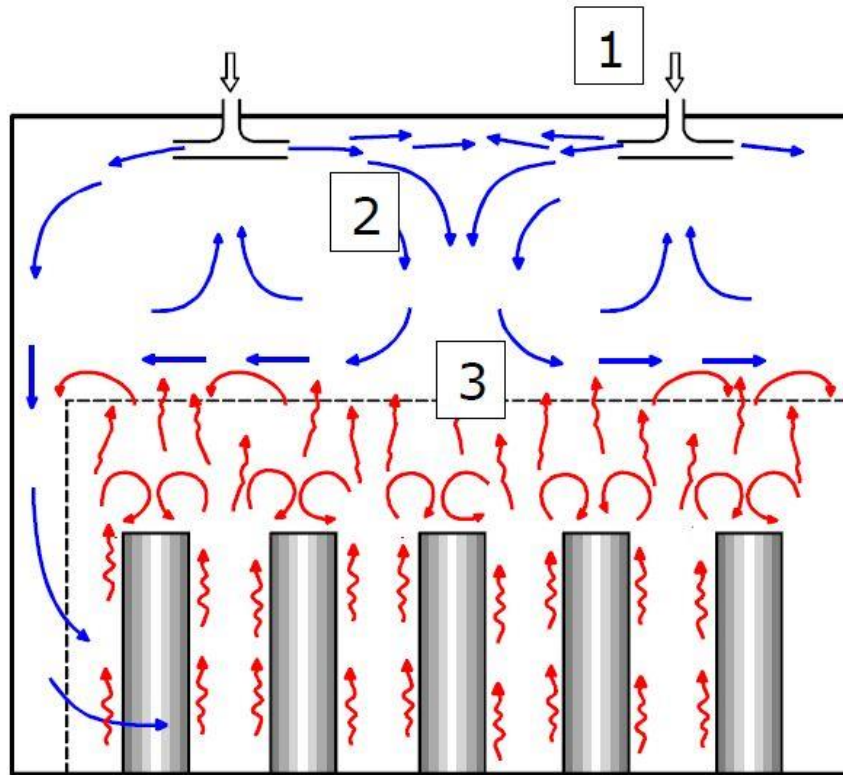
3.1.5. Aktiiv jahutustala

Ruumides, kus hea sisekliimatagamiseks ainult ventilatsioonist ei piisa, ruumid kus on kõrge soojuskoormus (bürood, nõupidamiste ruumid jne) on tarviklik jahutuselementide kasutus. Laialdaselt levinud vahendid liigsoojuse eemaldamiseks ruumist on konvektorpuhurid (*inglise k. „fan-coil“*) ja jahutustalad (*inglise k. „cooling beam“*), viimased neist jagunevad veel aktiivtalad ja passiivtalad. [36] Taolised jahutus meetmed hoiavad ruumi temperatuuri tsirkuleerides õhku läbi madalama temperatuuriga kalorifeeride paisates jahutatud õhu ruumi laiali [37]. Selline õhuliikumine, aitab kaasa ruumi õhusegunemisele ja ka patogeenide laiali kandumisele. Eriti aktiivne on segunemis protsess aktiivtaladega ruumi puhul, tulenevalt nende töö põhimõttest (joonis 3). Samuti



Joonis 3 – Aktiivtala tööpõhimõte. Venturi efekti mõjul tekib jahutuskalorifeeri (C) ees alarõhk ning ruumi õhk imetakse läbi kalorifeeri, kust edasi seguneb (D) jahutatud õhk sissepuhkeõhuga (A) ning puhutakse ruumi, kus juga liigub pinnale Coanda efekti mõjul ning liigub mööda lage, seinat, pörandat soojusallikani, kus konvektivselt liigub õhk jälle üles poole. [54] [24]

pikendavad jahutustalade poolt tekitatavad õhusegunemised ruumi õhu keskmist vanust (*inglise k. „mean age of air“*)[37], mida toetas ka Ameerika Ühendriikides läbiviidud katse passiivtaladega ruumis [38]. Veel selgus, et passiivtala poolt tekitatud õhuringlusel liikusid saasteained inimese viibimistsooni [38], mis suurendab riski viirusosakeste sisse hingamisele. Teisalt kui kaob ära aktiivjahutustalade poolt tekitatav aktiivne õhu segunemine näiteks vähendades õhuvooluhulka, võib kõrgema laega ruumi tekkida suurema saasteainete kontsentratsiooniga piirkond inimese viibimistsooni. Sellist olukorda kirjeldab joonis 4, kus ruumi sisse antav värske õhk ei ole piisavalt suure kiirusega ning õhu segunemine ruumi veritkaalses lõikes on halvenenud. Selliste olukordade vältimiseks võib sissepuhkele lisada juurde õhujaotajaid, mis viivad värske õhu viibimistsooni.[39] Taolisi katseid, millega on hinnatud nendes olukordades aktiiv jahutustalade mõju viiruste levikule pole või on liiga vähe uuritud, sellest tulenevalt on ka käes olevas magistritöös üheks eesmärgiks viiruste levikut nendes olukordades hinnata.

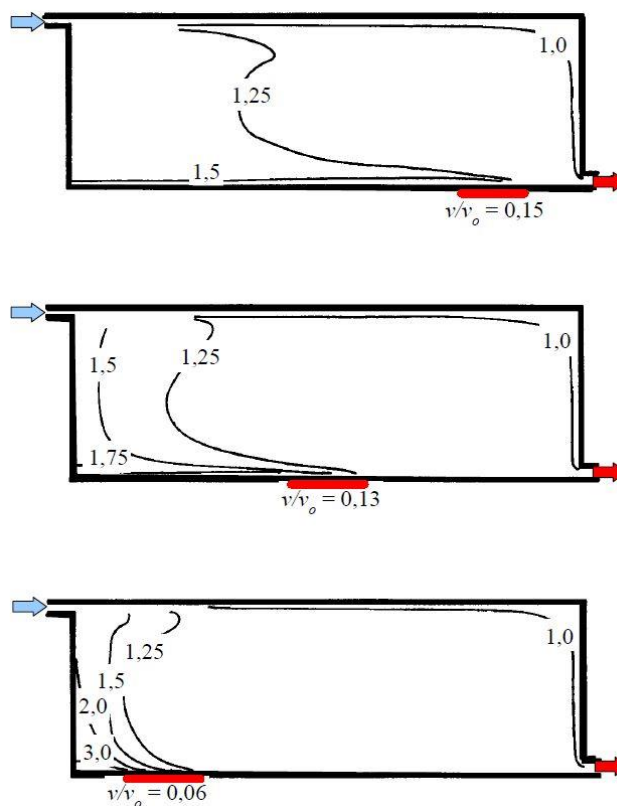


Joonis 4 – olukord, kus konvektiivse õhuvoolu ja ruumi sisse antava õhuvoolude vahel tekib tasakaal, mistõttu viibimistsooni värkse õhk enam ei jõua. [39]

3.2. Arvutus metoodika

3.2.1. Saasteaine hindamise indeks

Saasteaine, antud töös märkegaasina kasutatava CO₂, leviku hindamiseks ruumis on kasutatud lokaalset õhu kvaliteedi indeksi (valem 5).pöördväärtust, edaspidi „kontsentratsioonide suhe“. Antud väärtuse kasutamine aitab hinnata, mitu korda on mingis ruumi punktis saasteaine kontsentratsioon suurem väljatõmbe kanalis olevast kontsentratsioonist. Antud indeksi põhjal on toodud REHVA ventilatsiooniefektiivuse juhendmaterjalides seguneva ventilatsiooni puhul õhuliikumine, mis kirjeldab kontsentratsioonide suhte muutust sõltuvalt allika paikenemisest ruumis. Joonisel 5 on näha kontsentratsioonide suhte väärtuste muutusi, kust väljendub, et suurem väärtus tekib sissepuhke läheduses, kuhu õhujuga otse suunatud pole, mis tõttu tekib seisev piirkond. Seisvas piirkonnas on kontsentratsioon ülejäänud ruumist ja väljatõmbe kanali kontsentratsioonist oluliselt kõrgem, mistõttu kontsentratsioonide suhe on näiteks kolmandal juhul ruumi all nurgas 3.



Joonis 5 – Seguneva ventilatsiooni korral kontsentratsioonide suhte väärtused (mustad kõverjooned) sõltuvalt allika paiknemisest ruumis punasega märgitud saasteallika asukoht[40]

Kontsentratsioonide suhte valem on järgmine:

$$\varepsilon_p = \frac{C_p - C_{sp}}{C_{vt} - C_{sp}} \quad (1)$$

Kus

ε_p – ruumi punkti ja väljatõmbekanalite kontsentratsioonide suhe

C_p – ruumi punkti CO₂ kontsentratsioon (ppm)

C_{sp} – sissepuhkekanali CO₂ kontsentratsioon (ppm)

C_{vt} – väljatõmbekanalite CO₂ kontsentratsioon (ppm)

3.2.2. Nakatumise hindamine

Nakatamise risk (p , %) saab hinnata Wells-Riley õhuteel levivate haiguste mudeli järgi, võttes arvesse COVID-19 haiguse puhul patogeene eraldumise hulka (viirusosakeste eraldumise hulka). [29] Viirusosakeste hulka väljendatakse osakest tunnis (q , osakest/h). Viiruse osakesele vastab viiruste doos, mis on vajalik selleks, et põhjustada nakatumist 63% samas keskkonnas viibivatest inimestest. [29] COVID-19 puhul pole veel kindlalt paika pandud viirusosakeste hulga väljahingatavas õhus, kuid olemasolev kirjandus võrdustab väljahingatavas õhus veepiiskade patogeene sisalduse rõgas sisalduva viirusosakeste hulgaga. Vastavalt Rudnick, S.N. ja Milton, D.K. arvutus meetodile [41] (valem 2), mis põhineb Wells-Riley mudelil, saab nakatumise riski arvutada CO₂ kontsentratsioonide väärtusi (valem 3) kasutades:

$$P = \frac{D}{S} = 1 - e^{-\frac{\bar{f}Iqt}{S}} \quad (2)$$

Kus

P – nakatumise risk

D – nakatumiste arv

S – inimeste arv ruumis (va. nakataja)

\bar{f} – väljahingatava õhu osakaal kogu ruumi õhust

I – nakatunud inimeste arv

q – viirusosakeste eritumise hulk (osakest/s)

t – kokkupuute aeg (s)

Valemi 1 puhul on eeldatud, et ruumi õhk on hästi segunenud. Teine eeldus on, et viirusosakeste lagunemise, settimise ja filtratsiooni teel eemaldamise osakaal ventilatsiooniga eemaldamise kõrval on piisavalt väike, et ei arvestata. [41]

Väljahingatava õhu osakaal \bar{f} väljendub läbi CO₂ kontsentratsioonide valemiga 3 [16]. Valemi eelduseks on, et inimese hingamissagedus püsib vaadeldava perioodi vältel sama, vastavalt viidatud allikale on hingamisel eralduv CO₂ kontsentratsioon 40 000 ppm.

$$f = \frac{V_e}{V} = \frac{C - C_0}{C_a} \quad (3)$$

Kus

V_e – väljahingatava õhu hulk ruumi õhus (m³)

V – ruumi maht (m³)

C – CO₂ kontsentratsioon ruumi mingis punktis (ppm)

C_0 – CO₂ kontsentratsioon välis õhus ehk sissepuhke õhus (ppm)

C_a – väljahingatava õhu CO₂ kontsentratsioon (ppm)

Viiruse piiskade eritamise hulk (q , piiska/s) varieerub tulenevalt inimese hingamissagedusest, mis omakorda sõltub aktiivsusest. Piiskade eritumise hulk on toodud tabelis 1.

Tabel 1 – Viirusosakeste eraldumine tunnis erinevate aktiivsustega tegevuste korral [29] [42]

Tegevus	Piiskade eraldumine q , piiska/h
Puhkeolek, suukaudne hingamine	3,1
Kerge töö, kontoritöö, kuulamine (5% ajast rääkimine)	5
Kerge töö, koosolekul osalemine (40% ajast rääkimine)	19
Raske tegevus, oral breathing	21
Kerge töö, rääkimine	42
Kerge töö, laulmine või kõvasti rääkimine	270

Tabel 1 – Viirusosakeste eraldumine tunnis erinevate aktiivsustega tegevuste korral [29] [40]

Katsete käigus imiteeriti inimese poolt viiruse piiskade eritumist CO₂ manustamisega konstantsel vooluhulgal. Tulenevalt katseruumi suurest õhuvahetusest ja mõõteriistade veapiirist, valiti CO₂ vooluhulk manustamisel suurem, kui seda kirjandus allikad toetavad. Selleks, et hinnata nakatumise ohtu vastavate tegevuste korral, tuleb katsete andmed viia korrelatsiooni kirjanduses määratletud suurustega. Tabelis 2 on toodud kirjanduses kajastatud inimese poolt hingatavad õhuhulgad (Q_b , m³/h) erinevatel tegevustel:

Tabel 2 – Inimese hingamissagedus erinevatel tegevustel [29] [42]

Tegevus	Hingamissagedus Q _b , m ³ /h
Istuv tegevus	0,54
Rääkimine koosolekul	1,1
Kerge tegevus	1,38
Raske tegevus	3,3

Katseandmete ühildamiseks kirjanduse parameetritega, kasutati andmete suhete võrrandit (3). Andmed saadi tabelist 1 ja 2 ning iga katse käigus mõõdetud CO₂ manustatud hulk. CO₂ kirjanduse järgne eraldus võeti võrdseks väljahingatavas õhus CO₂ osakaaluga, mis on 4,5% hingamissagedusest.

$$\frac{q_{kat}}{Q_{CO_2, kat}} = \frac{q_{kir}}{Q_{CO_2, kir}} \quad (4)$$

Kus

q_{kat} – katse käigus eraldunud viiruseosakeste arv (osakest/h)

q_{kir} – kirjanduslikes allikates kajastatud viirusteosakeste eraldus (tabel 1) (osakest/h)

$Q_{CO_2, kat}$ – katse käigus manustatud CO₂ maht (l/h)

$Q_{CO_2, kir}$ – arutatud suurus kirjandus allikates kajastatud inimese hingamissagedusest (0,05Q_b) (l/h)

3.2.3. Ventilatsiooni efektiivsus hindamine

Ventilatsiooni efektiivsust hinnatakse ventilatsiooni süsteemi võimest eemaldada ruumist saasteaineid.[43] Efektiivsuse väärtus tuleneb saasteainete kontsentratsioonist sissepuhkkel, väljatõmbel ja inimese viibimistsoonis. [43] Täieliku ruumi õhu segunemise korral on ventilatsiooni väljatõmbekanalisis märkegaasi kontsentratsioon sama, mis ruumi õhus[40], ehk ventilatsiooni efektiivsus võrdub 1 -ga. Taoline olukord praktikas peaaegu mitte kunagi ei esine.[40] Antud töö puhul on mõistlik hinnata ventilatsiooni efektiivsust saasteainete eemaldamise seisukohalt tulenevalt väikeste viiruspiiskade lendlemisest ruumi õhus. Ventilatsiooni efektiivsust saasteainete eemaldamisele ruumist väljendab parameeter CRE[40], mis arvutatakse valemist 5. Kuna CRE väärtuse arvutamisel arvestatakse ruumi kesmise saasteaine kontsentratsiooniga, oleneb antud juhul selle väärtus allika paiknemisest ruumis. Kui allikas paikneb väljatõmbe läheduses ja suurem osa saasteainest eemaldub ruumist kiiresti, on ülejäänud ruumi kontsentratsioon madal, mis väljendub CRE eriti suure väärtusena.[40] Kui saasteallikas paikneb ruumi piirkonnas, kus õhusegunemine on halb või puudulik, ehk ruumi sisenev puhas õhk eemaldub ruumis

segunemata läbi väljatõmbe, väljendub CRE väärtus väga väiksenä.[40] Standardi EVS-EN 16798-3:2017 kohaselt on ventilatsiooni efektiivsus saasteainete eemaldamisel optimaalne väärtus „1“ REHVA seguneva ventilatsiooni juhendi kohaselt vastab see efektiivusele 50%. Ventilatsiooni efektiivsus saaste ainete eemaldamisele arvutatakse valemist (5):

$$CRE = \varepsilon_s = \frac{c_{vt} - c_{sp}}{\bar{c}_s - c_{sp}} \quad (5)$$

Kus

\bar{c}_s – on ruumi keskmine saasteaine kontsentratsioon.

4. TÖÖ METOODIKA

Käes olevas peatükis antakse ülevaade töö valmimise protsessist. Eraldi kirjeldatakse katseruumi, mõõteinstrumente, nende valmistamisest, tarkvaradest jm, katsete parameetreid. Struktuurskeem töö käigu kohta toodud järgnevalt:



4.1. Katseinstrumendid

4.1.1. Lisaküttekehad

Lisa radiaatorid

Suurema vabasoojuskoormuse saavutamiseks oli tarvis lisada ruumi lisa küttekehad, antud juhul elektriradiaaotrid. Radiaatorite eesmärk on tekitada konvektiivset õhuvoolu, ruumis temperatuuri tõstaks, ehk matkida olukorda, kus ruumis viibib suurel hulgal inimesi, et toimiks ruumi jahutussüsteem. Valitud radiaatorid: konvektor elektriradiaatorid Eurom E-Convect 1000W.



Joonis 6 – elektriline konvektorradiaator Eurom E-Convect [44]

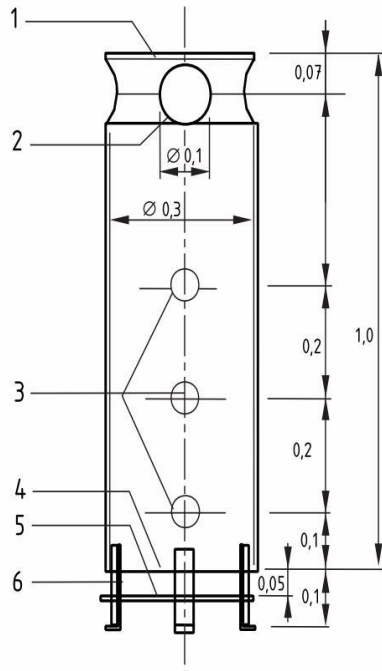
„Dummy“

Katsete läbiviimiseks oli tarvis valmistada teisedki elektrilise küttekehad „dummy“-d, ehk termilised mannekenid. Need katseeadmed matkivad inimese kohalolu ruumis, tekitades konvektiivset õhuvoolu enda läbiümbruses. „Dummy“-sid on kasutatud praktiliseks inimese mõju hindamiseks katsetes, kus on vajalik vabasoojuskoormus (jahutustalade töötamiseks). [45] [46] Vastavalt EN 14240 juhendile „dummy“ vastama järgmistele kriteeriumitele:

- katse dummy kest peab olema lehtterasest,
- nende asetus peab olema selline, et ühe dummy ala jääks minimaalselt 0,9m²,

- iga dummy peab olema reguleeritava võimsusega kuni 180W, ning kontrollitud vattmeetriga kvaliteedi klassiga 1%,

Antud katse jaoks valmistati 6 „dummy“-t. Samuti värviti instrumendid mustaks, et tulevikus tehes suitsukatseid, oleks nad ruumis kergesti eristatavad. „Dummy“ ehituseks vajalikud mõõtmised ja käesoleva töö jaoks ehitatud „dummy“ on toodud joonisel 7:



Joonis 7 – Katseinstrument „dummy“ e. terminine manneken, mis imiteerib inimest ruumis. Instrumenti joonis, mõõdud meetrites (paremal) ja töös valmistatud instrument (vasakul). 1 – otsakork; 2. neli ava võrdselt perimeetri peale jaotatuna; 3. kolm 60W lambipirini; 4. avatud põhi; 5. Põhja taldrik; 6 – tugi jalad

Katseinstrumentide elektrienergia kontroll

„Dummy“-de ja elektriradiaatoritele sooritati elektrienergia kontroll tegelike võimsuste kontrollimiseks. Mõõtmised teostati Hama „Premium“ energiakulu arvestiga. Instrumentide keskmised võimsused olid järgnevad:

- Elektriradiaator keskmine võimsus 958 W
- Dummy keskmine võimsus 184 W

4.1.2. CO₂ allikas

Märkegaasina kasutatud CO₂ gaasi manustati ruumi ballooni. Ballooni ventiililt sätiti paika manustatava gaasi kogus. Gaas juhiti vooliku abil ühte katse „dummy“-sse, voolik paiknes „dummy“ pikiteljel suunaga alla poole, et gaasi juga oleks paremini hajutatud, rohkem sarnane inimesele. „Dummy“ sees tekkiv konvektiivne õhuvool kannab CO₂ ülemiste avade kaudu ruumi. Balloon ja allika manustamise otsa paiknemine toodud järgmistel piltidel:







Joonis 8 – CO₂ allikas (vasakul) (autor Martin Kiil), gaasi manustamise punkt (paremal)

4.1.3. Mõõteseadmed

Katsete läbiviimiseks kasutati mitmeid mõõteseadmeid. Katsete käigus mõõdeti CO₂ ja RH% taset ning temperatuuri. Veel tuli kontrollida katseinstrumentide parameetreid. Tööde läbi viimiseks kasutatud mõõteseadmed on toodud tabelis 3 ja 4:

Tabel 3 – Katsetustes kasutatud mõõteseadmed Evikon E6226 [47], HOBO MX1102 [48], HOBO UX120-006M [49] ja seinamonitor Schneider SE8000 [50]

Mõõtesead	Õhukvaliteedi monitor-logger E6226 (CO ₂ sisalduse, õhuniiskuse ja temperatuuri mõõtmise)	Õhukvaliteedi monitor-logger Onset HOBO MX1102 (CO ₂ sisalduse, õhuniiskuse ja temperatuuri mõõtmise)	Õhutemperatuuri ja niiskuse monitor-logger HOBO UX120-006M (õhuniiskuse ja temperatuuri mõõtmise)	Seinamonitor, Schneider SE8000
Mõõtepiirkond	0...9 999 ppm CO ₂ , 0...100% RH, -10...+50 oC	0...5 000 ppm CO ₂ , 1...90% RH, 0...+50 oC	0...95% RH, -20...+70 oC	-
Mõõtetäpsus	±50ppm CO ₂ , ±4 % RH, ±0,6 oC	±50ppm CO ₂ , ±2% RH, ±0,21 oC	±0.1...0.3%	-
Pilt				

Tabel 4 –Kasutatud mõõteseadmed KERN FKB[51], Testo 440 dP [50]; Hama Premium [51]

Mõõtesead	Kaal KERN FKB (CO ₂ ballooni kaalumiseks)	Vooluhulga mõõtesead, testo 440 dP	Energiakulu arvesti Hama "Premium"
Mõõtepiirkond	2...65 000g	-150...+150hPa	...3680W
Mõõtetäpsus	±1g	± 0,02	±2%
Pilt			

4.2. Koosolekuruum

Uuritavate objektide valikul tuleb eelkõige lähtuda aktiiv jahutustalade olemasolud. Esmaseks valitud ruumiks sai Tallinna Tehnikaülikooli korpuses U03, teisel korrusel olev koosolekute ruum, 214. Ruumi aknad on ainult korpuse idafassaadil, idas paikneb ka teine 5 kordne korpus. Kõrgemate kõrvalmajade olemasolu viitab sellele, et sügisel ja talvel palju otsesest päikese kiirgust ruumi ei jõua, kevadel ja suvel kus päike liigub kõrgmalt, avaldab jällegi mõju. Koosoleku ruumi on pindala 52,5 m² ja kinnise ripplae kõrgus 2,7m. Ruumi keskel paikneb suur koosolekulaud, mille ümber on 22 istekohta, lisaks veel 10 kuulajate kohta akna ääres.



Joonis 9– koosolekute ruum Tallinna Tehnikaülikoolis U03 korpuse teisel korrusel.

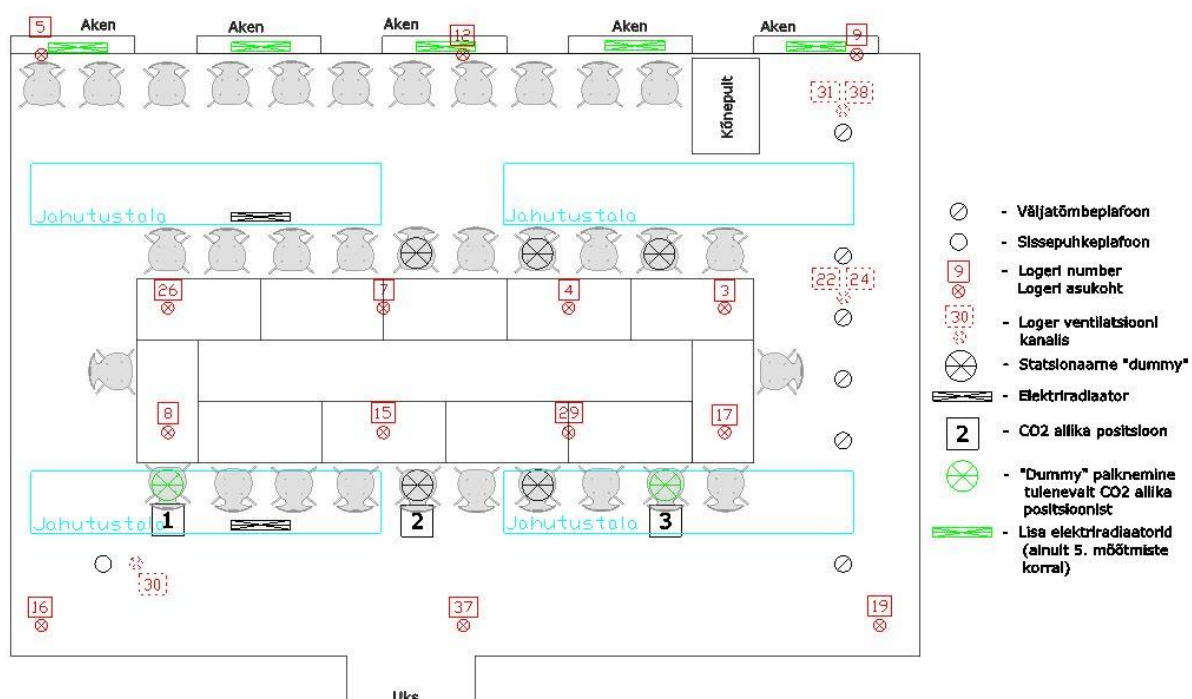
214 koosoleku ruumi tehnosüsteemideks on keskküttel põhinev radiaatorküte, jahutus- ja ventilatsioonisüsteemina on paigaldatud aktiivtalad tsentraalse ventilatsioonisüsteemi külge. Ruumi kliima juhtimine käib ruumi põhiselt läbi seinapealse termostaadi, mis võimaldab seadistada soovitud õhutemperatuuri. Ventilatsiooni väljatõmme paikneb ruumi ühes otsas laeplafoonidena. Sissepuhe toimib läbi aktiivpalkide, mis paiknevad peaaegu kogu ruumi pikkuses ning ühe lisa plafooni, mis paikneb väljatõmbest teisel pool ruumi otsas. Ruumi õhujagajate andmed on toodud tabelis 3. Ruumi mõõdetud sissepuhke ja väljatõmbe õhuhulk on võrdsed, 156 l/s (3 l/(s m²), mis vastab 4 kordsele õhuvahetusele.

Antud õhuhulgal eemaldub ventilatsiooniga 1120 W soojusenergiat. EVS 906:2018 uute majade koosoleku ruumide nõue $4l/(s \cdot m^2)$ siin täidetud pole.

Tabel 5 –Tallinna Tehnikaülikooli ruumi U03-214 õhujaoajate ja talade loend, kus Q_{tot} – kogu ruumi õhuvooluhulk, l/s; Φ – talade kogu jahutus võimsus W[52]

Tüüp	Tootja, toote nimetus	Andmed
Väljatõmbe ventiilid	Fläkt, KSO-200	$Q_{tot} = 156$ l/s Kogus: 6
Aktiiv jahutustalad	Halton, RE6/d-3400-3100-R2N, TC=C, CE=N, CO=W, AQ=A, EX=N, ZT=N	$Q_{tot} = 156$ l/s $\Phi_{tot} = 1326$ W Kogus: 4

Andmete kogumiseks paigaldati ruumi CO₂ andmelogerid EVIKON E6226. Veel oli ruumis seinapealne termostaat ning HOBO UX120-006M ruumi temperatuuride ja sissepuhke temperatuuride mõõtmiseks. CO₂ logerid paiknesid ruumis 14 punktis, lisaks veel üks sissepuhke kanalis ja 4 tükki väljatõmbe kanalis. Ruumis paiknevad logerid paigutati 1,6 meetri kõrgusele, mis on istuva inimese hingamisteede kõrgus 1,2 m. Ruumi jahutuse aktiveerimiseks, lisati katsetele juurde lisa soojust elektriradikate näol. CO₂ mõõtepunktid, koos muude oluliste komponentidega on toodud joonisel 4:



Joonis 10 –Tallinna Tehnikaülikooli ruumi U03-214 katsete ruumi plaan tähtsamate instrumentidega.

4.3. Koosolekute ruumi mõõtmiste kirjeldus

U03-214 koosolekute ruumis läbiviidud katsed viidi läbi 2020. aasta novembris. Katsete päevadel päikest ruumi, ei paistnud, seega vabasoojuse seisukohalt olid tagatud üpriski statsionaarsed tingimused. Valitud CO₂ manustamise vooluhulgad võetud teadlikult suuremad, vastavalt eelpool välja toodud põhjustele.

Tabel 6 – Koosolekute ruumi mõõtmiste detailne ülevaade

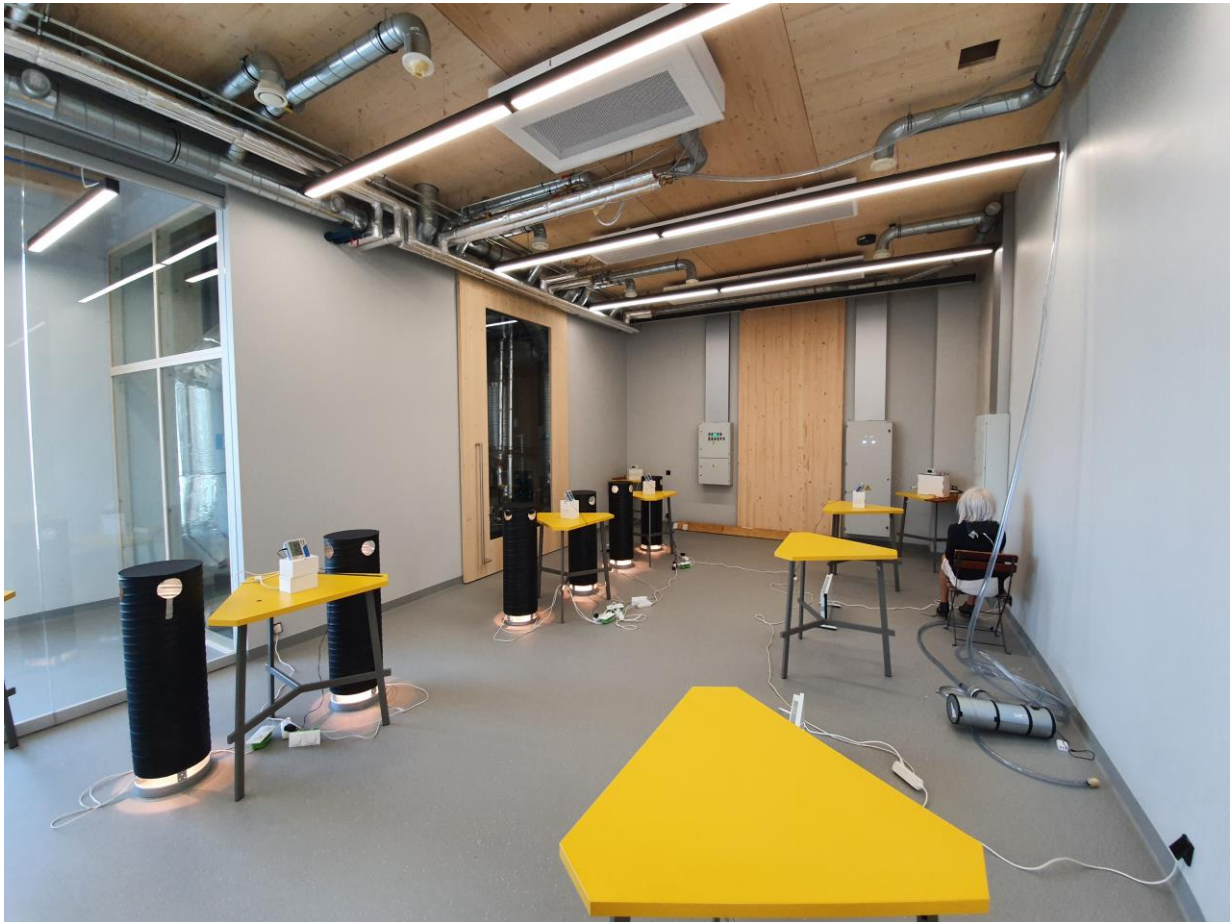
Mõõtmise nr	Kirjeldus	Katse nr	CO ₂ positsioon	Kestus (min)	CO ₂ vooluhulk (l/h)
Mõõtmised 1	Töötab ventilatsioon, lisasoojus 1104 W (dummy 6tk), mõõteintervall 1 sekund, tähis AV 5%	1.1	1	32	225
		1.2	2	31	271
		1.3	3	28	257
Mõõtmised 2	Töötab ventilatsioon ja jahutustalad, tähis J1 5% lisasoojus 3020 W (dummy 6tk + lisaradiaatorid 2tk),	2.1	3	36	250
		2.2	2	36	267
		2.3	1	36	267
Mõõtmised 3	Töötab ventilatsioon ja jahutustalad lisasoojus 3020 W (dummy 6tk + lisaradiaatorid 2tk), nakatunu aktiivsem (räägb 40 % ajast) mõõteintervall 1 sekund, tähis J1 40%	3.1	1	61	413
		3.2	3	62	445
Mõõtmised 4	Ventilatsioon ei tööta (dummy 6tk), intervall 1 sekund, tähis VK 5% mõõteintervall 1 sekund	4.1	3	122	219
Mõõtmised 5	Töötab ventilatsioon ja jahutustalad lisasoojus 7810 W (dummy 6tk + lisaradiaatorid 7tk), mõõteintervall 1 sekund, tähis J2 5%	5.1	3	39	220
		5.2	2	32	223
		5.3	1	35	230

Mõõtmiste alguses seati katseruum üles vastavalt joonisele 4. Mõõtmiste 1 puhul joonisel 4 olevaid lisaküttekehasid (elektriradiaatoreid ei kasutatud). Mõõtmiste 2, 3 ja 4 puhul võeti kasutusele kaks lisa küttekeha jahutuse aktiveerimiseks ning katse 5 puhul asetati lisaks kahele põrandal paiknevale lisa raditooritele veel ka aknalauale 5 radiaatorit. Kõigi mõõtmiste puhul viidi katsed läbi järjestikku (va mõõtmine 4, kus toimus ainult üks katse), see tähendab, et peale igat katset käidi kaalumas manustatud CO₂ hulka ning tõsteti allika uuele positsoonile. Detailsem ülevaade katsete kohta tabelis 6

4.4. Klassiruumi ja avatud kontoriruum

Klassiruumi ja avatud kontori ruumide kirjeldamiseks valiti Tallinna Tehnikaülikooli Ehitusinstituudi uues hoone, aadressil Mäepealse 3 ruum 214 õhujaotuslabor. Ruum on loodud ventilatsiooni ja jahutuse töötoaks. Ruum on üks osa suuremast avatud õppetoad, millest on vaadeldav ruum piiratud ühest otsast klaasist elementidega. Läbi ruumi pääseb ka ainult 214 ala teenindavad ventilatsiooni agregaadini. Toal puudub piir välis fassaadiga, seega puudub ka välise vabasoojuskoormuse mõju. Ruumi pindala on 45 m² ja avatud lae puhas kõrgus 4 m. Ruumis on paiknevad lauad ruumi kesk osas 6 positsoonil ja ruumi nurkades. Ruumi keskmiste laudade positsoonid on valitud vastavalt hajutatud

väljatõmbe otsade alla. Ruumi vabasoojuskoormuseks läbi mõlema katse on 3020 W.



Joonis 11 – Õhujaotuslabor 214, Mäepealse 3.

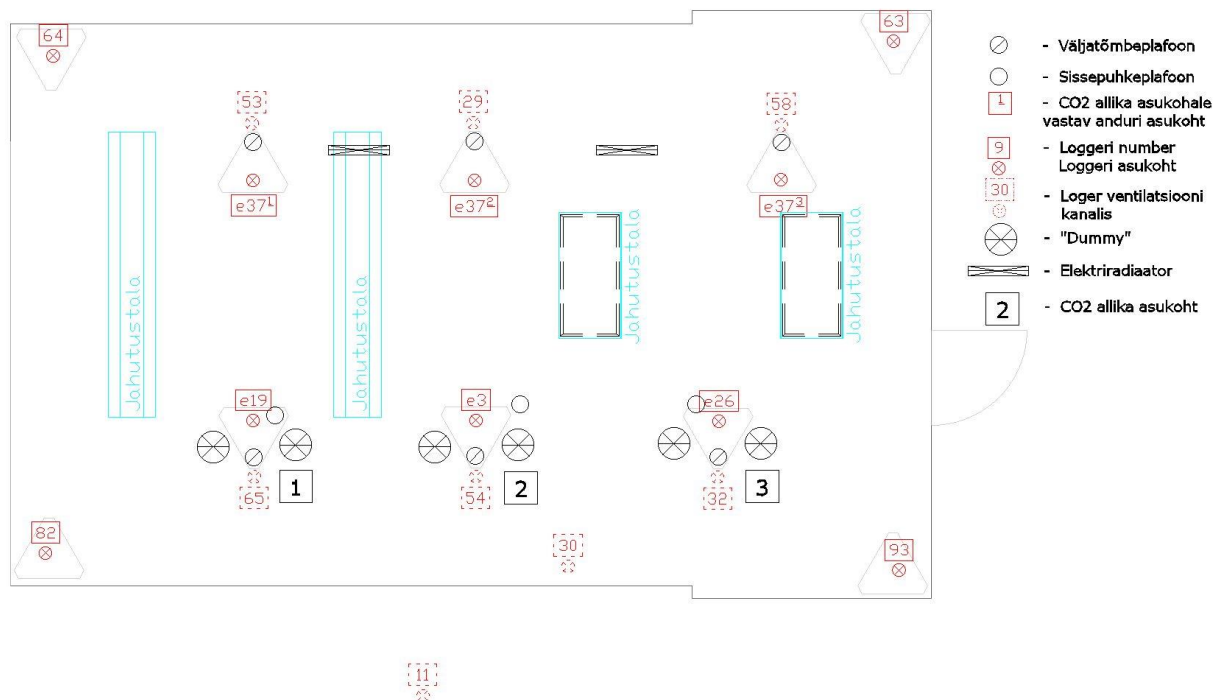
Tabel 7 – Õhujaotuslabori, ruumi 214 sissepuhke-, väljatõmbeõhujaotajad ja aktiivtalad [53]

Tüüp	Tootja, toote nimetus	Andmed
Väljatõmbe plafoonid	Fläktwoods, KSO-125	Kogus: 6
Sissepuhke plafoonid	Halton, IAO/N-100	Kogus: 3
Aktiivjahutustalad	Fläktwoods, IQFI-270-21-09-2 Fläktwoods, IQCC-120-12-2-04-1	Kogus: 2 Kogus: 2

214 õhujaotuslabori ruumi jahutuse ja venitlatsiooni süsteemideks on ruumis paigaldatud aktiivpalgid, mis saava õhu ruumipõhiselt ventiaalsiooni seadmelt. Lisaks on sissepuhkel veel 3 plafooni, mis aitavad õhku paremini segada ning väljatõmme on lahendatud 6 hajutatud punktiga. Aktiivtala, mida on kahte sorti paiknevad kõrgel lae all, risti ruumi pikema küljega. Ruumi õhujagajate andmed on toodud tabelis 7. Ruumi sissepuhke ja

väljatõmbe õhuhulk on võrdsed, klassiruumi puhul 180 l/s ($4 \text{ l}/(\text{s m}^2)$), mis vastab 3,6 kordsele õhuvahetusele ja avatud kontori puhul 90 l/s ($2 \text{ l}/(\text{s m}^2)$), õhuvahetus $1,8 \text{ h}^{-1}$.

Ventilatsiooni kanalites paiknevate mõõtepunktide andmete logimiseks kasutati HOBO MX1102 andmelogereid. Andmelogeri 53, 29, 58, 65, 54, 32 paiknesid ruumis hajutatud väljatõmbe punktide kanalites, nr 11 paiknes magistralis (ventilatsiooni seadmes väljatõmbe poolel). Logerid 64, 63, 82 ja 93 ning e37, e19, e3 ja e26 paiknesid ruumi istuva inimese hingamisteede kõrgusel. Loger e37 liikus katsetes allika positsiooniga paralleelselt kaasa (vt. joonis 11).



Joonis 11 – Klassiruumi ja avatud kontori plaan tähtsamate instrumentidega

4.5. Klassiruumi ja avatud kontori mõõtmiste kirjeldus

Mäepealse 3 õhujaotuslaboris läbi viidud klassiruumi ja avatud kontori mõõtmised toimusid 2021. aastal aprilli- ja maikuu. Katseid päikesepoolne lissoojus tulenevalt ruumi paiknemisest ei mõjutanud, seega vabasoojuse seisukohalt olid tagatud üpriski statsionaarsed tingimused. Valitud CO₂ manustamise vooluhulgad võetud jällegi teadlikult suuremad.

Tabel 8 – Klassiruumi mõõtmiste $4 \text{ l}/(\text{s m}^2)$ detailne info

Mõõtmise nr	Kirjeldus	Katse nr	CO2 positsioon	Kestus (min)	CO2 vooluhulk (l/h)
Mõõtmised 1	Lisa sissepuhke plafoonid + väljatõmme hajutatud	1.1	3	41	125
		1.2	2	43	135
		1.3	1	40	134
Mõõtmised 2	Väljatõmme hajutatud	2.1	3	40	130
		2.2	2	41	123
		2.3	1	41	125
Mõõtmised 3	Väljatõmme ruumi nurgas,	3.1	1	40	130
		3.2	2	40	128
		3.3	3	40	123

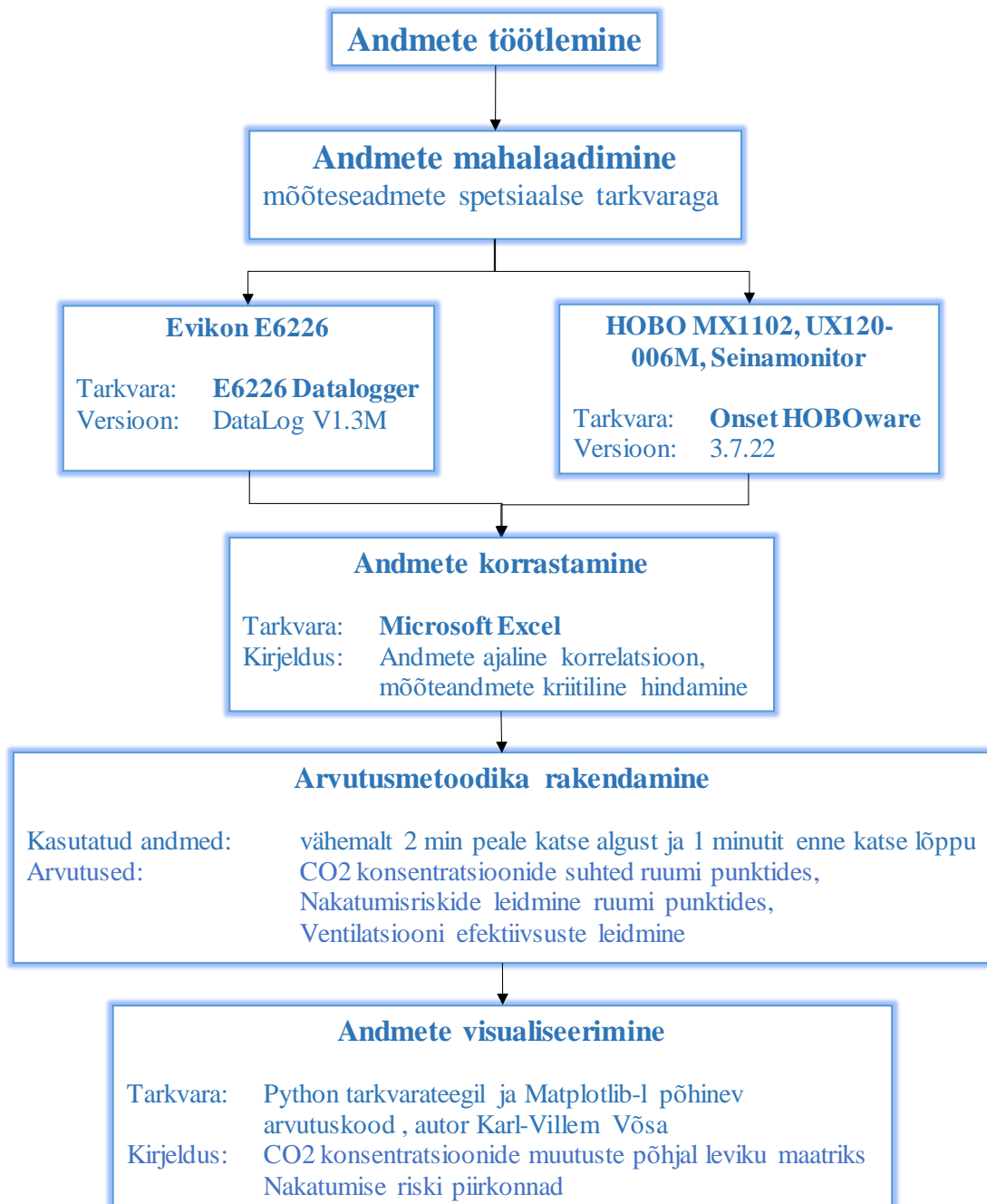
Tabel 9 – Avatud kontori mõõtmiste 2 l/(s m²) detailne info

Mõõtmise nr	Kirjeldus	Katse nr	CO2 positsioon	Kestus (min)	CO2 vooluhulk (l/h)
Mõõtmised 4	Väljatõmme ruumi nurgas	4.1	3	40	149
		4.2	2	40	127
		4.3	1	40	124
Mõõtmised 5	Väljatõmme hajutatud	5.1	1	40	125
		5.2	2	40	131
		5.3	3	40	123
Mõõtmised 6	Lisa sissepuhke plafoonid + väljatõmme hajutatud	6.1	3	42	123
		6.2	2	40	124
		6.3	1	40	115

Kahe tabeli vahe on ruumi ventilatsiooni õhuhulk. Klassi ruumi puhul oli see 4 l/(s m²) ja avatud kontori puhul 2 l/(s m²). Klassiruumi mõõtmiste puhul tehti katsete vahel ca 10 minutilised pausid, et vähendada eelnevate katste mõju. Avatud kontori mõõtmiste puhul rakendati katsete vahel ventilatsioonisüsteemile kõrgemad õhuhulgad, mis ruumi õhu jälle läbi segas. Kõigi mõõtmiste puhul võeti andmete logimisintervalliks 10 sekundit. Mõõtmiste 3 ja 4 korral eemaldati väljatõmbe kanali otsast toru kork ja sulgeti ülejäänud väljatõmbed ning andmeloger nr 65 sellesse kanalisse.

4.7. Mõõtmistulemuste töötlemine

Mõõtmisi teostati palju, millest tulenev andmete rohkus vajab suuremat korrastamist. Andmete töötlemiseks kasutati erinevaid tarkvarasid ning rakendati teoreetilisi valemeid mõõdetud tulemustele, viimase etapina visualiseeriti saadud tulemusi Karl-Villem Võsa programmikoodi abil. Ülevaade mõõtmiste analüüsist on toodud plokk skeemil:



Andmete korrastamisel oli suureks osaks erinevate Evikon E6226 logerite katsetulemuste ajaline ühildamine. Üle poolte logerite ei salvestanud korrapäraselt andmeid. Analüüs näitas, et puudu olid andmerekad keskmiselt iga 5 sekundi tagant, mistõttu pidi igat veega andmete tulpa pikendama tühja rea võrra iga 5 sekundi tagant.

Andmete analüüsimiseks jaotati mõõtmistes saadud andmed nelja võrdse ajavahemiku vahel ning arvutati iga ajavahemiku keskmised tulemused. Katsete läbiviijate mõju minimaliseerimiseks katsetulemustele arvestati andmeid katse algusest vähemalt 2 minutit hiljem kuni vähemalt 1 minutit enne katse lõppu. Ajavahemikud katsetel varieerusid, mis tõttu arvestati ventilatsiooni efektiivsuse ja keskmise nakatumisriski arvutamisel kõige lühema katse aega. Viiruste leviku hindamisel kasutati andmeid mõõtmiste täies mahus, rakendus ka reegel: algusest vähemalt 2 minutit hiljem kuni vähemalt 1 minut enne lõppu. Leviku hindamiseks leiti valemi 1 abil suhtarvud, millede baasil visualiseeriti doktorant Karl-Villem Võsa abiga, kasutades programeerimiskeeles Python tarkvarateeke SciPly ja matplotlib. Leviku paremaks hindamiseks, leiti valemi 5 abil ventilatsiooni efektiivsus saasteainete eemaldamisele ruumist. Nakatumise riskide leidmisel tulenevalt katsete läbiviimiseks manustatud suuremast CO₂ kogusest arvutati kirjanduses toodud suurused ümber vastavate katsete väärtustele. Arvutuskäik on on kirjeldatud antud lõigu lõpus. Tulemuste paremaks hindamiseks jaotati katseruumid kolmeks tsooniks (joonised 6 ja 7) ning tulemused koondati nende keskmistele väärtustele või mõnel juhul ka kogu ruumi keskväärtustele.

$$\frac{q_k}{Q_{CO_2,k}} = \frac{q_t}{Q_{CO_2,t}} \Rightarrow q_k = \frac{Q_{CO_2,k} \times q_t}{Q_{CO_2,t}} \quad (6)$$

Kus

q_k ja q_t - viirusosakeste eraldumine väärtus nakatajalt vastavalt katses ja teoorias, osakest/h

$Q_{CO_2,k}$ ja $Q_{CO_2,t}$ - CO₂ manustamise vooluhulga väärtus vastavalt katses ja teoorias, l/h

CO₂ teoreetiline vooluhulk on vastavalt inimese poolt väljahingatava õhu vooluhulgast (väärtus tabelist 2) 4,5%

CO₂ katse vooluhulk arvatakse valemist 7.

$$Q_{CO_2,k} = \frac{\frac{60}{t_m} \times m_{CO_2}}{1,98} \quad (7)$$

Kus

t_m - mõõtmise kestvus minutites

m_{CO_2} - mõõtmise jooksul ruumi manustatud gaasi kogus, kg

1,98 - CO₂ tihedus toatemperatuuril, kg/m³

5. ANALÜÜS JA DISKUSSIOON

Käesolev peatükk on jagatud kolmeks. Esimeses peatükis analüüsitakse koosolekuruumis CO₂ leviku põhjal viiruste aerosoolset levikut, hinnatakse nakatumise riski ruumis ja ventilatsiooni efektiivsust erinevatel juhtudel. Teises ja kolmandas peatükis antakse analoogselt nõupidamiste ruumile hinnangud ja analüüsitakse klassiruumi ja avatud kontorit viiruste leviku seisukohast.

5.1. Koosolekuruum

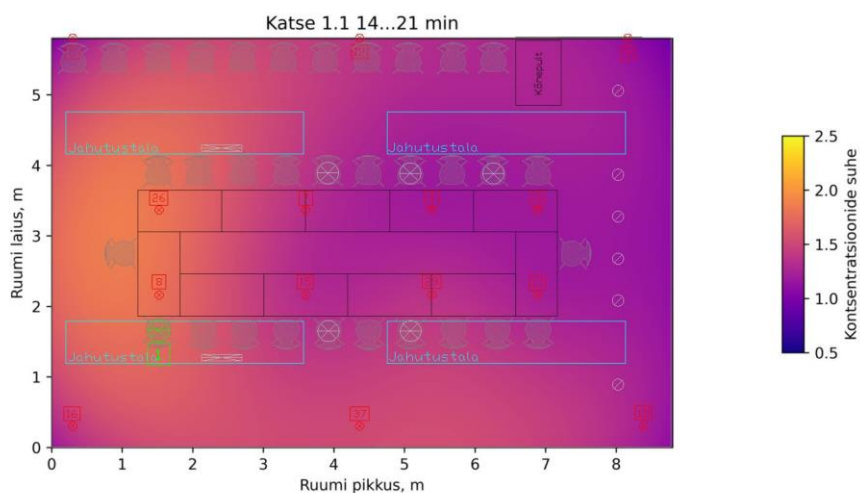
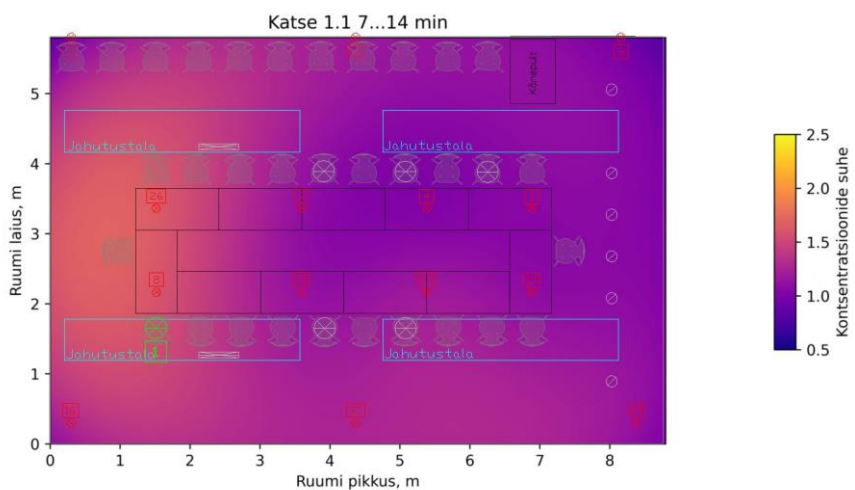
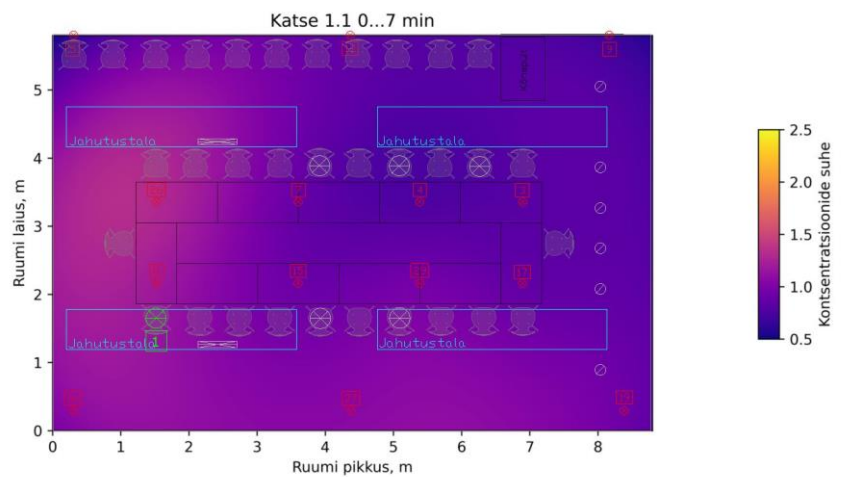
Koosolekute ruumis võrreldakse ventilatsiooni efektiivsust saasteainete eemaldamise aspektist, viiruste levikut ja viirustesse nakatumise riski olukordades, kus puudub ventilatsioon, toimib ventilatsioon, lisaks ventilatsioonile toimib ka jahutus. Analüüs jaguneb järgnevalt:

- Hinnatakse märkegaasi meetodil viiruse levikut ruumis erinevatelt manustamise positsioonidelt
- Analüüsitakse jahutuse mõju viiruste levikule läbi ventilatsiooni efektiivsuse eemaldada ruumist saasteaineid
- Analüüsitakse nakatumise riski ruumi tsoonide kaupa ja kogu ruumi kohta

5.1.1. Viiruse levik ja nakatunu paiknemine ruumis

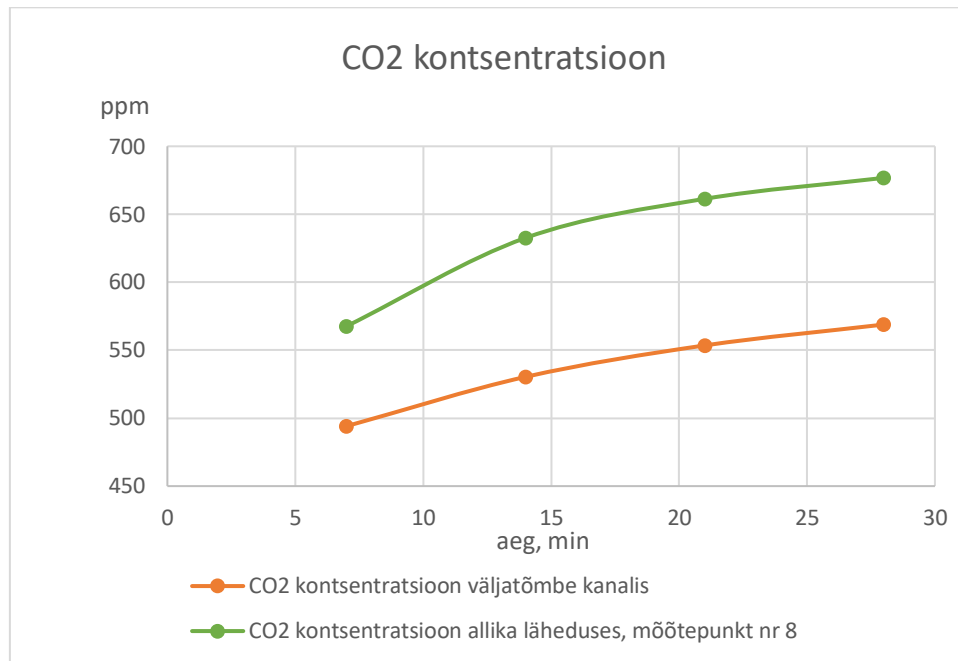
Viiruse leviku kirjeldamiseks on Karl-Villem Võsa abil koostatud joonised mõõdetud andmete põhjal. Joonised on koostatud läbi erinevate olukordade ruumis (jahutuse intensiivsus „0“, ehk töötab ainult ventilatsioon; jahutuse korral, vabasoojuskoormus 3020W; nakatunu on aktiivsem, ehk eraldab rohkem viiruste osakesi, mehaanilise ventilatsiooni puudumisel ja suvise olukorra ajal, ehk suurema vabasoojuse 7810W korral). Levikut kirjeldavad joonised põhinevad valemil 1. Levikute hindamiseks koostatud joonised asuvad täies mahus käesoleva töö lisas, selles peatükis väljatoodud pildid on valikulised.

Joonisel 12 on välja toodud ainult ventilatsiooni töötamisel mõõtmiste põhjal joonised läbi katse toimumise aja. Katse alguses on kontsentratsiooni suhe läbi ruumi suhteliselt madal, ainult tsoon 1, kus paikneb ka antud juhul allikas, on see kõrgem. Mida aeg edasi, tõuseb järkjärgult ruumis kontsentratsioon hajudes aina rohkem ruumis vasakult paremale, ehk liigub märkegaas väljatõmbe suunas. Saasteaine levikut väljatõmbe suunas kirjeldab ka



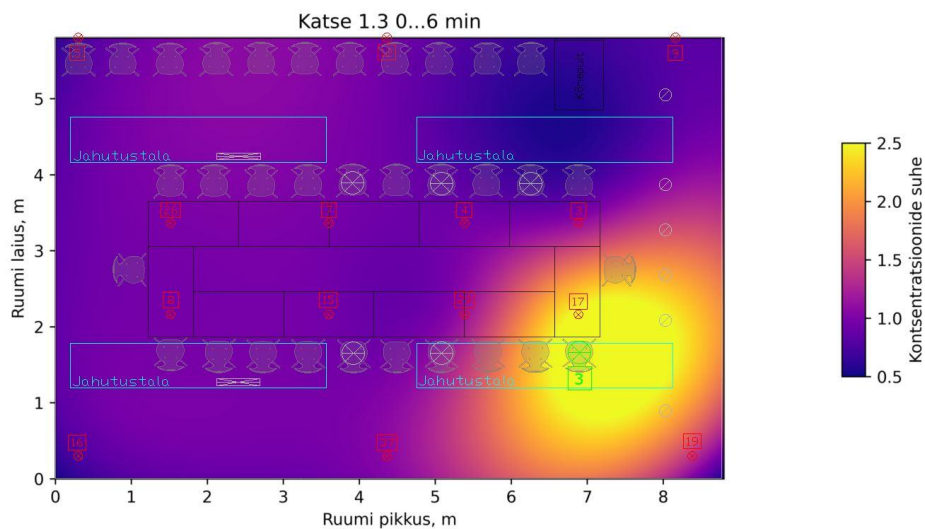
Joonis 12 – Saasteaine levik ruumis olukorras, kus ruumis töötab ventilatsioon ja CO₂ allikas asub positsioonil 1

tabel 13, kus allika vahetuses läheduses kontentratsiooni tõustes läbi aja tõuseb ka väljatõmbekanalis CO₂ kontsentratsioon.

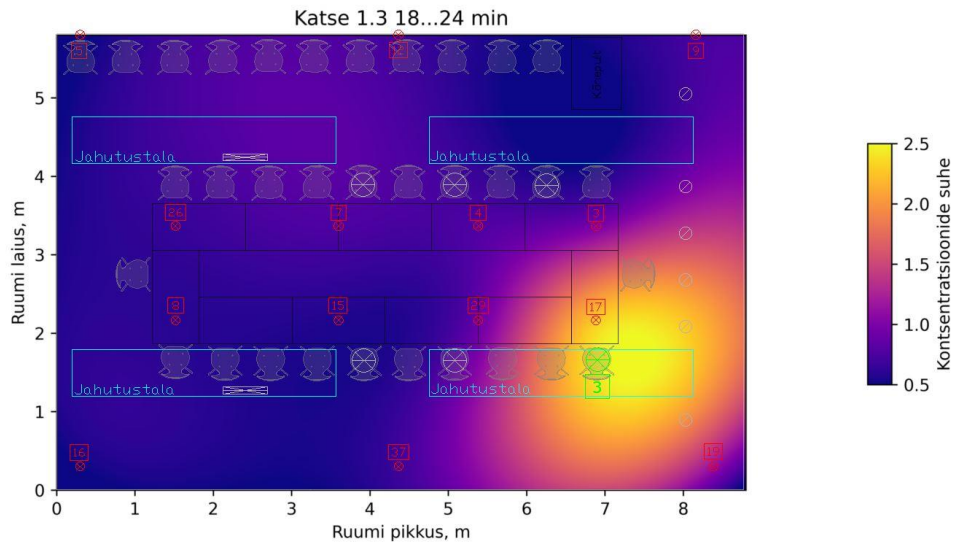


Joonis 13 – CO₂ kontsentratsiooni tõus läbi aja olukorras kus ruumis töötab mehaaniline ventilatsioon

Üldist saasteaine levikut väljatõmbe suunas kirjeldab ka allika asukoha muutmine positsioonile 3, mis asub väljatõmbele oluliselt lähemal. Jooniselt 14 ja 15 väljendub, et suurem kontsentratsioon püsib allika läheduses, ega kandu ruumi laiali. Olgugi, et joonisel on katse alguses ruumi vasak pool samuti roosat värvi, ehk kontsentratsioon on natukene kõrgem, ei näita see märkegaasi levikut konkreetse katse jooksul väljatõmbest eemale. Pigem väljendab, taoline nähtud eelmise katse mõju vaadeldavale katsele, sest katse lõpus on kontsentratsioonide suhe oluliselt madalam.

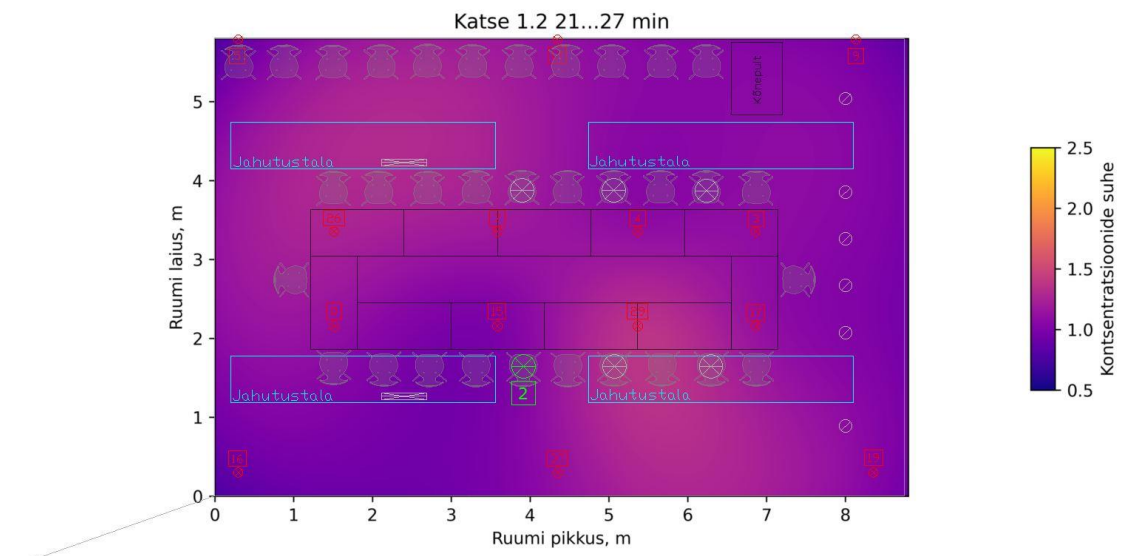


Joonis 14 – CO₂ kontsentratsioonide suhe positsioonil 3 katse alguses



Joonis 15 – CO₂ kontsentratsioonide suhe positsioonil 3 katse lõpus

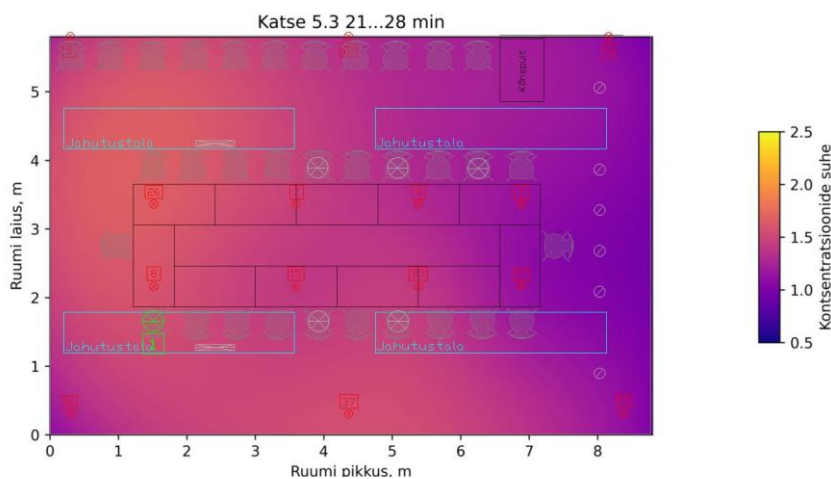
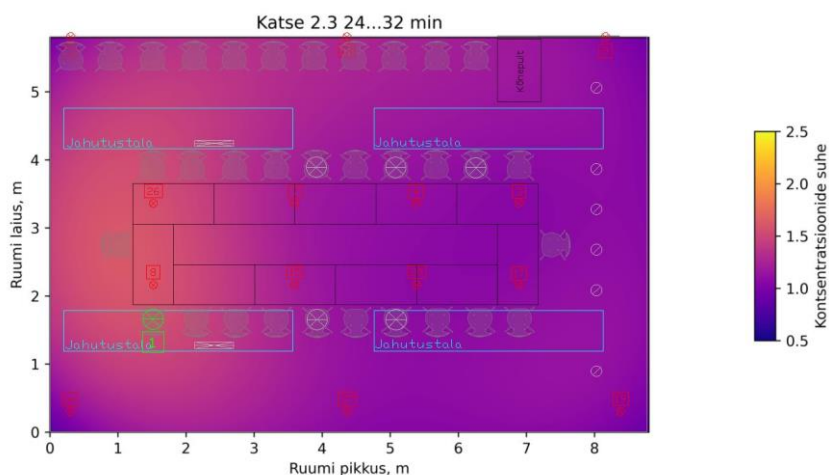
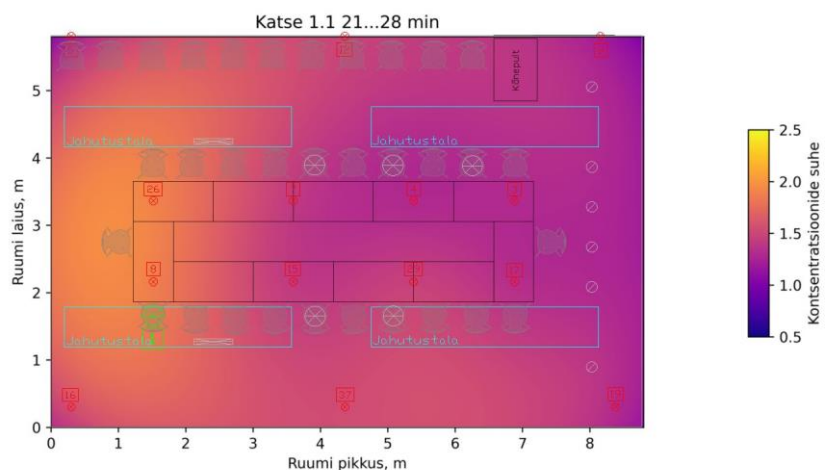
Eelmised katsed on kinnitanud saasteaine levikut väljatõmbe suunas. Joonisel 8 on välja toodud märkegaasi levik positsioonilt 2. Antud katses selgub, et manustatud märkegaas on ka mõjutatud ruumi õhujaoitusest. Kontsentratsioonide suhe näitab märkegaasi levikut kogu ruumi lõikes ning suhteliselt ühtlast hajumist ruumis. See nähtud on iseloomulik segunevale õhujaoitusele, millega on ka antud juhul tegu. Jooniste 12 ja 16 analüüsimisel, selgub et allika paiknemisel väljatõmbest kaugemal, positsioonil 1 ja 2, tekib ruumi vasakusse ülemisse veerandisse mõlemal juhul ülejäänud ruumist kõrgem kontsentratsiooni piirkond. Selline tulemus tuleneb ilmselt sellest, et inimese väljahingamisel eritub CO₂ suunaga allikast eemale ja üles ning ruumis seguneva õhujaoituse korral kandub ta just selles suunas. Võrreldes kahte olukorda on joonisel 8 kontsentratsioonide suhe ruumi lõikes ligikaudu sama aja möödudes hoopis madalam, kui seda joonisel 12, kus allikas paiknes väljatõmbest veel kaugemal. See jällegi kinnitab üldist saasteaine levikut väljatõmbe suunas. Et CO₂ kontsentratsiooni kasutati märkegaasina viiruse leviku hindamiseks, kanduvad kõik järeldused ka üle viiruspiiskade levikule ruumis.



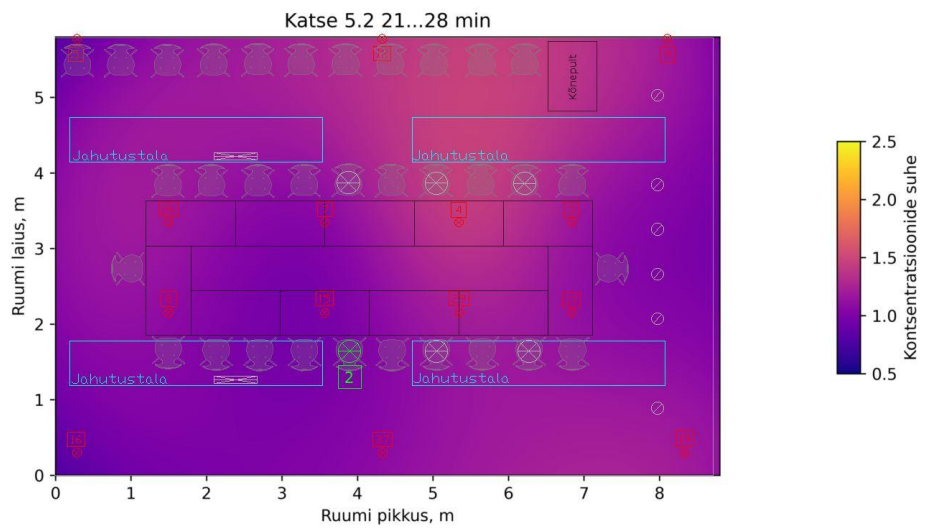
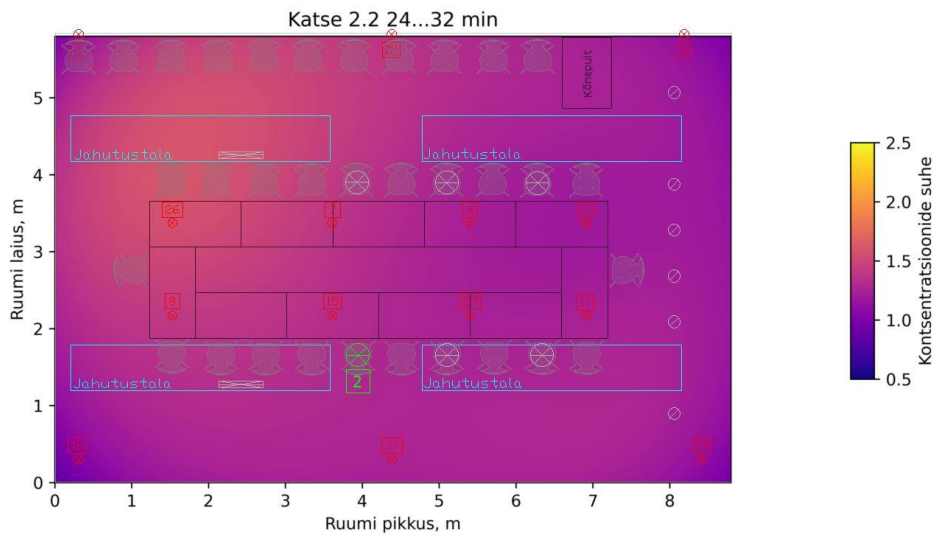
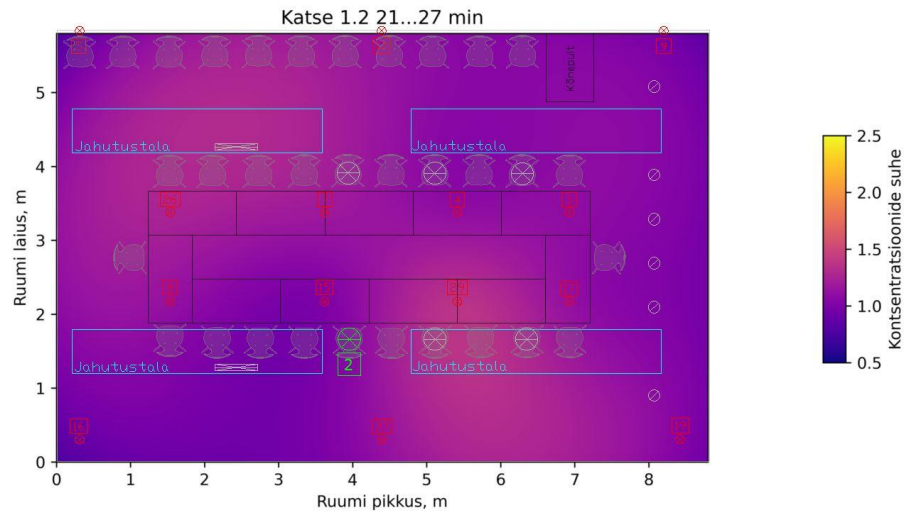
Joonis 16 – CO₂ kontsentratsioonide suhe positsioonil 2 katse lõpus

5.1.2. Aktiivjahutustalade mõju viiruse levikule

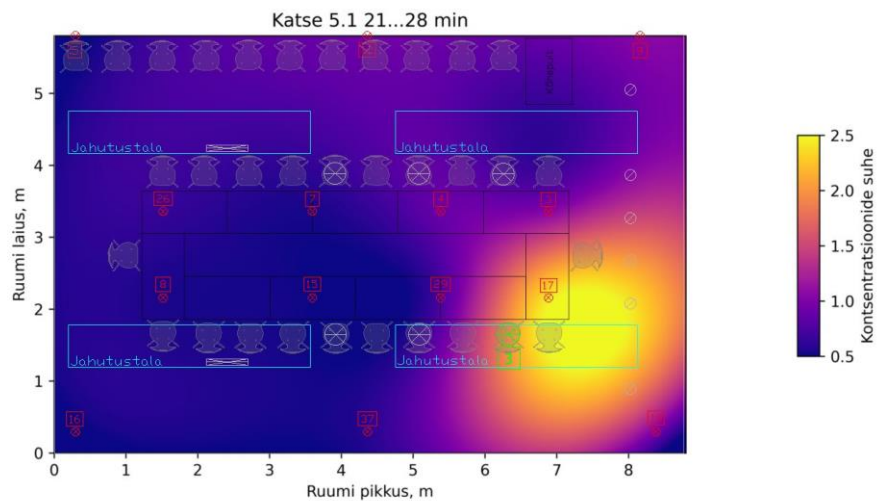
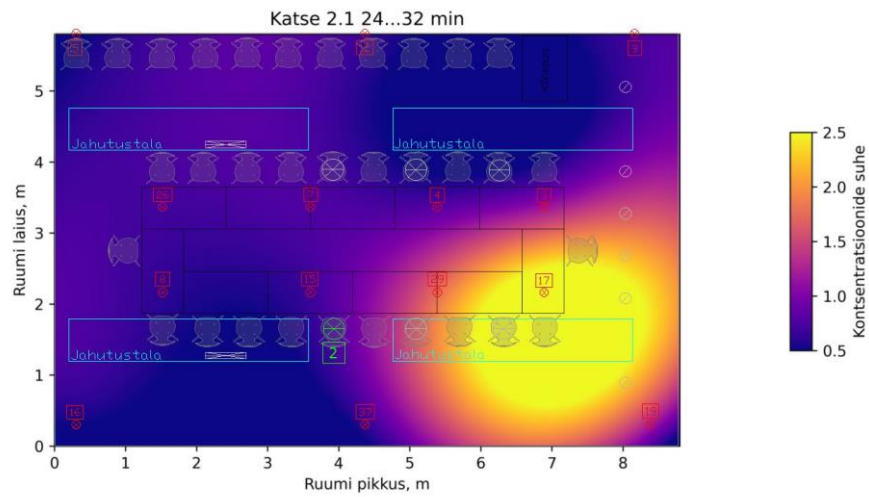
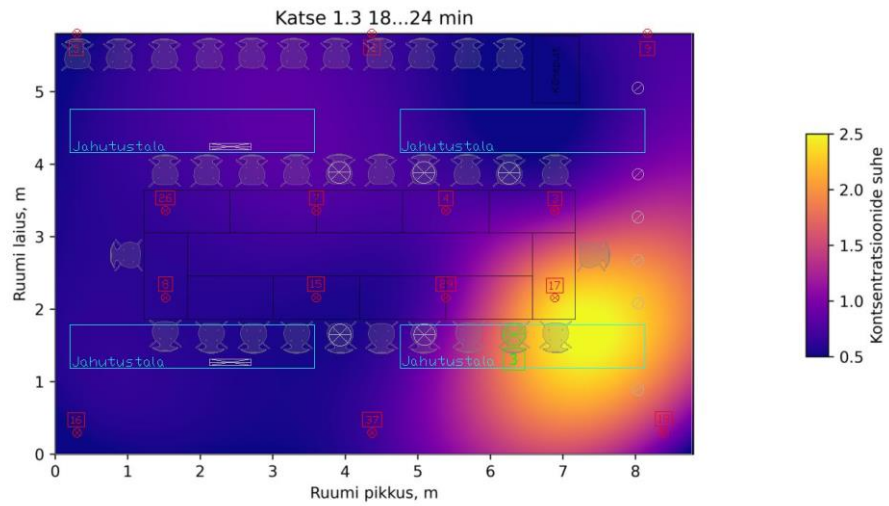
Teoorias aktiivtalade poolt tekitatav Venturi efekt tagab ruumis veel suurema õhusegunemise. Joonistel 17, 18 ja 19 on toodud võrdluseks ruumi kontsentratsioonide suhete põhjal saasteaine levik ventilatsiooniga ja erinevatel jahutus koormustel.



Joonis 17 – CO₂ kontsentratsioonide suhete põhjal saasteaine levik ventilatsiooni (1.1), jahutuse koormuse 3020W (2.3) ja jahutuskoormuse 7810W (5.3) korral, allikas positsioonil 1



Joonis 18 – CO₂ kontsentratsioonide suhte põhjal saasteaine levik ventilatsiooni (1.2), jahutuse koormuse 3020W (2.2) ja jahutuskoormuse 7810W (5.2) korral, allikas positsioonil 2



Joonis 19 – CO₂ kontsentratsioonide suhte põhjal saasteaine levik ventilatsiooni (1.3), jahutuse koormuse 3020W (2.1) ja jahutuskoormuse 7810W (5.1) korral, allikas positsioonil 3

Jooniselt 17 selgub, et parimat tulemust näitab esmapilgul vähem intensiivsema jahutusega olukord, kuid antud mõõtmistel puuduvad punkti 29 andmed, pole siiski terviklik pilt visuaalselt hindamisel õige. Võrreldes olukordi, kus töötab ainult ventilaatsioon ja töötab jahutus kõige suurema intensiivsusega nakatunu paiknemisel positsioonil 1 ei muutu viiruse levik kuigi palju. Küll võib märgata jahutuse puhul natukene ühtlasemat hajumist kogu ruumis ja väiksemat saasteaine kontsentratsioonide suhet väljatõmbe läheduses, mis tuleneb ilmselt aktiivjahutustalade poolt tekitatavas Venturi efektis.

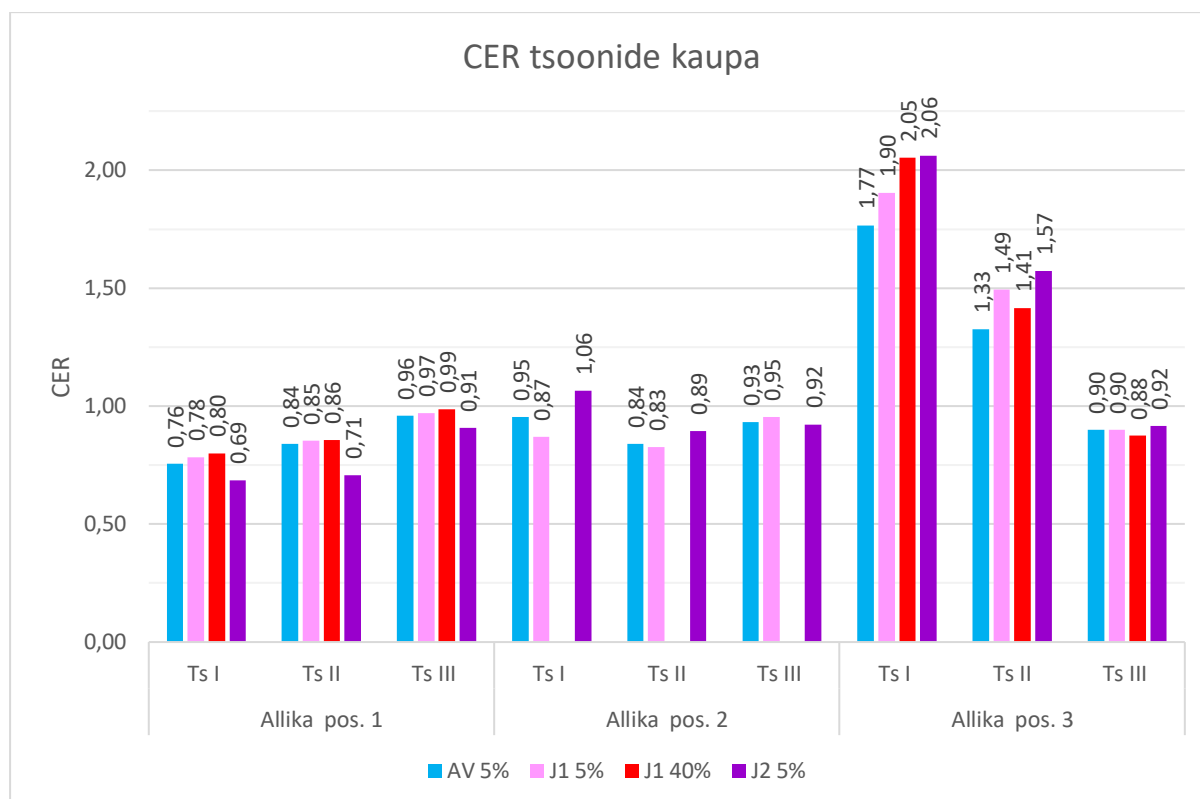
Joonisel 18, kus nakatunu paikneb ruumi keskel ja lähemal väljatõmbele, tekivad suuremad kontsentratsioonipiirkonnad allika lähedusse ja jällegi ruumi vasakusse ülemisse sektorisse. Taoline nähtus on ka läbiv joonisel 19, kus allikas paikneb ruumis paremal pool. Antud kohas paiknevad ka jahutuse korral lisaküttekehad, mis konvektiivse õhuliikumise intensiivistumisega võivad mõõtepunktis tekitada suuremat kontsentratsiooni taset. Samas on selle piirkonna puhul kontsentratsiooni tase ümbritsevate piirkondadega võrreldes kõrgem läbi erinevate katsete, siis võib järeldada, et pikema aja jooksul võib samuti antud piirkond ruumis kõrgema nakatumise ohuga asukohaks muutuda. Suurema intensiivsusega jahutuse korral on taoline jaotumine pisut vähendatud ning suurem kontsentratsioon tekib pigem allika asukoha vastas seina ja ruumi parem poolsesse otsa, kus paikneb väljatõmme. Sellist muutust põhjustab ilmselt aknalaudadel paiknevate lisaküttekehade poolt tekitatav konvektiivne õhuvool, mis on aktiivtaladest tuleva liibuvajoaga jahutatud õhule vastas suunalise liikumisega. Selle mõjul võib tekkida olukord, kus saasteained on surutud kõrgemalt ruumi piirkonnast inimese viibimistsooni, kus paiknevad ka mõõtepunktid.

Kolmanda olukorra puhul, kus allikas paikneb ventilatsiooni väljatõmbe läheduses oluliselt suuremat efekti võrreldes ventilatsiooniga ei anna. Olukorras, kus jahutuse intensiivsus on madalam, on kontsentratsiooni „pilve“ levik laialdasem, mida ilmselt põhjustab mõõtepunkti 29 andmete puudumine ja sellest tulenevalt ümbritsevas piirkonnas valet pilti. Küll aga saab võrrelda omavahel esimest ja viimast juhtu, nimelt on märgata intensiivsema jahutuse korral nakatunu ümber suurema kontsentratsiooni suhtega piirkonda, kui seda ventilatsiooniga olukorra puhul. Põhjus võib olla jällegi Venturi efekti intensiivistumisest. Samas näitab ka kontsentratsioonide suhe jahutuse puhul natukene suuremat hajumist ruumis ning seda jällegi akende juures, kus paiknevad lisaküttekehad.

Mõõtmised olukorras, kus nakatunu on aktiivsem, ehk räägib 40% ajast, visuaalseid tulemusi siinkohal kuvada ei pea autor vajalikuks, sest hajuvus ruumis toimus analoogselt olukorrale, kus jahutuse intensiivsus oli väiksem, so. 3020 W vabasoojuskooormuse korral. Küll aga on toodud lisatud katsete andmed joonisele 20. Visuaalsed joonised, mis

kirjeldavad saasteaine levikut ruumis nakatunu suurema intensiivsuse korral (Katse 3.1...3.2) on toodud välja koos teiste joonistega lisan.

Eelpool toodud jooniste põhjal saab hinnata viiruste levikut erinevate olukordade põhjal, kuid ei too tervikpilti jahutustalade mõjust. Mõju paremaks hindamiseks tuleks vaadelda saasteainete eemaldamise efektiivsust (CRE) ventilatsiooni abil. Joonis 20 kirjeldab erinevate olukordade puhul ruumis ventilatsiooni saasteainete eemaldamise efektiivsust tsoonide kaupa. Väärtused on arvatatud valemist 5 ning leitud tsoonide keskmine.



Joonis 20 – Ventilatsiooni saasteainete eemaldamise efektiivsus (CRE) kirjeldatud tsoonide mõõtepunktide keskmiste väärtuste ning erinevate olukordade puhul

Selgub, et jahutuse mõjul saasteainete eemaldamisele sõltub täielikult selle intensiivsusest ja nakatunu paiknemise asukohast ruumis. Allika paiknemise väljatõmbest kaugemal otsas on väiksem jahutus intensiivsus võrreldes olukorraga, kus töötab ainult ventilatsioon üldises pildis sama, natukene paremgi, erinevus jääb vahemikku +0,01...0,02. Oluliselt halvema efekti loob intensiivsema jahutusega olukord, kus ventilatsiooni efektiivsus on keskmiselt 0,08 madalam võrreldes ainult ventilatsiooni töötamisel, tsoon 2 puhul on kõige kriitilisem vahe -0,13. Juhul kui nakatunud paikneb ruumi keskmises või parempoolses osas, muudab suurem jahutuse intensiivsus saasteainete eemaldamist ventilatsiooniga oluliselt paremaks just allikast vasakpoolses ruumi osas. Sellest väljendub jahutuse positiivne efekt hoida madalamana ledlevate viirus

piiskade levik väljatõmbest eemale, siin kohal on ka efekt parem suurema jahutusintensiivsuse korral, parimal juhul on ventilatsiooni efektiivsuse näitaja jahutuse korral 0,13...0,29 võrra parem olukorrast, kui töötab ainult ventilatsioon). Vastavalt REHVA juhendile on allika saasteaine eemaldamise efektiivsus $\varepsilon_s > 1$, kui saasteallikas paikneb ruumis väljatõmbe läheduses, mida ka joonise 20, allika positsiooni 3 korral tulemused näitasid. Saadud töö tulemustel koostati tabel 9 üldisema hinnangu tegemiseks aktiivjahutustaladega süsteemi mõjust ruumist viiruste eemaldamise efektiivsusele, millest järeldus, et parem ventilatsiooni efektiivsus saasteainete eemaldamise ruumist on aktiivjahutustaladega olukorras.

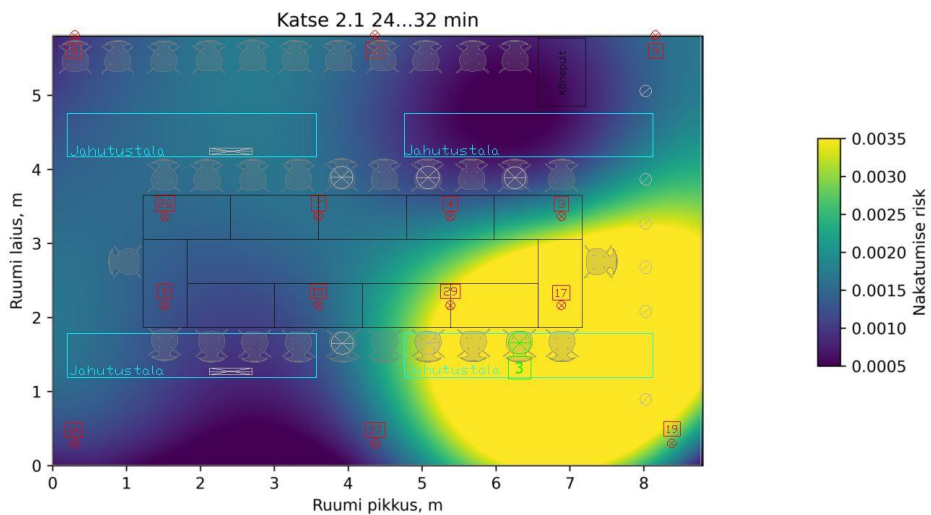
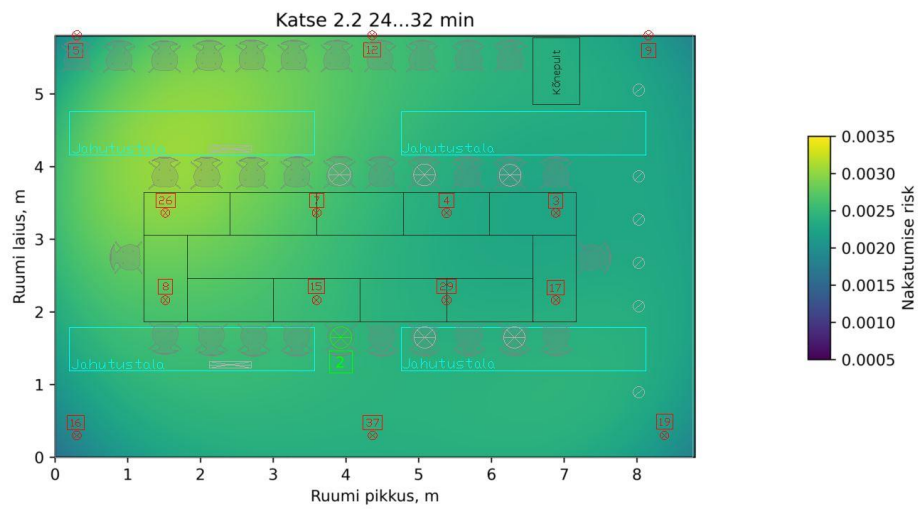
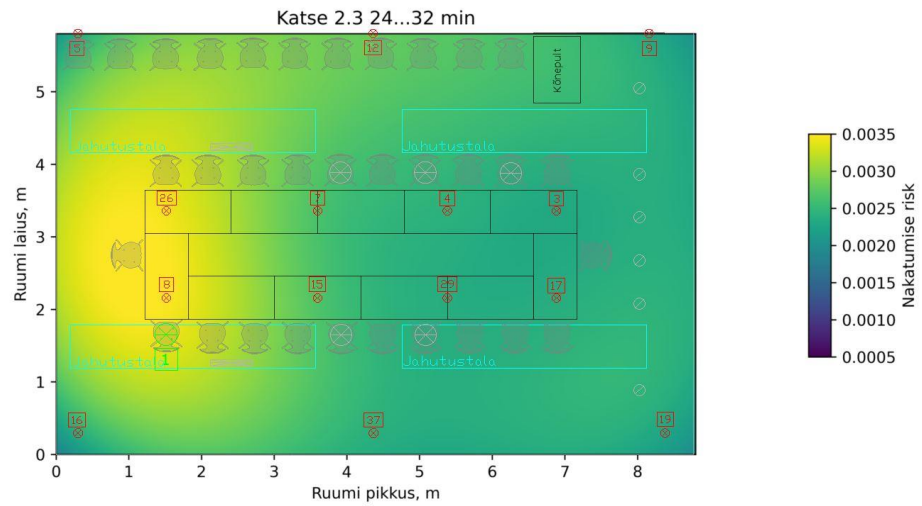
Tabel 9 – Ventilatsiooniga saasteainete eemaldamise efektiivsus (CER)

	Ainult ventilatsiooniga, istuv tegevus (rääkimine 5%)	Jahutusega (3020 W), istuv tegevus (rääkimine 5%)	Jahutusega (7810 W), istuv tegevus (rääkimine 5%)
Keskmine CER	1,03	1,06	1,08

5.1.3. Nakatumise risk

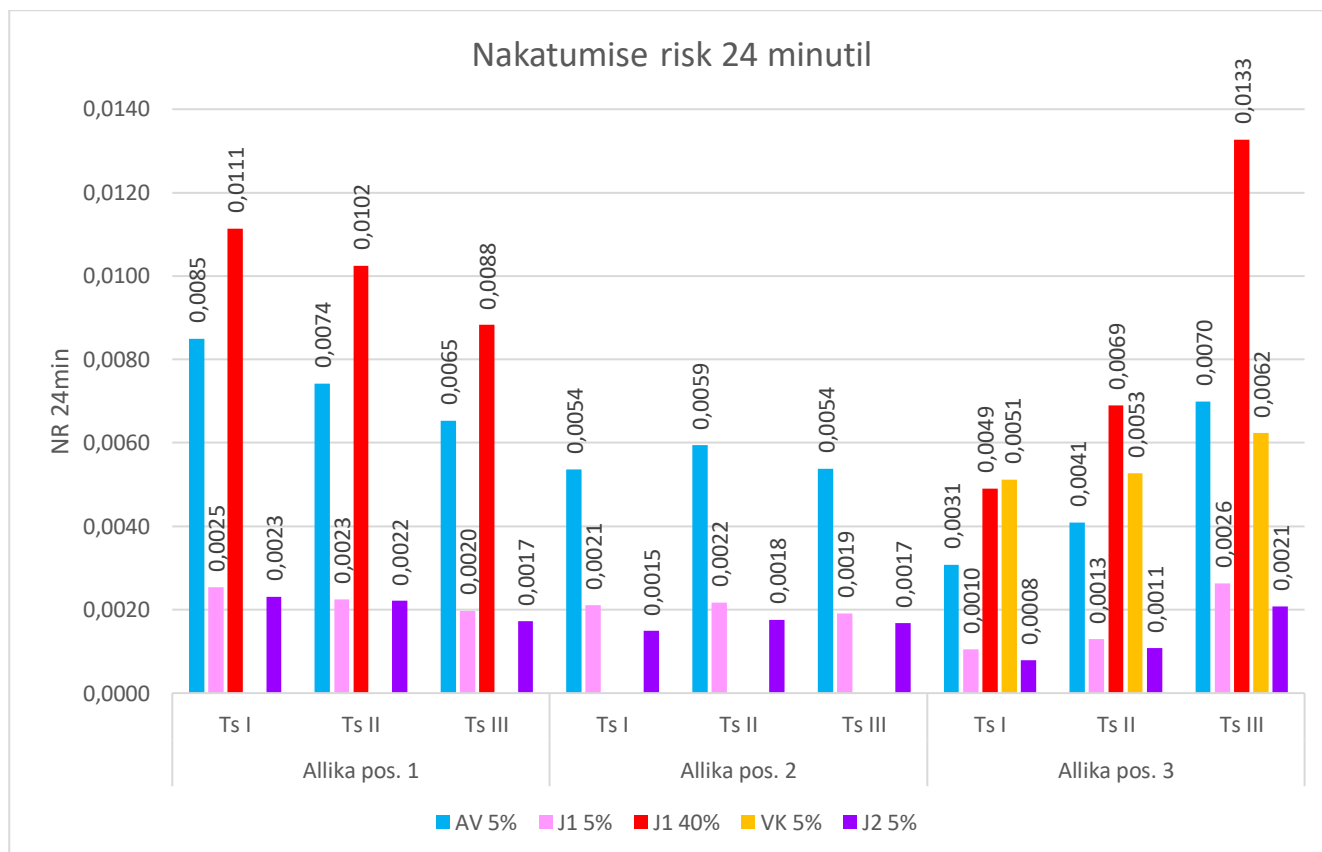
Nakatamise risk sõltub suuresti viirusosakeste kontsentratsioonist ja ajast, mis inimene veedab selles kontsentratsiooni sees. Antud ruumi puhul hinnati jahutuse mõju aktiivtaladega ruumis nakatumise riskile. Nakatumise risk arvutati valemist 2 kõigile ruumi punktile erinevatel aja vahemikel. Käesolevas töös hinnati ainult katsete mahus nakatumise riski, hinnangulisi väärtusi pikendatud ajagraafikuga ei koostatud.

Joonisel 14 on kujutatud nakatumise riski tõenäosus olukorras, kus vabasoojus koormus ruumis on 3020W, ajahetkel 32min, allika paiknemisel asukohas 1, 2 ja 3. Joonisel 14 olev info ühtib joonistel 17, 18, 19 toodud katse 2 infoga, mis on ka loogiline, kuna kasutatakse mõlemal juhul ühist alginfot (märkegaasi kontsentratsiooni). Sarnasusest tulenevalt rakendatakse ka nakatumise riski analüüsil ruumi kolmeks tsooniks jaotamist, et anda parem ülevaade jahutuse mõjust nakatumise riskile.



Joonis 21 – SARS-CoV-2 nakatamise risk 3020W vabasojuiskoormuse korral, allika paiknemised postisoonil 1 (Katse 2.3); 2 (Katse 2.2), 3 (Katse 2.1), 32 minuti möödudes.

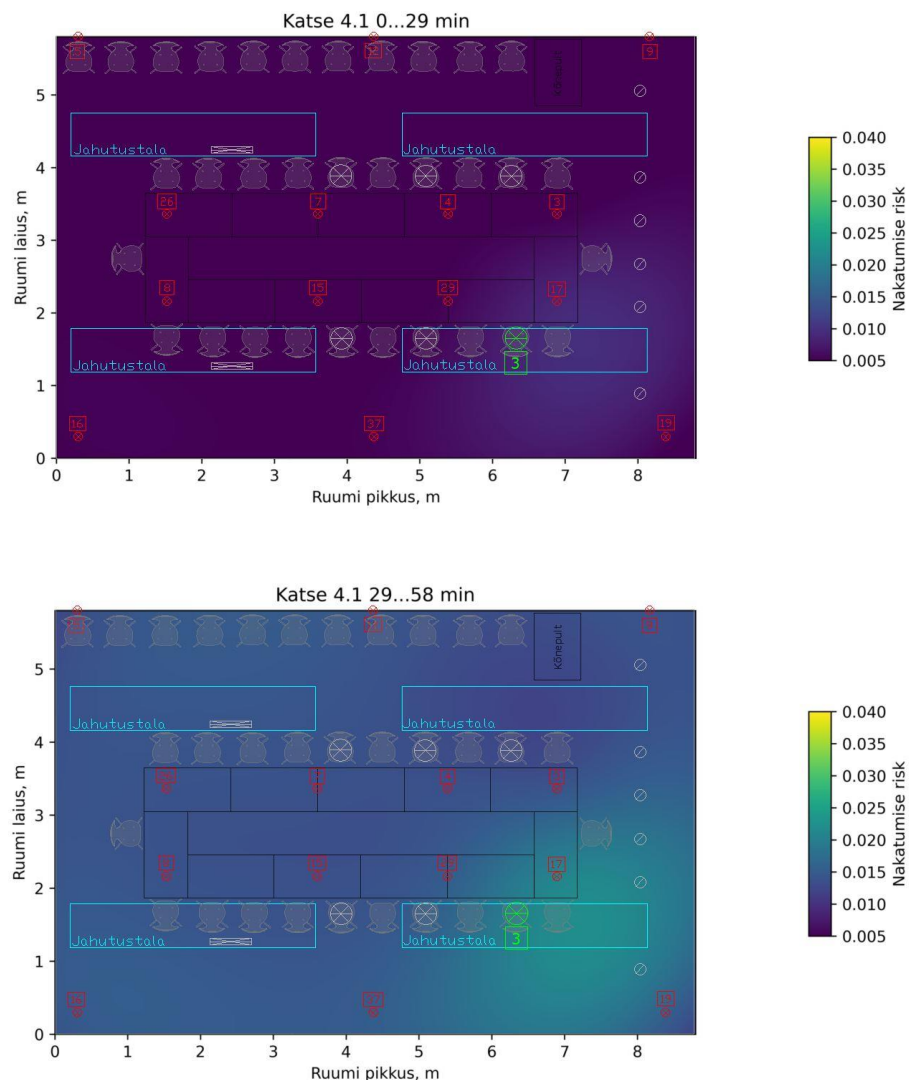
Jahutuse mõju hindamiseks nakatumise riskile tuli mõõtmiste tulemused arvestada kõik ühe ajaperioodi möödudes, milleks valiti lüheima katse toimumis aeg 24 minutit. Andmed, mida arvutustes kasutati võeti teistes katsetes mõõdetud perioodide viimase 24 minuti väärtused, et minimaliseerida eelnevate katsete mõju tulemustele. Arvutatud nakatumise riskid on toodud joonisel 22.



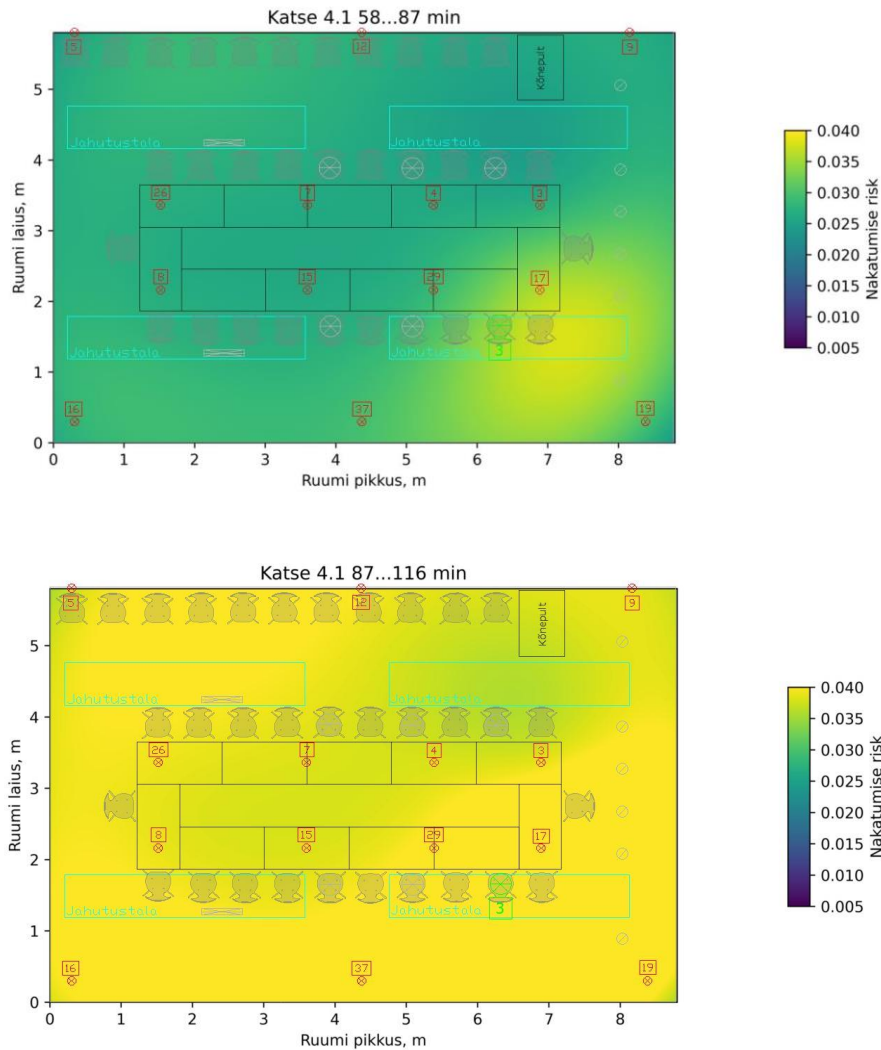
Joonis 22 – SARS-CoV-2 nakatumise risk 24 minutil erinevate olukordade ja tsoonide kaupa

Võrreldes joonist 20 ja 22 väljendub selgelt korrelatsioon nakatumise riski kõrgemate ning madalamate ja vastavalt CRE madalamate ja kõrgemate väärtuste vahel. Silmapaistvaimad erinevused kahe joonise vahel on 3020 W vabasoojusega olukorra puhul, kus nakatunu on ajajooksul aktiivsem ja olukorra puhul kus töötas ainult ventilatsioon. Nakatumisriskide erinevused võrreldes teiste olukordadega tulenevad sellest, et AV 5% puhul on ruumis inimesi oluliselt vähem (12tk). Tulenevalt valem 2-st muudab väiksem inimeste arv oluliselt suuremaks eksponendi asetendajas sulgude vahelist väärtust, mis väljendab sissehingavat viirus osakeste hulka. Teisel juhul, kus nakatunu räägib 40% ajast, mis tähendab aktiivsuse taseme tõusu, ehk eritab ruumi rohkem viiruste piisku, millest ka oluliselt suurem nakatumise risk kogu ruumis. Tulenevalt inimeste arvu erinevusest katsete puhul ei saa võrrelda üheselt nakatumise riski katse puhul kus töötas

ainult ventilatsioonile ning kus lisandub ka jahutus. Küll saab võrrelda jahutuse mõju läbi kahe erineva jahutuse intensiivsuse, vabasoojuste 3020 W ja 7810 W (vastavalt J1 5% ja J2 5%) vahel. Järeldub, jällegi analoogselt saasteainete eemaldamise efektiivuse tulemustele, kus suurem jahutuse intensiivsus tagas natukene parema ventilatsiooni efektiivuse saasteainete eemaldamisel, tagab siin natukene väiksema nakatumise riski. Nakatumise riski väärtuse suurus allikast vasakul pool allika positsioonide 2 ja 3 kolm korralt, väljendavad samuti osalist viiruste piiskade levikut ruumis õhujaotuse toimet väljatõmbest eemale, ehk segunevale õhujaotusele ruumis. Olukorras, kus ventilatsioon on välja lülitatud jaotub nakatumise riski kasv vastavalt joonisele 22 sujuvamalt. Kuna puudub aktiivne õhu segunemine, siis täitub ruum järkjärgult lendlevate viiruste piiskadega läbi aja, mida kirjeldavad ka joonised 23 ja 24.



Joonis 23 – SARS-CoV-2 nakatumise risk hajumine ruumis kinnise ventilatsiooni korral ajahetkedel 0,5h ja 1h



Joonis 24 – SARS-CoV-2 nakatumise risk hajumine ruumis kinnise ventilatsiooni korral ajahetkedel 1,5h ja 2h

Kogu ruumi nakatumise riski kokkuvõtlikumaks võrdluseks on toodud ruumi keskmised nakatumise riskide väärtused tabelis 10. Hinnates nakatumise riskide väärtusi tervik pildina jäävad numbriliselt riskid vägagi tagasihoidlikuks. Näiteks kui nakatunu veedab 5% ajast koosolekul rääkides, jahutusega olukordade puhul on tõenäosus keskmiselt 24 minuti möödudes 0,17...0,20%. See teeb suurema intensiivsusega jahutuse korral on eeliseks ainult 0,03%. Kordades suuremaks kasvab nakatumise risk, kui nakatunu peab koosolekul rääkima ca 40% ajast, küündides ligi 1%. Et nakatumise risk sõltub oluliselt ajast, mis veedetakse viiruste piiskadega kontsentreeritud piirkonnas, on toodud tabelis 10 ka katsete mõõtmiste keskmised väärtused katsete maksimaalsel ajahetkel. Väiksema intensiivsusega jahutuse korral, kus inimene veedab rääkides 40% ajast, on enam kui

topelt aja möödudes nakatumise risk üle kahe korra suurem. Tulevikus võiks koostada pikemad katsed nakatumise riski paremaks hindamiseks.

Tabel 10 – Nakatumise risk kogu ruumi lõikes, erinevate inimeste arvu ja aktiivsustasemetel

	Ainult ventilatsiooniga, istuv tegevus (rääkimine 5%)	Jahutusega (3020 W), istuv tegevus (rääkimine 5%)	Jahutusega (3020 W), istuv tegevus (rääkimine 40%)	Ventilatsioon ei tööta, istuv tegevus (rääkimine 5%)	Jahutusega (7810 W), istuv tegevus (rääkimine 5%)
Keskmine nakatumise risk 24 min	0,0059	0,0020	0,0092	0,0055	0,0017
Keskmine nakatumise risk erinevate ajaperioodide vältel	24 min	32 min	62 min	116 min	28 min
	0,0050	0,0027	0,0216	0,0463	0,0020

5.2. Klassiruum

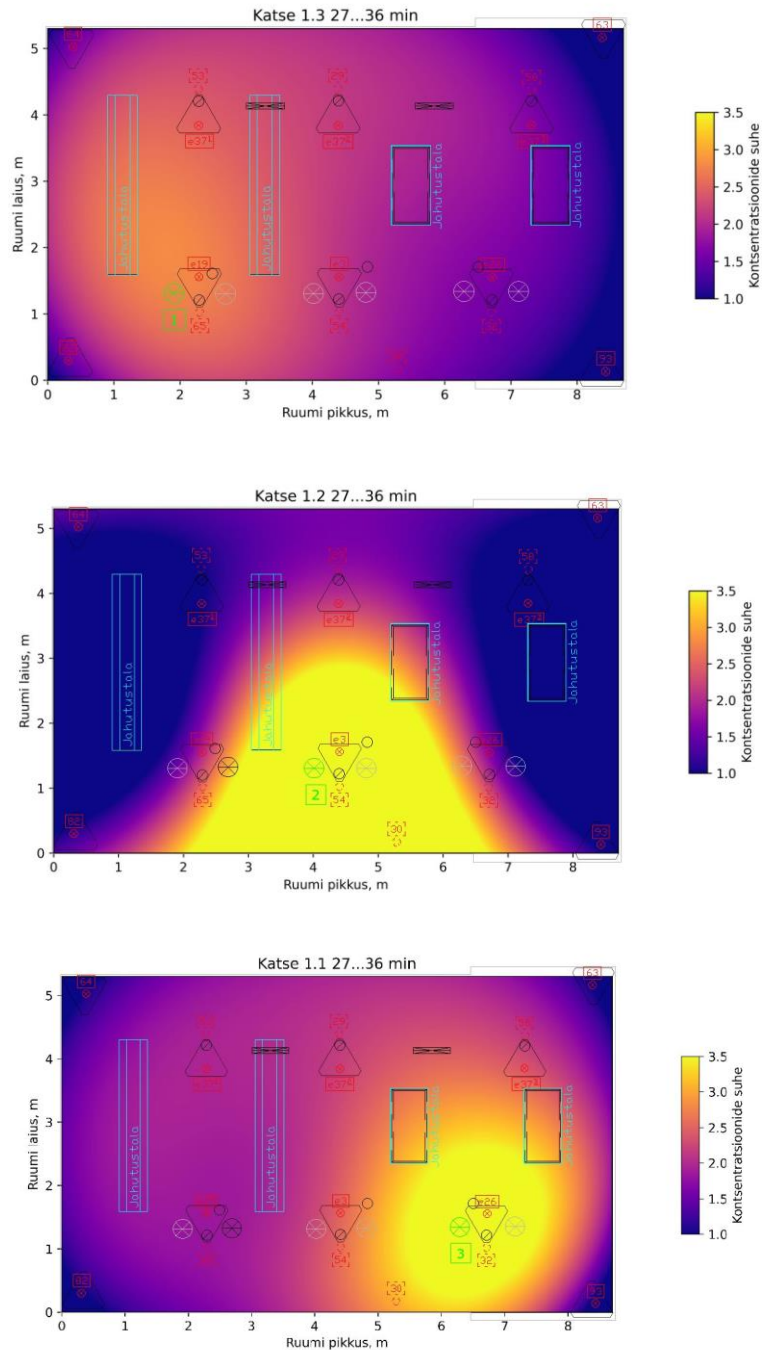
Klassiruumis võrreldakse ventilatsiooni efektiivsust saasteainete eemaldamise aspektist, viiruste levikut ja viirustesse nakatumise riski olukordades, kus puudub ventilatsioon, toimib ventilatsioon, lisaks ventilatsioonile toimib ka jahutus. Analüüs jaguneb järgnevalt:

- Hinnatakse märkegaasi meetodil viiruse levikut ruumis erinevatelt manustamise positsioonidelt
- Analüüsitakse eritüüpi väljatõmbe mõju viiruste levikule läbi ventilatsiooni efektiivsuse eemaldada ruumist saasteaineid
- Analüüsitakse nakatumise riski ruumi tsoonide kaupa ja kogu ruumi kohta

5.2.1. Viiruse levik ja nakatunu paiknemine ruumis

Viiruse leviku kirjeldamiseks on Karl-Villem Võsa abil koostatud joonised mõõdetud andmete põhjal. Joonised on koostatud läbi erinevate olukordade ruumis, kus sissepuhkel paiknevad lisa plafoonid ja väljatõmme on hajutatud, puuduvad lisaplafoonid ja väljatõmme on hajutatud ning puuduvad lisaplafoonid ja väljatõmme toimub ruumi nurgast. Levikut kirjeldavad joonised põhinevad valemil 1. Levikute hindamiseks koostatud joonised asuvad täies mahus käesoleva töö lisas, selles peatükis väljatoodud pildid on jällegi valikulised.

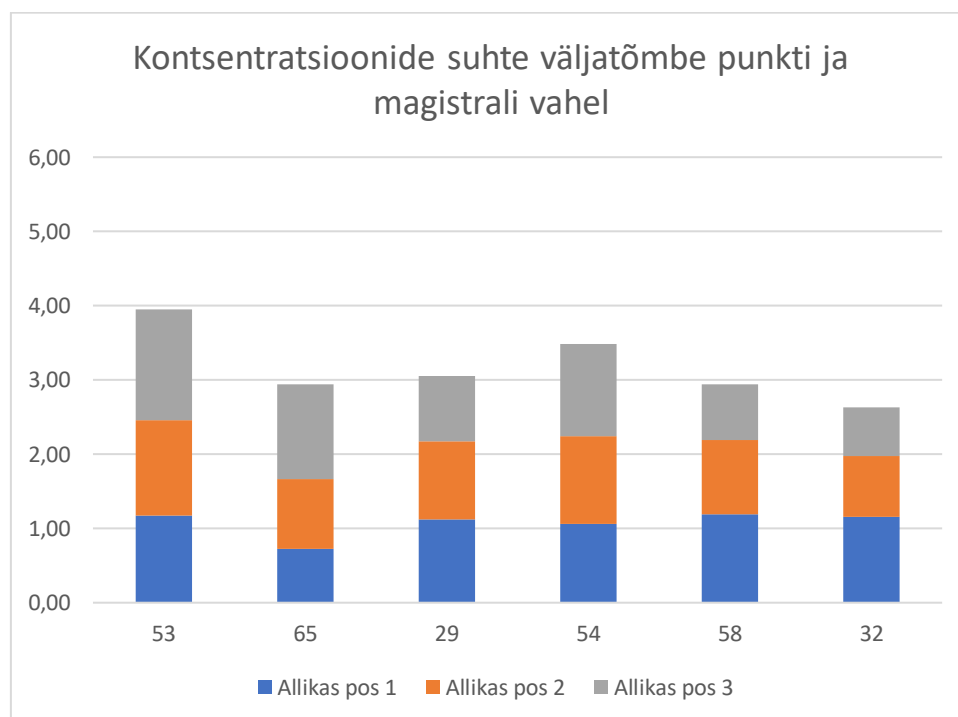
Joonisel 25 on välja toodud lisa sissepuhkega, hajutatud väljatõmbega saasteaine levik erinevate positsioonide puhul. Esimese ja viimase olukorra puhul (allikate paiknemisel pos. 1 ja 3) joonistub välja selgelt allika piirkond ning hajumine läbi kogu ruumi suhteliselt ühtlaselt. Antud juhtudel väljendab hajumist õhujootuse hea õhu segamise võime, kuid



Joonis 25 – Saasteaine levik ruumis arvutatud valemi 1 tulemuste põhjal olukorras, kus sissepuhkel on lisaplafoonid ja väljatõmme on hajutatud

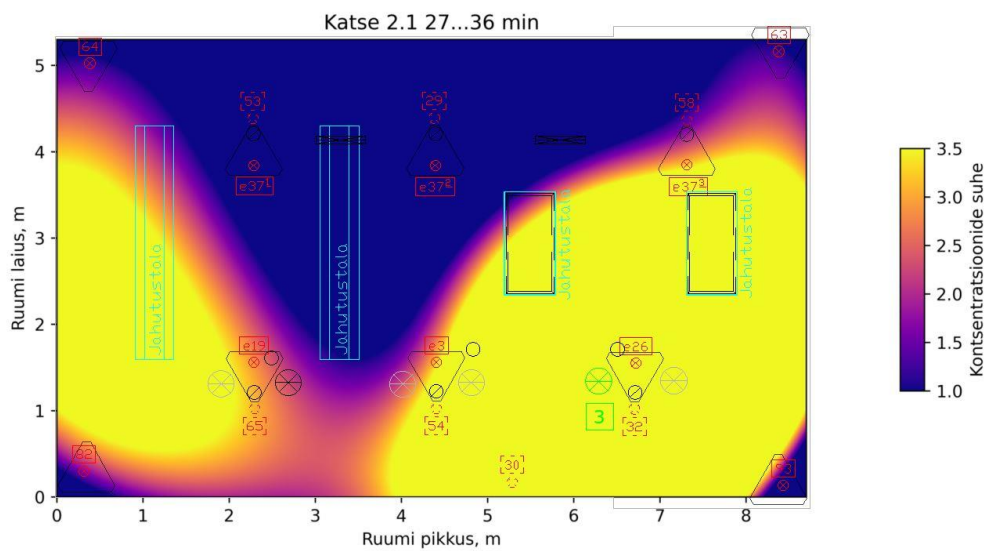
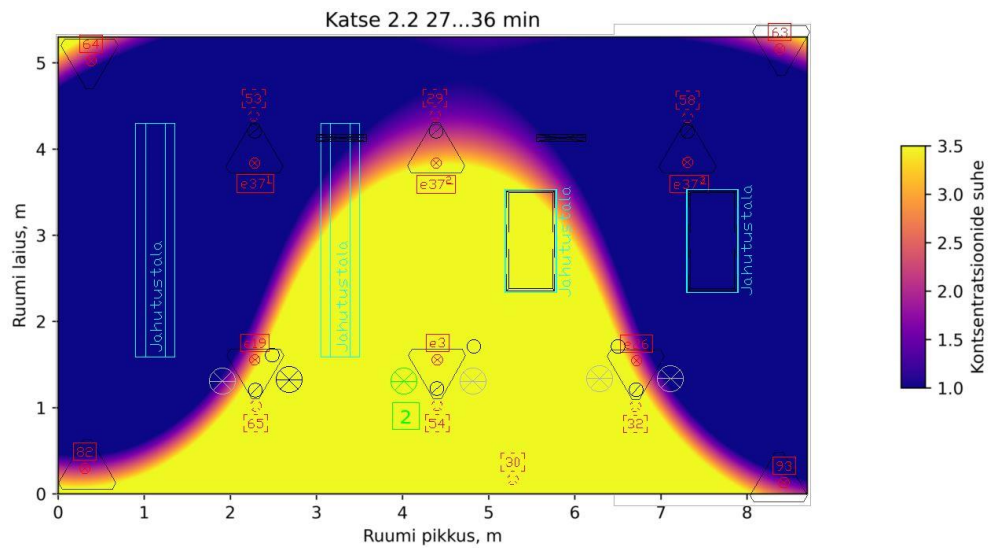
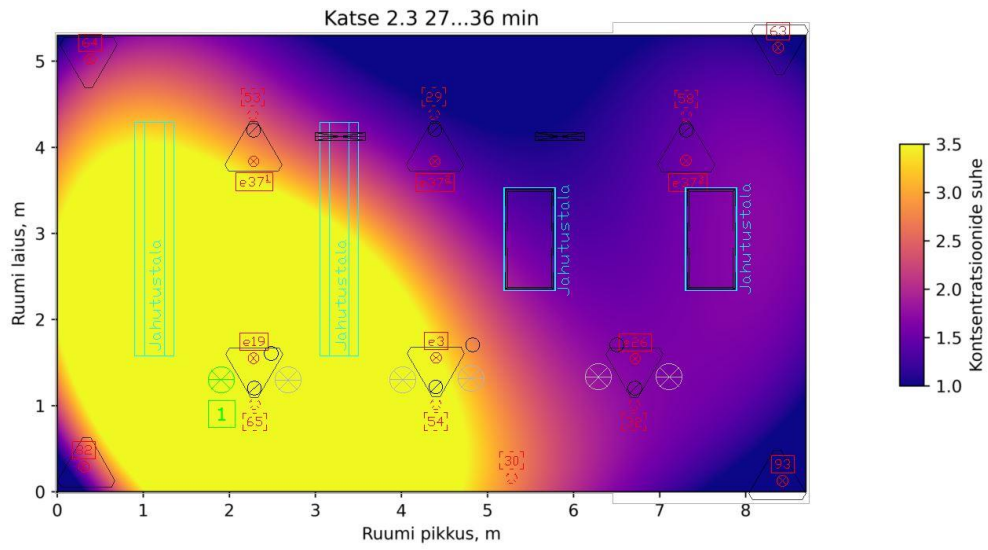
see tähendab seda, et viiruste levik ruumis on soodustatud. Allika paiknemisel positsioonil 1 näib, et viiruspiiskade laiali kandumine on mõnel määral väiksem, kui seda allika paiknemisel positsioonil 3, see võib tähendada, mõne kindla väljatõmbe punkti suuremat

aktiivsust võrreldes teistega. Teisel juhul (katse 1.2) puhul jääb suurenenud kontsentratsioonide ala allika ümbrusesse, tsooni 2, levides pisut vähesemal määral ka ruumi nurkadesse, kui tsoonide 1 ja 3 keskmised alad jäävad puutumata. Seda põhjustab ilmselt kahe kõrvuti paikneva aktiivjahtusetala poolt nn. „õhu kardin“, mis piirab saasteaine levikut ruumi otsaseinte suunas. Väljatõmbe mõju viiruse levikule kirjeldab joonis 26, kus selgub, et tõesti on ühe väljatõmbe puhul märkegaasi kontsentratsiooni suhe teistest postioonidest teistest kõrgem (mõõtepunkt nr 53). See tähendab ka seda, et õhuliikumine ning koos sellega viiruste levik on suurenenud antud punkti poole. Võrreldes ka märkegaasi allika märkegaasi asukohta ja väljatõmbe punktis kontsentratsioonide kasvu, selgub et suurima kontsentratsiooniga väljatõmbe punkt paikneb allikast toas vastas nurgas. See väljendab jällegi viiruste levikut diagonaalis läbi ruumi, mida väljendas ka koosolekute ruumis läbi viidud katsed (joonised 14 ja 19).



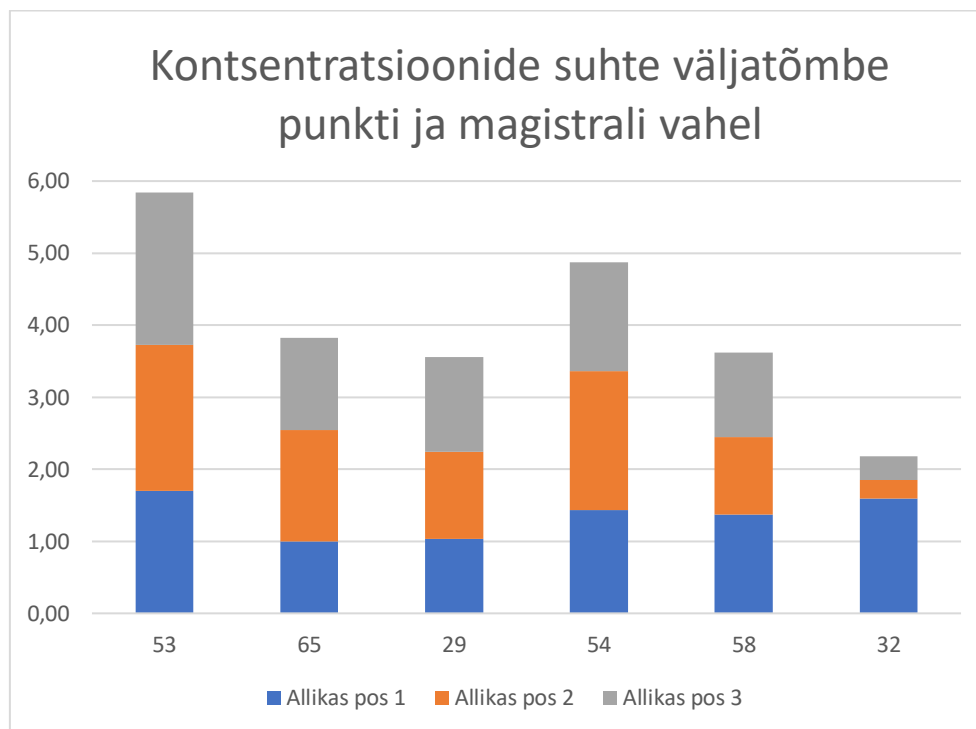
Joonis 26 – Kontsentratsioonide suhte väljatõmbe punkti ja magistralis mõõdetu vahel, valemi 1 põhjal, olukorras, kus on lisasissepuhke plafoonid ja väljatõmme hajutatud

Olukorras kus on eemaldatud sissepuhke plafoonide IAO mõju, on kontsentratsioonide põhjal viiruse levik toodud joonisel 27. Antud juhul on paista joonistelt väiksemat õhusegunemist (palju rohkem tume sinist ala võrreldes joonisega 25). Samuti on kõrgema kontsentratsioonisuhtega piirkonnad oluliselt suuremad. Et katstes kasutatud mõõtepunkt 37 oli katsete vahel liikuv paralleelselt allika positsiooniga, ei pruugi suuremate tulemuste



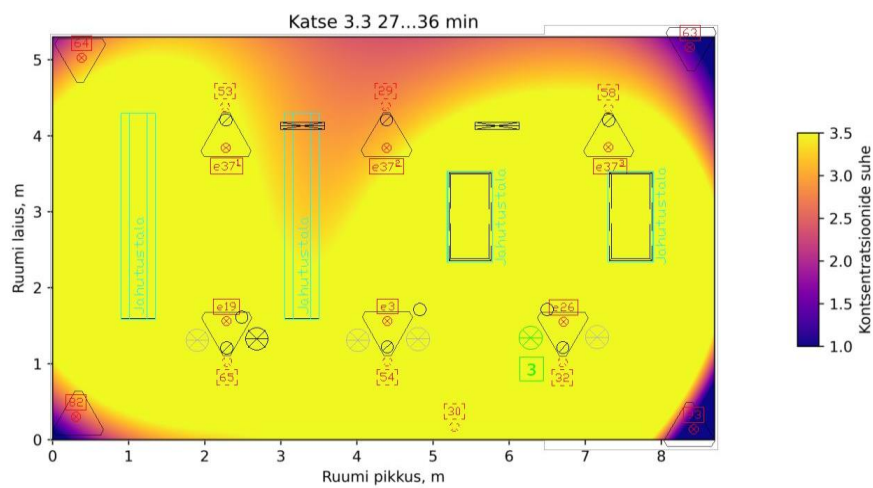
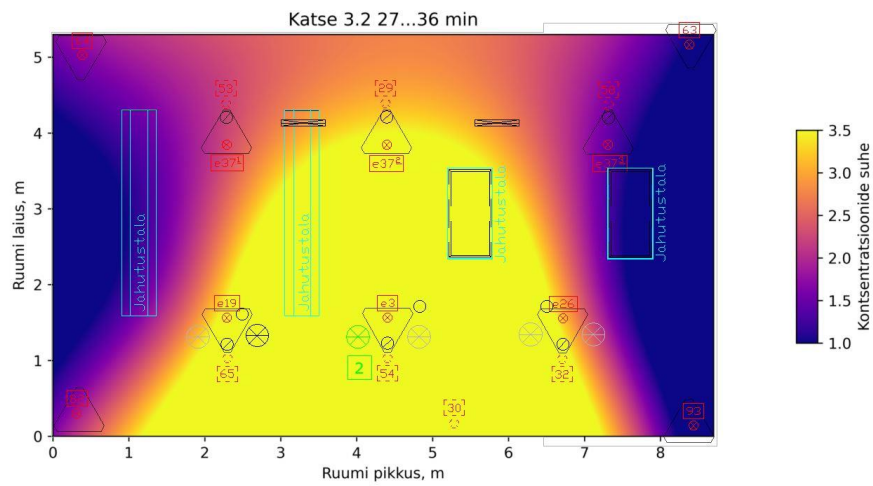
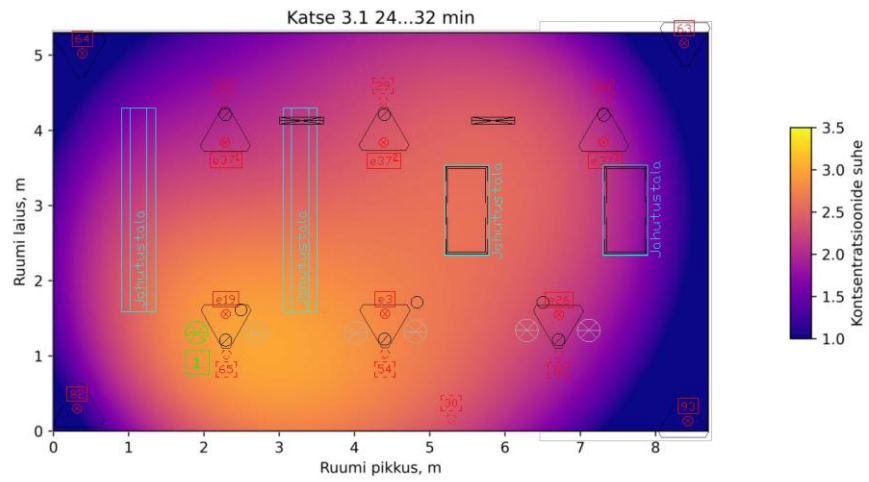
Joonis 27 – Saasteaine levik ruumis olukorras, kus sissepuhke lisaplafoonid puuduvad ning väljatõmme on hajutatud.

korral interpoleeritud joonised kuigi õiget pilti näidata. Kahtlust süvendab joonisel 27 katse 2.1 pilt, kus kõrgema kontsentratsiooni pilv piirneb olemas olevate mõõtepunktide asukohtadega. Tulevikus võiks katsetes kasutada viibimistsoonis rohkem mõõtepunkte. Õhuliikumist väljatõmbe suunas väljendab joonis 28, mis väljendab jällegi väljatõmbe punkti 53 olulisust. Kõigi väljatõmmete välja arvatud mõõtepunkti 32 puhul tõusis suhte väärtus, kohati kuni 2x. Sellest võib välja lugeda vähesemat õhusegunemist ruumis, mis tõttu satub väljatõmbe avasse suurema saasteaine kontsentratsiooniga õhk.



Joonis 28 – Kontsentratsioonide suhte väljatõmbe punkti ja magistralis mõõdetu vahel, valemil põhjal, olukorras, kus lississepuhke plafoonid on eemaldatud ja väljatõmme on hajutatud

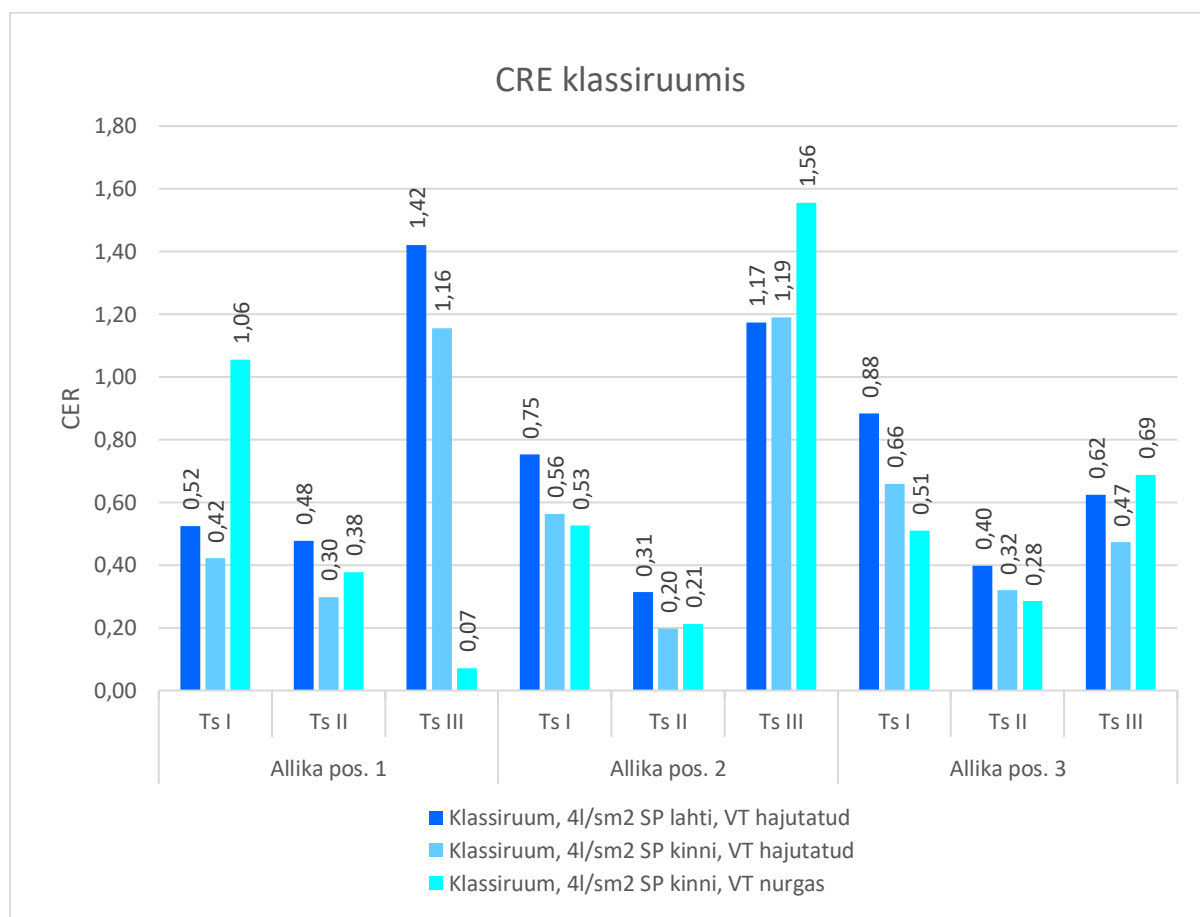
Kolmanda olukorra puhul, kus sissepuhke oli eemaldatud ning väljatõmme oli viidud ruumi ühte nurka olid kontsentratsioonide suhted viibimistsoonis juba oluliselt kõrgemad. Joonistel 29 on kuvatud viiruse levik jällegi väljatõmbe läheduses, ruumi keskel ja väljatõmbest teises ruumi otsas. Võrreldes eelmiste olukordadega, kus väljatõmme oli hajutatud, on olukord oluliselt kehvem. Põhjus tuleb ilmselt sellest, et ruumi kõrguse ja jahutustalade paigutuse tõttu on nende poolne mõju õhu surumisele viibimistsoonis suurem, kui seda on konvektiivne õhuvool üles. Eriti suur halb on olukord, kus allikas paikneb positsioonil nr 3. Sellel juhul on kogu ruumis ühtlaselt suur kontsentratsioon. Õhujaotuse suurt mõju väljendavad ka allika positsioonidelt 1 ja 2 saadud mõõtmistulemused.



Joonis 29 – Saasteaine levik ruumis olukorras, kus sissepuhke lisaplafoonid puuduvad ning väljatõmme on ruumi alumises vasakus nurgas lae all

5.2.2. Ruumi õhujaotuse mõju viiruse levikule

Vastavalt koosolekute ruumi analüüsile, annab kõige parema ülevaate erinevate õhujaotuste ja õhu eemaldamise variantide võrdlemisel ventilatsiooni efektiivsus saasteainete eemaldamise (CRE) seisukohalt. Täpsemaks kirjeldamiseks on siingi jaotatud ruum kolmeks tsooniks ning väärtused on arvatud kogu katse keskmiste järgi ning arvatatu edasi tsoonide keskmisteks väärtusteks.



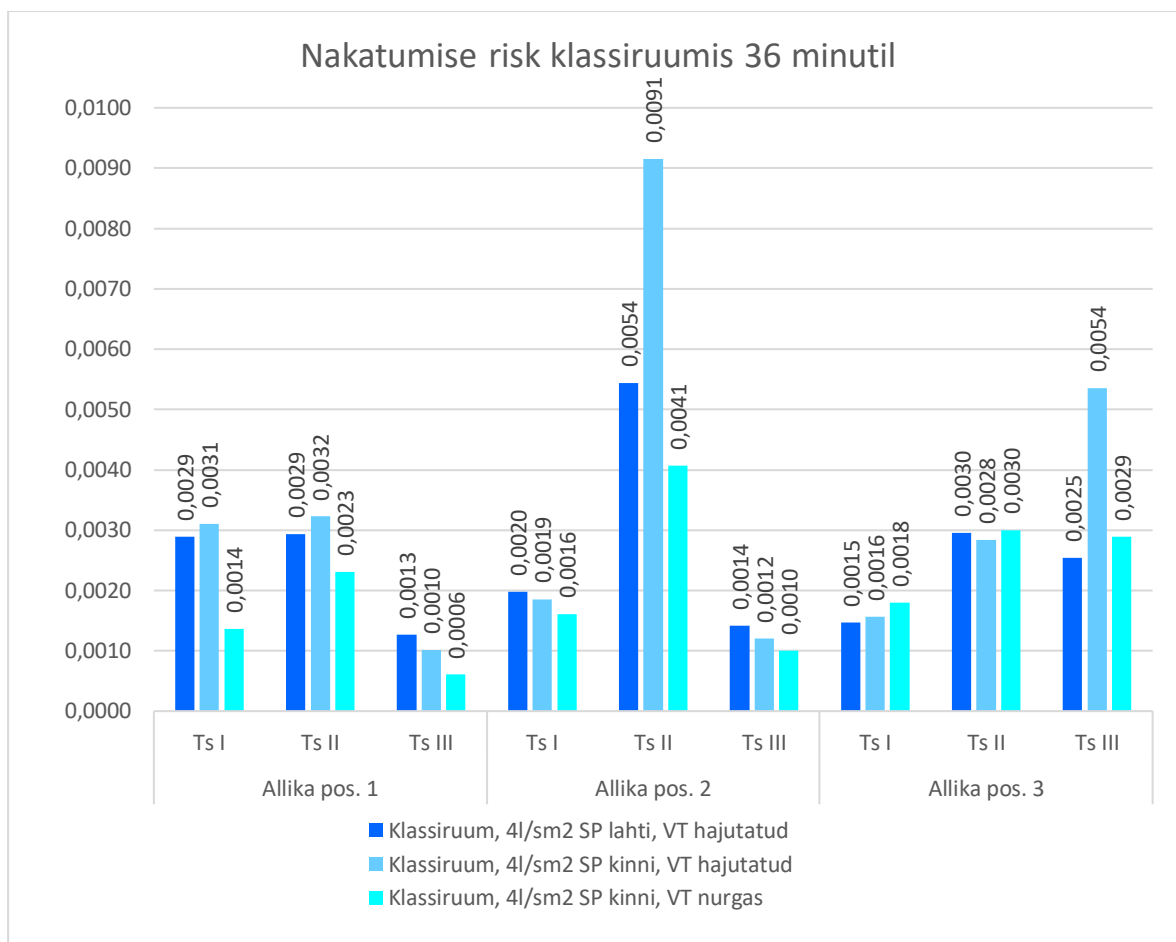
Joonis 30 – Ventilatsiooni efektiivsus saasteainete eemaldamisel ruumist (CRE) erinevate allikate positsioonide ja õhujaotusega olukordades

Jooniselt 30 jääb koheselt silma ebamääraselt kõrge ventilatsiooni efektiivsus tsoonis 3, kui kui allikas paikneb positsioonil 2. Üksikute andmete analüüsis selgub, et mõõtepunktis 93 on arvatud CRE väärtused osadel ajahetkedel negatiivsed, põhjuseks on õhuleke klaasseinte vahelisest ebatihedusest. Kuna ka mõõtepunkt 63 paiknes ebatiheda nurga läheduses, siis võivad ka selle tulemused olla madalamad. Õhuleket antud juhul ei ole mõõdetud ega hinnatud, mistõttu tuleb ülimalt kriitiliselt hinnata tsooni III mõõte tulemusi.

Vastupidiselt visaliseerivatele joonistele, kust paistis kõige halvem olukord olevat väljatõmbe paiknemisel ruumi nurgas, näitab joonis 30 paremat efektiivsust allika paiknemisel tsoonis I ja II, kui seda hajutatud juhul. Selle põhjuseks on ilmselt mõõtepunktis 64 püsiv madal kontsentratsiooni tase, kuna õhk liigub VT suunas, antud piirkonnast eemale. Üldiselt saab antud joonise põhjal öelda, et parima efektiivsusega olukord oli siis kui sissepuhke lisaplafoonid olid olemas ning väljatõmme oli hajutatud. Ilmselt tuleneb eelis sellest, et on tagatud ruumis parem õhu segunemine. Samuti avaldasid olulist mõju ka sissepuhkeplafoonide asukohad, mis suunasid puhta õhu otse mõõtepunktide tsooni, mille tõttu ka väiksem kontsentratsioon vaadeldava punkti asukohas.

5.2.3. Nakatumise risk

Antud ruumi puhul hinnati nakatumise riski ruumis olukordades, kus väljatõmme oli hajutatud ja sissepuhkel paiknesid õhu paramakse segamiseks plafoonid, väljatõmme oli hajutatud ja lisaplafoonid puudusid ning kui väljatõmme oli viidud ruumi ühte nurka. Et viirusesse nakatumine sõltub oluliselt ajast, mil viibitakse viirustega kontsentreeritud õhus, saab mõõtmisandmete põhjal maksimaalse nakatumise riski arvutada minutile 36. Arvutamisel võeti arvesse viimase ajavahemiku (9 minutit) keskmised väärtused. Samuti antakse hinnang nakatumisele nakatunu paiknemisel ruumis. Mõõtmistulemuste põhjal arvutatud nakatumise riskid on toodud joonisel 30.



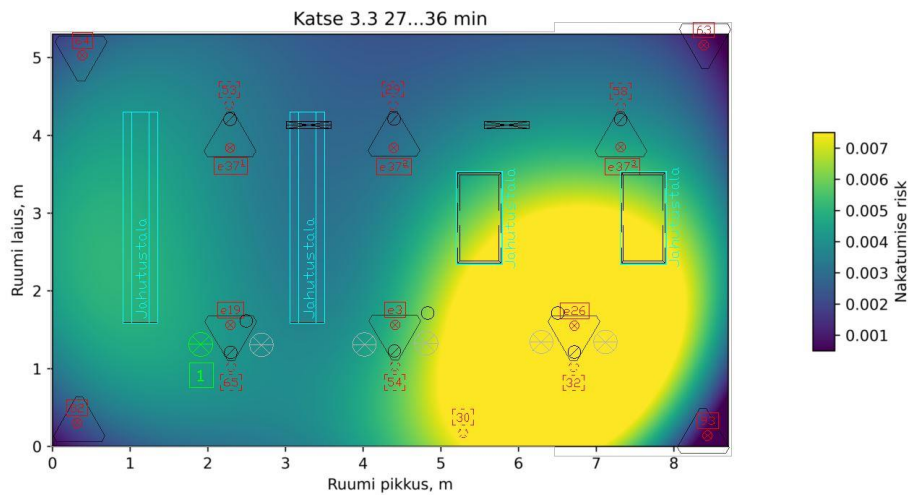
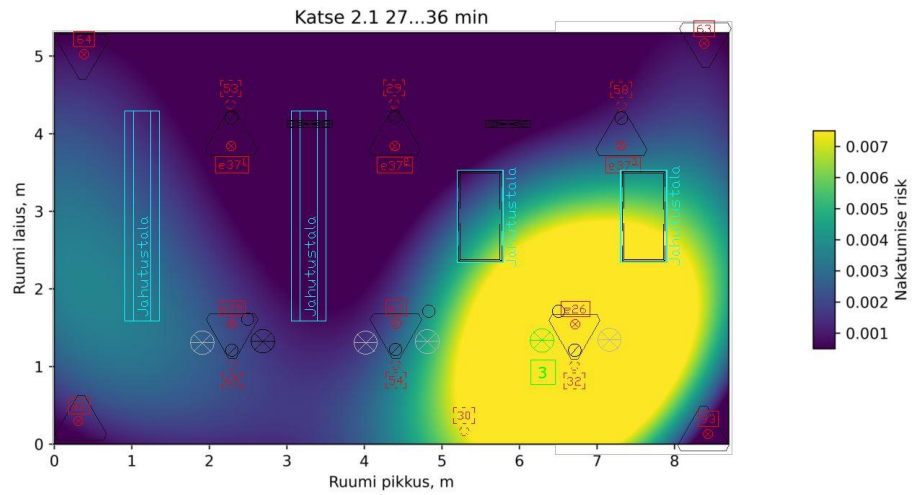
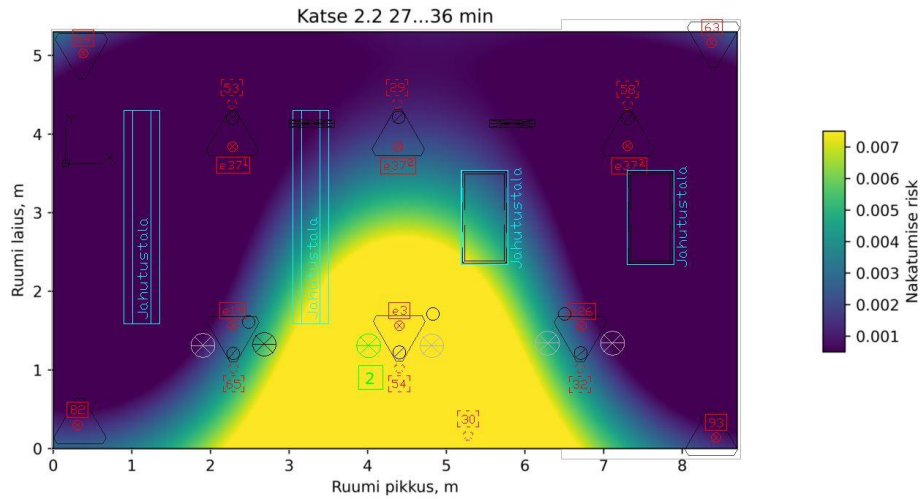
Joonis 31 – SARS-CoV-2 nakatumise risk 36 minutil erinevate olukordade ja tsoonide kaupa

Joonis 31 ühtib suures osas pöördvõrdeliselt CER joonisega (joonis 30). Parema ventilatsiooni efektiivsuse korral on nakatumise risk madalam ning vastupidi. Tsoon III puhul on aga varieeruvused, tulenevalt lekkeõhu mõjust katsetulemustele. Kõige suuremaks nakatumisega riski olukorraks kujuneb allika paiknemisel positsoonil 2, selle asukoht. Põhjus sellele tuleneb ilmselt jahutustaladelt tuleneva joa ühtimisel, mis surub ülevalt ruumist õhu alla viibimistsooni. Antud juhul aitab olukorda parandada olukord, kus on lisatud sissepuhke õhujaotaja AOI/N, mis suudab viibimistsoonis värskeõhu osakaalu suurendada. Suurima nakatumise riskiga olukorrad on ka visualiseeritud ruumis joonisel 32 ja 33.

Kogu ruumi nakatumise riski kokkuvõtlikumaks võrdluseks on toodud ruumi keskmised nakatumis riskide väärtused tabelis 11. Hinnates nakatumise riskide väärtusi tervik pildina jäävad numbriliselt riskid vägagi tagasihoidlikuks, jäädes joonise 31 põhjal suurima riskiga olukorras alla 1%. Keskmised väärtused näitavad ära erinevate olukordade riskide erinevused. Selgub, et riski maandamiseks on hajuva väljatõmbe kasutamine ruumis parem ning eriti parandab olukorda, kui puhas õhk antakse võimalikult lühikese viibimis ajaga inimese viibimistsooni.

Tabel 11 – klassiruumi keskmine nakatumise risk 36 minutil.

Tsooni tähis	Sissepuhke lisaplafoonidega, väljatõmme hajutatud	Sissepuhke ilma lisaplafoonideta, väljatõmme hajutatud	Sissepuhe ilma lisaplafoonideta, väljatõmme ruumi nurgas
Tsoon I	0,0024	0,0024	0,0014
Tsoon II	0,0029	0,0041	0,0022
Tsoon III	0,0023	0,0032	0,0026
Ruumi keskmine	0,0025	0,0033	0,0021
Ruumi keskmine 32 min	0,0023	0,0029	0,0035



Joonis 32– SARS-CoV-2 nakatamise risk olukordades, kus väljatõmme oli hajutatud, puudusid lisa sissepuhkeplafoonid allika manustamisel postisoonil 2 (Katse 2.2) ja 3 (Katse 2.1) ning kus väljatõmme oli viidud ruumi nurka (Katse 3.3)

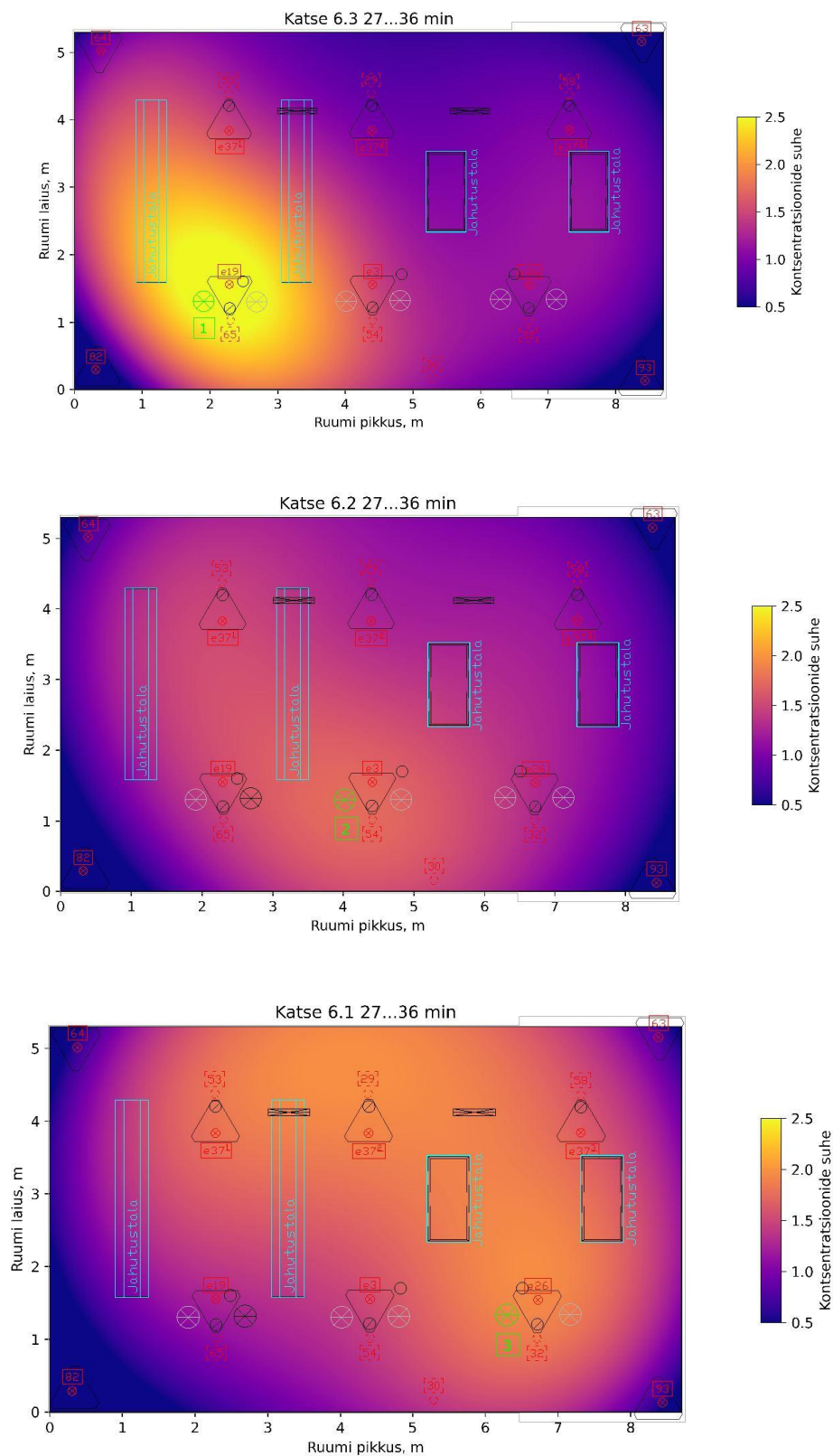
5.3. Avatud kontor

Avatud kontoris võrreldakse ventilatsiooni efektiivsust saasteainete eemaldamise aspektist, viiruste levikut ja viirustesse nakatumise riski olukordades, kus puudub ventilatsioon, toimib ventilatsioon, lisaks ventilatsioonile toimib ka jahutus. Analüüs jaguneb järgnevalt:

- Hinnatakse märkegaasi meetodil viiruse levikut ruumis erinevatelt manustamise positsioonidelt
- Analüüsitakse eritüüpi väljatõmbe mõju viiruste levikule läbi ventilatsiooni efektiivsuse eemaldada ruumist saasteaineid
- Analüüsitakse nakatumise riski ruumi tsoonide kaupa ja kogu ruumi kohta

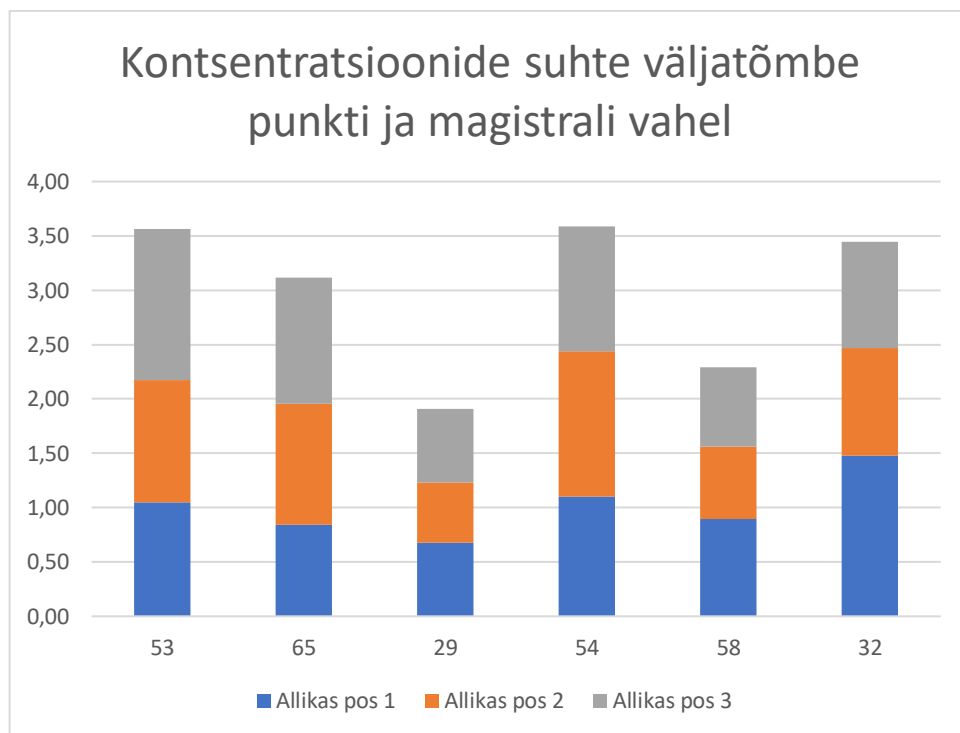
5.3.1. Viiruse levik ja nakatunu paiknemine ruumis

Viiruse leviku kirjeldamiseks on Karl-Villem Võsa abil koostatud joonised mõõdetud andmete põhjal. Joonised on koostatud läbi erinevate olukordade ruumis, kus sissepuhkel paiknevad lisa plafoonid ja väljatõmme on hajutatud, puuduvad lisaplafoonid ja väljatõmme on hajutatud ning puuduvad lisaplafoonid ja väljatõmme toimub ruumi nurgast. Levikut kirjeldavad joonised põhinevad valemil 1. Levikute hindamiseks koostatud joonised asuvad täies mahus käesoleva töö lisas, selles peatükis väljatoodud pildid on jällegi valikulised. Joonisel 25 on välja toodud lisa sissepuhkega, hajutatud väljatõmbega saasteaine levik erinevate positsioonide puhul.



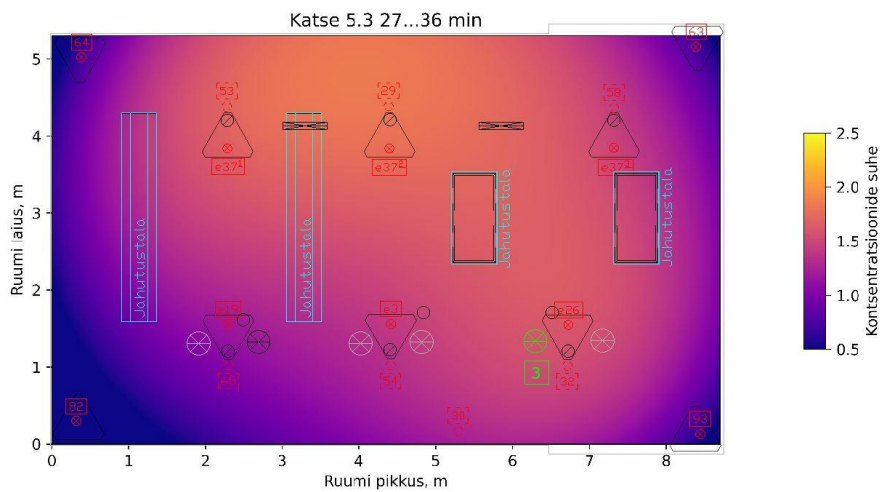
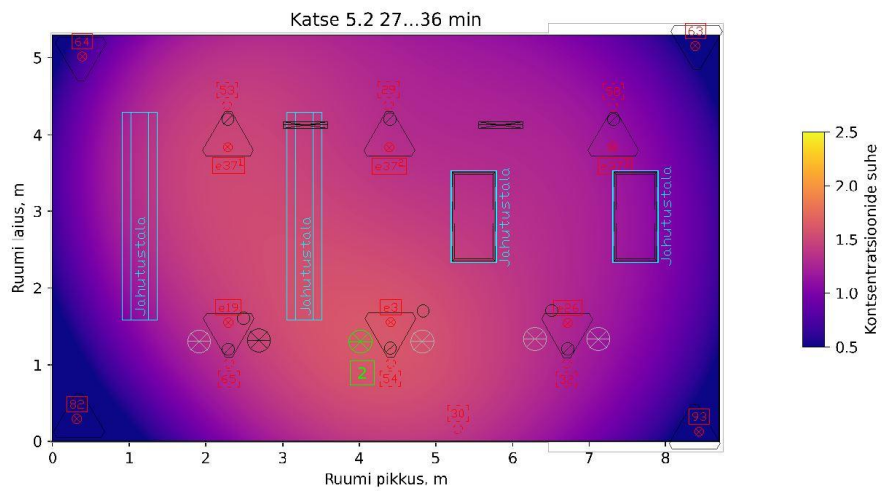
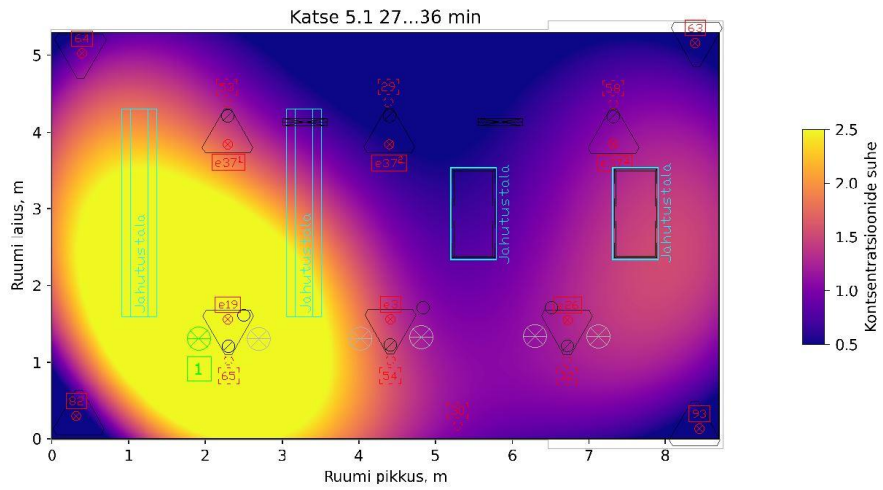
Joonis 33 – Saasteaine levik ruumis postisoonilt 1, 2, 3 olukorras, kus on kasutusel lisa sissepuhke plafoonid ning väljatõmme on hajutatud

Esimese olukorra puhul (allika paiknemisel pos. 1) joonistub välja selgelt allika piirkond. Hajumine ruumis toimub kõigil 3 juhul, kuid pos 1 puhul on see rohkem allika ümbruses kontsentreeritum. Teise ja kolmanda positsiooni puhul on hajumine väga sarnase kujuga, kuid kontseeruvad erinevates ruumis osades. Mõlemal juhul küll tekib hajumine ka varasemalt täheldatule ruumi ülemise vasaku nurga, väljatõmbe punkti 53 suunas. Allika paiknemisel positsioonil 1 näib, et viiruspiiskade laiali kandumine on mõnel määral väiksem, kui seda allika paiknemisel positsioonil 3, mis on analoogne klassiruumi olukorrale. Väljatõmbe mõju viiruse levikule kirjeldab joonis 26, kust erinevalt klassiruumi olukorrale on 3 domineerivat punkti 53, 54 ja 32. See tähendab ka seda, et õhuliikumine ning koos sellega viiruste levik on suurenenud antud väljatõmbepunktide poole. Võrreldes ka märkegaasi allika märkegaasi asukohta ja väljatõmbe punktis kontsentratsioonide kasvu, selgub et suurima kontsentratsiooniga väljatõmbe punkt paikneb allikast toas vastas nurgas. See väljendab jällegi viiruste levikut diagonaalis läbi ruumi, mida väljendas ka koosolekute ruumis läbi viidud katsed (joonised 16 ja 20).



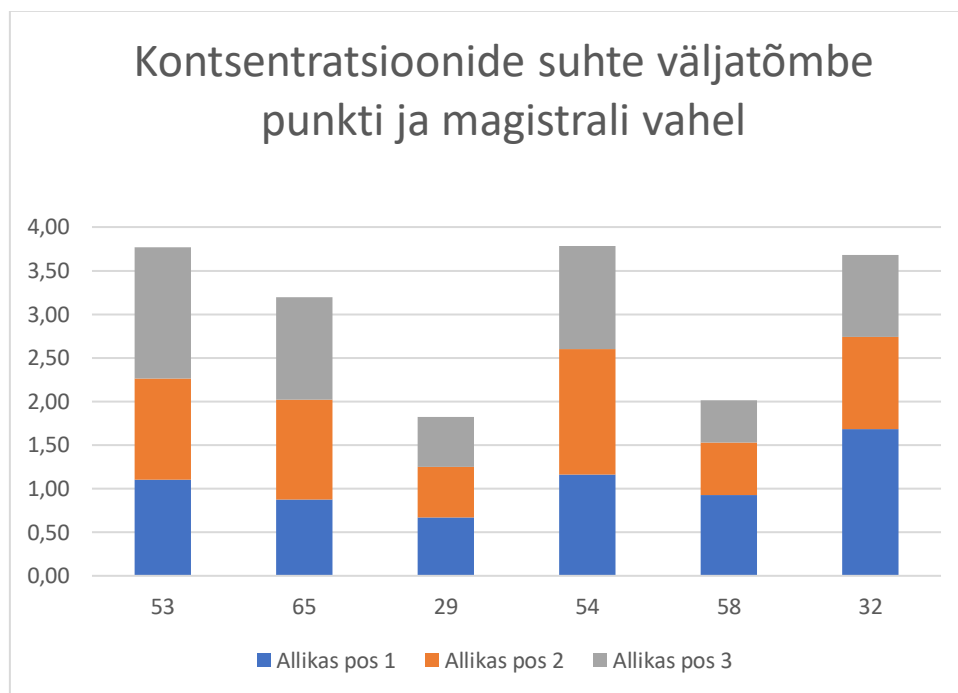
Joonis 34 – Kontsentratsioonide suhe väljatõmbepunkti ja magistralis mõõdetu vahel, valemil 1 põhjal, olukorras, kus on lississepuhke plafoonid ja väljatõmme hajutatud

Olukorras kus on eemaldatud sissepuhke plafoonide IAO mõju, on kontsentratsioonide põhjal viiruse levik toodud joonisel 35. Võrreldes joonisega 33, pole allika paiknemisel positsioonidel 2 ja 3 kuigi suuri muutusi, küll aga on mõningane muutus 1. positsiooni korral. Nimelt on kontsentratsiooni piirkond allika ümbruses palju suurem, mis viitab suuremale suhtarvule



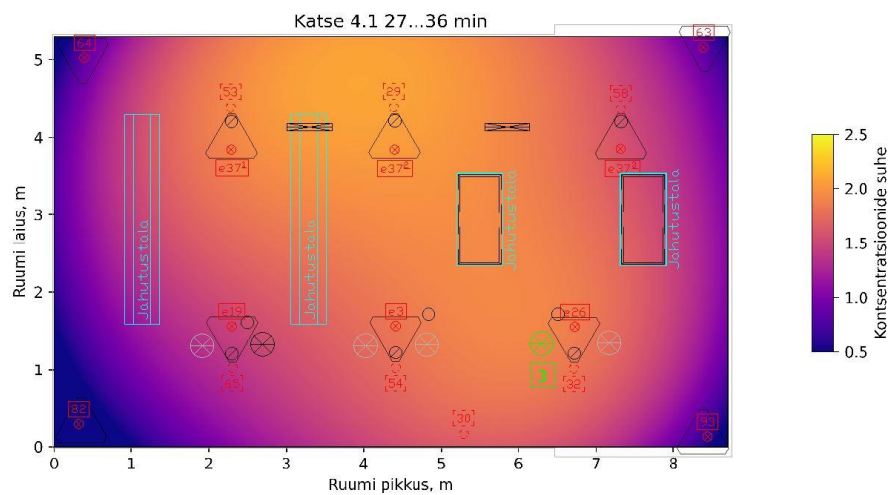
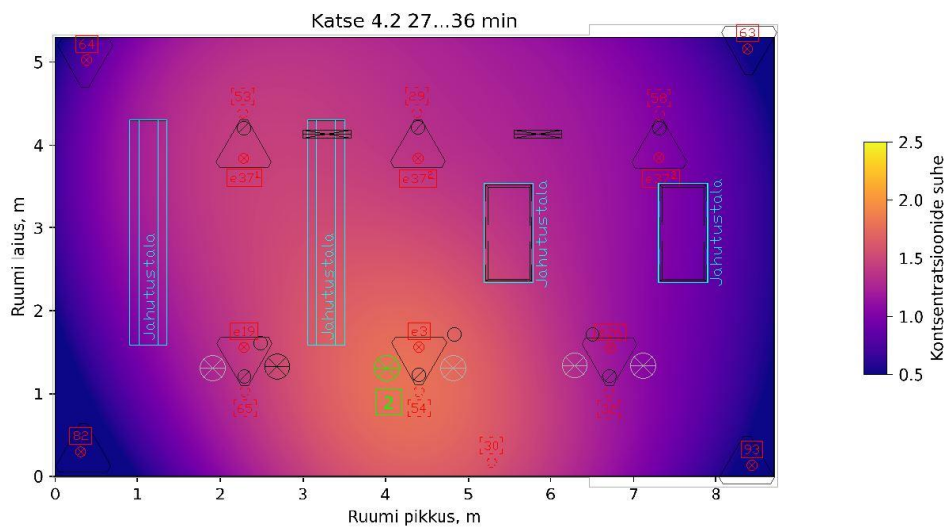
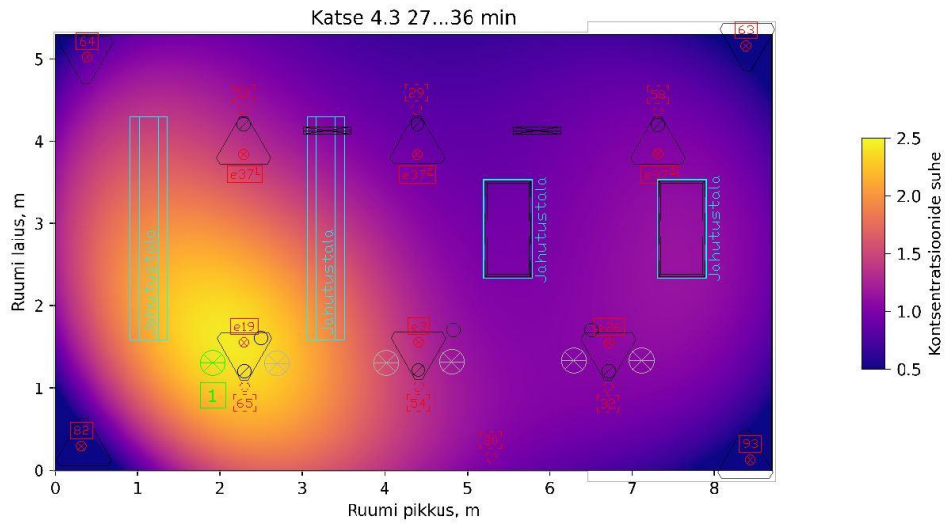
Joonis -35

Siin kohal eelmise ruumi puhul välja toodud märkus, et katstes puudulik mõõtepunkt võis oluliselt pilti mõjutada, pigem ei kehti, kuna suht arvud ei ole enam nii võrd suured. Õhuliikumist väljatõmbe suunas väljendab joonis 36, mis väljendab jällegi väljatõmbe punktide 53, 54 ja 32 olulisust. Sellist suurenemist nagu seda oli klassiruumi katses suhtearvud ei teinud.



Joonis 36 – Kontsentratsioonide suhte väljatõmbe punkti ja magistralis mõõdetu vahel, valemil põhjal, olukorras, kus lississepuhke plafoonid on eemaldatud ja väljatõmme on hajutatud

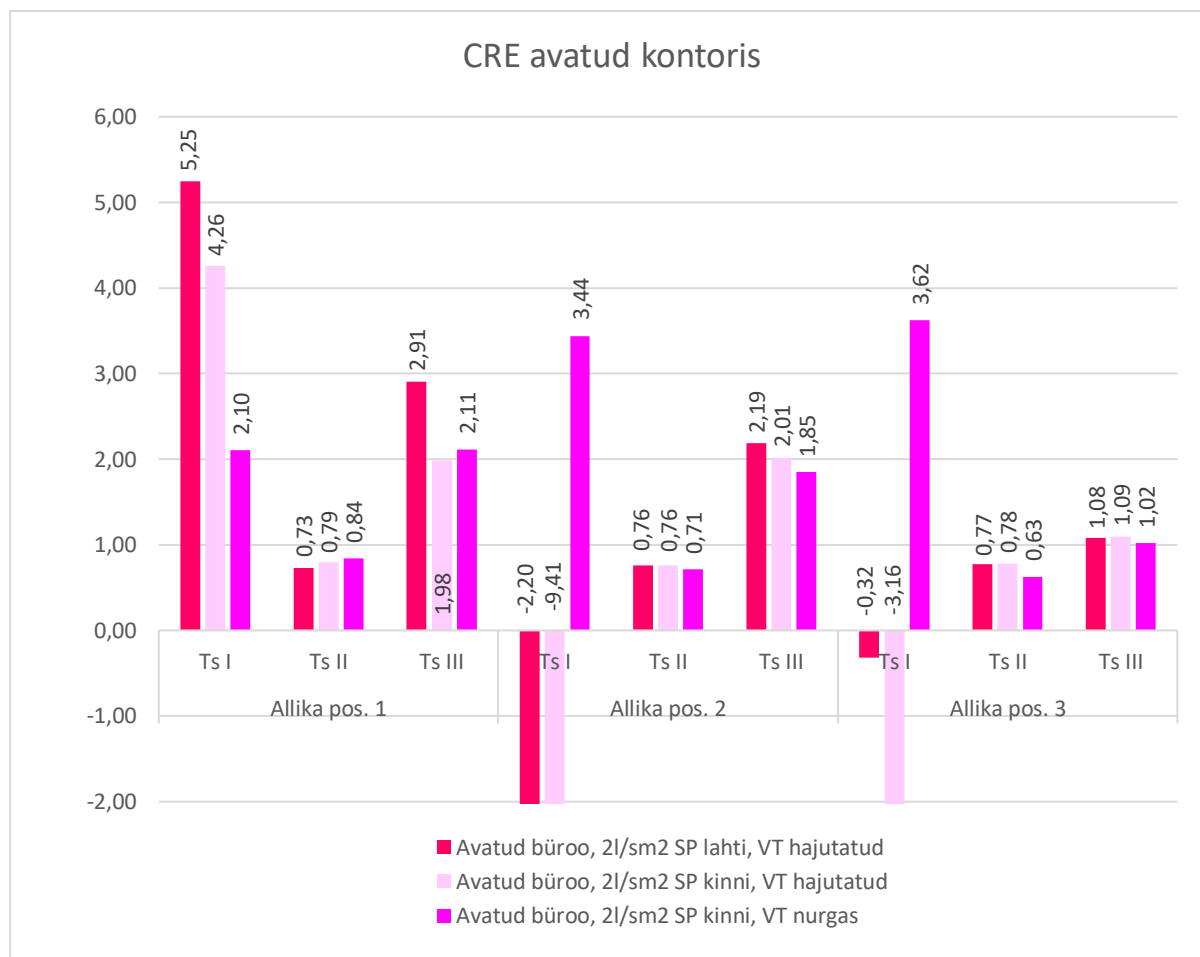
Kolmanda olukorra puhul, kus sissepuhe oli eemaldatud ning väljatõmme oli viidud ruumi ühte nurka toimus kõige suurem muutus allika paiknemise positsioonil 1, kus varasemate olukordade puhul paiknes suurema kontsentratsiooni suhte „pilv“. Joonistel 37 on kuvatud viiruse levik jällegi väljatõmbe läheduses, ruumi keskel ja väljatõmbest teises ruumi otsas. Allikate paiknemisel teises ja kolmandas punktis suuri muutusi võrreldes eelmiste olukordadega ei olnud, ehk levik suurt ei muutnud. Põhjus miks muutused erinevate katsete puhul pole suured võib tuleneda sellest, et ventilatsiooni õhuhulk mis ruumi antakse on liiga väike. Madalam õhuvooluhulk ei pruugi olla piisav peamiste õhujaoajate, antud juhul aktiivjahutustalade, poolt õhu viimiseks viibimistsooni, kuna konvektiivne õhuvool on intensiivsem.



Joonis 37 – Saasteaine levik ruumis olukorras, kus sissepuhke lisaplafoonid puuduvad ning väljatõmme on ruumi alumises vasakus nurgas lae all

5.3.2. Ruumi õhujaotuse mõju viiruse levikule

Analoogselt klassiruumi olukorrale on siingi kirjeldatud ventilatsiooni efektiivsus saasteainete eemaldamise aspektist (CER). Täpsemaks kirjeldamiseks on siingi jaotatud ruum kolmeks tsooniks ning väärtused on arvatud kogu katse keskmiste järgi ning arvatatu edasi tsoonide keskmisteks väärtusteks.



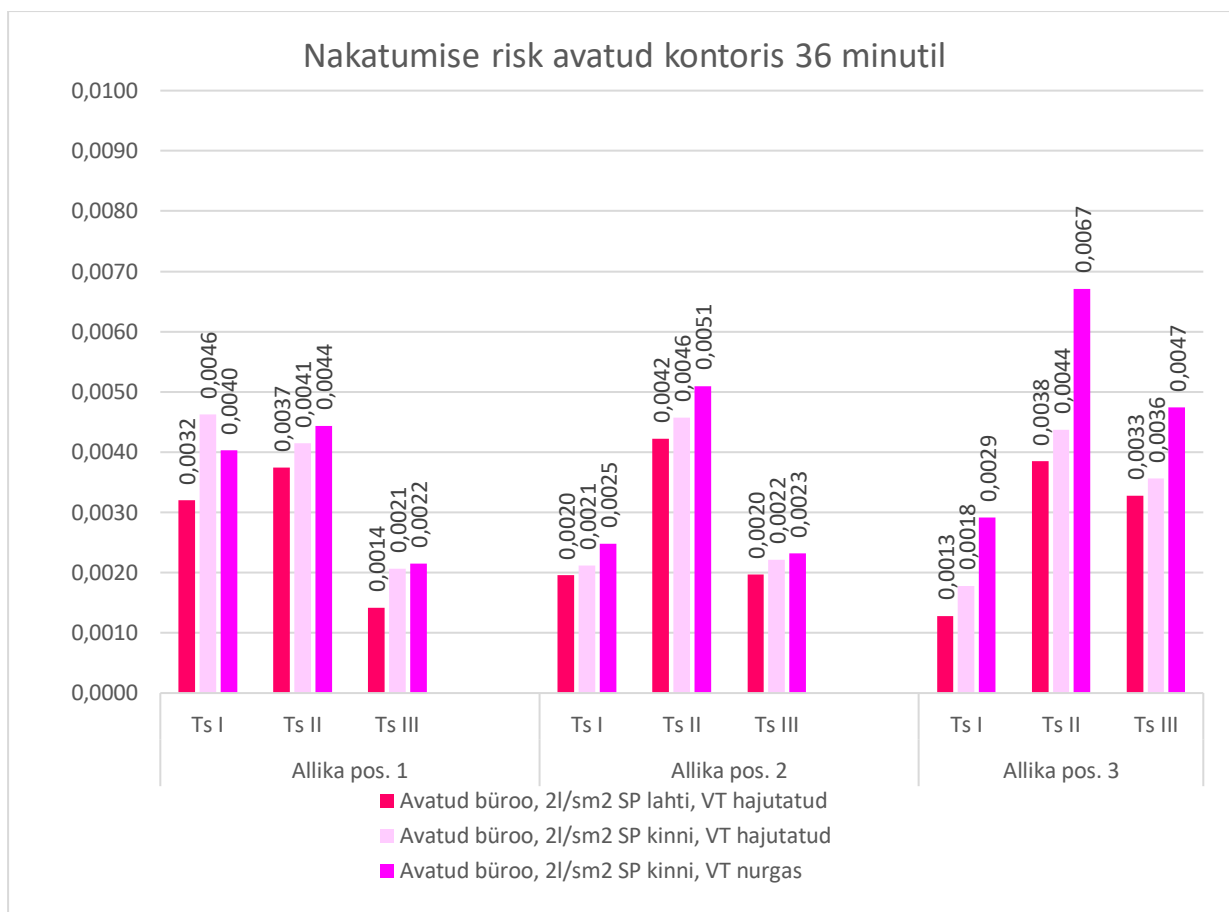
Joonis 38 – Ventilatsiooni efektiivsus saasteainete eemaldamisel ruumist (CRE) erinevate allikate positsoonide ja õhujaotusega olukordades avatud büroos

Jooniselt 38 jääb koheselt silma negatiivsed CRE väärtused neljal juhul. Põhjus tuleneb mõõtepunkti 82 katseandmetest, kus hajutatud väljatõmbe puhul olid salvestatud CO₂ kontsentratsioonid kohati madalamad sissepuhke kontsentratsioonist. Taoliste andmete tekkel oli ilmselt katsepäevade vahel kellegi poolt kasutatud anduri parameetrite muutmise tagajärg. Oluliselt madalam väärtus tekitab ka väga suured CRE väärtused tsoonis I juhul, kui allikas paikneb positsoonil 1 ja kui väljatõmme paikneb ruumi nurgas, selle sama anduri kohal. Samuti kirjeldatud ka klassiruumi analüüsi puhul oli tsoonis III saadud mõõtmised mõjutatud õhulekkest, siis tuleb seda arvestada ka siin kohal.

Üldises pildis on CRE üksik väärtused jällegi jaotunud analoogselt eelmiste ruumide andmetele, kus parim ventilatsiooni efektiivsus oli sissepuhke lisaplafoonide olemasolul ja väljatõmbe hajutatud punktide korral ning langes väljatõmbe liigutamisel ühte nurka. Põhjus jällegi ilmselt õhu paremal segunemisel. Erinev tulemus avaldub allika positsiooni korral tsoon II-s, kus väljatõmbe olukorras ruumi nurgas on kõige halvem variant just sissepuhke plafoonidega olukord. Põhjus võib-olla sissepuhke joa poolt mõõtepunkti kandub suurem kontsentratsiooni tase, teistel juhtudel, kus sissepuhke on vähendatud on intensiivsus pisut parem.

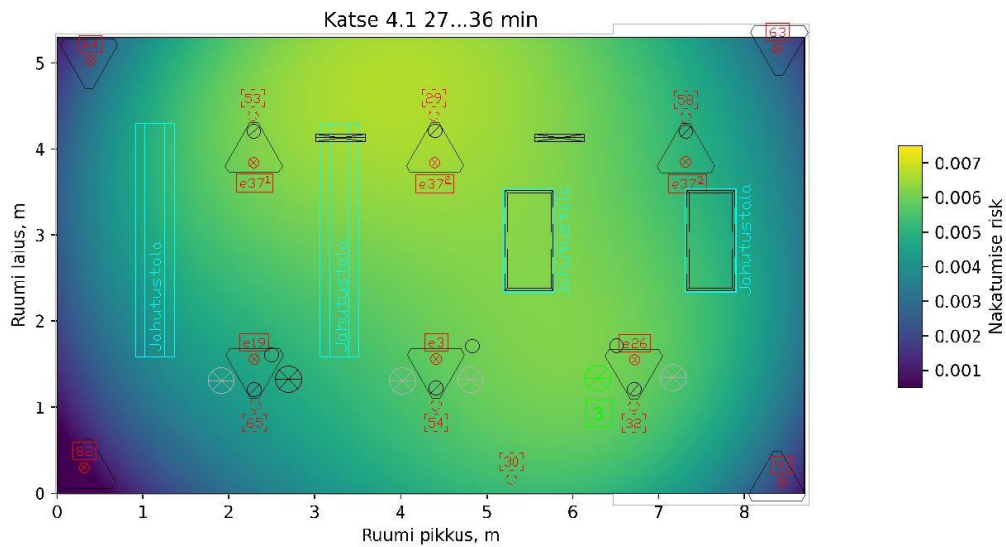
5.3.3. Nakatumise risk

Antud ruumi puhul hinnati nakatumise riski ruumis olukordades, kus väljatõmme oli hajutatud ja sissepuhkel paikensid õhu parimaks segamiseks plafoonid, väljatõmme oli hajutatud ja lisaplafoonid puudusid ning kui väljatõmme oli viidud ruumi ühte nurka. Et viirusesse nakatumine sõltub oluliselt ajast, mil viibitakse viirustega kontsentreeritud õhus, saab mõõtmisandmete põhjal maksimaalse nakatumise riski arvutada minutile 36. Arvutamisel võeti arvesse viimase ajavahemiku (9 minutit) keskmised väärtused. Samuti antakse hinnang nakatumisele nakatunu paiknemisel ruumis. Mõõtmistulemuste põhjal arvutatud nakatumise riskid on toodud joonisel 39.



Joonis 39 – SARS-CoV-2 nakatumise risk 36 minutil erinevate olukordade ja tsoonide kaupa avatud kontori ruumis

Joonisel 39 joonistub enamuse juhtudel välja trepp. Trepil on madalamaima nakatumise väärtusega olukord, kus sissepuhke lisaplafoonid on rakendatud ja väljatõmme hajutatud, kõrgemal astmel olukord lisa sissepuhkeplafoonide puudumisel ning kõige kõrgema nakatumise riskiga väljatõmbe paiknemine ruumi ühes nurgas. Suurim nakatumise risk on positsiooni 3 korral tsoonis II ja III juhul, kus väljatõmme paikneb ruumi teises nurgas. Sel juhul on saasteainete eemaldumine takistatud õhujaotuse poolt, kuna väljatõmbeni on pikem tee kui tieste olukordade puhul, mis tõttu ka suurem viiruse kontsentratsiooni hajumine kogu ruumis. Tsoon I-s mõõdetud väärad katseandmed avaldavad ka mõju nakatumise riskile, muutes siin kohal väärtused kohati madalamaks.



Joonis 40 – SARS-CoV-2 nakatumise risk olukorras, kus väljatõmme on ruumi vasakpoolses allnurgas, puudusid lisa sissepuhkeplafoonid allika manustamisel postisoonil 3

Kogu ruumi nakatumise riski kokkuvõtlikumaks võrdluseks on toodud ruumi keskmised nakatumise riskide väärtused tabelis 8. Hinnates nakatumise riskide väärtusi tervik pildina jäävad numbriliselt riskid jällegi vägagi tagasihoidlikuks, jäädes joonise 31 põhjal suurima riskiga olukorras alla 0,6%. Keskmised väärtused näitavad ära erinevate olukordade riskide erinevused. Järeldus sama, mis klassiruumi puhul, et riski maandamiseks on hajuva väljatõmbe kasutamine ruumis parem ning eriti parandab olukorda, kui puhas õhk antakse võimalikult lühikese viibimis ajaga inimese viibimistsooni.

Tabel 12 – klassiruumi keskmine nakatumise risk 36 minutil.

Tsooni tähis	Sissepuhke lisaplafoonidega, väljatõmme hajutatud	Sissepuhke ilma lisaplafoonideta, väljatõmme hajutatud	Sissepuhke ilma lisaplafoonideta, väljatõmme ruumi nurgas
Tsoon I	0,0028	0,0032	0,0035
Tsoon II	0,0027	0,0030	0,0033
Tsoon III	0,0028	0,0032	0,0048
Ruumi keskmine	0,0028	0,0031	0,0039
Ruumi keskmine 32 min	0,0025	0,0029	0,0034

6. JÄRELDUSED

Eelpool analüüsiti kolme erineva otstarbega ruumi: koosolekuruum, klass ja avatud planeeringuga kontor. Põhiliseks erinevuseks nende vahel on ventilatsiooni õhuvooluhulk, mis koosoleku ruumile on antud töös 3 l/(s m²), klassiruumile 4 l/(s m²) ja avatud kontorile 2 l/(s m²). Teine põhiline erinevus oli koosolekuruumi mõõtmiste teostamiseks kasutatav ruum. Ruumide info ja analüüside tulemused on kõrvutatud tabelis 8.

Tabel 8 – analüüside tulemused koosolekute ruumi, klassiruumi ja avatud kontori kohta

	Koosolekute ruum	Klassiruum	Avatud kontor
Pindala, m ²	52,5	45	45
Kõrgus, m	2,7	4	4
Õhuhulk, l/(s m ²)	3	4	2
Õhuvahetus kordarv, h ⁻¹	4,0	3,6	1,8
Õhujaotusviis	segunev	segunev	segunev
Väljatõmbe paiknemine ruumis	ühes otsas	ühes nurgas	ühes nurgas
Ruumi vabasoojuskoormus, W	3020	3020	3020
CRE	1,06	0,42	1,76
Nakatunu aktiivus	madal	madal	madal
Nakatamise risk, 32 min, üks nakatunu	0,0027	0,0018	0,0034

Tabeli 8 põhjal on väikseim nakatumise risk 4 l/(s m²) õhuhulga korral. Parim ventilatsiooni efektiivsus saaste ainete eemaldamisele ruumist on samuti 4 l/(s m²) korral. Antud tulemusi ei saa tõeks pidada, kuna klassiruumi ja avatud kontori mõõtmistel mõjutasid mitmeid faktoreid (lekke õhk, mõõteseadme viga). Teiseks on koosolekute ruum ja ülejäänud mõõtmiste ruum erinevad. Analüüsis selgus, et oluline mõju viiruste levikule ruumis on õhujaotusel, mis oleneb ruumis paiknevate õhujaotus elementide paiknemisest. Samuti mängib rolli nakatunu paiknemine ruumis. Veel on oluline erinevus ruumide kõrguste vahe, mis loob õhusegunemisele erinevad tingimused. Et klassiruumi ja avatud kontori mõõtmised viidi läbi samas ruumis saab võrrelda nende vahelisi tulemusi.

Tabel 9 – Nakatumise risk 36 minutil, nakatunu aktiivusetase madal

	Sisepuhke lisaplafoonidega, väljatõmme hajutatud	Sisepuhke ilma lisaplafoonideta, väljatõmme hajutatud	Sisepuhke ilma lisaplafoonideta, väljatõmme ruumi nurgas
Klassiruum, 4 l/(s m²)	0,0025	0,0033	0,0021
Avatud kontor, 2 l/(s m²)	0,0028	0,0033	0,0039

Tabelist 9 võib järeldub, et nakatumise riskid ei erine suurema ja väiksema õhuvooluhulga vahel kuigi palju. Siiski tagab suurem õhuvooluhulk olukorras kus ruumis on tagatud parem õhu segunemine madalama nakatumise riski. Parema õhusegunemise korral madalamat riski taset kinnitab ka tabel 6, kus suurema jahutuse intensiivsuse korral alanes samuti nakatumise riski tase üle 0,4%. intensiivsem õhu segamine aktiivtalaade poolt aitaks ka kaasa väikeste viiruspiiskade eemaldamisele ruumi õhust (tabel 5). Oluline on ka siinkohal väärse õhu joa tagamine inimese viibimistsooni, mis aitab vähendada sissehingatava viiruste hulka. Et nakatumise riskid on antud katsete puhul toodud välja 30 minutilise ajavahemiku läheduses, pole riskide suurused kuigi arvestatava suurusega, võiks edasi uurimisel koostada pikemale ajaperioodile.

Tabel 5 - Ventilatsiooniga saasteainete eemaldamise efektiivsus (CRE)

	Ainult ventilatsiooniga, istuv tegevus (rääkimine 5%)	Jahutusega (3020 W), istuv tegevus (rääkimine 5%)	Jahutusega (7810 W), istuv tegevus (rääkimine 5%)
Keskmine CRE	1,03	1,06	1,08

Tabel 6 – Nakatumise risk kogu ruumi lõikes, erinevate inimeste arvu ja aktiivsustasemetel

	Ainult ventilatsiooniga, istuv tegevus (rääkimine 5%)	Jahutusega (3020 W), istuv tegevus (rääkimine 5%)	Jahutusega (3020 W), istuv tegevus (rääkimine 40%)	Ventilatsioon ei tööta, istuv tegevus (rääkimine 5%)	Jahutusega (7810 W), istuv tegevus (rääkimine 5%)
Keskmine nakatumise risk 24 min	0,0059	0,0020	0,0092	0,0055	0,0017

KOKKUVÕTE

Käes oleva lõputöö eesmärgiks oli analüüsida SARS-CoV-2 aerosoolset levikut siseruumides koosolekuruumi, klassiruumi ja avatud kontori näitel. Leviku hindamiseks tuli kirjanduse baasil valida selleks parim mõõtmise viis. Lisaks hinnati aktiivjahutuse mõju viiruse levikule ning ventilatsiooni efektiivsusele eemaldada ruumist saasteaineid ning nakatunu paiknemisest tulenevat väikeste viirus piiskade levikut ruumis.

Uuritavateks objektideks olid koosolekuruumina Tallinna Tehnikaülikooli peamaja korpuse U03 teisel korrusel ruum 214 ja CON majas ruum 214 õhujaotuslabor klassiruumi ja avatud kontorina. Kõigi ruumide puhul paiknesid ruumide laes aktiivjahutustalad. „Mock-up“ ruumi puhul olid lisaks taladele ka lisa sissepuhke õhujaotajad ning väljatõmme paiknes ruumi peale hajutatuna, võrdluseks koosolekute ruum, kus väljatõmme oli ainult ühes ruumi otsas.

Viiruste leviku hindamiseks kasutati märkegaasina CO₂ konstantse doseerimise meetodil. Antud meetod sobib väga hästi praktilistes olukordades viiruste leviku hindamiseks ja nakatumise hindamiseks, sest konstantne manustamine imiteerib inimese ühtlast tegevust mingi ajaperioodi vältel. Gaasi levikut ruumis mõõdeti Evikon ja HOB0 andmelogeritega läbi gaasi kontsentratsiooni tõusu ruumi mõõtepunktides. Mõõtepunktidest saadud andmete põhjal koostati interpoleerimis tarkvara abiga levikukaardid. Viiruste leviku hindamiseks ja erinevate õhujaotuste võrdlemiseks leiti ka ventilatsiooni efektiivsuse saasteainete eemaldamise indeksid.

Analüüsi käigus selgus, et SARS-CoV-2 aerosoolne levik ruumis on dikteeritud õhuvoolude liikumise suunast. Et antud juhtudel oli tegemist seguneva ventilatsiooniga, siis toimus enamasti ruumis märkegaasi ühtlane hajumine, mida kirjeldasid ka katse tulemused. Nakatunu paiknemisel väljatõmbe läheduses tähendas, aga seda, et suurem osa ledlevaid piisku eemaldub ruumist suhteliselt kiiresti, vaid väike osa kandub ruumi laiali. Mida kaugemale nakatunu väljatõmbest liikus, seda rohkem segunevast õhujaotusest tulenevalt viiruste piiskade laiali hajumist ruumis täheldati. Kusjuures mida rohkem segunenud oli õhk, seda suurem oli ventilatsioonisüsteemi efektiivsuse näitaja viiruste aerosoolide eemaldamisele ruumist, mistõttu ka nakatumise risk oli väiksem. Efektiivsemat õhusegunemist väljendasid aktiivjahutustalade jahutamise intensiivsus. Üle kahe korra suurema vabasoojuskoormuse korral vähenes nakatumise risk 24 minuti pikkuse perioodi korral 0,03%. Et viirustesse nakatumise risk tõuseb viiruse piiskade „pilves“ viibides aja jooksul märgatavalt, võib taoline väike protsent pikema ajaperioodi vältel oluliselt nakatumise riski suurendada. Ventilatsiooni efektiivsust viiruste piiskade eemaldamisel

aitas ka tõsta ning selle läbi nakatumise riski vähendada väljatõmbe punktide paiknemine ruumis hajutatult. See tuleneb sellest, et õhu teekond ruumis lüheneb, mistõttu ka õhuvooludega kaasa liikuvad viiruste piisad eemaldatakse kiiremini ruumist. Nakatumise riski vähendamiseks veel enamgi on tähtis puhta õhu juhtimine võimalikult lühikest teed pidi inimese inimese viibimistsooni.

Tulenevalt mõõtmiste läbiviimisel ilmnenu ettenägematutest asjaoludest, ei saa lõplike järeldusi . Selleks annab autor tulevikuks mõned soovitused töö edasi arendamiseks/kontrollimiseks:

- 1) Mõõtmiste ajaperioodi pikendamine selgitamaks kui kõrgeks tõuseb nakatumise risk pikemate koosolekute/õppetundide/töötundide vältel
- 2) Hinnata nakatumise riski ja viiruste levikut mitme nakatunuga olukorra puhul
- 3) Läbi viia korduvkatsed, välistamaks antud töö puhul ette tulnud lekkeõhu ja andmelogerite mõõtevigu.
- 4) Võrrelda erinevate nakatumis mudelite puhul nakatumise riske
- 5) Läbi viia katsed erinevatel suhtelistel õhuniiskustel
- 6) Soovitus tulevikus läbiviidavateks katsetusteks: Mitte kasutada Evikon E6226 andmelogereid!

SUMMARY

The purpose of current thesis was to analyze SARS-CoV-2 transmission via air on the example of meeting room, classroom and open office. To evaluate the transmission, correct measuring method had to be selected based on published academical literature. Furthermore, the impact of infected persons location, active cooling on the virus transmission and virus removal rate by ventilation and infected persons location was analyzed too.

To conduct necessary measurements Tallinn University of Technology room 214 in facility U03 was chosen to conduct meeting room testing. For classroom and open office cases testing "Mock-up" room, room 214 in CON facility was selected. The main difference between these two rooms was the scattering of extract air locations throughout the room in the "mock-up" room, when the room in U03 had extraction points only in one end of the room.

To evaluate the virus transmission in room, CO₂ with tracer step-up method was used. The selected method suits for the practical testing where virus transmission and infection risk are assessed, as it simulates the human activity, where activity rate is assumed to be constant. The transmission of CO₂ was measured with Evikon and HOBO dataloggers which measured the gas concentration changes in room air. Gathered data was interpolated with special program software, to create transmission maps. To evaluate virus transmission and compare different air supply and extract methods contaminant removal effectiveness was also calculated.

Data analyzation showed that the transmission of SARS CoV-2 aerosols is dictated by airflows in the room. As tests were conducted with mixing ventilation the dispersion of contaminant was expected, which indeed was recorded. When the infected person located near air extraction point, less virus quanta was spread throughout the room. The further the infected person located from the extraction point the more scattering of the contaminant was detected. One noticeable fact was the better the air was mixed the better was the contaminant removal effectiveness which also meant the infection probability was smaller. Better rate for air mixing came from the bigger intensity of the active cooling beams. The probability of infection on 24th minute of exposure decreased about 0,03% when the heat load was slightly over two times higher. One main fact from the literature was the probability increases significantly in time, so the slight difference between two cases could mean much risk when exposure time grows. The scattering of extract points also helped to increase the contaminant removal rate, which meant lower infection risk. Which comes from the fact that droplet time spent in room is decreased significantly.

However, the increasing the fresh air flow in occupied zone helps to reduce the risk for infection.

The test results were on some level corrupted by unfortunate aspects, which means, the results acquired might not be 100% correct. For the future studies here are some recommendations:

- 1) Conduct measures on extended time frame, to assess the rise of infection risk when longer meeting, classes are held or time much more time spent on workstation
- 2) Analyze the transmission when multiple infected people are presented
- 3) Reproduce the tests, to eliminate the so-called unfortunate aspects which corrupted current measurements
- 4) Compare different infection risk calculating models
- 5) Conduct measures on different relative humidity to evaluate the change in infection probability
- 6) Highly recommended to not use Evikon E6226 loggers for future practices

VIIDATUD KIRJANDUS

- [1] N. K. Rai, A. Ashok, and B. R. Akondi, "Consequences of chemical impact of disinfectants: safe preventive measures against COVID-19," *Crit. Rev. Toxicol.*, vol. 50, no. 6, pp. 513–520, Jul. 2020, doi: 10.1080/10408444.2020.1790499.
- [2] "WHO Coronavirus (COVID-19) Dashboard | WHO Coronavirus (COVID-19) Dashboard With Vaccination Data." <https://covid19.who.int/> (accessed Apr. 23, 2021).
- [3] V. Arthi and J. Parman, "Disease, downturns, and wellbeing: Economic history and the long-run impacts of COVID-19," *Explorations in Economic History*, vol. 79. Academic Press Inc., p. 101381, Jan. 01, 2021, doi: 10.1016/j.eeh.2020.101381.
- [4] J. L. Domingo, M. Marquès, and J. Rovira, "Influence of airborne transmission of SARS-CoV-2 on COVID-19 pandemic. A review," *Environmental Research*, vol. 188. Academic Press Inc., p. 109861, Sep. 01, 2020, doi: 10.1016/j.envres.2020.109861.
- [5] O. Seppänen and M. Seppänen, *Hoone sisekliima kujundamine*. 1998.
- [6] *EVS-EN 16798-1:2019/NA:2019*. .
- [7] E. Abel and H. Voll, *Hoonete energiatarve ja sisekliima*. Tallinn: Presshouse, 2010.
- [8] E. Abel and H. Voll, *Hoonete energiatarve ja sisekliima*. 2010.
- [9] Z. Noorimotlagh, N. Jaafarzadeh, S. S. Martínez, and S. A. Mirzaee, "A systematic review of possible airborne transmission of the COVID-19 virus (SARS-CoV-2) in the indoor air environment," *Environ. Res.*, vol. 193, p. 110612, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.envres.2020.110612.
- [10] Y. Jin *et al.*, "Virology, Epidemiology, Pathogenesis, and Control of COVID-19," *Viruses*, vol. 12, no. 4, p. 372, Mar. 2020, doi: 10.3390/v12040372.
- [11] I. T. S. Yu *et al.*, "Evidence of Airborne Transmission of the Severe Acute Respiratory Syndrome Virus," *N. Engl. J. Med.*, vol. 350, no. 17, pp. 1731–1739, Apr. 2004, doi: 10.1056/NEJMoa032867.
- [12] R. Tellier, "Review of aerosol transmission of influenza A virus," *Emerging Infectious Diseases*, vol. 12, no. 11. Centers for Disease Control and Prevention (CDC), pp. 1657–1662, 2006, doi:

- 10.3201/eid1211.060426. infl," *Emerging Infectious Diseases*, vol. 12, no. 11. Centers for Disease Control and Prevention (CDC), pp. 1657–1662, 2006, doi: 10.3201/eid1211.060426.
- [13] S. Shao *et al.*, "Risk assessment of airborne transmission of COVID-19 by asymptomatic individuals under different practical settings," *J. Aerosol Sci.*, vol. 151, p. 105661, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.jaerosci.2020.105661.
- [14] V. Vuorinen *et al.*, "Modelling aerosol transport and virus exposure with numerical simulations in relation to SARS-CoV-2 transmission by inhalation indoors," *Saf. Sci.*, vol. 130, p. 104866, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.ssci.2020.104866.
- [15] G. Bognolo, "Calculating the risk of disease," *Bmj*, vol. 329, no. 7459, p. 237, 2004, doi: 10.1136/bmj.329.7459.237-a.
- [16] S. N. Rudnick and D. K. Milton, "Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration," *Indoor Air*, vol. 13, no. 3, pp. 237–245, Sep. 2003, doi: 10.1034/j.1600-0668.2003.00189.x.
- [17] G. N. Sze To and C. Y. H. Chao, "Review and comparison between the Wells-Riley and dose-response approaches to risk assessment of infectious respiratory diseases," *Indoor Air*, vol. 20, no. 1, pp. 2–16, 2010, doi: 10.1111/j.1600-0668.2009.00621.x.
- [18] G. Buonanno, L. Stabile, and L. Morawska, "Estimation of airborne viral emission: quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment 2 3," doi: 10.1101/2020.04.12.20062828.
- [19] E. Bjørn and P. V. Nielsen, "Dispersion of exhaled air and personal exposure in displacement ventilated rooms," *Indoor Air*, vol. 12, no. 3, pp. 147–164, Sep. 2002, doi: 10.1034/j.1600-0668.2002.08126.x.
- [20] L. Stabile, G. Buonanno, A. Frattolillo, and M. Dell'Isola, "The effect of the ventilation retrofit in a school on CO₂, airborne particles, and energy consumptions," *Build. Environ.*, vol. 156, pp. 1–11, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.04.001.
- [21] P. Amoatey, H. Omidvarborna, M. S. Baawain, and A. Al-Mamun, "Impact of building ventilation systems and habitual indoor incense burning on SARS-CoV-2 virus transmissions in Middle Eastern countries," *Science of the Total Environment*, vol. 733. Elsevier B.V., p. 139356, Sep. 01, 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139356.

- [22] J. Atkinson, Y. Chartier, C. Lúcia Pessoa-Silva, P. Jensen, Y. Li, and H. Seto, *Natural Ventilation for Infection Control in Health-Care Settings*. 2009.
- [23] *EVS 906:2018*. .
- [24] H. Koskela, H. Hggblom, R. Kosonen, and M. Ruponen, "Flow pattern and thermal comfort in office environment with active chilled beams," in *HVAC and R Research*, Aug. 2012, vol. 18, no. 4, pp. 723–736, doi: 10.1080/10789669.2011.603014.
- [25] N. Zhang *et al.*, "Recent advances in the detection of respiratory virus infection in humans," *J. Med. Virol.*, vol. 92, no. 4, pp. 408–417, 2020, doi: 10.1002/jmv.25674.
- [26] P. Krishnamoorthy, A. S. Raj, S. Roy, N. S. Kumar, and H. Kumar, "Comparative transcriptome analysis of SARS-CoV, MERS-CoV, and SARS-CoV-2 to identify potential pathways for drug repurposing," *Comput. Biol. Med.*, vol. 128, p. 104123, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.combiomed.2020.104123.
- [27] P.-E. Nilsson *et al.*, *Achieving the desired indoor climate*. 2007.
- [28] G. Buonanno, L. Stabile, and L. Morawska, "Estimation of airborne viral emission: Quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment," *Environ. Int.*, vol. 141, p. 105794, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.envint.2020.105794.
- [29] G. Buonanno, L. Morawska, and L. Stabile, "Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS-CoV-2 infection: Prospective and retrospective applications," *Environ. Int.*, vol. 145, p. 106112, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.envint.2020.106112.
- [30] S. Cui, M. Cohen, P. Stabat, and D. Marchio, "CO2 tracer gas concentration decay method for measuring air change rate," *Build. Environ.*, vol. 84, pp. 162–169, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2014.11.007.
- [31] L. D. Knibbs, L. Morawska, S. C. Bell, and P. Grzybowski, "Room ventilation and the risk of airborne infection transmission in 3 health care settings within a large teaching hospital," *Am. J. Infect. Control*, vol. 39, no. 10, pp. 866–872, Dec. 2011, doi: 10.1016/j.ajic.2011.02.014.
- [32] P. Wolkoff, K. Azuma, and P. Carrer, "Health, work performance, and risk of infection in office-like environments: The role of indoor temperature, air humidity, and ventilation," *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, vol. 233. Elsevier GmbH, p. 113709, Apr. 01, 2021, doi: 10.1016/j.ijheh.2021.113709.

- [33] F. A. Berlanga, I. Olmedo, M. R. de Adana, J. M. Villafruela, J. F. S. José, and F. Castro, "Experimental assessment of different mixing air ventilation systems on ventilation performance and exposure to exhaled contaminants in hospital rooms," *Energy Build.*, vol. 177, pp. 207–219, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.07.053.
- [34] J. M. Villafruela, F. Castro, J. F. San José, and J. Saint-Martin, "Comparison of air change efficiency, contaminant removal effectiveness and infection risk as IAQ indices in isolation rooms," *Energy Build.*, vol. 57, pp. 210–219, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.10.053.
- [35] G. Cao *et al.*, "A review of the performance of different ventilation and airflow distribution systems in buildings," *Building and Environment*, vol. 73. Pergamon, pp. 171–186, Mar. 01, 2014, doi: 10.1016/j.buildenv.2013.12.009.
- [36] P.-E. Nilsson *et al.*, *Achieving the desired indoor climate*. 2007.
- [37] M. Cehlin, T. Karimipannah, U. Larsson, and A. Ameen, "Comparing thermal comfort and air quality performance of two active chilled beam systems in an open-plan office," *J. Build. Eng.*, vol. 22, pp. 56–65, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.jobbe.2018.11.013.
- [38] Z. Shi, Z. Lu, and Q. Chen, "Indoor airflow and contaminant transport in a room with coupled displacement ventilation and passive-chilled-beam systems," *Build. Environ.*, vol. 161, p. 106244, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.106244.
- [39] C. Kandzia, R. Kosonen, A. Krikor, M. Peter, and V. Nielsen, *Mixing Ventilation distribution design*, no. 19. .
- [40] E. Mundt, H. M. Mathisen, P. V. Nielsen, and A. Moser, *Ventilation Effectiveness*, no. 2. 2004.
- [41] S. N. Rudnick and D. K. Milton, "Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration," *Indoor Air*, vol. 13, no. 3, pp. 237–245, Sep. 2003, doi: 10.1034/j.1600-0668.2003.00189.x.
- [42] J. Kurnitski *et al.*, "A new ventilation criterion based on respiratory infection risk of COVID-19," no. March, 2021.
- [43] *EVS-EN 16798-3:2017*. .
- [44] "HAMA 'Premium' Energy Cost Meter."

- https://www.hama.com/webresources/article-documents/00047/man/00047770man_bg_de_en_es_fr_nl_pt.pdf (accessed May 09, 2021).
- [45] K. Ji, W. Cai, X. Zhang, B. Wu, and X. Ou, "Modeling and validation of an active chilled beam terminal unit," *J. Build. Eng.*, vol. 22, pp. 161–170, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.jobbe.2018.12.009.
- [46] T. Arghand, S. Javed, A. Trüschel, and J. O. Dalenbäck, "Cooling of office buildings in cold climates using direct ground-coupled active chilled beams," *Renew. Energy*, vol. 164, pp. 122–132, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.renene.2020.09.066.
- [47] "CO₂, niiskuse ja temperatuuri loger E6226 ." www.evikon.ee/dnl/E6226DLog.zip. (accessed May 09, 2021).
- [48] "HOBO ® MX1102A Data Logger," 2021. <https://www.onsetcomp.com/datasheet/MX1102A> (accessed May 09, 2021).
- [49] "HOBO ® UX120-006M Data Logger 4-Channel Analog," 2021. .
- [50] "Schneider SE 8000 and SE7000."
- [51] "Bench scale FKB 65 kg; 0,2 g." <https://www.kern-sohn.com/en/FKB> (accessed May 09, 2021).
- [52] A. Mikola, "Alo Mikola ventilatsiooniprojekt Taltech U03 214."
- [53] A. Mikola, "Alo Mikola ventilatsiooni projekt TalTech CON-214."
- [54] D. Alexander and M. O'Rourke, "Design considerations for active chilled beams," *ASHRAE J.*, vol. 50, no. 9, 2008.