



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**KLASSIRUUMIDE ÕHUVAHETUSE KAARDISTAMINE
NING ÕHUJAOTUSLAHENDUSTE TOIMIVUSE
HINDAMINE TALLINNA ÜLDHARIDUSKOOLIDE
NÄITEL**

**THE MAPPING OF CLASSROOM AIR EXCHANGE AND THE
EVALUATION OF AIR DISTRIBUTION SOLUTIONS'
PERFORMANCE ON THE EXAMPLE OF TALLINN'S PUBLIC
SCHOOLS**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Indrek Valgma

Üliõpilaskood 177472EAKI

Juhendaja: Teet Tark, lektor

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad,

kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

16. mai 2022

Autor: Indrek Valgma

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

16. mai 2022

Juhendaja: Teet Tark

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Indrek Valgma

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Klassiruumide õhuvahetuse kaardistamine ning õhujaotuslahenduste toimivuse hindamine Tallinna üldhariduskoolide näitel“,

mille juhendaja on Teet Tark,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

16. mai 2022

/allkirjastatud digitaalselt/

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Indrek Valgma, 177472EAKI (nimi, üliõpilaskood)

Õppekava, peeriala: EAKI02/17 – Hoonete sisekliima ja veetehnika (kood ja nimetus)

Juhendaja(d): lektor, Teet Tark, +372 504 8037 (amet, nimi, telefon)

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Klassiruumide õhuvahetuse kaardistamine ning õhujaoituslahenduste toimivuse hindamine Tallinna üldhariduskoolide näitel

(inglise keeles) The Mapping of Classroom Air Exchange and the Evaluation of Air Distribution Solutions' Performance on the Example of Tallinn's Public Schools.

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Määratleda ning tuua välja tüüpiliste klassiruumide õhuvahetuse olemasolev olukord ja peamised puudused;
2. Anda katselistel analüüsidel põhinev hinnang olemasolevate klassiruumide õhujaoituse lahendustele õhuvahetuse efektiivsuse ja õhuliikumise aspektist;
3. Katsetele tuginedes hinnata dүүstorudel põhinevaid klassiruumide õhujaoituse lahendusi;
4. Tuua auditi tulemuste ja laborimõõtmiste põhjal välja ettepanekud võimalike probleemide lahendamiseks.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Lõputöö aluseks oleva viieteist Tallinna üldhariduskooli põhjal koostatud ventilatsiooni auditiga seotud tegevuste lõpetamine. Auditi tellijaks oli Tallinna Haridusamet ning koostajaks Hevac OÜ (töö nr. 3021).	15.12.2021
2.	Kirjanduse ülevaade ning metoodika lühikirjeldus, töö esitamine vahekontrolliks	07.03.2022

3.	Teoreetilise osa ja postri koostamine, töö esitamine ülevaatuks	10.04.2022
4.	Laborikatsete ettevalmistus ja läbiviimine	05.05.2022
5.	Mõõtmistulemuste analüüs ja kirjeldamine	11.05.2022
6.	Andmeanalüüs ja tulemuste graafiline vormistamine	14.05.2022
7.	Lõputöö vormistamine ning esitamine	16.05.2022

Töö keel: eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: 16. mai 2022. a

Üliõpilane: Indrek Valgma

.....

16. mai 2022. a

/allkirjastatud digitaalselt/

Juhendaja: Teet Tark

.....

16. mai 2022. a

/allkirjastatud digitaalselt/

SISUKORD

EESSÕNA	7
Lühendite, terminite ja tähiste loetelu.....	8
1. SISSEJUHATUS	9
2. KIRJANDUSE ÜLEVAADE.....	11
3. TEOREETILISED ALUSED	14
3.1 Sisekliima komponent – õhukvaliteet	14
3.2 CO ₂ siseõhu kvaliteedi indikaatorina klassiruumides.....	17
3.3 Ülevaade klassiruumide ventilatsiooni reguleerivatest määrustest ja standarditest...	18
3.4 Õhujaotusviisid	21
3.5 Õhukvaliteedi indikaatorid	24
3.6 Kontsentratsiooni languse meetod	28
4. METOODIKA.....	30
4.1 Koolide olemasolevate ventilatsioonisüsteemide kaardistamine.....	31
4.2 Laboratoorsed katsevahendid.....	34
4.3 Laboratoorse klassiruumi kirjeldus	36
4.4 Uuritud koolides esinenud tüüpiliste õhujaotuslahenduste katsed.....	38
4.5 Düüsidega õhujaotuse tüüplahenduste katsed.....	40
4.6 Õhujaotuse lahenduste mõõtmiste kirjeldus	43
4.7 Õhuvahetuse efektiivsuse määramine	46
4.8 Magistritöö limitatsioonid	47
5. TULEMUSED JA ANALÜÜS.....	48
5.1 Klassiruumide õhuvahetuse olemasolev olukord.....	48
5.2 Uuritud koolides esinenud tüüpiliste õhujaotuslahenduste toimivus	54
5.3 Düüstorudega õhujaotuslahenduste toimivus	61
6. JÄRELDUSED	70
KOKKUVÕTE	74
SUMMARY	76
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU.....	79

EESSÕNA

Siseõhu kvaliteet klassiruumides võib avaldada olulist mõju õpilaste tervisele ning õpitulemustele. Seetõttu on tähtis, et klassides oleks tagatud õppetöö ajal piisav ning efektiivne õhuvahetus. Antud magistritöös uuriti viieteistkümne Tallinna üldhariduskooli klassiruumide teenindavate ventilatsioonisüsteemide õhuvooluhulkasid ja hinnati pisteliselt klassiruumide süsihappegaasi kontsentratsioonide taset. Lisaks hinnati laboratoorses klassiruumis nelja õhujäätuslahenduse toimivust õhuvahetuse efektiivsuse, lokaalsete õhuvahetuse indeksite ja õhu liikumiskiiruse alusel.

Autor tänab juhendajat Teet Tarka lõputöö valmimisel toe ja konsultatsioonide eest ning doktorant Martin Kiili abi eest laboratoorsete katsete läbiviimisel ja töö sisulise ning vormilise poolega nõustamisel. Samuti professor Jarek Kurnitskit ja nooremteadur Alo Mikolat konsultatsioonide ning doktorant-nooremteadur Karl-Villem Võsa laboratoorsete katsetulemuste visualiseerimise eest. Eriline tänu ka uuritud koolide personalile, kes olid abiks koolides lähte- ja katseandmete kogumisel ning ETS Nordile laboratoorsetes katsetes kasutatud õhujäätajate varustamise eest.

Magistritöö võtmesõnad: klassiruumide ventilatsioon, õhuvahetuse efektiivsus, CO₂ märkegaas, kontsentratsiooni languse meetod, magistritöö.

Lühendite, terminite ja tähiste loetelu

Lühendid

REHVA - Euroopa kütte, ventilatsiooni ja jahutuse erialaühenduste katusorganisatsioon (ingl k Federation of European Heating, Ventilation and Air-Conditioning Associations)

RKAS – Riigi Kinnisvara Aktsiaselts

VOC – lenduvad orgaanilised ühendid (ingl k volatile organic compound)

Terminid

Dummy – termiline mannekeen katsetes vabasoojuste imiteerimiseks

Märkegaas – gaas, mida on võimalik õhuga segada ja mille väga madalaid kontsentratsioone on võimalik mõõta

Nominaalne ajakonstant – vähim võimalik aeg, mille jooksul jõuab kogu ruumi õhk vahetuda

Õhu eluiga – aeg alates hetkest, kui õhk ruumi sisenes

Õhuvahetuse efektiivsus – suurus, mis iseloomustab ruumi õhu vahetumise kiirust võrreldes suurima võimaliku kiirusega võrdsete õhuvooluhulkade juures

Tähised

CO_2 – süsinikdioksiid ehk süsihappegaas

V – ruumi kubatuur, m^3

q_v – õhuvooluhulk, m^3/h

ε^a – õhuvahetuse efektiivsus, %

ε_p^a – lokaalne õhuvahetuse indeks, %

ε^c – saasteainete eemaldamine tõhusus

ε_p^c – lokaalne õhukvaliteedi indeks

λ – lokaalne õhuvahetuse kordarv, $1/\text{h}$

$\bar{\tau}_p$ – lokaalne õhu keskmine eluiga, h

τ_n – nominaalne ajakonstant, h

$\langle \bar{\tau} \rangle$ – ruumiõhu keskmine eluiga, h

1. SISSEJUHATUS

Mitmete uurimuste tulemusel on leitud, et puudulik siseõhu kvaliteet klassiruumides vähendab õpilaste sooritusvõimet ning omab negatiivset mõju seal viibivate inimeste tervisele. Ebapiisava ventilatsiooni korral on täheldatud astma sümptomite riski kasvu, õpilaste seas puudumise arvu kasvu ja respiratoorsete haigusnähtude sagenemist [1][2][3][4]. Klassiruumide õhukvaliteedi tagamiseks ja ruumidest saasteainete eemaldamiseks rajatakse klassiruumide teenindavad ventilatsioonisüsteemid [5]. Paraku näitavad Eesti ja lähiriikides klassiruumides läbiviidud ventilatsioonisüsteemide uuringud, et sageli ei tööta välja ehitatud süsteemid projekteeritud tingimustel ning õhu saastatus ületab õpperuumides normidega ette nähtud piire [1][6][7][8]. Õhukvaliteedi tagamisel on lisaks nõuetekohasele õhuvahetusele oluline roll õhujaotusel, mis määrab ära, kui efektiivselt asendatakse ruumi saastunud õhk värske puhta õhuga [9].

Antud lõputöö baseerub Tallinna haridusametis läbiviidud ventilatsioonisüsteemide auditil [9]. Audit viidi läbi Tallinna Haridusameti tellimisel viieteistkümnes Tallinna üldhariduskoolis. Auditi koostajaks oli Hevac OÜ (töö nr. 3021) ning töö valmimisel osales ettevõtte esindaja, tehnikamagister Teet Tark ja lõputöö autor Indrek Valgma. Lõputöö koosneb sisuliselt kahest osast: esiteks auditi alusel klassiruumide õhukvaliteedi ja neid klassiruumide teenindavate ventilatsioonisüsteemide hindamisest, teiseks nelja klassiruumide õhujaotuslahenduse toimivuse analüüsist laboratoorsete katsete põhjal.

Käesoleva magistr töö peamiseks eesmärgideks on:

1. Määratleda ning tuua välja tüüpiliste klassiruumide õhuvahetuse olemasolev olukord ja peamised puudused;
2. Anda katselistel analüüsidel põhinev hinnang olemasolevate klassiruumide õhujaotuse lahendustele õhuvahetuse efektiivsuse ja õhuliikumise aspektist;
3. Katsetele tuginedes hinnata düüstorudel põhinevaid klassiruumide õhujaotuse lahendusi;
4. Tuua auditi tulemuste ja laborimõõtmiste põhjal välja ettepanekud võimalike probleemide lahendamiseks.

Koolide klassiruumide õhukvaliteedi hindamiseks mõõdeti õppetöö ajal kõikides koolides pisteliselt klassiruumide CO₂ kontsentratsioone. Koolide ventilatsioonisüsteemide toimivuse kaardistamiseks teostati pistelisi paikvaatluseid ventilatsioonikambrites ja klassiruumides, kus hinnati vastavalt vaatluste abil ventilatsiooniagregaatide ning

õhujaotuse olukorda. Samuti teostati ventilatsiooniagregaatide summaarsete õhuvooluhulkade kontrollmõõdistused. Kuna juurdepääsupiirangute, õppetöö läbiviimise jms asjaolude tõttu on koolide klassiruumides süstemaatiliste mõõdistuste läbiviimine raskendatud, loodi Tallinna Tehnikaülikooli Ehituse Mäemaja õppehoone ventilatsioonilaborisse tinglik klassiruum. Selles katseruumis hinnati nelja klassiruumi õhujaotuslahenduse toimivust õhuvahetuse efektiivsuse indikaatorile tuginedes, samuti mõõdeti kõikide õhujaotuslahenduste puhul õhu liikumiskiiruseid. Ruumiõhu ja lokaalsete õhu keskmiste eluigade leidmiseks rakendati laboratoorsetes katsetustes CO₂ märkegaasil tuginevat kontsentratsiooni languse mitme punkti meetodit. Antud tulemuste põhjal on võimalik arvutada õhuvahetuse efektiivsust ning lokaalseid õhuvahetuse indekseid, mis annavad hinnangu õhujaotuslahenduse toimivusele ruumis. Õhu liikumiskiirused määrati anemomeetritega teostatud mõõtmiste põhjal.

Lõputöö jaguneb neljaks peamiseks peatükiks, millest esimeses esitatakse teemaga seotud kirjanduse lühiülevaade ning käsitletakse töö teoreetilisi aluseid. Teises osas kirjeldatakse mõõtmiste läbiviimise ja analüüsi metoodikat. Kolmandas osas tuuakse välja töö tulemused ning esitatakse tulemustel põhinev analüüs. Neljandas osas esitatakse magistritöö järeldused ning kokkuvõte, mille osana antakse soovitusi edasiste uurimisküsimuste ja -teemade püstitamiseks.

2. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

Lapsed veedavad olulise osa siseruumides veedetud ajast koolis, seega on nende tervise ning õpiedukuse seisukohast oluline tagada klassiruumides hea siseõhu kvaliteet. Ventilatsioonisüsteemide mõju koolilaste tervisele on uuritud juba ligi sajand, esimesed teadaolevad publikatsioon avaldati 1920.ndate keskpaigas [11].

Bakó-Biró *et al.* leidsid koolides läbiviidud uurimuse tulemusena, et kehv õhuvahetuse tase klassiruumides vähendab oluliselt laste tähelepanuvõimet ja valvsust. Madala õhuvahetusega klassiruumides kaldusid lapsed vähem keskenduma õpetaja antud juhistele. Ebapiisava ventilatsiooni negatiivne mõju avaldus veelgi suuremal määral keerulisemate ülesannete täitmisel. Uurimuses soovitatakse klassiruumide puhul värske sissepuhkeõhu koguseks 8 l/s inimese kohta, et vältida kehvast ventilatsioonist tingitud sooritusvõime langust. [12]

Wargocki ja Wyon uurisid õpilaste õppeedukuse sõltuvust õhuvahetuse intensiivsusest ning tõdesid, et suurendades värske õhu juurdevoolu õppekeskkonda 3 liitrit sekundis 6 liitrile sekundis inimese kohta, võib õppetöö tulemuslikkus ülesannete lahendamise kiiruse osas paraneda kuni 14% [13]. Õppetöö tulemuslikkuse muutuse olulisust ilmestab Tallinna Tehnikaülikoolis läbiviidud uuring, mille kohaselt hinnatakse 15% õpitulemuse langust võrdväärseks ühe aasta õppetööga [6]. E. Simons *et al.* leidis 2751 koolist koosneva valimiga uuringu põhjal, et siseõhu CO₂ taseme tõus 1000 ppm-i võrra üle välisõhu kontsentratsiooni tõstab koolitööst puudumise määra 10 kuni 20% võrra. Antud juhul indikeerib kõrgenenud CO₂ tase ebapiisava ventilatsiooni olemasolu, mis tingib nakkushaiguste kontsentratsiooni tõusu siseõhus, mis omakorda suurendab hingamisteede nakkushaigustesse jäämise tõenäosust õpilaste seas. [14]

O. Toyinbo *et al.* poolt Soome algkoolides teostatud sisekliima alases uuringus uuriti sissepuhke-väljatõmbe ventilatsioonisüsteemiga varustatud klassiruumide õhuvahetust. 84-st klassiruumist koosneva valimi hulgast vaid 52% puhul vastas õhuvahetus soovituslikule õhuvahetusele 6 l/s inimese kohta [1]. S. Battermani koostatud uurimuses määrati CO₂ märkegaasi meetodil õhuvahetust mehaanilise sissepuhke-väljatõmbe süsteemiga varustatud klassiruumides. Valimisse kuulunud nelja erinevast koolist klassiruumi õhuvahetus jäi märkegaasi meetodil arvatult kõikidel juhtudel alla projekteeritud väärtuse. [15]

Eestis on koolide ventilatsioonisüsteemide seisukorda kajastatud Tallinna Tehnikaülikoolis avaldatud uuringus [6], kus toodi välja, et kuuest valimisse kuulunud koolihoonest viie ventilatsioonisüsteemide toimivus oli puudulik. Ainult ühes koolis vastas ventilatsioon ligikaudselt kehtivatele sisekliima nõuetele. Samas uurimuses

tõdeti, et mitmetes hästi renoveeritud koolimajades oli ventilatsioonisüsteem välja lülitatud, mis tõstab oluliselt riski ebapiisavast õhuvahetusest tulenevate tervisehädade tekkimiseks. [6]

A. Mikola ja T.-A. Kõiv uurisid ventilatsioonisüsteemide toimivust Eesti kortermajades ja kahes koolihoones. Uurimuse tulemusena ilmses, et tsentraalse mehaanilise sissepuhke-väljatõmbe ventilatsioonisüsteemiga koolis ületavad CO₂ tasemed projekteeritud väärtuseid. Põhjusena tuuakse välja, et sageli lülitatakse ventilatsiooniagregaadid energia kokkuhoidmiseks madalamale kiirusele [7]. Probleeme klassiruumide sisekliimaga, sh õhukvaliteediga, täheldati ka RKAS-i tellimisel 2017. aastal avaldatud „Õppeasutuste sisekliima seireprogrammi“ dokumendis [8].

Lisaks ruumi antavale värske õhu kogusele, on hea õhukvaliteedi saavutamiseks oluline tagada värske õhu jõudmine inimeste viibimistsooni. Eelmise sajandi 1980. aastail töötas grupp Skandinaavia teadlaseid välja õhuvahetuse efektiivsuse kontseptsiooni, mille alusel hinnata ventilatsioonisüsteemide toimivust. Õhuvahetuse efektiivsuse määramiseks võttis Sandberg 1981. aastal käibe õhu eluea mõiste. Õhuvahetuse efektiivsuse hindamise aluseks olevate indeksväärtuste arvutamiseks on REHVA poolt koostatud juhendmaterjal „*Ventilatsioon Effectiveness*“. [9]

K.-C. Chung ja S.-P. Hsu uurisid CO₂-l põhineval märkegaasi meetodil ventilatsiooni efektiivsuse ja õhuvahetuse kordarvude leidmist. Tulemustest järeldus, et sissepuhke-väljatõmbe elementide asukoht ruumis ei oma tähtsust õhuvahetuse kordarvu mõttes, kuid mõjutab oluliselt ventilatsiooni efektiivsust. Elementide paiknemine avaldab mõju õhu vooluringlusele, mis võib muuta ruumi õhu keskmist eluiga, mille alusel efektiivsust arvutatakse [16]. 2021. aastal uurisid Lichtner ja Kriegel Covid-19 pandeemia valguses ventilatsiooni efektiivsust klassiruumis, kasutades CFD simulatsioone. Leiti, et mitmel juhul oli klassiruumis istuva inimese hingamistsoonis lokaalne õhuvahetuse indeks vaid 20%. Seguneva õhuvahetusega klassiruumis, kus lokaalne õhuvahetuse indeks peaks teoreetiliselt olema igas punktis 100% [9], oleks nende inimeste hingamistsoonis õhukvaliteet kuni viis korda madalam, kui ruumi üldise õhuvahetuse põhjal eeldada võiks. [17]

R. Kosonen ja P. Musrakallio uurisid CFD simulatsioonide ja laboratoorsete katsetega erinevate õhujaotuslahendust toimivust klassiruumis. Seinapealse sissepuhkerestiga lahenduse juures täheldati normidest kõrgemaid ($v_{lim}=0,2$ m/s) õhu liikumiskiiruseid kõikides katsetes akende ääres ning põrandapinna ligidal. Düstorudega õhujaotuse korral ületas õhu liikumiskiirus 0,2 m/s piiri suvisel jahutusperioodil, mil erinevus ruumiõhu ja sissepuhkeõhu temperatuuride vahel oli suurim. Katsetest järeldati, et

seguneva õhuvahetusviisiga ruumides avaldavad vabasoojused olulist mõju õhujaoatuse toimivusele. [18]

Ventilatsiooni efektiivsuse määramist märkegaasi meetodil on rakendatud mitmetes uuringutes nii Eestis kui mujal. Õhuvahetuse efektiivsust koos lokaalsete õhuvahetuse indeksitega on erinevate õhujaoatustahenduste osas Eestis veel vähe uuritud. Samuti ei ole värskeid laiema valimiga uuringuid Eesti koolide ventilatsioonisüsteemide toimivuse kohta. Seega on antud töös asjakohane uurida klassiruumide teenindavate ventilatsioonisüsteemide õhuvoolehulkade vastavust projektile ja mõõta õppetöö ajal süsihappegaasi taset klassides, samuti hinnata klassiruumide õhujaoatustahenduste toimivust õhuvahetuse efektiivsuse ja lokaalsete õhuvahetuse indeksite alusel.

3. TEOREETILISED ALUSED

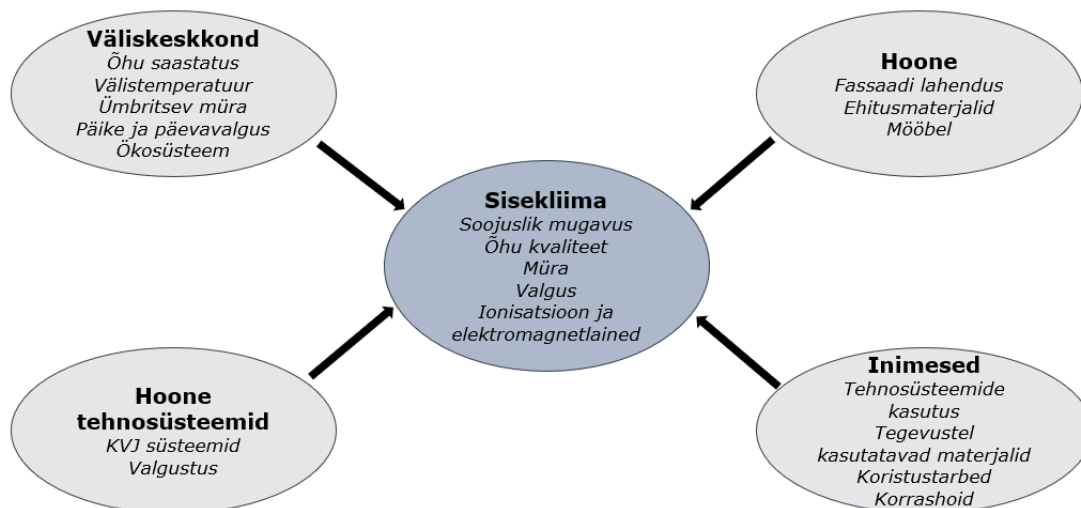
Arenenud riikides veedavad inimesed ligikaudu 90% ajast siseruumides, kusjuures lapsed veedavad lisaks kodusele keskkonnale olulise osa ajast õppeasutustes, sh klassiruumides, spordisaalides jms [4]. Siseruumides inimesi ümbritsev keskkond ehk sisekliima mõjutab oluliselt ruumis viibivate inimeste ebamugavustunnet ning riske nende tervisele [3]. Järgnevas teoreetilises osas antakse ülevaade ühest peamisest sisekliima komponendist - õhukvaliteedist. Samuti käsitletakse teemana CO₂ kui siseõhu kvaliteedi indikaatorit, antakse ülevaade klassiruumide ventilatsiooni reguleeritavatest määrustest ja standarditest, kirjeldatakse erinevaid õhujaotusviise ning õhukvaliteedi indikaatoreid. Viimastest käsitletakse täpsemalt õhuvahetuse efektiivsust ja selle näitaja määramiseks kasutatavat mitme punkti kontsentratsiooni languse meetodit.

3.1 Sisekliima komponent – õhukvaliteet

3.1.1 Sisekliima

Sisekliima kvaliteet ruumides kujuneb mitmete tegurite koosmõjul. Peamiste sisekliima teguritena eristatakse soojuslikku mugavust, õhukvaliteeti, valgust, müra ning õhu ionisatsiooni ja elektromagnetlaineid. Need komponendid jagunevad omakorda alamkomponentideks, mille alusel hinnatakse ruumide sisekliimat. Sisekliima kvaliteeti mõjutavad mitmed sise- ja välistingimused, mis jaotuvad nelja põhilisse kategooriasse: välistingimused, hoonet iseloomustavad parameetrid, hoone tehnosüsteemid ning inimtegevus. Käsitletud tingimused on graafiliselt mõningate alamjaotustega esitatud joonisel 3.1. Kvaliteetse ja inimestele sobiva sisekliimaga ruumide loomisel on oluline roll hoone, sisustuse ja hoonet teenindavate süsteemide korrektsel kavandamisel, kasutamisel ning hooldusel.

Standardi EVS-EN 16798-1:2019+NA:2019 kohaselt on sisekliima jagatud nelja kategooriasse: kategooria 1 – kõrge tase, kategooria 2 – keskmine tase, kategooria 3 – tagasihoidlik tase ning kategooria 4 – madal tase. Standardi järgselt on uute ja oluliselt rekonstrueeritavate koolihoonete normtasemeks kategooria 2 ehk keskmine tase [19]. RKAS on enda väljaandes „Tehnilised nõuded mitteiluhoonetele 2021“ määranud klassiruumide projekteerimise aluseks sisekliimaklassi kategooria 2 [20]. Lisaks sisekliimaklasside jaotusele on antud standardis määratletud klassidele vastavad temperatuurid, õhukvaliteedi tasemed, müratasemed ja muud sisekliima parameetrid [19].

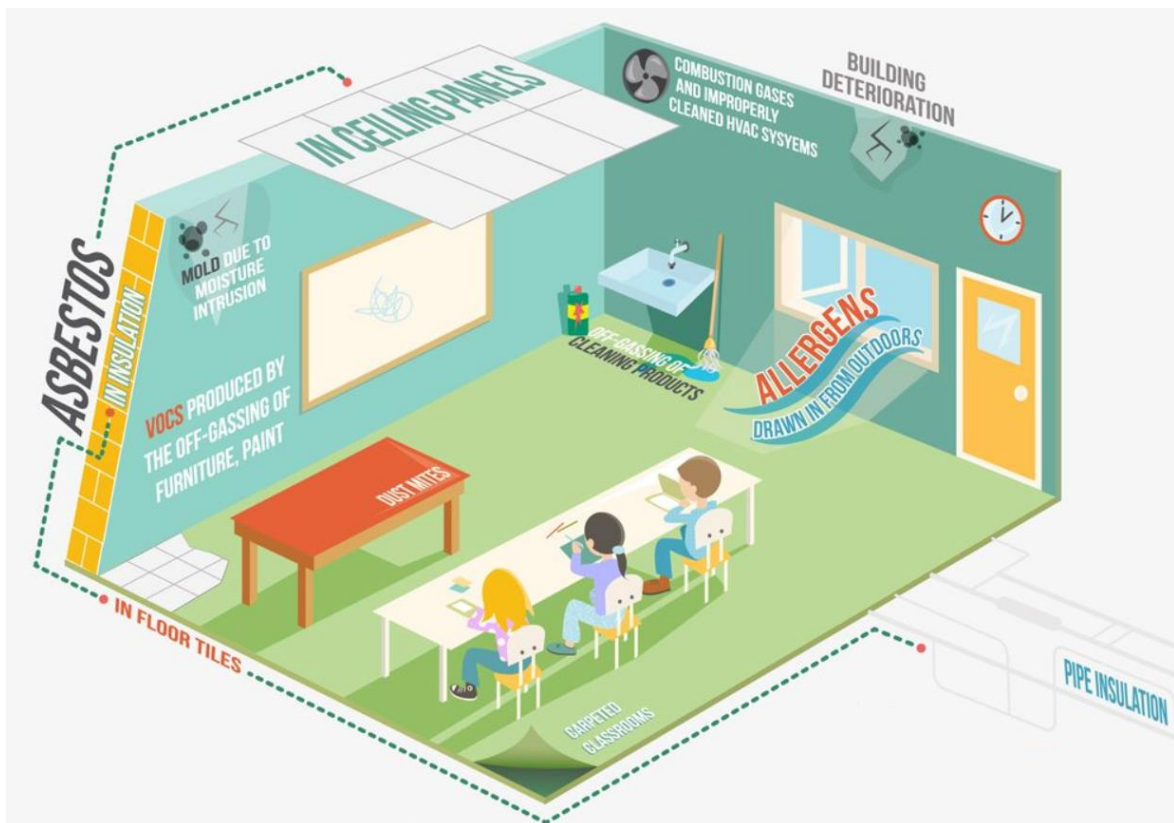


Joonis 3.1 Sisekliimat mõjutavad tegurid [2]

3.1.2 Õhukvaliteet

Õhukvaliteedi määramisel hinnatakse inimestele ohtlike või ärritavate saasteainete hulka õhus. Omaduste poolest jagunevad saasteained kahte peamisesse kategooriasse: tahked osakesed ning gaasid ja aurud [21]. Hea kvaliteediga siseõhuks loetakse õhku, milles saasteainete kontsentratsioonid ei ületa pädeva asutuse poolt kehtestatud piirmäärasid ning vähemalt 80% hinnatavas keskkonnas viibivatest inimestest ei kurda õhukvaliteediga seotud probleemide üle [2].

Sisekeskkondade õhu peamiseks saasteallikateks on mööbel ja muu furnituur, puhastus- ja desinfitseerimisained, ehitusmaterjalid, ning värvid, mis eraldavad mitmeid VOC ühendeid, tahkeid osakesi, NO_x ühendeid ja osooni. Saasteallikaks on ka siseruumides viibivad inimesed, kelle väljahingatavas õhus leidub süsihappegaasi, mitmeid VOC ühendeid ning veeauru. Siseõhu kvaliteeti mõjutavad lisaks hoonesisestele saasteallikatele väliskeskkonnas sisalduvad tahked osakesed, gaasid ning aurud, mis võivad hoonesse siseneda läbi tarindite infiltratsiooni ja lekete teel või KVJ-süsteemide tulemusena [3]. Hoonet teenindavate tehnosüsteemide, eriti ventilatsiooni, projekteerimisel tuleb analüüsida väliskeskkonna saastatust ning näha vajadusel ette meetmed ruumi toodava õhu puhastamiseks [22]. Tehnosüsteemide vahendusel, ruumis leiduvate niiskuskahjustuste või inimeste liikumise tulemusena võib ruumi sattuda ka erinevaid õhukvaliteeti halvendavaid baktereid [1]. Õhu saastumist klassiruumis illustreerib joonis 3.2.



Joonis 3.2 Siseõhu kvaliteeti mõjutavad tegurid [23]

Asbestos in floor tiles, ceiling panels, pipe insulation (eng) – *Asbestiühendid põrandaplaatides, laepaneelides, toruisolatsioonis (est)*; Mold due to moisture intrusion (eng) – *niiskuskahjustustest tingitud hallitus (est)*; VOCs produced by the off-gassing of furniture (eng) – *Mööblist eralduvad VOC ühendid (est)*; Allergens drawn in from outdoors (eng) – *välisõhust ruumi sattuvad allergeenid (est)*; Combustion gases and improperly cleaned HVAC systems (eng) – *põlemisgaasid ja ebapiisavalt puhastatud tehnosüsteemid.*

3.1.3 Ventilatsiooni roll õhukvaliteedi tagamisel

Ruumi ventilatsioon on süsteem, mille abil varustatakse ruumi puhta õhuga ning seejuures eemaldatakse ruumist saastunud õhk. Nõutud õhukvaliteedi taseme tagamine saasteainete eemaldamise teel on alati ventilatsioonisüsteemi põhiline eesmärk. Sekundaarselt on ventilatsiooniga vajadusel võimalik muuta ruumiõhu temperatuuri või niiskust [21]. Mehaanilised ventilatsioonisüsteemid jagunevad peamiselt väljatõmbe ning sissepuhke-väljatõmbe süsteemideks. Esimese puhul eemaldatakse ventilatsioonisüsteemiga pidevalt ruumist saastunud õhku ning värske õhk siseneb ruumi akendest-ustest või spetsiaalsetest värskeõhuklappidest. Mehaanilise sissepuhke-väljatõmbe süsteemi korral tuuakse värske õhk ning eemaldatakse saastunud õhk ventilatsioonisüsteemiga. Kuigi enamik värskeõhuklappe sisaldab endas filtreid, võimaldab viimasena kirjeldatud süsteem võrreldes väljatõmbesüsteemiga tuua ruumi filtreeritud sissepuhkeõhku, mille parameetreid on võimalik vajadusel jälgida. Puhta õhu sisenemisel ustest-akendest kanduvad ruumi välisõhus leiduv õhu saaste, mis võib olla problemaatiline eriti linnakeskkondades. [1]

3.1.4 Siseõhu kvaliteet klassiruumides

Lapsed veedavad olulise osa oma ajast koolis, olles mõjutatud sealsest sisekliimast. Tervisega seotud riskide ning õppealase sooritusvõime seisukohast on oluline tagada koolides hea sisekliima. Lisaks on lapsed võrreldes täiskasvanutega sisekliima tingimuste suhtes tundlikumad ning võimalikud mõjud avalduvad varasemalt [1]. Lapsed ei ole füüsiliselt veel täielikult välja arenenud ning nende sissehingitava õhu koguse suhe kehamassi on oluliselt kõrgem kui täiskasvanutel, mis muudab nad sisekliima tingimuste osas vastuvõtlikumaks [2].

Halb siseõhu kvaliteet on võimeline põhjustama üldiseid haigussümptomeid, näiteks peavalu, silmade-nina sügelust ja kuivust, apaatiat iiveldust ning keskendumisvõime langust [3]. Sellist sümptomite kooslust seostatakse haige hoone sündroomiga, mille avaldumist on keeruline diagnoosida. REHVA käsiraamatu kohaselt kinnitatakse haige hoone sündroomi avaldumise, kui kõik eelnevalt mainitud sümptomid ilmnevad vähemalt 20% ruumis viibivate inimeste seas kahe nädala jooksul [2]. Lisaks tervisega seotud probleemidele on uuringute tulemustel leitud, et ebapiisav ventilatsioon klassides omab negatiivset mõju võimele keskenduda ning valvsana püsida. Leiti, et mida keerulisemad on ülesanded, seda enam vähendab kehv õhuvahetus sooritusvõimet [12]. Samuti on uuringutes täheldatud, et tõstes õhuvahetust 5-lt l/s inimese kohta 10-le l/s inimese kohta, paraneb õpilaste kiirus numbriliste ülesannete lahendamisel, mis on ilmselt tingitud paranenud keskendumisvõimest [24].

3.2 CO₂ siseõhu kvaliteedi indikaatorina klassiruumides

Inimesed eraldavad peamiselt ainevahetuse tagajärjel välja hingates süsihappegaasi ning mitmeid VOC ja gaasilisi ühendeid, millest osad annavad juba madalate kontsentratsioonide puhul õhule ebameeldiva lõhna halvendades sisekliimat [3]. Gaasiliste ja VOC ühendite eraldumismahud on võrreldes CO₂ eritustega küll väikesed, kuid nende ainete vahel on teatav korrelatsioon. See võimaldab kasutada ruumide siseõhu kvaliteedi ja ventilatsioonisüsteemi toimimise hindamisel indikaatorina süsinikdioksiidi. CO₂ taset on kerge mõõta ning mõõtmiste teostamiseks on olemas kättesaadav ja suhteliselt soodne mõõtmistehnika. [21]

CO₂ kontsentratsioon tasemeni 0,5% ehk 5000 ppm-i ei ole toksiline ning seega ei ohusta eluliselt inimeste tervist. Küll aga indikeerib kõrge CO₂ kontsentratsioon kehva õhu kvaliteedi taset [21]. Selleks, et inimestelt eralduvate ühendite tõttu ei kaotaks õhk

oma tunnetuslikku värskest ning CO₂ kontsentratsioonide tase ei omaks mõju inimese tegevustele, soovitatakse mitmete uuringute tulemusel hoida siseõhu süsihappegaasi tase maksimaalselt kuni 650 ppm-i üle taustkontsentratsiooni [3]. Eestis on CO₂ välisõhu ehk taustkontsentratsiooni tase ligikaudu 350-450 ppm-i, mis teeb soovituslikuks absoluutseks kontsentratsiooniks kuni ligi 1000 ppm-i.

3.3 Ülevaade klassiruumide ventilatsiooni reguleerivatest määrustest ja standarditest

Eestis käsitletakse ruumide sisekliima ja ventilatsioonisüsteemide norme läbi määruste ja standardite, riigigümnaasiumite puhul ka RKAS-i nõudete. Kehtivaid, kuid Euroopa Liidu tasemel harmoniseerimata standardeid, võib määratleda kui head projekteerimis- ja ehitustava [10]. Antud alapeatükis esitatakse ülevaade alates 2000. a. jõustunud klassiruumide sisekliimat reguleerivatest määrustest (tabel 3.1) ning standarditest (tabel 3.2). Samuti käsitletakse alapeatüki lõpus õhuvooluhulkade ning nende mõõdistamisel lubatud mõõtemääramatuse mõju ruumi õhukvaliteedile CO₂ kontsentratsioonide põhjal.

Tabel 3.1 Klassiruumide sisekliimat reguleerivate määruste ülevaade [10][25][26][27]

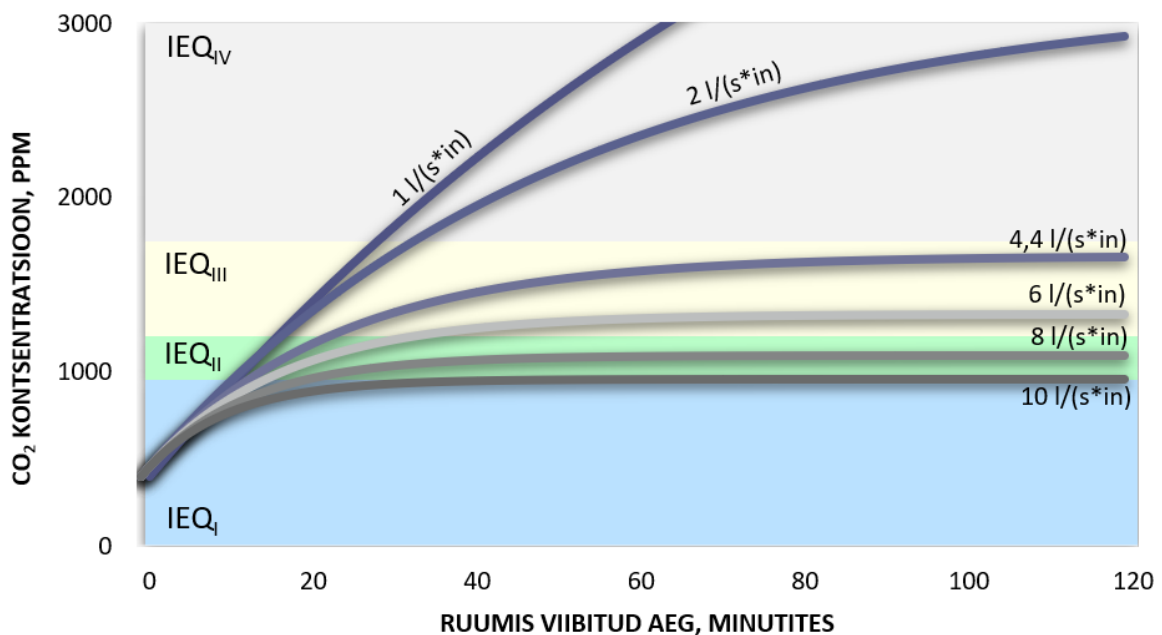
Määrus	Määruse pealkiri	Nõuded CO ₂ tasemetele	Nõuded õhuvooluhulkadele	Kehtivus
Vabariigi valitsuse määrus nr 84. 30.05.2013	Tervisekaitse nõuded koolidele	Õpperuumi ühes liitris siseõhus võib olla keskmiselt kuni 1000 mikrolitrit (ppm) süsinikdioksiidi	Puuduvad	Kehtiv alates 03.06.2013
Sotsiaalministri määrus nr 109. 29.08.2003	Tervisekaitse nõuded koolidele	Siseõhu süsihappegaasi sisaldus õpperuumides õppepäeva viimase tunni lõpus ning aula ürituse lõppemisel ei tohi ületada 1000 mikrolitrit süsihappegaasi liitris õhus	Puuduvad	Kehtis 13.09.2003-31.12.2010
Sotsiaalministri määrus nr 47. 14.07.2000	Kooli tervisekaitse nõuded	Vähemalt 1/3 õpperuumi akendest peavad olema tuulutamiseks avatavad. Õhutusakende pindala peab olema vähemalt 1/50 põrandapindalast. (Kõiki õpperuume tuulutatakse igal vahetunnil ning taastusruume iga õppetunni ajal.	16 m ³ /h (4,4) l/s	Määrus jõustub projekteeritavatele koolidele 1. augustil 2000. a ja tegutsevatele koolidele 1. jaanuaril 2003. a.

Tabel 3.2 Klassiruumide sisekliimat reguleerivate standardite ülevaade [10][19][28]-[33]

Standard	Standardi pealkiri	Nõuded CO ₂ tasemetele	Nõuded õhuvoolu-hulkadele	Kehtivus
EVS-EN 16798-1:2019 +NA:2019	HOONETE ENERGIATÕHUSUS Hoonete ventilatsioon Osa 1: Sisekeskkonna lähteandmed hoonete energiatõhususe projekteerimiseks ja hindamiseks, lähtudes siseõhu kvaliteedist, soojuslikust keskkonnast, valgustusest ja akustikast. Moodul M1-6	I klass 950 ppm ^{1,2} II klass 1200 ppm ^{1,2} III klass 1750 ppm ^{1,2}	II klass (LPB-2) 7 l/(s×in) +0,7 l/(s×m ²)	Kehtiv alates 15.10.2019
EVS 906:2018	Mitteeluhoonete ventilatsioon. Üldnõuded ventilatsiooni- ja ruumiõhu konditsioneerimissüsteemidele. Eesti rahvuslik lisa standardile EVS-EN 16798-3:2017.	CO ₂ kontsentratsioon klassides õppetöö ajal ei tohi ületada 1000 ppm.	Min 8 l/(s×in) või 4 l/(s×m ²)	Kehtiv alates 15.02.2018
EVS-EN 15251:2007	Sisekeskkonna algandmed hoonete energiatõhususe projekteerimiseks ja hindamiseks, lähtudes siseõhu kvaliteedist, soojuslikust mugavusest, valgustusest ja akustikast	I klass 750 ppm ^{1,2} II klass 900 ppm ^{1,2} III klass 1200 ppm ^{1,2}	II klass (LPB-2) 7 l/(s×in) +0,7 l/(s×m ²)	Kehtis 03.2010- 15.10.2019
EVS-EN 13779:2007/ AC:2010	Mitteeluhoonete ventilatsioon. Üldnõuded ventilatsiooni- ja ruumiõhu konditsioneerimissüsteemidele	I klass 750 ppm ^{1,2} II klass 900 ppm ^{1,2} III klass 1200 ppm ^{1,2}	IDA 2 10-15 l/(s×in)	Kehtis 04.12.2008- 03.10.2017
EVS 906:2010	Mitteeluhoonete ventilatsioon. Üldnõuded ventilatsiooni- ja ruumiõhu konditsioneerimissüsteemidele. Eesti rahvuslik lisa standardile EVS- EN 13779:2007	CO ₂ kontsentratsioon klassides õppetöö ajal ei tohi ületada 1000 ppm-i	Min 8 l/s inimese kohta	Kehtis 15.02.2008- 04.2010
EVS 845-1:2004	Hoonete ventilatsiooni projekteerimine Osa 1: Üldnõuded.	Puuduvad	Min 6 l/s inimese kohta	Kehtis 01.06.2004- 04.2010
EPN 18.3.1	Hoonete ventilatsiooni projekteerimismõõdi 1. osa	Puuduvad	Min 6 l/s inimese kohta	Kehtis 08.1999- 31.05.2004

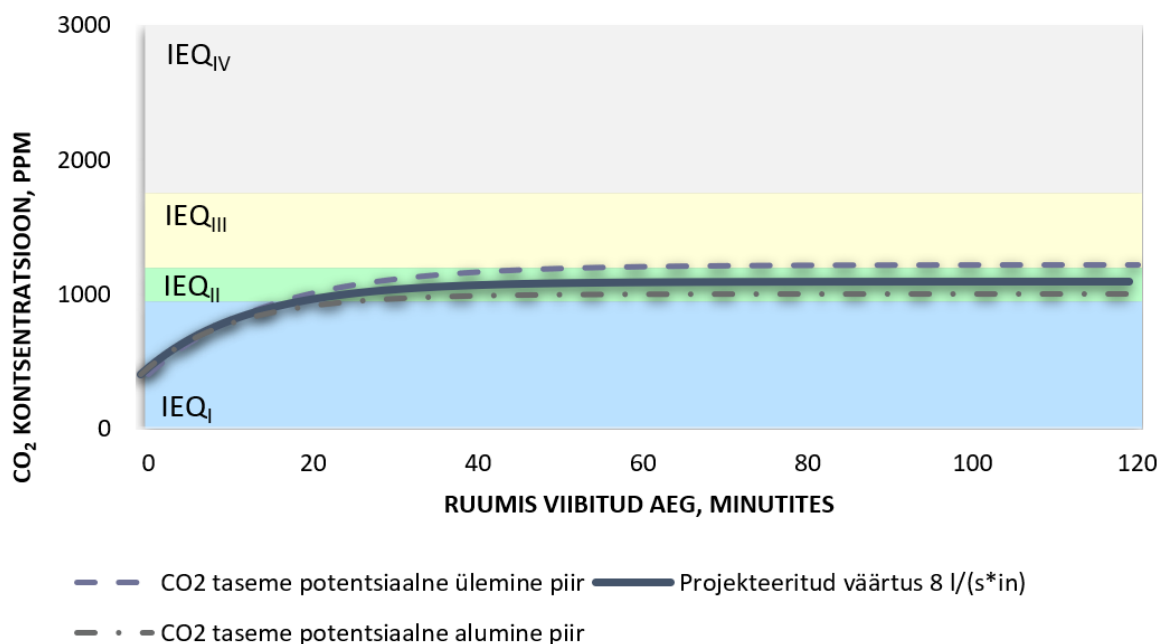
¹ Süsihappegaasi absoluutkontsentratsioon, arvestades välisõhu tasemeks 400 ppm-i.
² Sisekliimaklasside jaotus ei ole esitatud otseselt klassiruumide, vaid üldiselt mitteiluhoone kohta.

Standardite ja määruste vahel esines kuni 04.2010 vastuolu. Kehtiv määrus seadis klassiruumi lubatud maksimaalseks CO₂ absoluutkontsentratsiooniks 1000 ppm-i, kuid standard sätestas klassiruumi ventileerimiseks õhuvahetuse normarvu 6 l/s inimese kohta, millega üldjuhul ei suudeta tagada CO₂ taset alla 1000 ppm-i [10]. Joonisel 3.3 on esitatud standardi EVS-EN 13779:2007 [30] kohaselt arvatud CO₂ kontsentratsioonide tõus erinevate õhuvooluhulkade korral ruumis, kus põhiliseks CO₂ saasteallikaks on inimene. Arvutustes on võetud aluseks ühe inimese kohta kubatuur 6 m³ (vastab klassiruumi nõuetele) ning CO₂ erituse määraks 20 l/h inimese kohta, välisõhu süsihappe kontsentratsioon 400 ppm-i. Lisaks on kontsentratsioonimäärade taustal esitatud vastavalt EVS-EN 16798-1:2019+NA:2019 sisekliimaklasside jaotus.



Joonis 3.3 CO₂ absoluutkontsentratsioonid ruumis erinevate õhuvooluhulkade juures [30]

Õhuvooluhulkade mõõtmistulemuste juures tuleb arvestada, et vastavalt standardile EN 12599:2012 [34] võib ruumi õhuvooluhulk varieeruda seadeväärtuses $\pm 15\%$ ning summaarselt ventilatsioonisüsteemi puhul $\pm 10\%$. Õhuvooluhulkade muutudes muutuvad vastavalt ka saavutatavad CO₂ piirkontsentratsioonid [10]. Joonisel 3.4 on esitatud CO₂ piirkontsentratsioonide varieeruvus ruumipõhiselt, kui õhuvahetus on 8 l/s inimese kohta. Jooniselt on nähtav, et maksimaalse lubatud kõrvalekalde puhul võib süsihappegaasi kontsentratsioonide põhjal hinnatav sisekliimaklass langeda antud näite lähteandmete korral ühe klassi madalamale.



Joonis 3.4 Ventilatsiooni õhuvooluhulkade mõõteveast tulenev ruumi CO₂ kontsentratsioonide varieeruvus [34]

3.4 Õhujaotusviisid

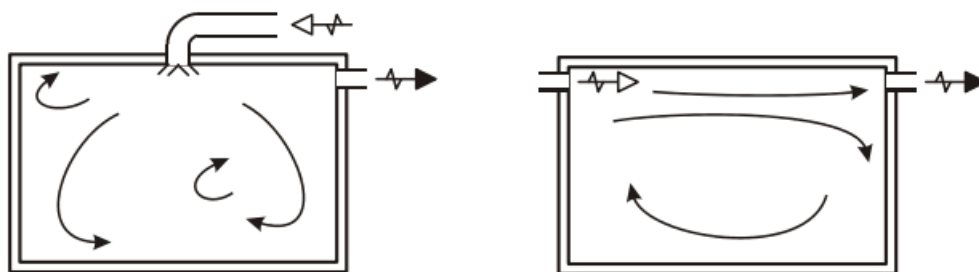
Ruumist saasteainete eemaldamiseks kasutatava ventilatsioonisüsteemi rajamiseks on mitmeid viise, mis erinevad üksteisest õhujaotuselementide tüüpide ja nende ruumis paiknemise, õhuvahetuse intensiivsuse, sissepuhke temperatuuri erinevusest ruumi siseõhu temperatuurist ning õhu liikumiskiiruse poolest. Eeltoodud aspektide põhjal liigitatakse ventilatsioonilahendused ruumis erinevate õhujaotusviiside järgi, mis omakorda määravad võimaliku õhuvahetuse efektiivsuse. Laiemalt võib õhujaotust määratleda kogu ruumi hõlmavaks või lokaalseks õhujaotuseks. Klassiruumides on üldiselt kasutusel kogu ruumi mahtu hõlmavad ventilatsioonilahendused, mille eesmärgiks on tagada viibimistsoonis võimalikult ühtlane sisekliima. Viimased jagunevad omakorda peamiselt seguneva ning tõrjuva õhuvahetusega ventilatsioonisüsteemideks. [35] Antud peatükis kirjeldatakse seguneva, tõrjuva ja läbiva õhuvahetusviisi põhimõtteid.

3.4.1 Segunev õhujaotus

Segunev õhujaotusviis on vanim ning levinuim õhujaotuslahendus, mille eesmärgiks on tagada viibimistsoonis võimalikult ühtlane saasteainete eemaldamine ja temperatuurijaotus [36]. Seguneva õhujaotuse puhul suunatakse ruumi enamasti sealsest õhust külmemat puhast õhku, erandina võidakse kasutada õhkkütte korral ruumiõhust soojemat sissepuhkeõhku. Õhujaotajatest väljub esialgsel suurel kiirusel õhk, mis tekkivate turbulentside ja hõrenduse abil seguneb efektiivselt ruumi õhuga.

Üldiselt jääb seguneva õhujaotuse puhul ruumi õhuvahetuseks 1-5 korda tunnis, olenevalt ruumi kasutusotstarbest [35].

Ebasoodsatel tingimustel (nt sissepuhkeõhk oluliselt kõrgem ruumi õhust) võib sissepuhkeõhu segunemine ruumiõhuga olla ebapiisav ehk tekib lühisvool ning puhas õhk liigub suures osas viibimistsooni läbimata väljatõmbe kanalis. Sellisel juhul väheneb oluliselt õhuvahetuse efektiivsus ning soovitatav õhukvaliteedi tase jääb saavutamata. Joonisel 3.5 on esitatud seguneva õhujaotuse ning lühisvoolu tekkimist kujutavad skeemid [5]. Seguneva õhujaotuse puhul võib lühisvool tekkida olukorras, kus laes või lae ligidal paiknevatest õhujaotajatest antakse ruumi puhast õhku, mille temperatuur on ligilähedane või kõrgem ruumiõhu temperatuurist. Kõrgete sissepuhkeõhu temperatuuride puhul on eriti oluline mõju õhujaotajate valikul, et tagada segunevale õhujaotusele vastav õhuvahetuse efektiivsus 50%. [21]



Joonis 3.5 Illustreeringud seguneva õhujaotuse skeemist (vasakul) ning seguneva õhujaotuse lühisvoolust (paremal) [5]

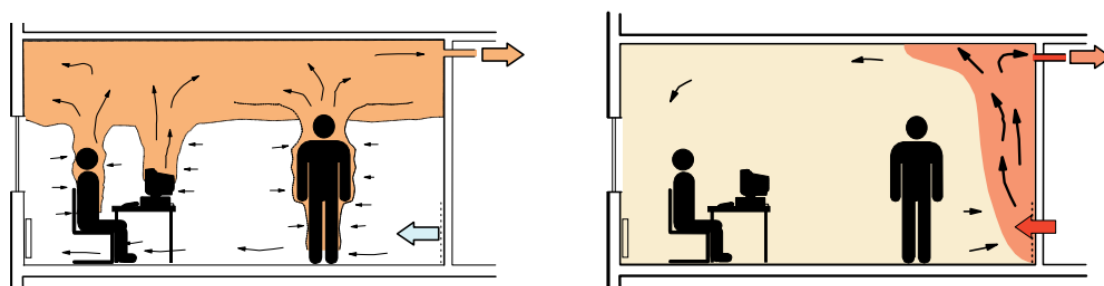
3.4.2 Tõrjuv õhujaotus

Tõrjuva õhuvahetusviisi puhul puhutakse jahutatud puhast õhku ruumi viibimistsooni põranda lähedalt, kust õhk liigub koos saasteainetega soojade konvektiivsete õhujugade mõjul lae suunas, kust saastunud õhk eemaldatakse väljatõmbe kaudu [37]. Erinevalt segunevast õhujaotusest, ei ole eesmärgiks õhu segunemine, vaid saastunud õhu väljatõrjumine viibimistsoonist puhta õhu poolt. Õhuvahetuse kordsus on üldiselt võrdväärne või mõnevõrra madalam võrreldes seguneva õhujaotusega [35]. Tõrjuva õhujaotuse korral peab sissepuhkeõhu temperatuur olema enamasti 3-5°C madalam viibimistsoonis kõrgusel 1,1 meetrit valitsevast õhu temperatuurist, et toimuks efektiivne õhujugade vertikaalne liikumine. Vastupidiselt segunevale õhujaotusele, antakse puhast õhku ruumi madalal kiirusel põranda lähedalt, maksimaalsel kiirusel õhujaotajast väljumisel 0,5 m/s. [37]

Tõrjuval õhujaotusviisil on segunevaga võrreldes tulenevalt õhujaotusviisi tööpõhimõttest (õhu väljatõrjumine mitte segunemine) potentsiaal tagada kõrgem õhuvahetuse efektiivsus ning seeläbi parem õhukvaliteet viibimistsoonis. Samas on

tõrjuva õhujaoituse efektiivsus sõltuv konvektiivsete õhujugade olemasolust ning intensiivsusest. Lisaks mõjutab inimeste liikumine tõrjuvate õhujugade toimivust. Seega ei pruugi tõrjuv õhujaoitus potentsiaalset hoolimata tagada segunevast viisist viibimistsoonis paremat õhukvaliteeti. [35]

Analoogselt seguneva õhujaoitusviisiga, võib tõrjuva õhujaoituse korral ilmned lühisvool, mille tulemusena liigub enamik sissepuhkeõhust viibimistsooni läbimata väljatõmbe kanalisse. Lühisvool leiab aset, kui ruumi puhutakse sissepuhkeõhku, mille temperatuur on kõrgem kui ruumiõhu temperatuur. Sellisel juhul tõuseb soe sissepuhkeõhk, mille tihedus on ruumiõhu omast madalam, ruumis üles ning eemaldub väljatõmbega. [37] Joonisel 3.6 on illustreeritud tõrjuvat õhujaoitust ja lühisvoolu teket.



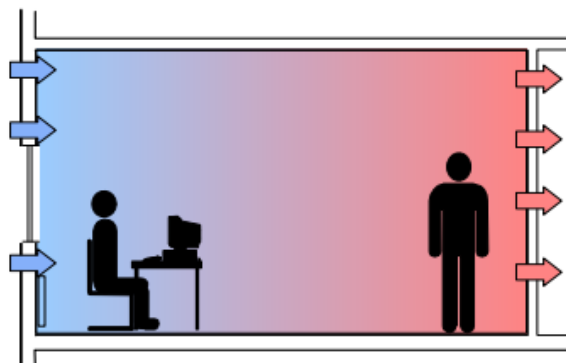
Joonis 3.6 Tõrjuva õhujaoituse skeem (vasakul) ning tõrjuva õhujaoituse lühisvoolu skeem (paremal) [37]

3.4.3 Läbiv õhujaoitus

Läbiva õhujaoitusviisi rakendamiseks antakse sissepuhkeõhk ruumi ühtlaselt tervelt lae või seina pinnalt ning eemaldatakse ruumi vastastarindilt. Antud õhujaoitusviisi puhul liigub õhk ideaalis läbi ruumi sealse õhuga segunemata [21]. Joonisel 3.7 on kujutatud läbiva õhujaoitusviisi skeem. Läbiva õhujaoitusega on võimalik saavutada lühim õhu eluiga ning suurim õhuvahetuse efektiivsus. Selleks tuleb tagada ruumis õhuhulk, mis on ajaühikus võrdne ruumi kubatuuriga. Oluline on õhujoo liikumissuuna valikul arvestada ruumis leiduvate saasteainete loomuliku liikumissuunaga, et tagada võimalikult hea saasteainete eemaldamise efektiivsus. [9]

Läbiva õhujaoituse toimimiseks peab õhu liikumiskiirus ületama muude ruumis tegevuste poolt tekitatud õhuvoolu kiirused. Reaalsuses on ruumides, kus toimuvad õhuliikumist mõjutavad tegevused, peaaegu võimatu saavutada ideaalset läbivat õhujaoitust. Liialt madala ventilatsiooniõhu kiiruse tõttu, võrreldes tegevustest tingitud õhu liikumiskiirustega, leiab teatud määral alati aset sissepuhkeõhu segunemine ruumiõhuga. Läbiva õhujaoitusviisi puhul peab õhuvoolu kiirus takistuste ületamiseks olema vähemalt 0,3 m/s [21]. Üldiselt on antud õhujaoitusviisi puhul õhuvahetus 50-100 korda tunnis, erijuhtudel kuni mitusada korda tunnis. Läbiva õhujaoitusviisiga

ventilatsioonisüsteemid on suurte õhuhulkade tagamise vajaduse tõttu suhteliselt kulukad. Seetõttu kasutatakse seda õhujaotusviisi eriti kõrgete õhukvaliteedi nõudmistega ruumides, näiteks erinevate puhasruumi lahenduste korral. [35]



Joonis 3.7 Läbiva õhujaotusviisi skeem [9]

3.5 Õhukvaliteedi indikaatorid

Ventilatsioonisüsteemi peamine eesmärk on tagada ruumis õhukvaliteet, eemaldades saastunud õhu ning varustades ruumi puhta õhuga. Samas mõjutab ventilatsioon olulisel määral ka soojuslikku mugavust, mille mõju tunnetavad ruumi kasutajad koheselt. Kuna siseõhu kvaliteeti on tunnetuslikult keerulisem hinnata ning halva õhu kvaliteediga seotud kaebused ilmnevad üldjuhul pikema perioodi vältel, keskendutakse õhujaotuslahenduste projekteerimisel eelkõige soojusliku mugavusega seotud aspektidele. Samuti on õhukvaliteeti keeruline mõõta, kuna kogu ruumiõhu kvaliteedi hindamiseks tuleks kasutada suurel hulgal piisava täpsusega mõõteseadmeid, mis üldjuhul ei ole koolides kättesaadavad. Õhukvaliteedi saavutamine efektiivse õhujaotuse abil seatakse sageli teisejärguliseks, mille tulemusel ei ole piisava õhuvahetusega ruumides tagatud soovitud õhukvaliteet. [38]

Õhukvaliteedi hindamiseks on välja töötatud hulgaliselt indikaatoreid. Enamlevinud ja kasutatavaid indikaatoreid on neli: õhuvahetuse kordarv, saasteainete eemaldamise tõhusus, ventilatsiooni efektiivsus ja õhuvahetuse efektiivsus. Lisaks on olemas mitmeid spetsiifilisi indikaatoreid, mis põhinevad eelnimetatud neljal. Antud peatükis käsitletakse õhu elueal põhinevat õhuvahetuse efektiivsust ning saasteainete eemaldamise tõhusust, kuna need indikaatorid on rakendatavad kõikide õhujaotusviiside puhul ja nende mõõtmise ning arvutamise meetodid on kirjandusest leitavad. [38]

3.5.1 Õhu eluea mõiste

Õhu keskmine eluiga on teoreetiline suurus, mida hinnatakse õhu vanuselisel jaotusel ruumi osades. Vanust loetakse alates hetkest, mil õhk ruumi siseneb [9]. Lokaalne õhu keskmine eluiga $\bar{\tau}_p$ on õhukvaliteedi mõõdik, millena mõistetakse keskmist aega, mille jooksul erinevad õhu osad jõuavad teatud ruumi punkti, läbides selleks erineva ajaperioodiga teatud teepikkuse [20]. Väljatõmbel on lokaalne õhu eluiga alati võrdne nominaalse ajakonstandiga, mis on leitav valemi 3.1 abil. Nominaalne ajakonstant näitab vähimat aega, mil kogu ruumi õhk vahetuda jõuab ning on võrdne ajaga, mil ruumi kogu kubatuur täitub värske õhuga [8].

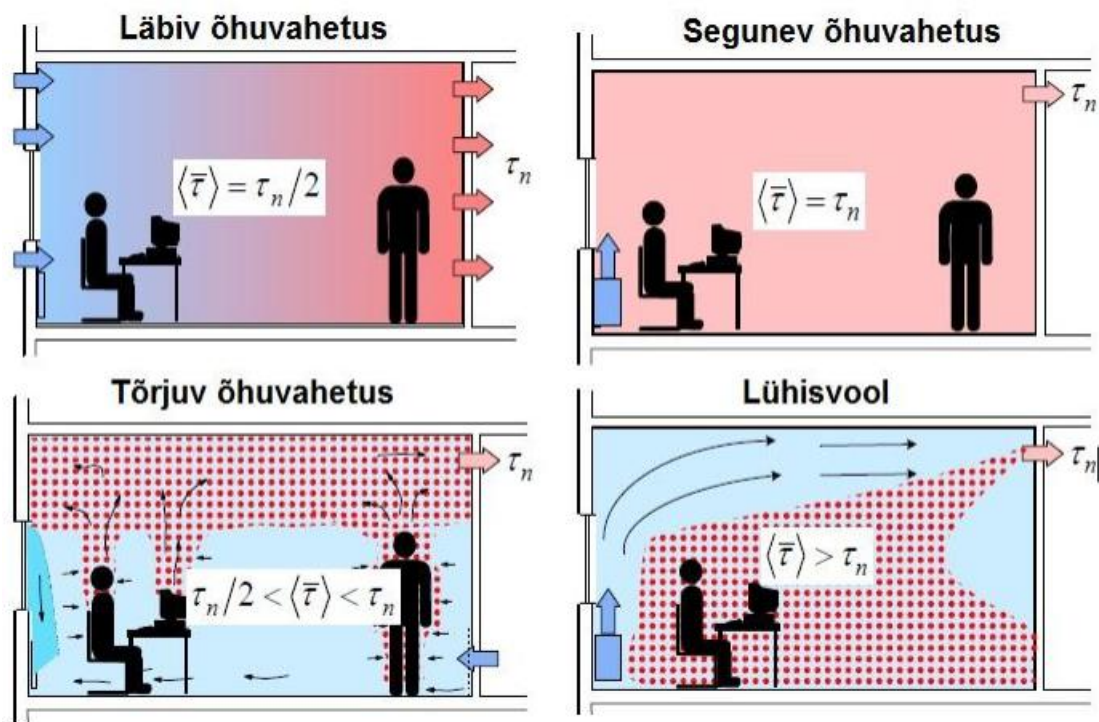
$$\tau_n = \frac{V}{q_v} \quad (3.1)$$

kus τ_p – nominaalne ajakonstant, h;

V – ruumi kubatuur, m³;

q_v – õhuvooluhulk, m³/h.

Õhu keskmine eluiga ruumis $\langle t \rangle$, on lokaalsete keskmiste õhu eluigade keskmine. Läbiva õhujaotusviisi korral siseneb ruumi õhk, mille lokaalne keskmine eluiga on null ning ruumist väljuva õhu lokaalne keskmine eluiga on võrdne nominaalse ajakonstandiga. Kuna õhu eluiga läbiva õhujaotuse puhul muutub lineaarselt, on antud skeemi korral ruumiõhu keskmine eluiga $\langle \tau_{LÄBIV} \rangle = \tau_n/2$. Täieliku segunemise korral lokaalsed õhu keskmised eluead igas ruumi punktis ning seega ka ruumiõhu keskmine eluiga võrdne nominaalse ajakonstandiga ehk $\langle \tau_{SEGUNEV} \rangle = \tau_n$ [21]. Tõrjuva õhujaotuse korral on $\langle \tau_{TÕRJUVA} \rangle$ väärtus seguneva ja läbiva keskmiste eluigade vahel. Lokaalsed õhu eluead on antud skeemi juures viibimistsoonis väiksemad ning ruumi ülaosas suuremad. Lühisvoolu puhul on $\langle \tau_{LÜHIS} \rangle$ kõrgem seguneva õhujaotuse vastavast väärtusest, kusjuures lühisvoolu tsoonis on õhu eluiga madal, kuid stagneerunud tsoonis oluliselt kõrgem. Õhu eluiga erinevate õhujaotusskeemide korral on illustreeritud joonisel 3.8. [9]



Joonis 3.8 Õhu eluiga erinevate õhujaoitusviiside korral [9][39]

3.5.2 Õhuvahetuse efektiivsus

Õhuvahetuse efektiivsus ε_a on õhukvaliteedi indikaator, mis iseloomustab sama õhuvooluhulga juures suhet suurima võimaliku õhuvahetuse kiiruse ja ruumi reaalse õhuvahetuse kiiruse vahel. Õhuvahetuse efektiivsus on leitav valemiga 3.2. [38]

$$\varepsilon^a = \frac{\tau_n}{2 \cdot \langle \bar{\tau} \rangle} \cdot 100 \quad (3.2)$$

kus ε^a – õhuvahetuse efektiivsus, %;

τ_n – nominaalne ajakonstant, h;

$\langle \bar{\tau} \rangle$ – ruumiõhu keskmine eluiga, h.

Kuna õhuvahetuse indikaatori juures on tegemist efektiivsusega, on antud suuruse maksimaalseks väärtuseks 100%, mis esineb ideaalse läbiva õhujaoituse korral. Tõrjuva õhujaoitusviisi puhul on antud väärtus vahemikus 50-100%, seguneva skeemi korral 50% ning lühisvoolu esinemisel alla 50%. [9]

3.5.3 Lokaalne õhuvahetuse indeks

Õhuvahetuse efektiivsust ühes ruumi punktis iseloomustab lokaalne õhuvahetuse indeks ε_p^a . Lokaalse õhuvahetuse indeks näitab suhet nominaalse ajakonstandi ja lokaalse õhu

keskmise eluea vahel ning on leitav valemiga 3.3. Seguneva õhujaoituse korral on lokaalne õhu eluiga igas ruumi punktis sama ja seejuures võrdne nominaalse ajakonstandiga. Seega on seguneva skeemi puhul lokaalne õhuvahetuse indeks igas ruumi punktis teoreetiliselt 100%. [9]

$$\varepsilon_p^a = \frac{\tau_n}{\bar{\tau}_p} \cdot 100 \quad (3.3)$$

kus ε_p^a – lokaalne õhuvahetuse indeks, %;

τ_n – nominaalne ajakonstant, h;

$\bar{\tau}_p$ – lokaalne õhu keskmine eluiga, h.

3.5.4 Õhuvahetuse efektiivsuse ja saasteainete eemaldamise tõhususe võrdlus

Õhuvahetuse efektiivsus ning saasteainete eemaldamise tõhusus on oma olemuselt erinevad õhukvaliteedi indikaatorid. Õhuvahetuse efektiivsuse mõistet on käsitletud peatükis 3.5.2. Saasteainete eemaldamise tõhusus ε^e on õhukvaliteedi indikaator, mis näitab, kui kiiresti eemaldatakse ruumist õhus sisalduvad saasteained. Sarnaselt õhuvahetuse efektiivsusele, saab ka saasteainete eemaldamise tõhusust hinnata ühes konkreetses ruumi punktis, sel juhul on tegemist lokaalse õhukvaliteedi indeksiga ε_p^e [9]. Erinevate õhujaoitusviiside ja saasteallikate paiknemiste puhul võivad antud indikaatorid anda õhukvaliteedi hindamisel vastandlikke tulemusi. Õhuvahetuse efektiivsus indikeerib õhujaoituse kvaliteeti, andes õhujaoitusele kvalitatiivse hinnangu. Antud indikaator vaatleb õhu segunemist erinevate õhujaoitusskeemide puhul ja võrdleb nende käitumist ideaalse läbiva õhujaoitusega. Saasteainete eemaldamise tõhusus annab jällegi hinnangu ruumiõhu saastatuse tasemele. Saastatuse indikaator sõltub lisaks õhujaoituse lahendusele veel saasteallika asukohast, intensiivsusest ja pinna suuruselt, millelt saasteainet eraldub. Seega on saasteainete eemaldamise tõhususe indikaator otstarbekas õhukvaliteedi hindamisel ruumides, kus saasteallika intensiivsus ja asukoht on teada. Õhuvahetuse efektiivsus sobib vastupidi olukordadesse, kus saasteallika karakteristika on teadmata, kuna õhukvaliteeti on võimalik hinnata saasteallikate paiknemisest sõltumatult. Kuna antud töö keskendub peamiselt õhujaoituse uurimisele ning klassiruumides on saasteallikad üldjuhul teadmatult jaotunud, on antud töö kontekstis lähtunud õhujaoituse uurimisel õhuvahetuse efektiivsuse indikaatorist. Joonisel 3.9 on esitatud kahe käsitletud indikaatori väärtusvahemike võrdlus. [38]

Tabel 3.3 Õhuvahetuse indikaatorite väärtuste võrdlus [38]

Õhuvahetuse efektiivsus	Ülemine piir	$\epsilon_a = 1$	Ideaalne läbiv õhujaotus
	Segunev õhujaotus	$\epsilon_a = 0,5$	Täielik ja pidev õhu segunemine
	Alumine piir	$\epsilon_a \rightarrow 0$	Lühisvoolu tsoon on täielikult eraldatud stagneerunud tsoonist
Saasteainete eemaldamise tõhusus	Ülemine piir	$\epsilon^c \rightarrow \infty$	Saastallikas asub väljatõmbeavas, õhujaotusel ei ole mingit mõju indikaatorile
	Segunev õhujaotus	$\epsilon^c = 1$	Täielik ja pidev õhu segunemine, saasteallika asukohal ei ole mõju indikaatorile
	Alumine piir	$\epsilon^c \rightarrow 0$	Saasteallikas asub stagneerunud tsoonis, mis on täielikult lühisvoolu tsoonist eraldatud

3.6 Kontsentratsiooni languse meetod

Ruumi õhuvahetuse ja õhuvahetuse efektiivsuse määramiseks on välja töötatud mitmeid meetodeid, mille kohaselt arvutatakse õhuvahetus või selle efektiivsus ruumis märkegaasi kontsentratsioonide mõõtmise teel. Üldiselt jagunevad märkegaasi meetodid kolmeks: kontsentratsiooni languse meetod, konstantse doseerimise meetod ning konstantse kontsentratsiooni meetod. [40]

Eelpool toodud meetodid jagunevad omakorda alameetoditeks. Erinevate märkegaasi meetodite kasutamine eeldab mitmete spetsiifiliste eeltingimuste täitmist ning seetõttu sobivad meetodid erinevate õhuvahetust puudutavate suuruste leidmiseks. Märkegaasi meetoditel põhinevat õhuvahetuse määramise metoodikat on kirjeldatud standardis EVS-EN ISO 12569:2017 [40]. Metoodika õhuvahetuse efektiivsuse määramiseks lokaalsete õhu keskmiste eluigade põhjal on esitatud standardis ISO 16000-8 [41]. Antud töös rakendatakse õhuvahetuse efektiivsuse määramiseks kontsentratsiooni languse alaliiki – mitme punkti kontsentratsiooni languse meetodit. Järgnevates alapeatükkides on kirjeldatud kasutatava märkegaasi omadusi ning antakse ülevaade kontsentratsiooni languse mitme punkti meetodist.

3.6.1 Märkegaaside kasutamine

Märkegaasiks loetakse gaasi, mille väga madalaid kontsentratsioone on võimalik õhuga segunenult määrata, eesmärgiga hinnata õhuvahetust ruumis [40]. Katsetes kasutatav märkegaas peab olema lihtsasti ja piisava täpsusega mõõdetav. Samuti peab valitud märkegaas olema kasutatavate kontsentratsioonide juures keemiliselt püsiv, mittemürgine, ei tohi olla tule- ja plahvatusohtlik või mull moel inimese tervist ohustav. Enamlevinud märkegaasideks on CO₂, SF₆ ning N₂O. [41] Antud töös kasutatakse

märkegaasina CO₂-e ehk süsinikdioksiidi, mida käsitletakse põhjalikumalt töö metoodilises osas.

3.6.2 Kontsentratsiooni languse mitme punkti meetod

Kontsentratsiooni languse meetodil juhitakse uuritavasse ruumi märkegaasi ning lokaalsed õhu eluead arvutatakse mõõdetud kontsentratsioonide languse tulemuste baasilt. Märkegaasi algkontsentratsioon ruumi peab olema vähemalt 100 korda kõrgem mõõteseadme mõõteveast [41]. Katse alguses ja vältel on vajalik tagada ruumis ühtlane märkegaasi jaotus ning konstantne õhuvahetus. Kontsentratsiooni languse meetod jaguneb metoodiliselt neljaks alaliigiks: kahe punkti languse meetod, mitme punkti languse meetod, väljatõmbe kontsentratsiooni languse meetod ning impulsi languse meetod. [40]

Antud töö raames õhujaotust uurivate katsete jooksul on võimalik mõõta CO₂ kontsentratsioone mitmetes ruumpunktides, mistõttu rakendatakse mitme punkti languse meetodit. Antud meetodi kasutamise eelduseks on konstantne õhuvahetus ruumis kogu katse jooksul. Märkegaasi kontsentratsioone mõõdetakse katse alguses ja lõpus, samuti teatud intervallide tagant katse vältel. Intervallide määramisel lähtutakse mõõteseadme võimalustest, kuid üldiselt toimub mõõtmine kümnete sekundite kuni mitme minutiliste intervallidena. Õhuvahetus arvutatakse mõõdetud kontsentratsioonide põhjal vähimruutude meetodil, kasutades valemit 3.6. [40]

$$N = \frac{\left(\sum_{j=1}^{n_p} t_j \right) \cdot \sum_{j=1}^{n_p} \ln C(t_j) - n_p \cdot \sum_{j=1}^{n_p} t_j \cdot \ln C(t_j)}{n_p \cdot \sum_{j=1}^{n_p} t_j^2 - \left(\sum_{j=1}^{n_p} t_j \right)^2} \quad (3.4)$$

kus N – õhuvahetuse kordarv, 1/h;

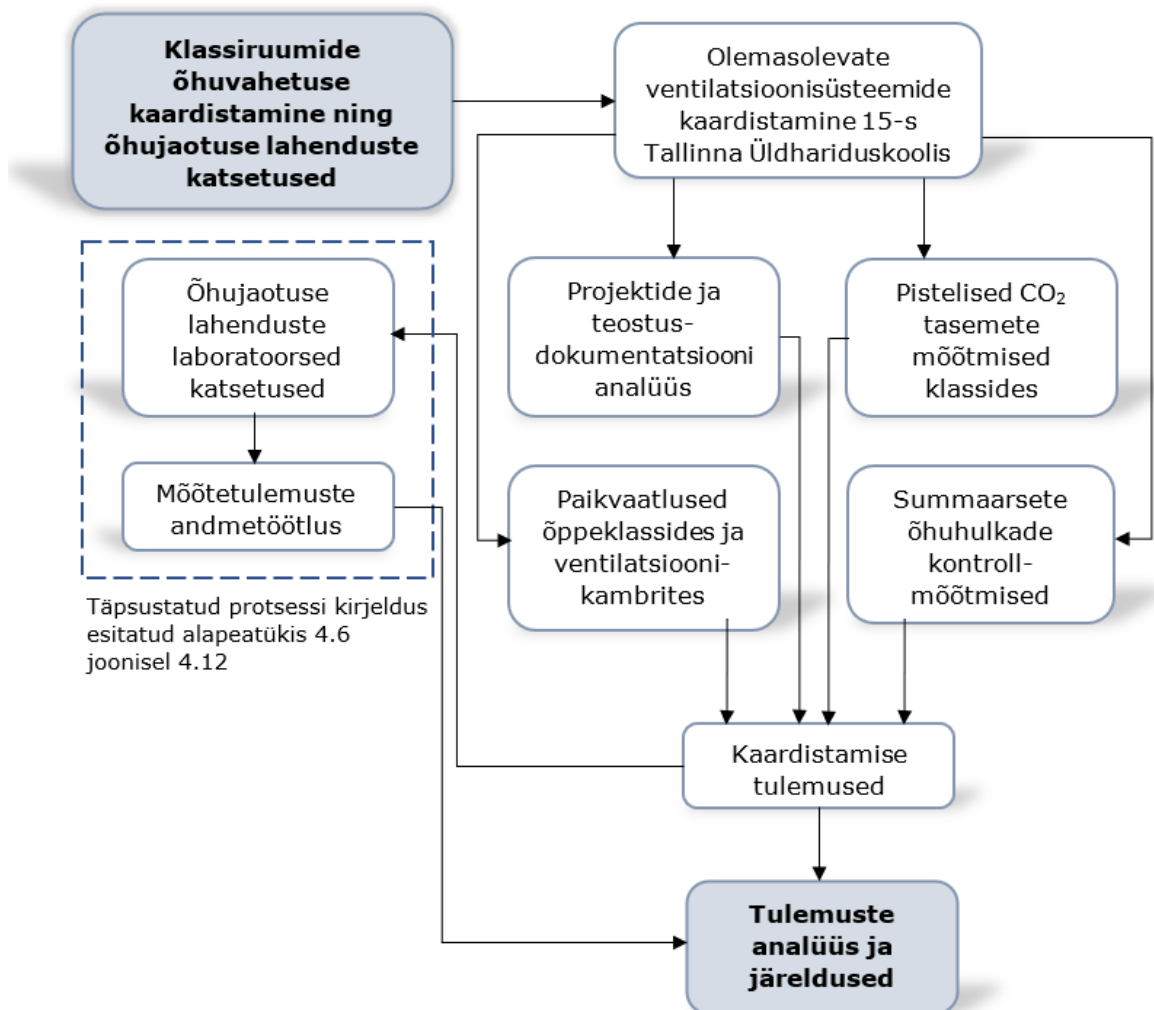
t_j – j-s kumulatiivne ajahetk alates katse algusest, kusjuures $t_1 = 0$, h;

$C(t_j)$ – mõõdetud märkegaasi kontsentratsioon ajahetkel j, ppm;

n_p – mõõtepunktide kogu hulk (min. 3).

4. METOODIKA

Antud peatükis esitatakse ülevaade lõputöö koostamisel rakendatud meetodikatest, kirjeldatakse uuritavaid objekte, katsete lähteparameetreid ja mõõteseadmeid. Samuti selgitatakse andmeanalüüsiga seonduvat meetodikat. Peatükis käsitletakse kolme põhilist teemavaldkonda: kirjeldatakse koolide olemasolevate ventilatsioonisüsteemide kaardistamist, antakse ülevaade õhujaotuslahenduste laboratoorsetest katsete meetodikatest ning kirjeldatakse andmeanalüüsi meetodikat. Järgnevalt on esitatud joonisel 4.1 plokk skeemina töö meetodilist protsessi kirjeldav struktuurskeem:



Joonis 4.1 Töö meetodilise protsessi struktuurskeem

4.1 Koolide olemasolevate ventilatsioonisüsteemide kaardistamine

Koolide klassiruumide teenindavate ventilatsioonisüsteemide kaardistamine viidi läbi Tallinna Haridusameti poolt tellitud ventilatsiooni auditi raames. Läbiviidud auditi põhikoostajad olid volitatud kütte, ventilatsiooni ja jahutuse insener, tase 8 Teet Tark ja antud lõputöö koostaja Indrek Valgma. Töö ja mõõdistused koolides viidi läbi perioodil 01.10.2021-05.12.2021. Auditi põhilisteks eesmärkideks seati klassiruumide ventilatsioonisüsteemide seisukorra hindamine ja parandusettepanekute tegemine. Hinnangu andmiseks mõõdeti klassiruumide süsihappegaasi tasemeid õppetöö ajal (vt. 4.1.2), sooritati uuritavate ventilatsioonisüsteemide agregaatidele summaarsete õhuvooluhulkade kontrollmõõdistused (vt. 4.1.1), teostati klassi- ja tehnoruumides paikvaatluseid, analüüsiti kättesaadavat tehnilist dokumentatsiooni ning suheldi hoonete kasutajate ja ventilatsioonisüsteemide hooldajatega. [10]

Ventilatsiooni auditi valimi moodustasid 15 olemasolevat Tallinna üldhariduskooli, mille õppeklasse teenindavad ventilatsioonisüsteemid on ehitatud või renoveeritud viimase 25 aasta jooksul. Valimi koostajaks oli Tallinna Haridusamet ning valim edastati ventilatsiooni auditi lähteülesandega. Alljärgnevas tabelis 4.1 on esitatud valimisse kuuluvate koolide ehitusloa taotluse esitamisaajad (andmed pärinevad EHR-st seisuga 05.12.2021) ja renoveerimisaastad. [10]

Tabel 4.1 Auditis osalenud koolide andmed [10]

Kooli nimetus	Tähis	Ehitusloa taotluse kuupäev	Renoveerimisaasta, sh õppeklasside ventilatsioonisüsteemid
Kool nr. 1	K1	12.04.1999	2001
Kool nr. 2	K2	IV korrus 28.03.2014	IV korrus: 2015
			I-III korrus: 1996
Kool nr. 3	K3	30.04.2009	2009
Kool nr. 4	K4	-	2001
Kool nr. 5	K5	03.04.2008	2008
Kool nr. 6	K6	10.06.2013	V korrus 2004
			Muu 2013
Kool nr. 7	K7	24.09.2007	2008
Kool nr. 8	K8	18.03.1999	2000
Kool nr. 9	K9	30.07.2014	2015
Kool nr. 10	K10	25.03.2004	2004
Kool nr. 11	K11	10.11.2015	2016
Kool nr. 12	K12	21.03.2013	2013
Kool nr. 13	K13	06.02.1998	1999
Kool nr. 14	K14	12.03.2004	2006
Kool nr. 15	K15	23.03.2009	2009

Ventilatsioonиаuditi koostamisel ja ventilatsioonisüsteemide kaardistamisel tugineti järgnevatele teabeallikatele:

- Eesti Ehitusregistrist kättesaadav relevantne teave;
 - Koolide sisekliimat reguleerivad määrused ja standardid;
 - Auditi allikates viidatud asjakohased juhendmaterjalid ja teadusartiklid;
 - Tellija poolt esitatud informatsioon: ventilatsioonisüsteemide projektid, teostusdokumentatsioon, hoolduspäevikud jms;
 - Koolide poolt väljastatud informatsioon: ventilatsioonisüsteemide projektid, teostusdokumentatsioon, hoolduspäevikud jms;
 - Intervjuud hoonete personali ja hooldajatega;
 - Paikvaatlused klassi- ja tehnoruumides, sh vajadusel müramõõdistused ning õhu liikumise hindamine märkesuitsuga;
 - Klassiruumete teenindavate põhiliste ventilatsioonisüsteemide summaarsed õhuhulkade kontrollmõõdistused ning tulemuste kõrvutamine projekteeritud väärtustega;
 - Klassiruumides õppetöö ajal läbiviidud süsihappegaasi tasemete mõõdistused.
- [10]

Kohati ei olnud koolide kohta saada korrektset ventilatsioonisüsteeme puudutavat tehnilist dokumentatsiooni ning sageli puudus informatsioon teostusdokumentatsiooni osas. Seetõttu tugineti auditis parimale kättesaadavale teabele ja eksperthinnangutele.

[10]

4.1.1 Ventilatsiooniseadmete õhuhulkade kontrollmõõdistused

Koolihoonete ventilatsioonisüsteemide auditeerimise käigus mõõdeti kõikide valimisse arvatud koolide põhiliste klassiruumete teenindavate ventilatsioonisüsteemide summaarseid õhuvooluhulkasid. Enne mõõtmistöödega alustamist informeeriti koolide juhtivpersonali ning ventilatsioonisüsteeme hooldavad ettevõtted auditi läbiviimise osas ning paluti tagada mõõdistuste ajaks ventilatsioonisüsteemide ette nähtud töörežiim.

[10]


Auditeerimise tarbeks vajalikud õhuvooluhulkade kontrollmõõdistused viis läbi akrediteeritud katselabor Amecon OÜ (reg. nr. 10717495). Mõõdistamised toimusid õppetegevuse ajal perioodil 15.11.2021-19.11.2021. Mõõdistusperioodil oli piirkonna

minimaalne välisõhu temperatuur õppetegevuse ajal -3°C , seega ventilatsiooniseadmete automaatika pidi tagama süsteemide töö seadistatud täisvõimsusel [9]. Vastavalt EVS 906:2018 standardile [28] on mitmeluuremides lubatud välistemperatuuri langedes alla -10°C vähendada ventilatsiooni õhuhulkasid kuni 50% või normdokumentides toodud miinimumini.

4.1.2 Klassiruumide CO₂ tasemete hindamine

Olemasolevate koolide ventilatsioonisüsteemide kaardistamisel hinnati siseõhu kvaliteeti klassiruumides õppetegevuse ajal märkegaasi CO₂ kontsentratsioonidele tuginedes. Andmete kogumiseks rentis Tallinna linn 150 Adeunis Comfort CO₂ kaugloetavat logerit. Kasutatud logerite tehnilised andmed on esitatud tabelis 4.2.

Tabel 4.2 Klassiruumi CO₂ mõõteseadme tehnilised andmed [42]

Mõõteseadme nimetus	Adeunis Comfort CO ₂
Mõõdetavad parameetrid	CO ₂ kontsentratsioon
Mõõtepiirkond	400...5000 ppm
Mõõtetäpsus	± 30 ppm + 3% lugemist
Illustreeriv pilt	

Paigaldatud mõõteseadmed eelseadistati salvestama CO₂ näitused viie minutiliste intervallidega igapäevaselt ajavahemikul 06.00-20.00. Salvestatud andmed olid kättesaadavad veebilehelt <https://nora-x.com/>. Klassiruumide CO₂ kontsentratsioonide mõõdistamiseks paigaldati igasse koolihoonesse 10 logerit. Näide kooli paigaldatud logeritest on esitatud joonisel 4.2. Koolides märgistati mõõteseadmed paaride kaupa värvimarkeeringuga ning nummerdati. Mõõdetavatesse klassiruumidesse paigaldati korraga kaks mõõteseadet ning korraga mõõdeti ühes koolis viite erinevat klassiruumi. Logerid paiknesid klassiruumides võimalikult hajutatult – üks enamasti õpetaja laua lähisel seinal ning teine diagonaalselt klassi taga seinal. Logerid paigaldati seintele orienteeruval kõrgusel 1,5 meetrit põrandapinnast, kuna antud kõrgusel paiknesid seadmed veidi kõrgemal õpilaste istumistsoonist ning seeläbi püüdsid minimaalselt õpilaste tähelepanu. Ühes klassis mõõdistasid logerid CO₂ kontsentratsioone üldjuhul ühe täisnädala, seejärel suunati mõõteseadmed rotatsiooniga järgmistesse viite

klassiruumi. Klassides, kus logerid paiknesid, paluti õpetajatel täita toimunud tundide kaupa tabelleid õpilaste arvu ja akende avamise info osas. [10]



Joonis 4.2 Adeunis CO₂ mõõteseadmete markeritud komplekt auditeeritud koolis





4.2 Laboratoorsed katsevahendid

Antud alapeatükis esitatakse laboratoorsete katsete läbiviimiseks kasutatud seadmete ning abivahendite kirjeldus ja andmed.

4.2.1 Mõõteseadmed

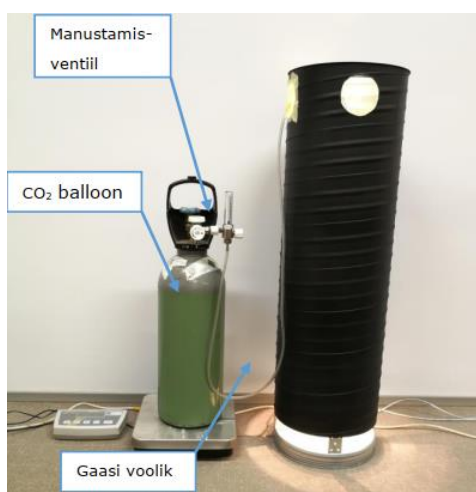
Katseandmete kogumiseks kasutati mitmeid mõõteseadmeid temperatuuride, CO₂ kontsentratsioonide, rõhkude vahe, kaalu ja õhu liikumiskiiruse mõõtmiseks. Mõõteseadmete tehnilised andmed on esitatud tabelis 4.3.

Tabel 4.3 Labortoorsete mõõteseadmete tehnilised andmed: HOBO MX1102A [43], Testo 440 dP [44], KERN FKB [45] ja ComfortSense 54T35 [46]

Mõõteseadme nimetus	Onset HOBO MX1102A Data Logger	Testo 440 dP	Kern FKB	Anemomeeter ComfortSense 54T35
Mõõdetavad parameetrid	CO ₂ kontsentratsioon, õhu temperatuur	Diferentsiaalrõhk	Kaalumine	Õhu liikumiskiirus ja õhutemperatuur
Mõõtepiirkond	0...5000 ppm 0...50 °C	-150 kuni +150 hPa	0,002...65 kg	-20...70 °C 0,05...10 m/s
Mõõtetäpsus	±50 ppm + ±5 lugemist ±0,21 °C	Kuni 100 Pa ±0,05 hPa	±0,001 kg	±0,5 °C ±0,02 m/s
Illustreeriv pilt				

4.2.2 CO₂ doseerimine

Kontsentratsiooni languse meetodil ventilatsiooni efektiivsuse määramiseks kasutati antud töös märkegaasina süsihappegaasi (CO₂). Süsihappegaasi doseeriti katseruumi vastavast balloonist läbi ventiili, kasutatud ballooni on kujutatud joonisel 4.3. Märkegaasi doseeriti vabalt ruumi õhku ning ühtlase kontsentratsiooni saavutamiseks kasutati kahte ventilaatorit, millega ruumiõhk läbi segati. Kontsentratsioonide jaotumise ühtlust kontrolliti pisteliselt CO₂ logerite näitude põhjal.



Joonis 4.3 Süsihappegaasi manustamise balloon ning termineline mannekeen [47]

4.2.3 Vabasoojuste imiteerimine

Reaalsele klassiruumile vastavate tingimuste loomiseks jälgendati õpilastelt eralduvaid vabasoojuskoormuseid kahel viisil – termilisi mannekeene ehk „dummy“-sid ja konvektor elektriradiaatorit kasutades. Termiliste mannekeenidena kasutati standardile EN14240 vastavaid ümara ristlõikega lehtterasest 1,1 meetrit kõrgeid ja 0,3 meetrise diameetriga katsekehasid, millele kinnitatud kokku 180 W väärtuses elektripirne. Kokku kasutati kuute termilist mannekeeni, mille keskmine reaalne soojusväljastus oli 198 W. Radiaatorina kasutati Eurom E-Convect 1 kW radiaatorit, mille reaalne soojusväljastus oli ca 980 W. Lisaküttekehad paigutati korrapäraselt ruumi keskele, et matkida klassiruumi vabasoojuste jaotust. Isotermsete katsete puhul vajaliku ruumiõhu temperatuuri hoidmiseks vabasoojuseid ei rakendatud.

4.2.4 Ventilatsiooniseade

Laboratoorse klassiruumi õhuvahetus tekitatakse laborisse paigaldatud rootorsoojusvahetiga sissepuhke-väljatõmbe ventilatsiooniseadmega. Rootorsoojusvahetitega varustatud agregaatides toimub sissepuhke ning väljatõmbe õhuvoolude segunemine, mille tulemusena tõuseb sissepuhkeõhu CO₂ kontsentratsioon välisõhu suhtes [48]. Rootortagastis õhuvoolude segunemise mõju elimineerimiseks mõõdeti CO₂ kontsentratsioone sissepuhke kanalis ning vastavad lugemid võeti kontsentratsioonide algparameetriteks.

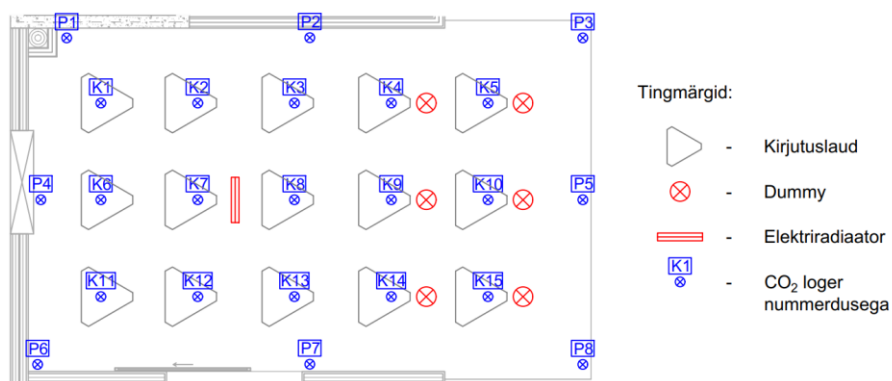
4.3 Laboratoorse klassiruumi kirjeldus

Klassiruumina kasutati Tallinna Tehnikaülikooli Ehituse Mäemaja ruumi 214, kus asub ehitusfüüsika ja sisekliima õhujaotusruum. Ruum on mõõtmetega 5,3x8,6 meetrit, vastav põranda pindala on 46,6 m² ning ruumi puhaskõrgus 4 meetrit. Laboril puuduvad välisõhuga kokkupuutuvad tarindid, päevavalgus siseneb ruumi läbi klaasist vaheseinte. Katseruumi ja ümbritseva ruumi õhuvahetuse minimaliseerimiseks tihendati klaaspaneelide vahed ja muud ebatihedused teibiga. Ruumis paiknevaid jahutusseadmeid antud töö raames läbiviidavates katsetes ei kasutatud.

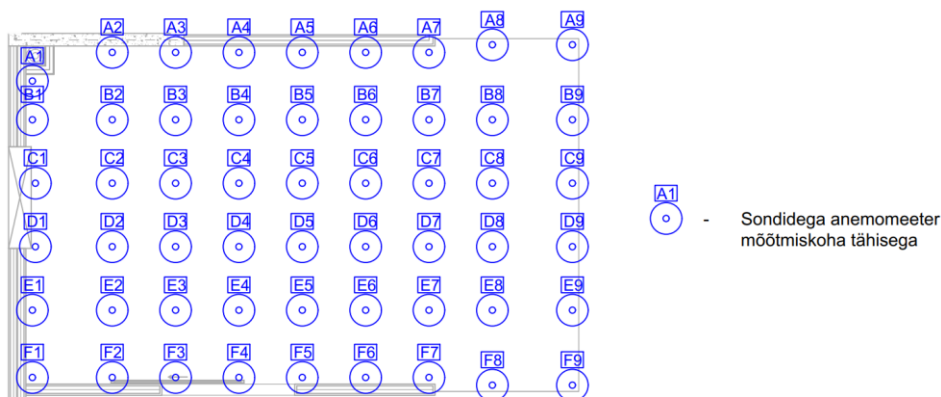
Vastavalt Riigikogu seadusele „Põhikooli- ja gümnaasiumiseadus“ [49] on põhikooli klassiruumi täituvuse piirnormiks sätestatud 24 õpilast, kuid hoolekogu nõusolekul on tervisekaitse- ja ohutusnõuete täitmisel lubatud piirnormi tõsta. Kuna auditi tulemustest selgub, et enamikel juhtudel on koolides õpilaste piirnormiks seatud kõrgem määr kui 24 õpilast, siis viiakse antud töö raames laboratoorsed katsed läbi arvestusega, et klassiruumis on koos õpetajaga 30 inimest. Vabariigi Valituse määruse nr. 84 „Tervisekaitse-nõuded koolidele“ [25] kohaselt on põhikooli õpilase kohta nõutav

põrandapind 2 m² ning minimaalne ruumi kõrgus 2,5 meetrit. Katseruumi pindala ei taga õpilasele nõutavat põrandapinda, kuid tänu katseruumi suuremale kõrgusele, on tagatud nõutav kubatuur õpilase kohta, seega loetakse antud töö raames katseruumi parameetrid piisavalt täpselt vastavaks klassiruumi nõutud parameetritele. Vastavalt standardile EVS 906:2018 [28] on klassiruumi õhuvahetus täiesti seguneva ventilatsiooni puhul inimese kohta 8 l/s ehk 29 õpilase ja ühe õpetaja kohta on summaarne klassiruumi õhuvahetus 240 l/s. Sama standardi kohaselt on maksimaalne õhu liikumiskiirus viibimistsoonis 0,2 m/s.

Reaalse klassiruumi olustiku matkimiseks asetsesid katseruumi keskel lauad, mille vahele olid paigutatud termilised mannekeenid ning üks elektriradiaator, mis tekitavad konvektiivseid õhuvoolusid ruumiõhu segamiseks. Katseandmete kogumiseks paiknesid ruumis ühtlaselt jaotatult kõrgusel 1,1 meetrit viisteist CO₂ mõõteseadet, lisaks mõõdeti CO₂ kontsentratsioone ruumi perimeetril kaheksa logeriga, kahe logeriga väljatõmbe avas ning sissepuhke magistraalkanalis. Kõikide logerite mõõteintervall oli 10 sekundit. Õhujaotuslahenduste puhul mõõdeti õhu liikumiskiiruseid sondidega mõõteseadmete abil katseruumis kõrgusel 1,1 meetrit. Joonistel 4.4 ja 4.5 on esitatud vastavalt katseruumis logerite ja õhu liikumiskiiruste mõõtepunktid.



Joonis 4.4 Katselabori plaan vabasoojusallikate ja CO₂ logerite paiknemisega



Joonis 4.5 Katseruumi plaan õhu liikumiskiiruse mõõtepunktidega

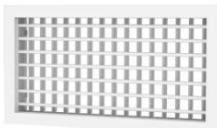

4.4 Uuritud koolides esinenud tüüpiliste õhujaotuslahenduste katsed

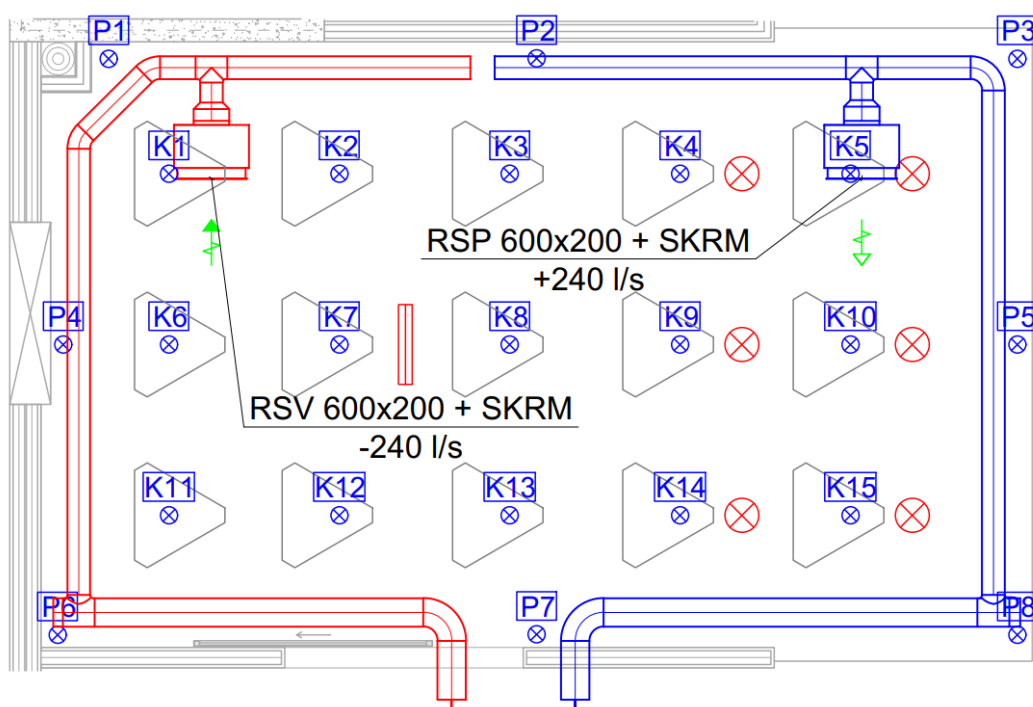
Laboratoorsete katsetega testiti kahte klassiruumides levinud õhujaotuse lahendust õhuvahetuse efektiivsuse, lokaalsete õhuvahetuse indekseid ja õhu liikumiskiiruse aspektist. Järgnevatel alapeatistel on esitatud katsetatud õhujaotuslahenduste põhimõttelised kirjeldused.

4.4.1 Ühe sissepuhkerestiga õhujaotus

Antud lahenduse puhul antakse kogu värske õhk ruumi ühe sissepuhkerestiga ning saastunud õhk eemaldatakse ruumist ühe väljatõmberestiga. Mõlemad restid paiknevad klassiruumi koridori poolse seina ääres (näiteks karniisis või seinal), restide kaugus külgnevast seinast 1,5 meetrit. Õhujaotust on katseruumi plaanil kujutatud joonisel 4.6. Õhujaotuslahendust kasutatakse katsetes 1.1 ja 1.2, vt täpsemalt struktuurskeemilt joonisel 4.12. Alljärgnevalt on tabelis 4.4 esitatud katses kasutatud õhujaotajate nimistu ning lahendusele vastav põhimõtteline klassiruumi ventilatsiooni plaan.

Tabel 4.4 Sissepuhkerestiga õhujaotuslahenduse seadmed [50]

Seadme tüüp	Toote markeering	Tootja	Kogus (tk)	Illustreering
Sissepuhkerest	RSP-600x200 +SKRM	ETS NORD	1	
Väljatõmberest	RSV-600x200 +SKRM	ETS NORD	1	





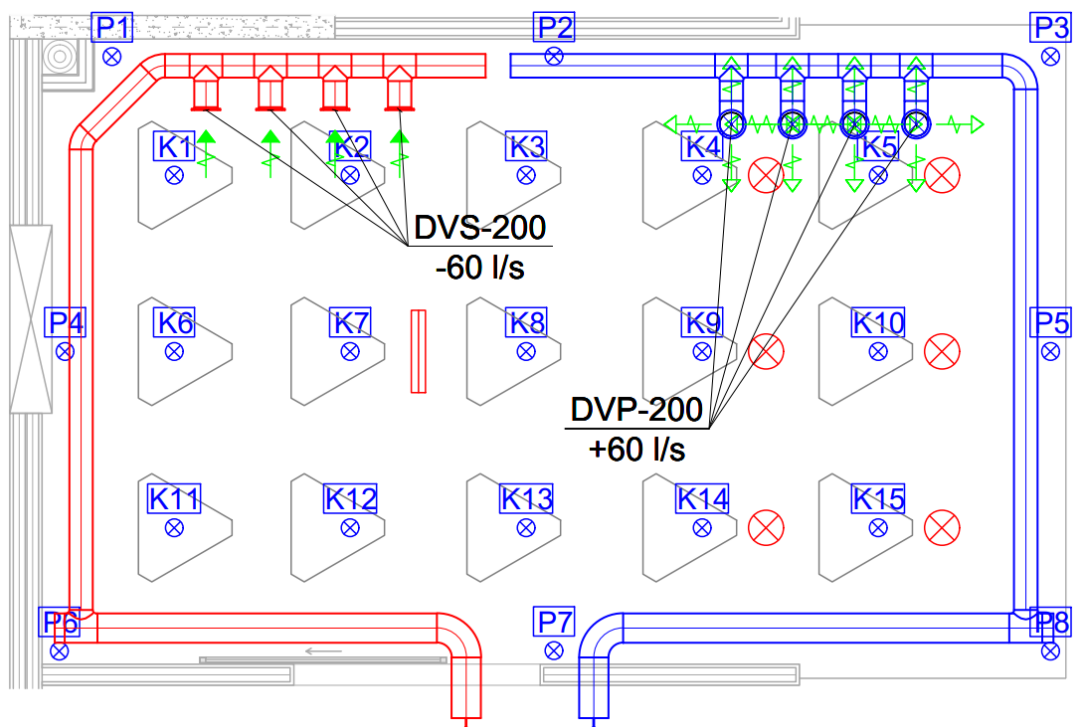
Joonis 4.6 Restidega õhujaotuslahenduse põhimõtteline plaan

4.4.2 Seinäärsete plafoonidega õhujaotus

Antud lahenduse puhul antakse kogu värske õhk ruumi nelja sissepuhke plafooniga ning saastunud õhk eemaldatakse ruumist nelja väljatõmbe plafooniga. Kõik plafoonid paiknevad grupeeritult klassiruumi koridori poolse sein ääres. Õhujaotust on katseruumi plaanil kujutatud joonisel 4.7. Õhujaotuslahendust kasutatakse katsetes 2.1 ja 2.2, vt täpsemalt struktuurskeemilt joonisel 4.12. Alljärgnevalt on tabelis 4.5 esitatud katses kasutatud õhujaotajate nimistu ning lahendusele vastav põhimõtteline klassiruumi ventilatsiooni plaan.

Tabel 4.5 Plafoonidega õhujaotuslahenduse seadmed [50]

Seadme tüüp	Toote markeering	Tootja	Kogus (tk)	Illustreering
Sissepuhkeplafoon	DVP-200	ETS NORD	4	
Väljatõmbeplafoon	DVS-200	ETS NORD	4	



Joonis 4.7 Plafoonidega õhujaotuslahenduse põhimõtteline plaan

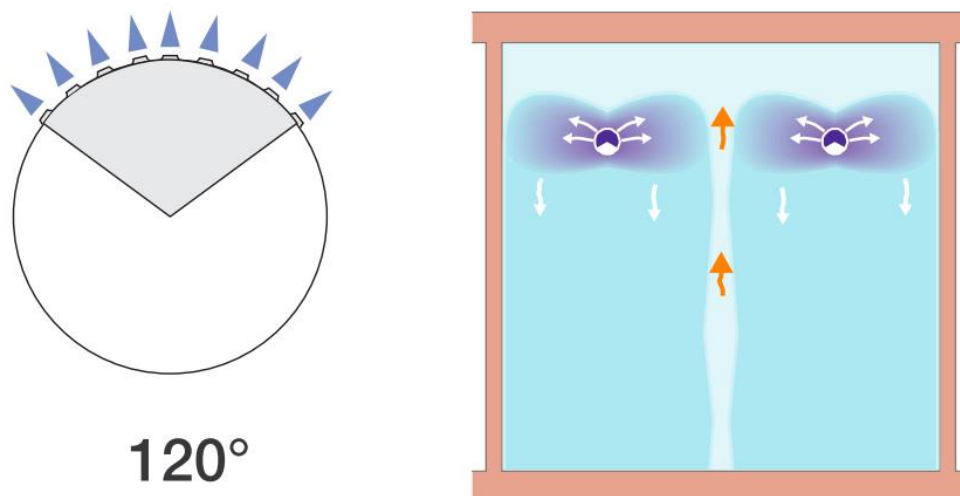
4.5 Düüsidega õhujaotuse tüüplahenduste katsed

Düüstorudega õhujaotuslahenduste katsete eesmärk on võrrelda düüstorudega lahenduste toimivust õhuvahetuse efektiivsuse, lokaalsete õhuvahetus indeksite ja õhu liikumiskiiruse seisukohast võrreldes levinud restide või plafoonidega lahenduste suhtes. Erinevalt restidest või plafoonidest, ei saa düüse integreerida karniiside või ripplagedega. Seega on düüstorud sobilikud kasutamiseks avatud lagedega ruumides. Võrreldes plafoonidega on düüstorused keerulisem kooli personalil omavoliliselt ümber seadistada, mistõttu võiksid düüstorudega õhujaotuslahendused olla ventilatsioonisüsteemide üldise toimivuse seisukohalt eelistatud. Samuti tagab teoreetiliselt düüstorude tööpõhimõtte ruumi õhu efektiivse segunemise ning värsket õhu ühtlast jaotust. Järgnevatel alapeatistel on esitatud katsetatud düüstorudega õhujaotuslahenduste põhimõttelised kirjeldused.

4.5.1 Düüstorud – õhuvool suunatud üles 120°

Antud lahenduse puhul antakse värsket õhku ruumi nelja düüstoru kaudu ning saastunud õhk eemaldatakse ruumist nelja väljatõmbe plafooniga. Düüstorud paiknevad kahestes gruppides ühel liinil, sissepuhke õhuvool on suunatud düüsidega üles 120° lehvikuna.



Düüsidest väljuv õhk indutseerib ruumiõhku ning teoreetiliselt sissepuhkeõhk seguneb efektiivselt ruumiõhuga, mistõttu tuuletõmbuse oht on õigesti projekteeritud süsteemi puhul minimaalne. Joonisel 4.8 on kujutatud katses kasutatavate düüside tööpõhimõte.

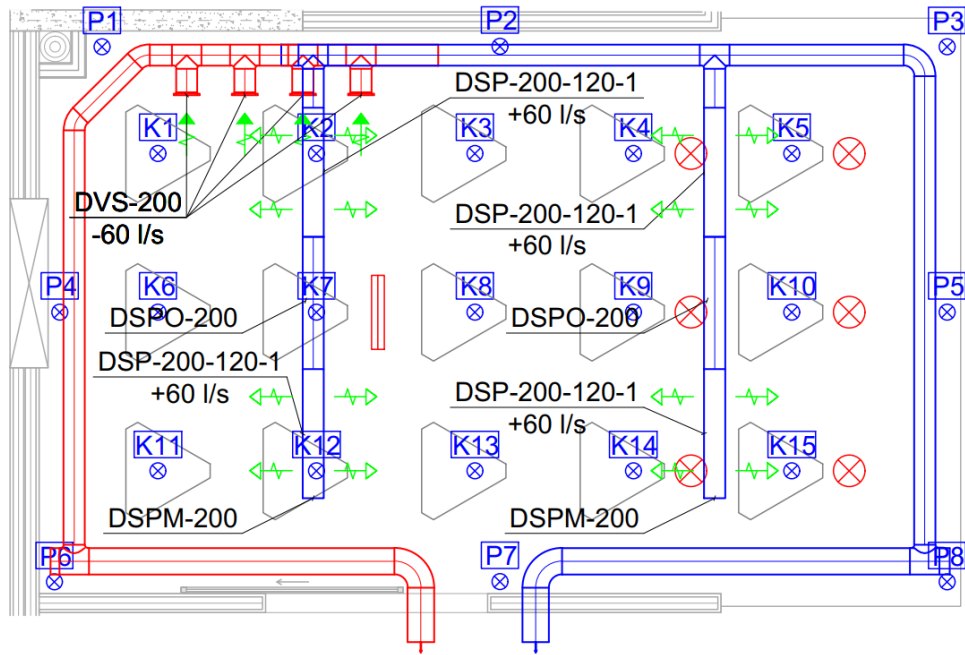


Joonis 4.8 Illustreering üles suunatud düüsidega düüstoru ristlõikest [51] ja õhuvoolude liikumisest ruumis [52]

Mõlemad torustike liinid kulgevad ruumi keskel, liinide omavaheline kaugus c/c on 3,8 meetrit. Kõik väljatõmbe plafoonid paiknevad grupeeritult klassiruumi tagumise seina ääres. Õhujaotust on katseruumi plaanil kujutatud joonisel 4.9. Õhujaotuslahendust kasutatakse katsetes 3.1 ja 3.2, vt täpsemalt struktuurskeemilt joonisel 4.12. Alljärgnevalt on esitatud tabelis 4.6 katses kasutatud õhujaotajate nimistu ning lahendusele vastav põhimõtteline klassiruumi ventilatsiooni plan.

Tabel 4.6 Üles suunatud õhuvooluga düüstorude õhujaotuslahenduse seadmed [50]

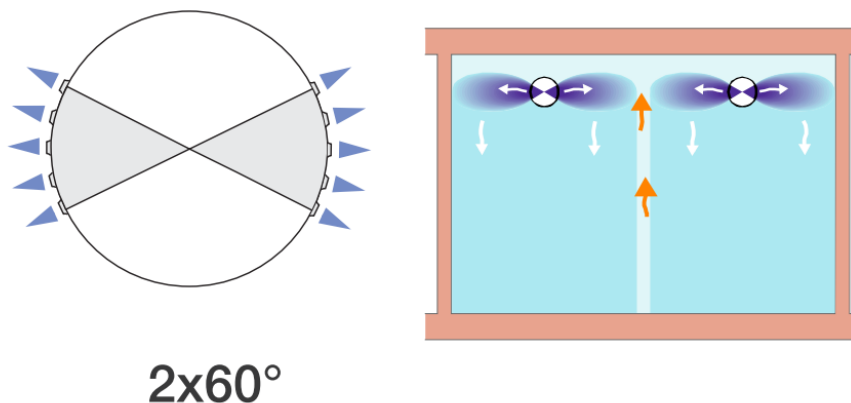
Seadme tüüp	Toote markeering	Tootja	Kogus (tk)	Illustreering
Sissepuhke düüstoru	DSP-200-120-1	ETS NORD	4	
Väljatõmbe plafoon	DVS-200	ETS NORD	4	



Joonis 4.9 Üles suunatud õhuvooluga düüstorude õhujaoituslahenduse põhimõtteline plaan

4.5.2 Düüstorud – õhuvool suunatud horisontaalselt 2x60°

Antud lahenduse puhul antakse värske õhk ruumi nelja düüstoru kaudu ning saastunud õhk eemaldatakse ruumist nelja väljatõmbe plafooniga. Düüstorud paiknevad kahestes gruppides ühel liinil, sissepuhke õhuvool on suunatud düüsidega horisontaalselt külgedele 2x60° lehvikuna. Horisontaalselt suunatud õhuvooluga düüstorude lahenduse puhul on tekkivad õhujoad pikemad ning segunemine ruumi õhuga toimub võrreldes üles suunatud õhuvooluga suuremal alal. Joonisel 4.10 on kujutatud katses kasutatavate düüside tööpõhimõte.





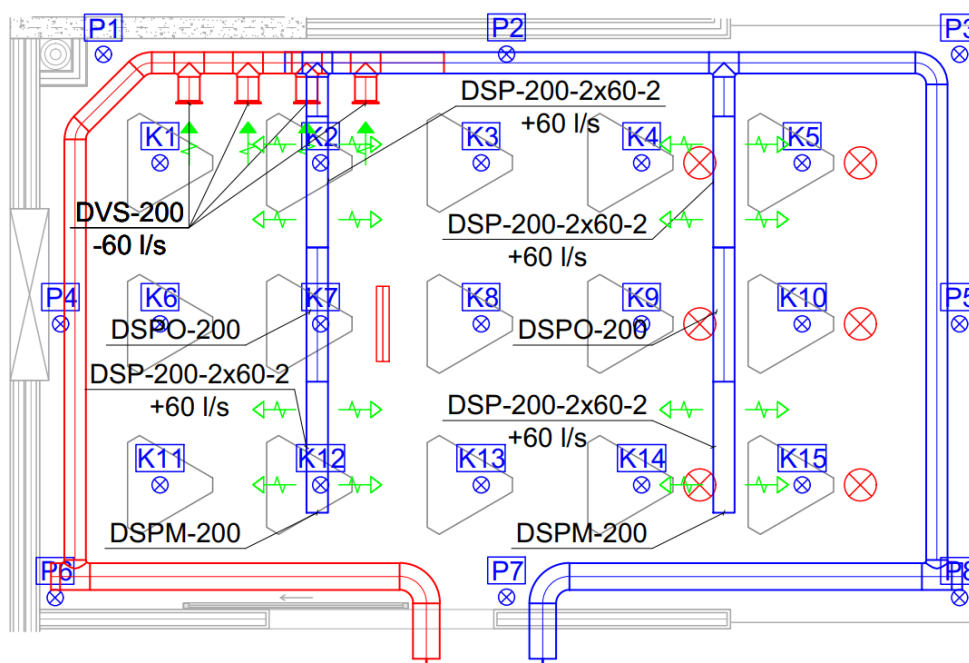
Joonis 4.10 Illustreering horisontaalselt suunatud düüsidega düüstoru ristlõikest [51] ja õhuvoolude liikumisest ruumis [52]

Mõlemad torustike liinid kulgevad ruumi keskel, liinide omavaheline kaugus c/c on 3,8 meetrit. Kõik väljatõmbe plafoonid paiknevad grupeeritult klassiruumi tagumise seina

ääres. Õhujaotust on katseruumi plaanil kujutatud joonisel 4.11. Õhujaotuslahendust kasutatakse katsetes 4.1 ja 4.2, vt täpsemalt struktuurskeemilt joonisel 4.12. Alljärgnevalt on esitatud tabelis 4.7 katses kasutatud õhujaotajate nimistu ning lahendusele vastav põhimõtteline klassiruumi ventilatsiooni plaan.

Tabel 4.7 Horisontaalselt suunatud õhuvooluga düüstorude õhujaotuslahenduse seadmed [50]

Seadme tüüp	Toote markeering	Tootja	Kogus (tk)	Illustreering
Sissepuhke düüstoru	DSP-200-2x60-2	ETS NORD	4	
Väljatõmbe plafoon	DVS-200	ETS NORD	4	

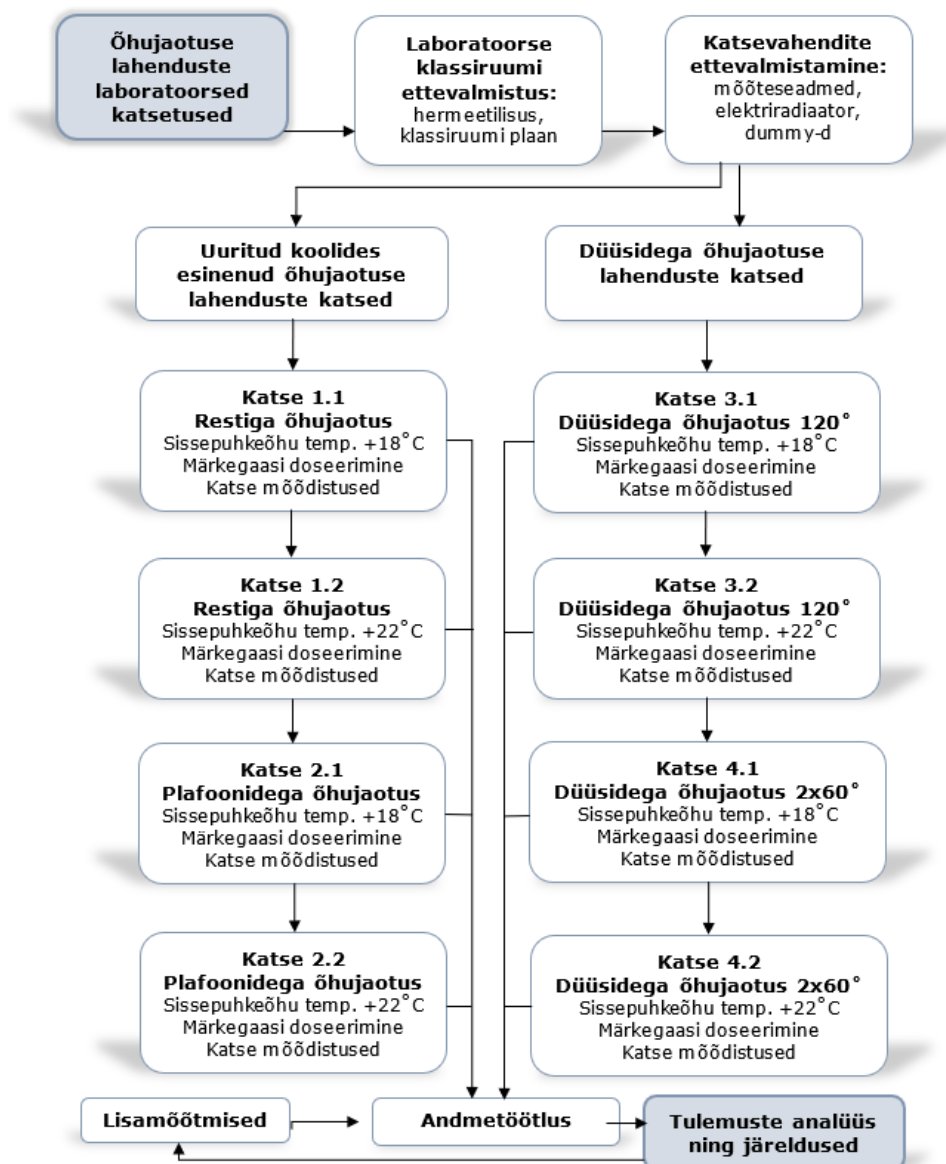


Joonis 4.11 Horisontaalselt suunatud õhuvooluga düüstorude õhujaotuslahenduse põhimõtteline plaan

4.6 Õhujaotuse lahenduste mõõtmiste kirjeldus

Laboratorsete mõõdistuste käigus uuriti kahe levinud klassiruumide õhujaotuse lahenduse ning kahe düüstorudega õhujaotuse tüüplahenduse toimivust õhuvahetuse efektiivsuse, lokaalsete õhuvahetus indeksite ja õhu liikumiskiiruse seisukohalt. Lahenduste toimivuse hindamisel kasutati kontsentratsiooni languse mitme punkti meetodit CO₂ märkegaasi abil. Samuti hinnati õhujaotuse käitumist kõikide lahenduste korral tossu abil, mida doseeriti sissepuhkekanalisse. Tossukatsete tulemused

jäädvustati videotena, millest mõningad staatilised väljalõiked on esitatud tulemuste peatükis. Kõik katsetatavad õhujaotussüsteemid põhinesid teoreetiliselt seguneval õhujaotusviisil, mis on peamine klassiruumides ja neid puudutavates normdokumentides käsitletud õhujaotusviis. Õhujaotuslahendusi puhul katsetati ka nende tundlikust sissepuhkeõhu temperatuuri suhtes, sooritades kõikide nelja süsteemi katseid kahel sissepuhke temperatuuril: ruumiõhust ligi 4°C madalamal temperatuuril ($t_{SP}\approx+18^{\circ}\text{C}$) ja ruumiõhu temperatuuri ligilähedasel või veidi madalamal temperatuuril ($t_{SP}\approx+22^{\circ}\text{C}$). Laboratoorsed katsed viidi läbi Ehituse Mäemaja, ehitusfüüsika ja sisekliimalabori õhujaotusruumis kuupäevadel 21.03.2022-06.05.2022. Katsete ajal oli labori keskmine siseõhu temperatuur ligikaudu 22°C . Järgnevalt on esitatud plokk skeemina joonisel 4.12 õhujaotuslahenduste laboratoorsete katsete protsessi kirjeldav struktuurskeem:



Joonis 4.12 Õhujaotuslahenduste katsete läbiviimise protsessi struktuurskeem

Antud töö laboratoorsetes katsemõõtmistes kasutatav CO₂ märkegaas meetod on levinud ruumide õhuvahetuse hindamiseks. CO₂ märkegaasil baseeruva mõõtmismetoodika eelisteks on gaasi suhteliselt odav hind ja hea kättesaadavus, samuti piisavalt täpsete mõõteseadmete olemasolu. Lisaks on CO₂ puhul tegemist inertse gaasiga, mis on madalatel kontsentratsioonidel (kuni 5000 ppm-i) inimestele ohutu ning mida esineb loomulikult kujul väli- ja siseõhus. Süsihappegaasi eeliseks on ka tema suhteliselt sarnane tihedus võrreldes õhuga, mis võimaldab märkegaasi efektiivselt õhuga segada [15]. CO₂ märkegaasi kasutamise kitsaskohaks on selle suhteliselt kõrge kontsentratsioon välisõhus – ligikaudu 400 ppm-i, mis varieerub vastavalt asukohale, ilmastiku oludele, liiklustihendusele jms. Taustkontsentratsiooni muutumise ja mõõteseadmete vea mõju vähendamiseks võetakse antud töös märkegaasi absoluutseks algkontsentratsiooniks vastava mõõteseadme mõõtevahemiku ülemine piir – 5000 ppm-i [43]. Katsete lõppkontsentratsiooniks arvestatakse 1000 ppm-i.

Kontsentratsiooni languse meetodi rakendamiseks tuleb tagada mõõdetavas ruumis konstante õhuvahetus ning minimeerida katseruumi õhuvahetus ümbritsevate keskkondadega. Viimase tingimuse tagamiseks sulgeti õhutihedalt katses mitte-kasutatavad ventilatsioonitorustike avad ning teibiti õhutihedalt kõik ruumi välispiirete ebatihedused (klaaspaneelide liitekohad, avad laes jms). Märkegaasi doseeriti enne katse algust ruumi läbi ventiili ühest CO₂ balloonist. Vastavalt standardile EVS-EN ISO 12569:2017 [40] võib märkegaasi doseerida ühes punktist, juhul kui katse alguseks tagatakse märkegaasi ühtlane jaotus kogu ruumi ulatuses. Märkegaasi ja ruumiõhu segamiseks kasutati katses kahte ventilaatorit, mille abil segati doseerimise käigus ruumiõhku. Ruumis valitseva ühtlase kontsentratsiooni kontrollimiseks võrreldi enne katse algust kolme ruumis ühtlaselt hajutatud CO₂ logeri näitu, ühtlaste tasemete korral väljuti katseruumist ning alustati mõõtmistega. Katse käigus ventilaatoritega õhku ei segatud.

Katsete käigus mõõdeti süsihappegaasi kontsentratsiooni ruumis 23 CO₂ logeriga. Viisteist mõõteseadet paiknesid ühtlaselt jaotatult nn õpilaste tsoonis kõrgusel 1,1 meetrit, kaheksa seadet ruumi perimeetril kõrgusel 1,1 meetrit, ühe anduriga mõõdeti kontsentratsiooni sissepuhkeõhu magistraalkanalisis ning kahe logeritega salvestati CO₂ kontsentratsiooni väljatõmbekanalisis. Süsihappegaasi logerite mõõteintervalliks seadistati 10 sekundit. Lisaks CO₂ kontsentratsioonidele mõõdeti iga õhujaotuslahenduse puhul õhu liikumiskiirust viibimistsoonis kõrgusel 1,1 meetrit. Kasutusel oli 6 sondi ehk kokku mõõdeti ühe katse käigus ruumiga risti olevad 6 punkti üheksal korral. Õhu liikumiskiirus fikseeriti ka ventilatsioonisüsteemi mittetöötamisel nii vabasoojustega kui ilma, et hinnata nendes olukordades ruumis õhuvoolude liikumist.

Õhu liikumiskiiruse mõõtmiseks kasutati vastavalt ISO 7730 [53] meetodikale sondidega anemomeetrit, millega mõõdeti õhu liikumiskiiruseid ühtlaselt kogu ruumi piires kokku 54 ruumipunktis. Õhu liikumiskiiruste hindamisel lähtuti VV määrusest nr. 84 [25], mille järgselt peab õhu liikumiskiirus kooliruumis olema väiksem kui 0,21 (m/s). Alternatiivselt on standardi EVS-EN 16798-1:2019 kohaselt kütteperioodil viibimistsoonis maksimaalne õhu liikumiskiirus 0,16 m/s [19]. Anemomeetrite mõõtepunktid ruumis on esitatud joonisel 4.5. Ruumis paiknevate CO₂ mõõteseadmete (v.a torustikes paiknevad seadmed) asukohad on tähistatud joonisel 4.4.

4.7 Õhuvahetuse efektiivsuse määramine

Laboratoorsete katsete eesmärgiks oli hinnata õhujaotuslahenduste toimivust õhuvahetuse efektiivsuse seisukohast. Selleks määrati katseliselt õhujaotuslahenduste õhuvahetuse efektiivsus ning mõõtepunktide K-1...K-15 ning P-1...P-8 lokaalsed õhuvahetuse indeksid.

Õhuvahetust indikeerivate parameetrite leidmisel kasutati kontsentratsiooni languse meetodit lokaalsete õhu keskmiste eluigade arvutamiseks vastavalt standardile ISO 16000:8 [41]. Ühe mõõtepunkti lokaalse õhu keskmise eluea leidmiseks kujutati mõõtepunktis mõõdetud CO₂ kontsentratsioonide naturaallogaritmilised väärtused graafikul sõltuvuses ajast. Ühtlase õhuvahetuse korral langeb mõõtmiste käigus süsihappegaasi kontsentratsioon ruumis eksponentsiaalselt ning seda ilmestab graafikul lineaarne seos ehk negatiivse tõusuga sirge. Avaldades tekkinud joone võrrandi kujul $y = a \times \exp(-b \times x)$, saab Euleri arvu astendaja kordaja b absoluutväärtuse võrdsustada mõõtepunkti lokaalse õhuvahetuse kordarvuna λ , 1/h. Vastava punkti lokaalne õhu keskmine eluiga avaldub valemi (4.1) kohaselt pöörväärtusena lokaalsest õhuvahetuse kordarvust. [41]

$$\bar{\tau}_p = \frac{1}{\lambda} \quad (4.1)$$

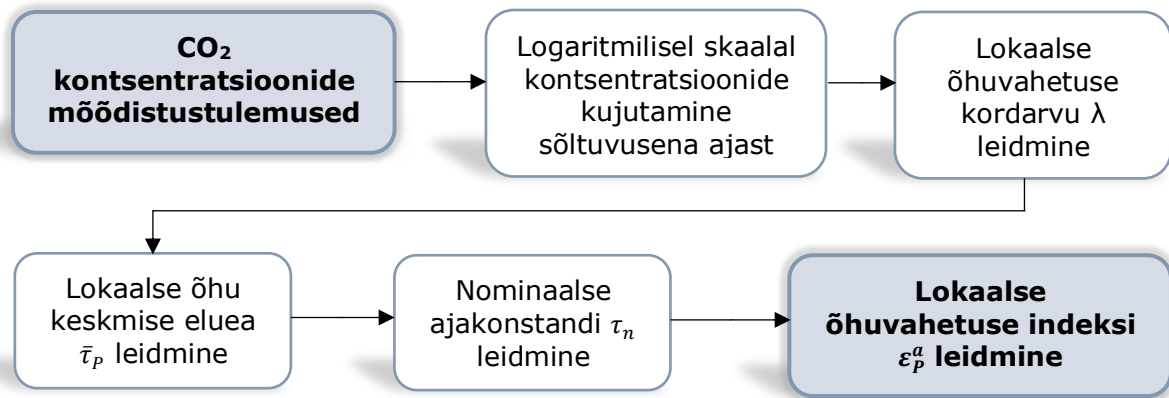
kus $\bar{\tau}_p$ – lokaalne õhu keskmine eluiga, h;

λ – lokaalne õhuvahetuse kordarv, 1/h.

Nominaalse ajakonstandi määramiseks rakendati eelmises lõigus esitatud kontsentratsiooni languse meetodit väljatõmbe õhule. Iga mõõtepunkti lokaalne õhuvahetuse indeks ε_p^g arvutati valemit (3.3) kasutades. Ruumi õhuvahetuse efektiivsuse määramiseks kasutati analoogset lahenduskaiku, kui lokaalsete õhuvahetuse indeksite leidmiseks. Lokaalsete õhu keskmiste eluigade asemel leiti

ruumiõhu keskmine eluiga $\langle \bar{\tau} \rangle$, mille abil määrati ruumi õhuvahetuse efektiivsus valemi (3.2) abil. [9]

Alljärgnevalt on plokk skeemina esitatud põhimõtteline lahenduskäik mõõdetud kontsentratsioonidest lokaalsete õhuvahetuse indeksite leidmiseks.



Joonis 4.13 Lahenduskäik mõõdetud kontsentratsioonidest lokaalsete õhuvahetuse indeksite leidmiseks

4.8 Magistritöö limitatsioonid

Antud peatükis on esitatud meetodika ja katsete läbiviimisega seotud limitatsioonid. Alljärgnevalt esitatud limitatsioonidega tuleks arvestada töö tulemuste tõlgendamisel.

- Auditi raames uuritud koolides ei viidud läbi süstemaatilisi õhu liikumiskiiruse ega müra mõõdistusi. Koolides kogutud andmed ei pruugi olla lõplikud ning vastata reaalsele olukorrale;
- Õhuvahetuse efektiivsus annab hinnangu ruumi õhujaotuse toimivusele, kuid ei arvesta otseselt saasteainete leviku intensiivsuse ja levimise suunaga ruumis;
- Iga laboratoorse kontsentratsiooni languse katse korral ei suudetud tagada võrdväärset CO₂ algkontsentratsiooni ega täielikult segunenud ruumiõhku;
- Õhu liikumiskiiruseid kui ka CO₂ kontsentratsioone mõõdeti laboris vaid 1,1 meetri kõrgusel tasapinnal põrandast;
- Laboratoorsete õhujaotuslahenduste katsete tulemused on otseselt seotud kasutatud õhujaotajatega, toodete asendamisel, võidakse saada oluliselt erinevaid tulemusi;
- Laboratoorsete katsete tulemused on iseloomulikud katsete läbiviimiseks kasutatud õhujaotusruumile, samuti iga konkreetse katse korral valitsenud tingimustele.

5. TULEMUSED JA ANALÜÜS

Antud peatükis esitatakse töö tulemused ning nende analüüs. Sisuliselt jaotub tulemuste peatükk kaheks. Esimeses alapeatükis antakse hinnang ventilatsioonиаудитис [10] uuritud klassiruumide teenindavate ventilatsioonisüsteemide toimivusele summaarsete õhuvooluhulkade mõõtmistulemuste põhjal ning hinnatakse klassiruumide õhukvaliteeti kogutud CO₂ kontsentratsioonide alusel. Lisaks esitatakse koolides paikvaatluste põhjal ventilatsioonisüsteemide puudutavad tähelepanekud. Teises ja kolmandas alapeatükis esitatakse vastavalt uuritud koolides esinenud ja düüstorudel põhinevate õhujaotuslahenduste laboratoorsete katsete tulemused ja analüüs.

5.1 Klassiruumide õhuvahetuse olemasolev olukord

Selles alapeatükis esitatakse koolide ventilatsioonisüsteemide ja õhujaotuslahenduste kaardistamise tulemused. Tulemuste juures tuleb märkida, et uuritud viieteistkümne kooli ventilatsioonisüsteemid on projekteeritud ja ehitatud erinevatel aegadel, lähtudes mitmetest normidest ja standarditest [10]. Osad koolihooned on muinsuskaitsealased mälestised, millede ventilatsioonisüsteemide rajamine, renoveerimine või laiendamine eeldab erikokkuleppeid ning -lahendusi. Kuigi enamasti ilmnes kõikide koolide puhul spetsiifilisi probleeme, esitatakse antud töös üldine ülevaade koolide ventilatsioonisüsteemide seisukorrast. Lisaks tuleb mainida, et paikvaatlused ja mõõtmised toimusid koolides Covid-19 pandeemia ajal, kuid auditeerimisperiodil piiranguid koolitööle kehtestatud ei olnud. Sellest hoolimata toimus mõningates koolides õppetöö osaliselt distantsõppel, mistõttu ei viibinud kohati klassiruumides õppetöö ajal projektis ette nähtul hulgal õpilasi.

5.1.1 Ventilatsioonisüsteemide summaarsed õhuvooluhulgad

Klassiruumide teenindavate ventilatsioonisüsteemide töö hindamiseks teostati seadmetele summaarsete õhuvooluhulkade kontrollmõõdistused (vt täpsemalt 4.1.1). Kuna mõõdetud ventilatsioonisüsteemid on projekteeritud erinevatele õhuhulkadele, arvutati süsteemide võrdlemiseks iga süsteemi kohta mõõdetud ja projekteeritud õhuvooluhulga suhe, mis on avaldatud protsentides. Tulemuse 100% korral töötab süsteem projekteeritud õhuvooluhulgal. Projekteeritud õhuvooluhulgad pärinevad kättesaadavatel dokumentidel (projektid, teostusjoonised, mõõteprotokollid jms). [10]

Alljärgnevalt on esitatud arvutatud suhtarvud süsteemide sissepuhke (joonis 5.1) ja väljatõmbe (joonise 5.2) õhuvooluhulkadele. Rohelise tulbana on kujutatud süsteemid, mille puhul mõõdetud õhuvooluhulk vastas või ületas projektiga määratud väärtust.

Kollasega süsteemid, mille korral mõõdetud õhuvooluhulk ei küündinud projektijärgse tasemeni, kuid moodustas sellest vähemalt 80%. Punasega süsteemid, mille mõõdetud väärtused jäid rohkem kui 20% võrra alla projekteritud väärtustele ehk moodustasid ette nähtud õhuhulgast kuni 80%. Süsteemide toimivuse protsendiline jaotamine on hinnanguline, kuid põhineb eeldataval mõõdistuse ning mõõteseadmete mõõtemääramatustel [10].



Joonis 5.1 Mõõdetud sissepuhke õhuvooluhulkade suhe projektijärgsesse väärtusesse, koolide ja ventilatsioonisüsteemide kaupa



Joonis 5.2 Mõõdetud väljatõmbe õhuvooluhulkade suhe projektijärgsesse väärtusesse, koolide ja ventilatsioonisüsteemide kaupa

Möödistatud süsteemidest 19% puhul oli sissepuhkel tagatud projektikohane õhuvooluhulk, 31% seadmetest jäi see veidi alla (suhe >80%) ning 50% seadmetest oluliselt alla (suhe <80%) projektijärgse õhuvooluhulga. Seadmetel, mis töötasid oluliselt madalamal ette nähtud väärtustest, oli möödistatud ja projekteeritud sissepuhke õhuvooluhulga mediaansuhe 57%, mis näitab, et oluline hulk seadmetest töötas õhuhulgal, mis moodustas ligi poole projektiga ette nähtud õhuhulgast. Ühes koolis olid kasutusel klassipõhised ventilatsiooniseadmed, mis liigse müra ja tõmbuse tekkimise tõttu olid alaliselt välja lülitatud, mistõttu neid antud möödistustulemustes ei kajastatud. Sissepuhkel töötas neli seadet oluliselt üle projekteeritud normi (suhe >110%). Eeldusel, et kõrgema õhuvooluhulga juures on tagatud ette nähtud sissepuhkeõhu temperatuur ja nõuded mürale, on õhuhulkade tõstmine sobiv meede, arvestades, et nendes koolides oli projekteeritud õhuvooluhulk inimese kohta alla 8 l/s.

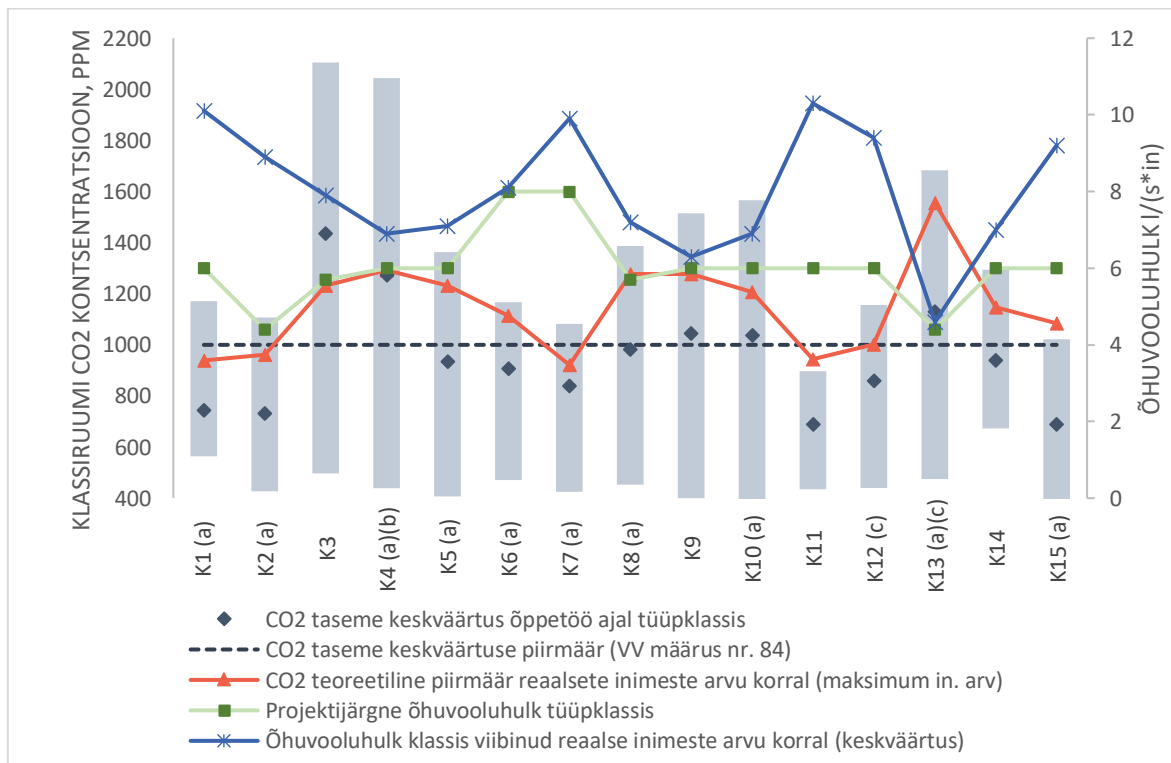
Väljatõmbel oli 21% süsteemidest tagatud projektikohane õhuvooluhulk, 33% seadmetest jäi see veidi alla (suhe >80%) ning 45% seadmetest oluliselt alla (suhe <80%) projektijärgse õhuvooluhulga. Üldiselt valitses sissepuhke ja väljatõmbe möödistatud õhuvooluhulkade vahel seadmete lõikes positiivne korrelatsioon. Üksikute seadmete puhul olid suured erinevused sissepuhke ja väljatõmbe väärtuste vahel tingitud ummistusega vastavas kanalis. [10]

5.1.2 Hinnang tüüpiliste klassiruumide õhukvaliteedile

Süsihappegaasi kontsentratsioonide mõõtmiste põhjal klassiruumide õhukvaliteedi hindamiseks valiti iga kooli puhul üks tüüpilise suurusega klass, milles oli mõõtmiste ajal kohal võimalikult palju õpilasi, kus avati aknaid võimalikult vähe ning kus tabelid õpetajate poolt olid piisavas mahus täidetud. Alljärgnevalt joonisel 5.3 on esitatud õppetöö ajal tüüpilistes klassiruumides mõõdetud CO₂ absoluutkontsentratsioonide miinimum-, maksimum- ja mediaanväärtused. Samal joonisel on kujutatud ka projektijärgne ning reaalselt kohal olevate õpilaste hulgale kohandatud õhuvooluhulk inimese kohta. Joonisel 5.4 on toodud välja samas klassis paiknenud kahe logeri näitude vahe miinimum-, maksimum- ja keskvärtus. Logeri näitudest on eemaldatud kontsentratsioonide hetkelised järsud tõusud, mis enamasti olid ilmselt tingitud logerile peale puhumisest või muul moel sekkumisest.

Graafikult 5.3 ilmneb, et analüüsitud viieteistkümnepäevase tüüpklassi puhul tõusis CO₂ kontsentratsioon õppetöö ajal üle tuhande ppm-i 14 klassis. Kümnepäevase klassi CO₂ keskmine tase püsis õppetöö ajal alla 1000 ppm-i, mille tulemusena täidetakse VV määruse nr. 84 [25] nõuet. Samas tuleb tulemuste puhul arvestada, et valdavalt tuulutati vahetundides klasse ning kohati olid aknad avatud ka tunni ajal. Oluliselt mõjutas mõõdetud CO₂ kontsentratsioonide taset asjaolu, et kõikides klassides viibis keskmiselt

kohal vähem inimesi, kui sinna oli projektiga ette nähtud. Seetõttu oli teoreetiline värske õhu hulk inimese kohta kuni 2/3 võrra kõrgem projektikohasest tasemest. Projektijärgne õhuvooluhulk inimese kohta on kujutatud graafikul 5.3 roheka joonega, reaalne õhuvooluhulk inimese kohta keskmise inimeste arvu juures vastavalt sinaka joonega. Tuleb arvestada, et õhuvooluhulkade erinevuse tõttu on kõikide tüüpklasside analüüsitud lugemid mõnevõrra madalamad, võrreldes olukorraga, kus klassis viibiks maksimaalne lubatud arv õpilasi. Tulemuste tõlgendamisel tuleb lisaks arvesse võtta, et valdavalt ei töötanud ventilatsiooniseadmed projekteeritud õhuvooluhulkadega, kuid kuna enamik süsteeme oli tasakaalust väljas ning klasside põhiselt õhuvooluhulkasid ei mõõdetud, ei ole võimalik hinnata, kui üle- või alaventileeritud analüüsitud tüüpklassid võrreldes projektikohaste väärtustega olid. Graafikul 5.3 on esitatud veel analüüsitud tundidel realselt ruumis viibinud maksimaalsele inimeste hulgale vastava õhuvooluhulga korral saavutatav teoreetiline CO₂ tasemete piirmäär. Tulemustest selgub, et 13 klassi puhul ületas mõõdetud maksimaalne kontsentratsioon teoreetilist piirmäära. See võib olla tingitud ventilatsioonisüsteemide töötamisest madalamatel kiirustel, kehvast õhujaotusest tüüpklassis, sissepuhkeelementide täielikust või osalisest sulgemisest vms.

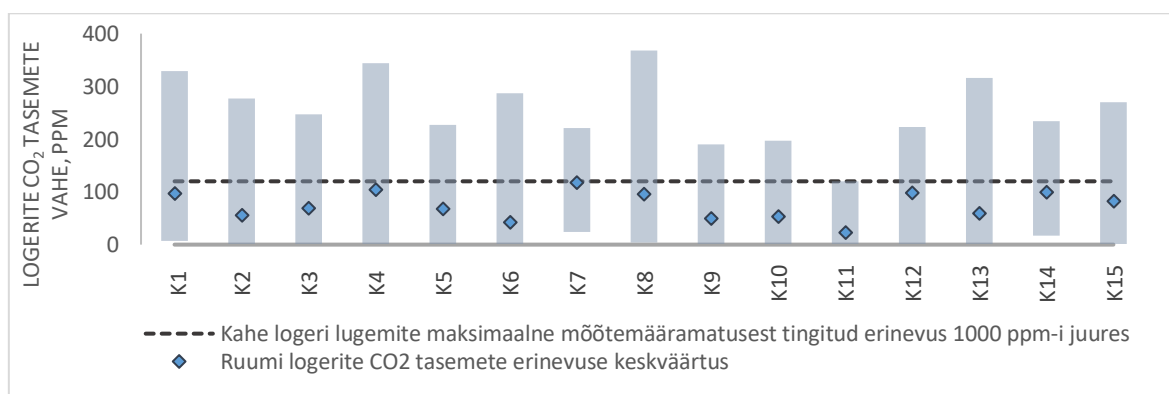


Joonis 5.3 Tüüpklasside mõõdetud CO₂ kontsentratsioonide miinimum-, maksimum- ja keskväärtsused. Lisaks projektijärgne ning reaalne õhuvooluhulk inimese kohta. (a) – Aknad vahetunnil avatud; (b) – Ventilatsiooniseadmed ei ole töös; (c) – Aknad kohati tunni ajal avatud

Normdokumentides esitatud õhuvooluhulgad, mille puhul saavutatakse teoreetiliselt nõuetelevastav siseõhu kvaliteet, on arvestatud üldiselt täielikult seguneva

õhujaotusviisiga. Antud õhujaotusviisi korral peaks õhukvaliteet igas ruumi punktis olema võrdne ehk klassiruumidesse paigutatud kahe logeri näidud peaksid olema võrdsed. Klassiruumidesse paigaldatud logerite puhul võib kahe seadme kombineeritud mõõtemääramatuseks 1000 ppm-i taseme juures arvestada kuni 120 ppm-i. Sellest tasemest oluliselt kõrgem erinevus viitab asjaolule, et ruumis ei ole tegemist täielikult seguneva õhujaotusega ning õhukvaliteet ruumi lõikes võib oluliselt erineda.

Joonisel 5.4 on kujutatud tüüpklasside kahe logeri vaheliste kontsentratsioonide miinimum-, maksimum- ja keskvaärtused. Lisaks on katkendjoonega illustreeritud mõõtevea piir 120 ppm-i. Neljateistkümne tüüpklassi puhul 15st ületab logerite näitude maksimaalne erinevus mõõtevea piiri, ületades üldiselt 200 ppm-i taseme ning mõningatel juhtudel ka 300 ppm-i piiri. Kontsentratsioonide keskmine erinevus on kuuel juhul 100 ppm-i ligidal viidates valdavalt suhteliselt suurele kontsentratsioonide erinevusele ruumis. Tulemustest selgub, et üks tüüpklass, mille puhul kontsentratsioonide absoluuttasemed kui ka nende erinevus jäävad lubatud piirnormidesse, mille põhjal võib eeldada, et antud klassis on hästi toimiv õhujaotus. Antud klassis on sissepuhe lahendatud ruumi lakke ühtlaselt paigaldatud sissepuhkeplafoonidega, väljatõmme toimub laeplafoonidega klassi siseseina äärest. Neljal juhul erinevad sama klassi logerite hetkeväärtused üle 300 ppm-i. Esimesel juhul antakse sissepuhkeõhk ruumi karniisis paiknevast restist ning kõrgema näiduga andur paiknes karniisi all, kus tekkis ilmselt osaliselt seisva õhu tsoon. Teises tüüpklassis ei töötanud lokaalsed seadmed ning ruumi õhuvahetus sisuliselt puudus. Kolmandal juhul anti puhast õhku ruumi laeplafoonidest, kusjuures ruumi lagede kõrgus oli ligikaudu 4 meetrit ning võis tekkida olukord, kus värske õhk ei jõudnud ühtlaselt kõikjale ruumi. Neljandal juhul anti värske õhk ruumi siseseinas paiknevast restist, mille tulemusena tõenäoliselt ei segune ruumiõhk täielikult ja tekivad osaliselt seisva õhuga tsoonid.



Joonis 5.4 Tüüpklasside logerite CO₂ kontsentratsioonide lugemite väärtuste minimaalne, maksimaalne ja keskmine erinevus

5.1.3 Paikvaatluste tulemused

Antud alapeatükis esitatakse ülevaade koolides läbiviidud paikvaatlustel tekkinud tähelepanekutest. Peamiselt käsitletakse järgnevaid teemavaldkondi: klassiruumide õhujaotus, kooliruumide kasutusotstarbe muutmine ja ventilatsiooniseadmed.

Klassiruumide õhujaotus

Klassiruumides sissepuhkeõhu jaotamiseks oli valimisse kuulunud koolides kasutatud mitmeid lahendusi. Kuuel juhul oli kasutatud sissepuhkeresti(sid) siseseinal/karniisis, neljas koolis olid valdavalt laes hajutatult sissepuhkeplafoonid või -difuusorid, neljal juhul erinevatel kujudel grupeeritud plafoonid ning ühes koolis olid valdavalt kasutusel klassipõhised seadmed, vahel erinesid õhujaotusskeemid ehituselt ka sama kooli erinevates klassiruumides. Üldiselt võis õhujaotuslahendused jagada kahte gruppi: lahendused, kus värske õhk anti klassi laest ühtlaselt hajutatult (nt laediffuuserite või plafoonide abil) ning klassid, kus sissepuhete toimus klassi ühest tsoonist üldiselt seinal paiknevast restist või plafoonidest. Hajutatud sissepuhete puhul üldiselt probleeme ei täheldatud, mõnel juhul oli kooli personal omavoliliselt plafoone kinni keeranud ning seeläbi klassi õhuvahetust piiranud. Lahenduste puhul, kus kogu värske õhk anti ruumi ühest tsoonist, võis täheldada sageli viibimistsoonis lubatust kiiremat ning häirivat õhu liikumist. Selliste olukordade puhul oli mitmel juhul plafoonide avatust kinni keeratud või halvemal juhul avad kinni teibitud või muul moel kaetud. Mitmes koolis oli ventilatsioonit tingitud ebamugava sisekliima tõttu õpetajate palvel tõstetult tsentraalselt sissepuhkeõhu temperatuuri. Mitmel juhul oli sissepuhkeõhu levik ruumi takistatud mööbli või muude esemetega. Joonisel 5.5 esitatud piltidel on toodud välja mõningad näited probleemsetest olukordadest. [10]



Joonis 5.5 Vasakul sissepuhkerestid kaetud projektori ekraaniga, paremal sissepuhkeplafoonid suletud ja kaetud teibiga [10]

Kõik eelnimetatud probleemid vähendavad ruumides efektiivset õhuvahetust ning tingivad klassides kehvema õhukvaliteedi. Ebasoodsate olukordade vältimiseks on oluline klassiruumide õhujaotuse projekteerimisel ja väljaehitamisel panna rõhku

piisava ja ühtlase õhuvahetuse efektiivsuse saavutamisele ning ruumi sisekliimat kahjustavate aspektide (nt tõmbus, müra) vältimisele.

Kasutusotstarbe muutmine

Mitmetes koolides esines klassiruumide, mille algotstarve ei olnud õpperuum. Näiteks oli õppeklasse moodustatud endistest kabinetidest või panipaikadest. Samuti oli vaheseinte nihutamise muudetud klasside suuruseid. Enamasti aga ei olnud ruumide ventileerimist muudatustele vastavalt kohandatud. Nendes ruumides oli reaalne õhuvahetus õpilase kohta oluliselt madalam soovituslikest suurustest, mistõttu tõusis CO₂ tase neis ruumides lubatust oluliselt kõrgemaks, kohati üle 3000 ppm-i. [10]

Klassipõhised ventilatsiooniseadmed

Paaril juhul oli koolides üldiselt või lokaalselt kasutusel klassipõhised ventilatsiooniseadmed. Nende puhul oli sageli probleemiks kõrge müratase (iseegi normaalses töörežiimis), agregaadil lähistel õhujaotusest tingitud suurest õhu liikumiskiirusest põhjustatud tõmbus ning puudulikust õhujaotusest tingitud madal õhuvahetuse efektiivsus. Eelnimetatud põhjustel ning asjaolul, et üldiselt oli neid seadmeid võimalik hõlpsasti õpetajatel välja lülitada, ei olnud need seadmed üldiselt töös, mistõttu kannatab klassiruumide õhukvaliteet. Kohati tõusis CO₂ tase klassipõhiste seadmetega varustatud klassiruumides üle 4000 ppm-i. [10]

5.2 Uuritud koolides esinenud tüüpiliste õhujaotuslahenduste toimivus

Antud alapeatükis esitatakse uuritud Tallinna koolides esinenud kahe levinud õhujaotuslahenduse laboratoorsete katsete tulemused ja nende analüüs. Iga õhujaotuslahenduse puhul esitatakse katsete läbiviimise tingimused, katseliselt määratud õhuvahetuse efektiivsus, lokaalsete õhuvahetuse indeksite väärtused ning mõõdetud õhu liikumiskiirused. Süsihappegaasi kontsentratsioonide ja õhu liikumiskiiruste mõõtepunktid asusid kõik kõrgusel 1,1 meetrit põrandapinnast.

5.2.1 Ühe sissepuhkerestiga õhujaotuslahendus

Selle õhujaotuslahenduse korral anti kogu värske õhk ruumi läbi ühe klassiruumi pikemas seinas paiknenud tasanduskastiga sissepuhkeresti, saastunud õhk eemaldati sama seina teises otsas paikneva väljatõmberestiga. Täpsemalt on õhujaotuslahendust kirjeldatud punktis 4.4.1. Ühe sissepuhkerestiga õhujaotuslahendust katsetati kahel erineval sissepuhkeõhu temperatuuril: esimesel juhul hoiti sissepuhkeõhu temperatuuri

ligi 4 °C ($\Delta t \approx 4^\circ\text{C}$) võrra madalamal ruumiõhu temperatuurist (katse 1.1) ning teisel juhul prooviti tagada isothermiline olukord ($\Delta t \approx 0^\circ\text{C}$), kus sissepuhkeõhu ja ruumiõhu temperatuurid olid võrdsed (katse 1.2). Tabelis 5.1 on esitatud katsete parameetrid ning õhuvahetuse efektiivsuse tulemused.

Tabel 5.1 Sissepuhkerestiga õhujaotuslahenduse katseparameetrid ning õhuvahetuse efektiivsus

Katse number (temp. erinevus)	1.1 ($\Delta t \approx 4^\circ\text{C}$)	1.2 ($\Delta t \approx 0^\circ\text{C}$)
Sissepuhkeõhu temperatuur, °C	18,5	22,0
Ruumiõhu temperatuur, °C	22,8	22,7
Õhuvooluhulk, l/s	240	240
Nominaalne ajakonstant, h	0,226	0,217
Õhu keskmine eluiga, h	0,221	0,198
Korrelatsiooni kordaja R^2	0,9986	0,9954
Õhuvahetuse efektiivsus ε_a , %	51	54

Ühe sissepuhkerestiga õhujaotuslahenduse korral saadi mõõdetud andmete puhul õhuvahetuse efektiivsuseks katse 1.1 ($\Delta t \approx 4^\circ\text{C}$) puhul 51% ja katse 1.2 ($\Delta t \approx 0^\circ\text{C}$) puhul 55%. Teoreetiliselt on ideaalse seguneva õhuvahetuse korral õhuvahetuse efektiivsuse väärtuseks 50%, seega on mõlemal sissepuhke temperatuuril sissepuhkerestiga lahenduse juures tagatud ideaalsest segunevast õhuvahetusest veidi parem õhuvahetuse efektiivsus. Katseandmete töötlemisel moodustasid katsete 1.1 ja 1.2 puhul CO₂ kontsentratsioonide langused logaritmilisel skaalal sirged ehk tegemist oli eksponentsiaalse langusega, mida eeldas kontsentratsiooni languse arvutusmeetod. Sirgete moodustumist kinnitavad ka võrdluses teoreetilise lähendusjoonega arvatud tugevalt positiivsed korrelatsioonikordajad R^2 , mis katsete 1.1 ja 1.2 korral olid vastavalt 0,9986 ja 0,9954.

Lisaks ruumipõhisele õhuvahetuse efektiivsusele määrati ruumi viibimistsoonis (tähisega K) 15 punkti ja ruumi perimeetril (tähisega P) 8 punkti lokaalsed õhuvahetuse indeksid. Mõlema katse lõikes oli kõikide mõõtepunktide korral minimaalne korrelatsioonikordaja R^2 0,9896, mis viitab taas tugevalt positiivsele sõltuvusele teoreetilise lähendusjoonega. Katsete 1.1 ja 1.2 puhul oli vahe viibimistsoonis määratud kõrgeima ning madalaima ε_p^a vahel vastavalt 15% ja 22%, mis tähendab, et mõlema katse korral varieerusid lokaalsed õhuvahetuse indeksid oluliselt. Mõlema katse kõikide punktide mõõtmistulemuste põhjal arvatud ε_p^a numbrilised väärtused on esitatud joonisel 5.7. Joonisel 5.8 on visualiseeritud vastavate indeksite jaotus ruumis väljana, kuhu on märgitud plaaniliselt viibimistsoon.

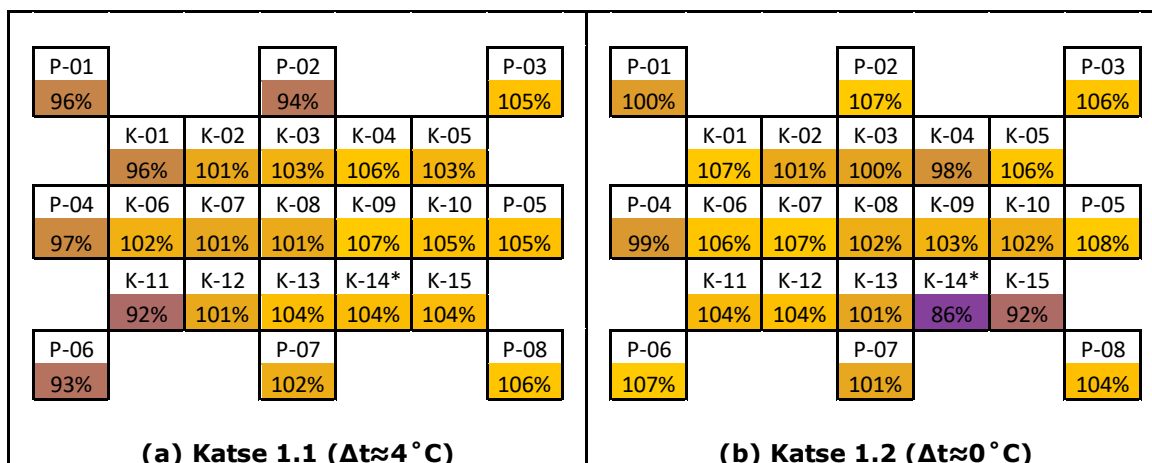
Üldjuhul tagatakse võrreldes isothermilise õhujaotusega ruumiõhust madalama sissepuhkeõhu temperatuuri puhul parem segunemine. Seega oli mõnevõrra üllatav, et

laboratoorsete katsete tulemusena saavutati katse 1.2 ($\Delta t \approx 0^\circ\text{C}$) korral võrreldes katsega 1.1 ($\Delta t \approx 4^\circ\text{C}$) 4% võrra parem õhuvahetuse efektiivsus. Katsete visuaalsel hindamisel tossuga paistis, et madalama sissepuhkeõhu temperatuuri korral langes sissepuhkeõhk enam sissepuhke tsooni põranda pinnale ning paiskus vähem ruumi tagumisse serva. Isotermse sissepuhkeõhu temperatuuriga katse 1.2 puhul paistis tossukatsega, et värske õhk paiskus võrreldes katsega 1.1 paremini mööda seinu ruumi laiali. Joonisel 5.6 on esitatud tulemusi ilmestavad kuvatõmmised tossukatsetest.

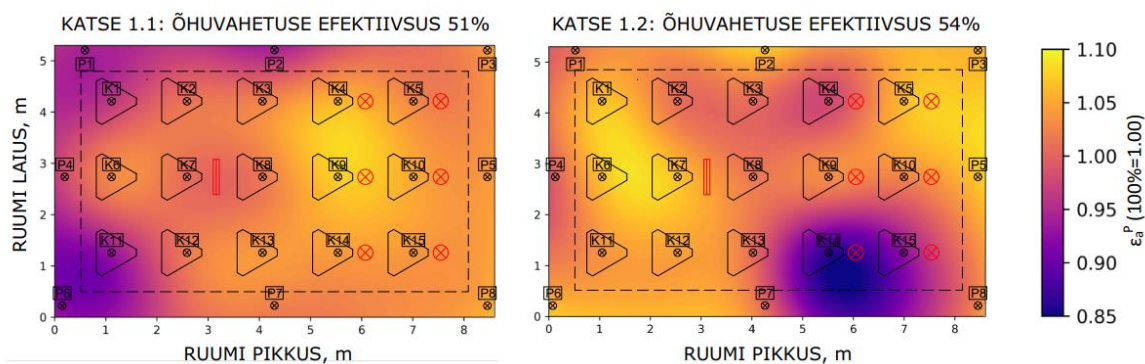


Joonis 5.6 Katsete 1.1 ($\Delta t \approx 4^\circ\text{C}$) (vasakul) ja 1.2 ($\Delta t \approx 0^\circ\text{C}$) (paremal) tossukatsete kuvatõmmised

Tossukatsel visuaalset hinnangut kinnitavad ka joonisel 5.7 esitatud lokaalsed õhuvahetuse indeksid, mille puhul on näha, et katse 1.1 korral saavutatakse parem lokaalne õhuvahetus ruumi sissepuhke poolel ning kehvem väljatõmbe tsoonis. Katse 1.2 juures ei ole võimalik täheldada ε_p^g väärtustes kindlat trendi, vaid pigem on kõikjal ruumis tagatud ühtlane lokaalne õhuvahetus. Katse 1.2 korral eristuvad sissepuhke tsoonis paiknevad punktid K-14 ja K-15, mille lokaalsed õhuvahetuse indeksid on oluliselt madalamad ümbritsevate punktide vastavatest väärtustest. Kuna katse 1.2 käigus punkti K-14 loger tõrkus, võis see põhjustada selle punkti ε_p^g väärtuse olulist erinevust ruumi üldisest tasemest. Kuigi katsete 1.1 ja 1.2 tulemused mõningal määral varieeruvad, võib väita, et mõlemal juhul tagati ruumis tervikuna ideaalsele segunevale õhujaotusele vastavast õhuvahetuse efektiivsusest pisut paremad tulemused. Lisaks ei omanud antud õhujaotuse korral sissepuhkeõhu temperatuuri tõstmine ruumiõhu temperatuurini negatiivset mõju õhuvahetuse efektiivsusele.

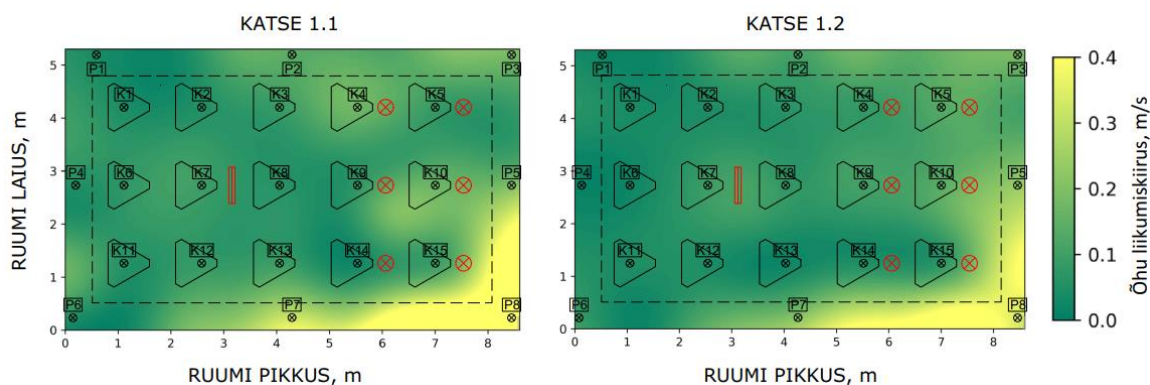


Joonis 5.7 Katsete 1.1 (a) ja 1.2 (b) lokaalsete õhuvahetuse indeksite tulemused



Joonis 5.8 Katsete 1.1 ($\Delta t \approx 4^\circ\text{C}$) ja 1.2 ($\Delta t \approx 0^\circ\text{C}$) lokaalsete õhuvahetuse indeksite jaotus ruumis väljana

Ühe sissepuhkerestiga õhujaotuse korral mõõdeti kahe sissepuhkeõhu temperatuuri puhul antud õhujaotuslahendusele vastavaid õhu liikumiskiiruseid ruumis 54 punktis ühtlasel kõrgusel 1,1 meetrit põrandapinnast. Täpsemalt on õhu liikumiskiiruste mõõtmismetoodikat käsitletud alapeatükis 4.6. Madalama sissepuhkeõhu temperatuuriga katse 1.1 ($\Delta t \approx 4^\circ\text{C}$) puhul oli mõõtmistulemuste järgi viibimistsoonis kõrgusel 1,1 meetrit maksimaalne õhu liikumiskiirus 0,20 m/s, katse 1.2 ($\Delta t \approx 0^\circ\text{C}$) korral saadi vastavaks väärtuseks 0,17 m/s. Mõlema katse korral jäi õhu liikumiskiirus viibimistsoonis alla määrusega nr. 84 [25] kehtestatud piiri $<0,21$ m/s. Maksimaalsed õhu liikumiskiirused sissepuhkerestiga lahenduse juures ilmnesid ootuslikult vastasseina ääres, kus mõõdetud maksimaalseks kiiruseks oli katsete 1.1 ja 1.2 puhul vastavalt 0,65 m/s ja 0,55 m/s. Seega on oht, et vahetult viibimistsooni piiril on oht tõmbuse tekkeks ning sellest tulenevalt antud tsoonis soojusliku mugavuse vähenemiseks. Katsete 1.1 ja 1.2 käigus mõõdetud õhu liikumiskiirused on esitatud tasapinnalise väljana kõrgusel 1,1 meetrit põrandast joonisel 5.9.



Joonis 5.9 Mõõdetud õhu liikumiskiiruste väljad katsete 1.1 ($\Delta t \approx 4^\circ\text{C}$) ja 1.2 ($\Delta t \approx 0^\circ\text{C}$) korral

5.2.2 Seinäärsete plafoonidega õhujaotuslahendus

Selle õhujaotuslahenduse korral anti värske õhk ruumi läbi nelja klassiruumi pikemas seinas paiknenud sissepuhkeplafoonist, mis asetsesid põrandaga paralleelselt. Saastunud õhk eemaldati sama seinaga vastaspoolel paiknevatest väljatõmbeplafoonidest. Täpsemalt on õhujaotuslahendust kirjeldatud punktis 4.4.2. Plafoonidega õhujaotuslahendust katsetati kahel sissepuhkeõhu temperatuuril: esmalt hoiti sissepuhkeõhu temperatuuri ligi 4°C ($\Delta t \approx 4^\circ\text{C}$) võrra madalamal ruumiõhu temperatuurist (katse 2.1) ning teisel juhul prooviti tagada isothermiline olukord ($\Delta t \approx 0^\circ\text{C}$), kus sissepuhkeõhu ja ruumiõhu temperatuurid olid võrdsed (katse 2.2). Tabelis 5.2 on esitatud katsete parameetrid ning õhuvahetuse efektiivsuse tulemused.

Tabel 5.2 Plafoonidega õhujaotuslahenduse katseparameetrid ning õhuvahetuse efektiivsus

Katse number (temp. erinevus)	2.1 ($\Delta t \approx 4^\circ\text{C}$)	2.2 ($\Delta t \approx 0^\circ\text{C}$)
Sissepuhkeõhu temperatuur, $^\circ\text{C}$	18,6	21,9
Ruumiõhu temperatuur, $^\circ\text{C}$	22,2	22,2
Õhuvooluhulk, l/s	240	240
Nominaalne ajakonstant, h	0,220	0,222
Õhu keskmine eluiga, h	0,218	0,221
Korrelatsiooni kordaja R^2	0,9985	0,9996
Õhuvahetuse efektiivsus ε_a , %	50	50

Seinäärsete plafoonidega õhujaotuse korral saadi mõõdetud andmete puhul õhuvahetuse efektiivsuseks katse 2.1 ($\Delta t \approx 4^\circ\text{C}$) puhul 50% ja katse 2.2 ($\Delta t \approx 0^\circ\text{C}$) puhul samuti 50%. Teoreetiliselt on ideaalse seguneva õhuvahetuse korral ε^a väärtuseks 50%, seega on mõlemal sissepuhkeõhu temperatuuril plafoonidega lahenduse juures tagatud ideaalsele segunevale õhuvahetusele vastav õhuvahetuse efektiivsus. Katseandmete töötlemisel moodustasid katsete 2.1 ja 2.2 puhul CO_2 kontsentratsioonide langused logaritmilisel skaalal sirged ehk tegemist oli eksponentsiaalse langusega, mida eeldas kontsentratsiooni languse arvutusmeetod. Sirgete moodustumist kinnitavad ka võrdluses teoreetilise lähendusjoonega arvatud

tugevalt positiivsed korrelatsioonikordajad R^2 , mis katsete 2.1 ja 2.2 korral olid vastavalt 0,9985 ja 0,9996.

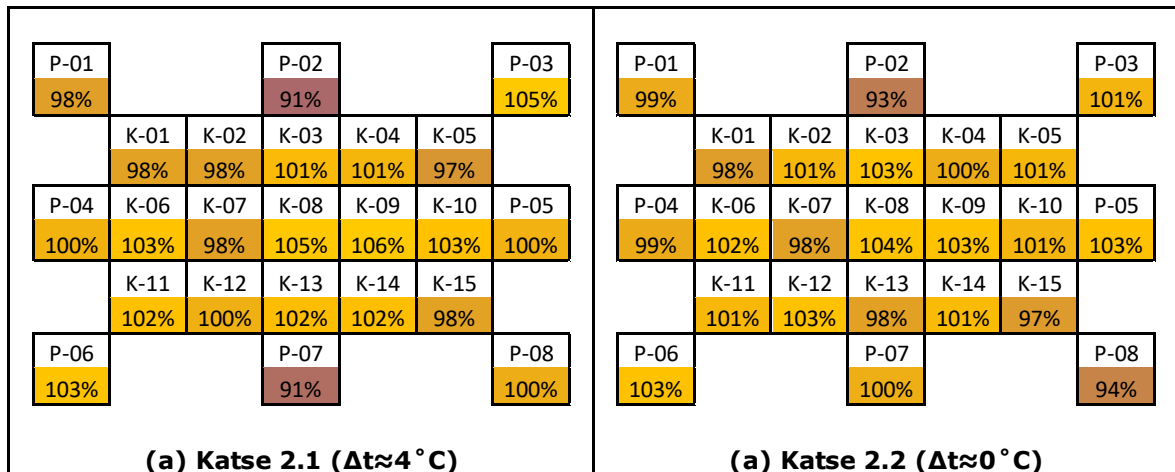
Lisaks ruumipõhisele õhuvahetuse efektiivsusele määrati ruumi viibimistsoonis (tähisega K) 15 punkti ja ruumi perimeetril (tähisega P) 8 punkti lokaalsed õhuvahetuse indeksid. Mõlema katse lõikes oli kõikide mõõtepunktide korral minimaalne korrelatsioonikordaja R^2 0,9884, mis viitab taas tugevalt positiivsele sõltuvusele teoreetilise lähedusjoonega. Katsete 2.1 ja 2.2 puhul oli vahe viibimistsoonis määratud kõrgeima ning madalaima ε_p^a vahel vastavalt 9% ja 7%, mis tähendab, et mõlema katse korral varieerusid mõnevõrra lokaalsed õhuvahetuse indeksid ruumi viibimistsooni lõikes. Mõlema katse kõikide punktide mõõtmistulemuste põhjal arvutatud ε_p^a numbrilised väärtused on esitatud joonisel 5.11. Joonisel 5.12 on visualiseeritud vastavate indeksite jaotus ruumis väljana, kuhu on märgitud plaaniliselt viibimistsoon.

Mõlemal sissepuhkeõhu temperatuuril tehtud plafoonidega katsete 2.1 ja 2.2 korral saadud ruumi õhuvahetuse efektiivsust 50% kinnitavad ka joonisel 5.9 esitatud lokaalsed õhuvahetuse indeksid, mis viibimistsooni lõikes on mõlemal juhul suhteliselt ühtlased ja ei eristu oluliselt kehvema või parema õhuvahetusega tsoone. Mõlema katse tulemuste juures võis täheldada perimeetril lokaalseid punkte (nt. P-02), kus lokaalne õhuvahetuse indeks osutus ruumi üldisest tasemest selgeks kehvemaks. Seda tulemust kinnitasid ka visuaalsed tossukatsed, mille käigus võis märgata, et punkti P-02 ümber tekkis tsoon, kus õhk, võrreldes ümbritsevaga, niivõrd hästi ei liikunud. Tossukatsetelt ilmnis, et värske õhu mass liikus antud juhul punkti P-02 suhtes mööda ruumi vastas perimeetrit väljatõmbeni ja seetõttu võis eelnimetatud punktis õhuvahetuse efektiivsus jääda madalamaks. Tossukatsed kinnitasid ka saavutatud ruumi õhuvahetuse efektiivsuse tasemeid, kuna tossuga vaadeldes võis täheldada, et sissepuhke värske õhk kandus mõlema katse korral ühtlaselt ruumi laiali. Joonisel 5.10 on esitatud tulemusi ilmestavad kuvatõmmised tossukatsetest. Võrreldes isothermse katsega 2.2, langes madalama sissepuhkeõhuga katses 2.1 värske õhk veidi enam põrandapinnale, mis on arvestades jahedama õhu kõrgemat tihedust igati loomulik.

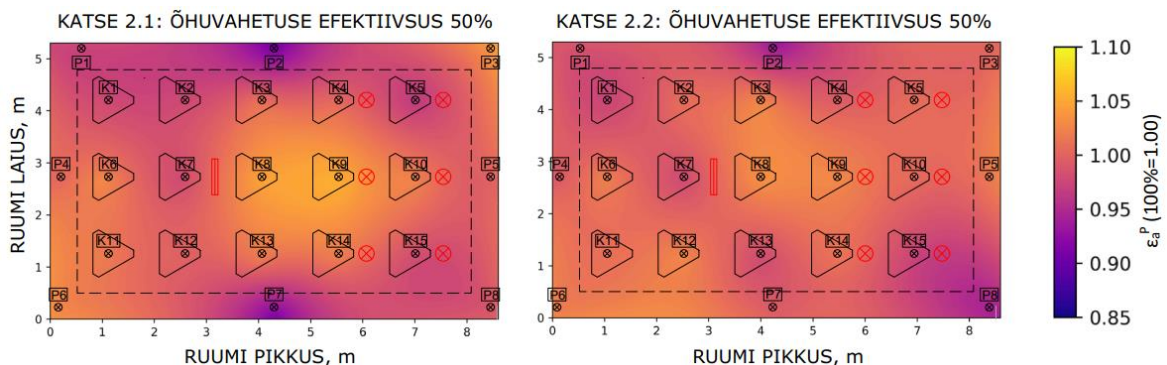


Joonis 5.10 Plafoonidega katsel isoleeritud loger P-02 (vasakul), tossu ühtlane jaotus (paremal)

Kuigi katsete 2.1 ja 2.2 tulemused mõningal määral lokaalselt mõõdetud punktides varieeruvad, võib väita, et mõlemal juhul tagati ruumis tervikuna ideaalsele segunevale õhujaoitusele vastav õhuvahetuse efektiivsus. Lisaks ei omanud antud õhujaoituse korral sissepuhkeõhu temperatuuri tõstmine ruumiõhu temperatuurini negatiivset mõju õhuvahetuse efektiivsusele.



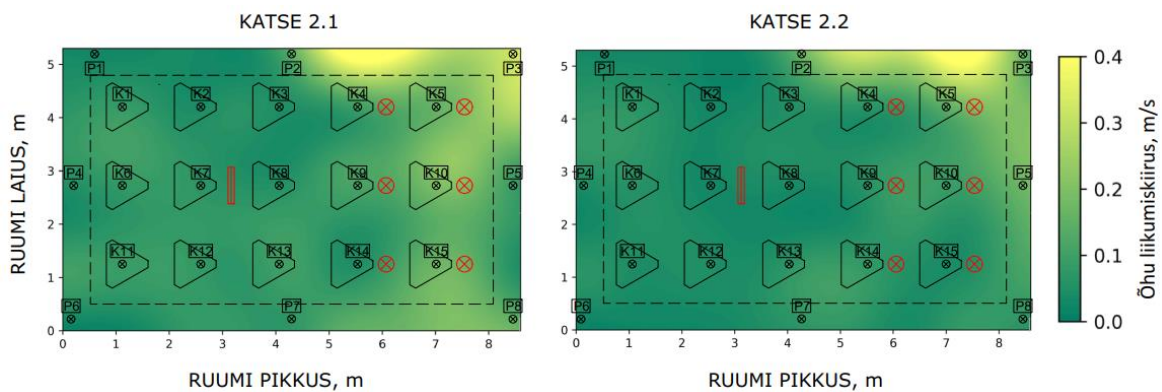
Joonis 5.11 Katsete 2.1 (a) ja 2.2 (b) lokaalsete õhuvahetuse indeksite tulemused



Joonis 5.12 Katsete 2.1 ($\Delta t \approx 4^\circ \text{C}$) ja 2.2 ($\Delta t \approx 0^\circ \text{C}$) lokaalsete õhuvahetuse indeksite jaotus ruumis väljana

Seinaäärsete sissepuhkeplafonidega õhujaoituse korral mõõdeti kahe sissepuhkeõhu temperatuuri puhul antud õhujaoituslahendusele vastavaid õhu liikumiskiiruseid ruumis 54 punktis ühtlasel kõrgusel 1,1 meetrit põrandapinnast. Täpsemalt on õhu liikumiskiiruste mõõtmismetoodikat käsitletud alapeatükis 4.6. Madalama sissepuhkeõhu temperatuuriga katse 2.1 ($\Delta t \approx 4^\circ \text{C}$) puhul oli mõõtmistulemuste järgi viibimistsoonis kõrgusel 1,1 meetrit maksimaalne õhu liikumiskiirus 0,23 m/s, katse 2.2 ($\Delta t \approx 0^\circ \text{C}$) korral saadi vastavaks väärtuseks 0,16 m/s. Madalama sissepuhkeõhu temperatuuriga katse 2.1 korral ületati viibimistsoonis määrusega nr. 84 [25] kehtestatud õhu liikumiskiiruse piir <0,21 m/s, kuid seda vaid ühes viibimistsooni mõõtepunktis, ülejäänud näitajad jäid lubatud piiridesse. Sellest võib järeldada, et

soojusliku mugavuse mõistes on sellisel kujul seinäärsete plafoonidega õhujaoituslahenduse korral, kus ruumi antakse ruumiõhust ligi neli kraadi madalamat sissepuhkeõhku, oht tõmbuse tekkeks. Kuna õhuvahetuse efektiivsus sissepuhkeõhu temperatuuri tõustes ei vähenenud, tuleks eelistada ruumiõhust veidi madalamal või võrdsel tasemel sissepuhkeõhu temperatuuri. Vältida tuleks olukorda, kus sissepuhkeõhu temperatuur ületab ruumiõhu temperatuuri, kuna sellisel juhul on oluline risk laealuse lühisvoolu tekkeks. Maksimaalsed õhu liikumiskiirused seinäärsete plafoonidega lahenduse juures ilmnesisid ootuslikult sissepuhkeplafoonide all sein ääres, kus mõõdetud maksimaalseks kiiruseks oli katsete 2.1 ja 2.2 puhul vastavalt 0,45 m/s ja 0,47 m/s. Seega eksiseerib oht, et mõlema sissepuhkeõhu temperatuuri korral on vahetult viibimistsooni piiril oht tõmbuse tekkeks ning sellest tulenevalt sissepuhke tsoonis soojusliku mugavuse vähenemiseks. Katsete 2.1 ja 2.2 käigus mõõdetud õhu liikumiskiirused on esitatud tasapinnalise väljana kõrgusel 1,1 meetrit põrandast joonisel 5.13.



Joonis 5.13 Mõõdetud õhu liikumiskiiruste väljad katsete 2.1 ($\Delta t \approx 4^\circ\text{C}$) ja 2.2 ($\Delta t \approx 0^\circ\text{C}$) korral

5.3 Düüstorudega õhujaoituslahenduste toimivus

Antud alapeatükis esitatakse düüstorudega lahendatud klassiruumi õhujaoituse laboratoorsete katsete tulemused ja nende analüüs. Mõlema õhujaoituslahenduse puhul esitatakse katsete läbiviimise tingimused, katseliselt määratud õhuvahetuse efektiivsus, lokaalsete õhuvahetuse indeksite väärtused ning mõõdetud õhu liikumiskiirused. Süsihappegaasi kontsentratsioonide ja õhu liikumiskiiruste mõõtepunktid asusid kõik kõrgusel 1,1 meetrit põrandapinnast.

5.3.1 Düstorudega lahendus – õhuvool suunatud 120° joana

üles

Selle õhujaoituslahenduse korral anti värske õhk ruumi läbi nelja düüstoru, mis paiknesid kahestes gruppides ruumi keskosas lae all. Õhujuga oli düüsidest suunatud lae poole 120° all. Saastunud õhk eemaldati ruumi pikemal seinal paiknevatest neljast väljatõmbeplafoonist. Täpsemalt on õhujaoituslahendust kirjeldatud punktis 4.5.1. Antud düüsidega õhujaoituslahendust katsetati kahel erineval sissepuhkeõhu temperatuuril: esimesel juhul hoiti sissepuhkeõhu temperatuuri ligi 4 °C ($\Delta t \approx 4^\circ\text{C}$) võrra madalamal ruumiõhu temperatuurist (katse 3.1) ning teisel juhul prooviti tagada isothermiline olukord ($\Delta t \approx 0^\circ\text{C}$), kus sissepuhkeõhu ja ruumiõhu temperatuurid olid võrdsed (katse 3.2). Tabelis 5.3 on esitatud katsete parameetrid ning õhuvahetuse efektiivsuse tulemused.

Tabel 5.3 Düüsidega (õhujuga suunatud 120° üles) õhujaoituslahenduse katseparameetrid ning õhuvahetuse efektiivsus

Katse number (temp. erinevus)	3.1 ($\Delta t \approx 4^\circ\text{C}$)	3.2 ($\Delta t \approx 0^\circ\text{C}$)
Sissepuhkeõhu temperatuur, °C	18,2	22,2
Ruumiõhu temperatuur, °C	21,8	22,4
Õhuvooluhulk, l/s	240	240
Nominaalne ajakonstant, h	0,240	0,256
Õhu keskmine eluiga, h	0,245	0,233
Korrelatsiooni kordaja R^2	0,9992	0,9988
Õhuvahetuse efektiivsus ε_a , %	49	46

Üles suunatud 120° õhujoga düüstorudega õhujaoituslahenduse korral saadi mõõdetud andmete puhul õhuvahetuse efektiivsuseks katse 3.1 ($\Delta t \approx 4^\circ\text{C}$) puhul 49% ja katse 3.2 ($\Delta t \approx 0^\circ\text{C}$) puhul 46%. Teoreetiliselt on ideaalse seguneva õhuvahetuse korral õhuvahetuse efektiivsuse väärtuseks 50%. Seega tagati madalama sissepuhkeõhu temperatuuriga katsel 3.1 peaaegu ideaalsele segunevale õhuvahetusele vastav õhuvahetuse efektiivsus. Isotermse katse 3.2 puhul jäi ruumi õhuvahetuse efektiivsus tagasihoidlikumaks ning võib väita, et päris segunevat õhuvahetust ei tagatud. Katseandmete töötlemisel moodustasid katsete 3.1 ja 3.2 korral CO_2 kontsentratsioonide langused logaritmilisel skaalal sirged ehk tegemist oli eksponentsiaalse langusega, mida eeldas kontsentratsiooni languse arvutusmeetod. Sirgete moodustumist kinnitavad ka võrdluses teoreetilise lähendusjoonega arvatud tugevalt positiivsed korrelatsioonikordajad R^2 , mis katsete 3.1 ja 3.2 puhul olid vastavalt 0,9992 ja 0,9988.

Lisaks ruumipõhisele õhuvahetuse efektiivsusele määrati ruumi viibimistsoonis (tähisega K) 15 punkti ja ruumi perimeetril (tähisega P) 8 punkti lokaalsed õhuvahetuse

indeksid. Mõlema katse lõikes oli kõikide mõõtepunktide korral minimaalne korrelatsioonikordaja R^2 0,9840, mis viitab taas tugevalt positiivsele sõltuvusele teoreetilise lähedusjoonega. Katsete 3.1 ja 3.2 puhul oli vahe viibimistsoonis määratud kõrgeima ning madalaima ε_p^a vahel vastavalt 15% ja 29%, mis tähendab, et mõlema katse korral, kuid eriti isotermes katse 3.2 puhul varieerusid lokaalsed õhuvahetuse indeksid ruumi viibimistsooni lõikes oluliselt. Mõlema katse kõikide punktide mõõtmistulemuste põhjal arvatud ε_p^a numbrilised väärtused on esitatud joonisel 5.15. Joonisel 5.16 on visualiseeritud vastavate indeksite jaotus ruumis väljana, kuhu on märgitud plaaniliselt viibimistsoon.

Madalama sissepuhkeõhu temperatuuriga katse 3.1 korral tagati ruumi viibimistsoonis suhteliselt ühtlased lokaalsed õhuvahetuse indeksid. Ruumi keskmistest tulemustest mõnevõrra paremad näitajad saavutati ruumi keskosas, kuhu düüside õhujugade kokkupõrkumise tulemusena jõudis enam värsket õhku. Antud nähtust kinnitasid ka visuaalsed tossukatsed. Lisaks paistis tossuga vaatlusel, et katse 3.1 puhul jõudis sissepuhkeõhk ühtlaselt ruumi jugade kokkupõrkumise teel ja mööda seinu alla liibudes. Vaadeldut ilmestas antud katsel saavutatud ruumi õhuvahetuse efektiivsus 49%. Isotermsetele temperatuuridele ligineva katse 3.2 korral oli lokaalsete õhuvahetuse indeksite jaotuse loogika viibimistsoonis analoogne katsega 3.1. Kõrgem lokaalne efektiivsus saavutati ruumi keskosas ja äärte suunas liikudes vastavad väärtused langesid. Üldiselt oli isotermes katse 3.2 juures lokaalsed õhuvahetuse indeksid enamikes mõõtepunktides märgatavalt madalamad võrreldes katsega 3.1, seda asjaolu väljendab ka katse 3.2 korral mõõdetud madalam ruumi õhuvahetuse efektiivsus. Ka tossukatsete läbiviimise käigus võis märgata, et kõrgema sissepuhkeõhu temperatuuri puhul liibus oluliselt vähem värsket õhku mööda seinu alla, vaid õhu segunemine toimus eelkõige kokkupõrkavate jugade mõjul. Joonisel 5.14 on kujutatud tossukatsete kuvatõmmised.



Joonis 5.14 Tossu jaotus katsel 3.1 ($\Delta t \approx 4^\circ\text{C}$) (vasakul) ning katsel 3.2 ($\Delta t \approx 0^\circ\text{C}$) (paremal)

Üles suunatud 120° õhujoaga düüstorudega katsete tulemusena võib väita, et madalama sissepuhkeõhu temperatuuri korral saavutatakse ideaalsele segunemisele lähedane õhuvahetus. Sissepuhkeõhu temperatuuri tõustes ligi ruumiõhu tasemele jõuab vähem värsket õhku viibimistsooni, mis väljendub ka õhujaotuslahenduse madalamas õhuvahetuse efektiivsuse määras. Seega võib järeldada, et antud düüsidega õhujaotuslahenduse korral omab sissepuhkeõhu temperatuuri tõstmine selgelt negatiivset mõju ruumis õhu segunemisele ning ruumi õhuvahetuse efektiivsusele.

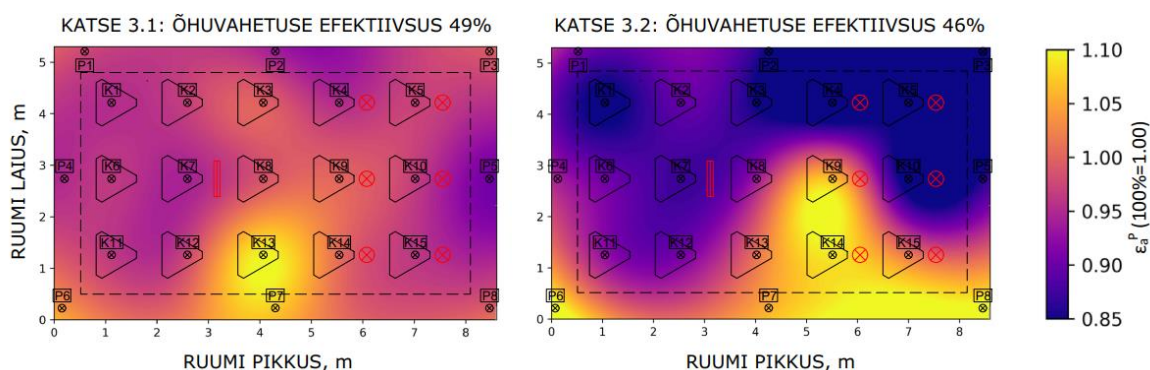
P-01 100%			P-02 94%			P-03 100%
	K-01 95%	K-02 97%	K-03 100%	K-04 96%	K-05 97%	
P-04 95%	K-06 96%	K-07 94%	K-08 99%	K-09 100%	K-10 97%	P-05 91%
	K-11 97%	K-12 97%	K-13 110%	K-14 101%	K-15 96%	
P-06 106%			P-07 106%			P-08 101%

(a) Katse 3.1 ($\Delta t \approx 4^\circ\text{C}$)

P-01 96%			P-02 85%			P-03 78%
	K-01 84%	K-02 89%	K-03 85%	K-04 80%	K-05 85%	
P-04 95%	K-06 91%	K-07 87%	K-08 94%	K-09 108%	K-10 83%	P-05 88%
	K-11 94%	K-12 91%	K-13 101%	K-14 109%	K-15 103%	
P-06 115%			P-07 107%			P-08 113%

(a) Katse 3.2 ($\Delta t \approx 0^\circ\text{C}$)

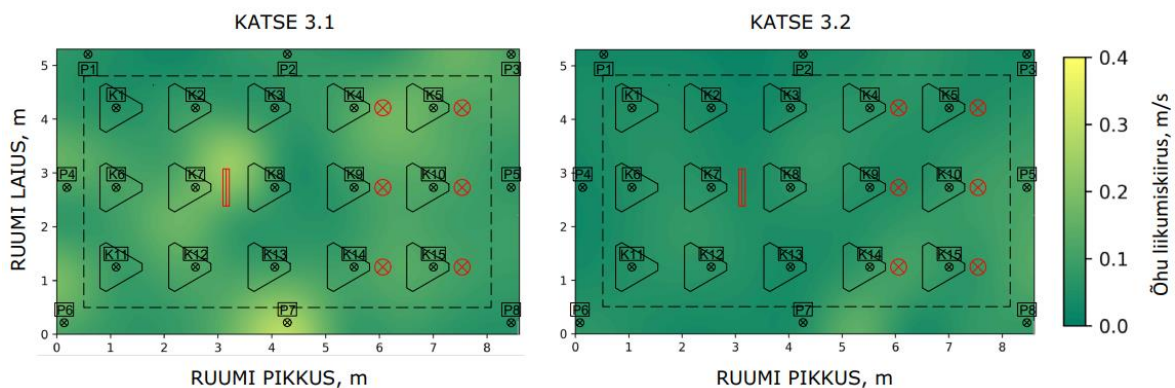
Joonis 5.15 Katsete 3.1 (a) ja 3.2 (b) lokaalsete õhuvahetuse indeksite tulemused



Joonis 5.16 Katsete 3.1 ($\Delta t \approx 4^\circ\text{C}$) ja 3.2 ($\Delta t \approx 0^\circ\text{C}$) lokaalsete õhuvahetuse indeksite jaotus ruumis väljana

Üles suunatud 120° õhujoaga düüstorudega õhujaotuse korral mõõdeti kahe sissepuhkeõhu temperatuuri puhul antud õhujaotuslahendusele vastavaid õhu liikumiskiiruseid ruumis 54 punktis ühtlasel kõrgusel 1,1 meetrit põrandapinnast. Täpsemalt on õhu liikumiskiiruste mõõtmismetoodikat käsitletud alapeatükis 4.6. Madalama sissepuhkeõhu temperatuuriga katse 3.1 ($\Delta t \approx 4^\circ\text{C}$) puhul oli mõõtmistulemuste järgi viibimistsoonis kõrgusel 1,1 meetrit maksimaalne õhu liikumiskiirus 0,24 m/s, katse 3.2 ($\Delta t \approx 0^\circ\text{C}$) korral saadi vastavaks väärtuseks 0,11 m/s. Madalama sissepuhkeõhu temperatuuriga katse 3.1 korral ületati viibimistsoonis

määrusega nr. 84 [25] kehtestatud õhu liikumiskiiruse piir $<0,21$ m/s, kuid seda vaid ühes viibimistsooni mõõtepunktis, ülejäänud näitajad jäid lubatud piiridesse. Üles suunatud 120° õhujoaga düüstorudega lahenduse juures mõõdeti katsel 3.1 maksimaalne õhu liikumiskiirus viibimistsoonis kahe düüstoru vahelisel alal ruumi keskel, kus lae all kokku põrkunud jahedad õhujoad ilmselt suuremal kiirusel viibimistsooni jõudsid. Mõlema üles suunatud õhujoaga düüstorudega lahenduse korral saavutati maksimaalne õhu liikumiskiirus kahe düüsi vahelisel alal ruumi perimeetril, kus mõõdetud maksimaalseks kiiruseks oli katsete 3.1 ja 3.2 puhul vastavalt $0,29$ m/s ja $0,15$ m/s. Isotermse katse 3.2 korral ei ületa õhu liikumiskiirus üheski mõõtepunktis eelpool toodud määruses esitatud piirväärtust ja seega ei ole antud lahenduse korral ohtu tõmbuse tekkeks, kuid samas saavutatakse võrreldes madalama sissepuhkeõhu temperatuuriga ka madalam õhuvahetuse efektiivsus. Madalama sissepuhkeõhu temperatuuriga katse 3.1 puhul ületati üksikutes mõõtepunktides viibimistsoonis ning ka perimeetril $0,2$ m/s taset, kuid enamasti jäädi lubatud taseme piiridesse. Seega võib järeldada, et madalama sissepuhkeõhu temperatuuri korral on antud düüside lahenduses puhul oht tõmbuse tekkeks ning sellest tulenevalt sissepuhke tsoonis soojusliku mugavuse vähenemiseks. Katsete 3.1 ja 3.2 käigus mõõdetud õhu liikumiskiirused on esitatud tasapinnalise väljana kõrgusel $1,1$ meetrit põrandast joonisel 5.17.



Joonis 5.17 Mõõdetud õhu liikumiskiiruste väljad katsete 3.1 ($\Delta t \approx 4^\circ\text{C}$) ja 3.2 ($\Delta t \approx 0^\circ\text{C}$) korral

5.3.2 Düüstorudega lahendus – õhuvool suunatud $2 \times 60^\circ$ joana horisontaalselt

Selle õhujaotuslahenduse korral anti värske õhk ruumi läbi nelja düüstoru, mis paiknesid kahestes gruppides ruumi keskosas lae all. Õhujuga oli düüsidest suunatud horisontaalselt kahes suuna 60° all. Saastunud õhk eemaldati ruumi pikemal seinal paiknevatest neljast väljatõmbeplofonist. Täpsemalt on õhujaotuslahendust kirjeldatud punktis 4.5.2. Antud düüsidega õhujaotuslahendust katsetati kahel erineval sissepuhkeõhu temperatuuril: esimesel juhul hoiti sissepuhkeõhu temperatuuri ligi 4°C

($\Delta t \approx 4^\circ\text{C}$) võrra madalamal ruumiõhu temperatuurist (katse 4.1) ning teisel juhul prooviti tagada isothermiline olukord ($\Delta t \approx 0^\circ\text{C}$), kus sissepuhkeõhu ja ruumiõhu temperatuurid olid võrdsed (katse 4.2). Tabelis 5.4 on esitatud katsete parameetrid ning õhuvahetuse efektiivsuse tulemused.

Tabel 5.4 Düüsidega (õhujuga suunatud $2 \times 60^\circ$ horisontaalselt) õhujaoituslahenduse katseparameetrid ning õhuvahetuse efektiivsus

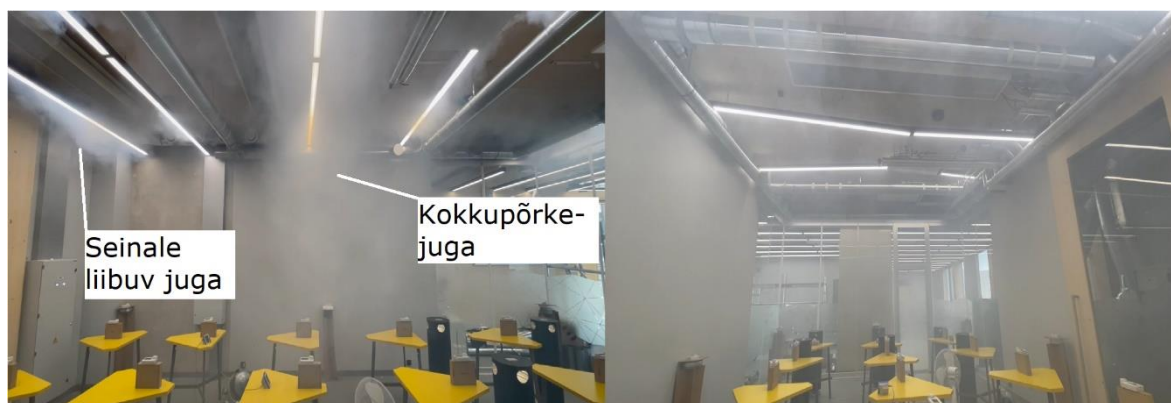
Katse number (temp. erinevus)	4.1 ($\Delta t \approx 4^\circ\text{C}$)	4.2 ($\Delta t \approx 0^\circ\text{C}$)
Sissepuhkeõhu temperatuur, $^\circ\text{C}$	18,0	22,0
Ruumiõhu temperatuur, $^\circ\text{C}$	22,3	22,8
Õhuvooluhulk, l/s	240	240
Nominaalne ajakonstant, h	0,238	0,218
Õhu keskmine eluiga, h	0,238	0,224
Korrelatsiooni kordaja R^2	0,9995	0,9992
Õhuvahetuse efektiivsus ε_a , %	50	49

Horisontaalselt suunatud $2 \times 60^\circ$ õhujoaga düüstorudega õhujaoituslahenduse korral saadi mõõdetud andmete puhul õhuvahetuse efektiivsuseks katse 4.1 ($\Delta t \approx 4^\circ\text{C}$) puhul 50% ja katse 4.2 ($\Delta t \approx 0^\circ\text{C}$) puhul 49%. Teoreetiliselt on ideaalse seguneva õhuvahetuse korral õhuvahetuse efektiivsuse väärtuseks 50%. Seega tagati mõlema sissepuhkeõhu temperatuuriga katse korral ideaalsele segunevale õhuvahetusele vastav või väga lähedane õhuvahetuse efektiivsus. Katseandmete töötlemisel moodustasid katsete 4.1 ja 4.2 korral CO_2 kontsentratsioonide langused logaritmilisel skaalal sirged ehk tegemist oli eksponentsiaalse langusega, mida eeldas kontsentratsiooni languse arvutusmeetod. Sirgete moodustumist kinnitavad ka võrdluses teoreetilise lähendusjoonega arvatud tugevalt positiivsed korrelatsioonikordajad R^2 , mis katsete 4.1 ja 4.2 puhul olid vastavalt 0,9995 ja 0,9992.

Lisaks ruumipõhisele õhuvahetuse efektiivsusele määrati ruumi viibimistsoonis (tähisega K) 15 punkti ja ruumi perimeetril (tähisega P) 8 punkti lokaalsed õhuvahetuse indeksid. Mõlema katse lõikes oli kõikide mõõtepunktide korral minimaalne korrelatsioonikordaja R^2 0,9923, mis viitab taas tugevalt positiivsele sõltuvusele teoreetilise lähendusjoonega. Katsete 4.1 ja 4.2 puhul oli vahe viibimistsoonis määratud kõrgeima ning madalaima ε_p^g vahel vastavalt 15% ja 4%, mis tähendab, et madalama sissepuhkeõhu temperatuuriga katse 4.1 korral varieerusid lokaalsed õhuvahetuse indeksid ruumi viibimistsoonis oluliselt. Katse 4.2 juures olid ε_p^g väärtused suhteliselt ühtlased ning seega viibimistsoonis oli tagatud ideaalselt segunevale õhuvahetusele ligilähedane olukord. Katse 4.2 puhul ei ole arvestatud õhuvahetuse efektiivsuse arvutusel punkti K-07 tulemusega, kuna antud katsel see konkreetne loger tõrkus ning saadud tulemus ei pruugi olla vastav reaalsele õhuvahetuse tasemele. Mõlema katse

kõikide punktide mõõtmistulemuste põhjal arvatud ε_p^a numbrilised väärtused on esitatud joonisel 5.19. Joonisel 5.20 on visualiseeritud vastavate indeksite jaotus ruumis väljana, kuhu on märgitud plaaniliselt viibimistsoon.

Madalama sissepuhkeõhu temperatuuriga katse 4.1 korral saavutati olukord, kus ruumi ühel poolel olid lokaalsed õhuvahetuse indeksid valdavalt paremad, kui ruumi teises pooles. Kuna õhujaotuslahendus oli ruumi mõttes sümmeetriline, siis oli antud tulemus mõnevõrra üllatav. Ilmselt mõjutasid õhu segunemist ruumis lae alused takistused, mis muutsid õhujugade teekonda. Tossukatsete käigus ei õnnestunud antud hüpoteesi kinnitada, kuna ruum täitus üsna kiiresti ühtlase tossuga. Isotermse katse 4.2 puhul tagati ruumi viibimistsoonis suhteliselt ühtlane õhuvahetus, mida kinnitas visuaalne tossukatse. Tossukatsetest nähtus, et värske õhk liikus viibimistsooni mõlemal temperatuuril mööda ruumi otsa seinu ning ruumi keskelt õhujugade kokkupõrkumise tulemusena. Joonisel 5.18 on kujutatud tossukatsete kuvatõmmised. Erinevalt 120° õhujoaga düüstorude lahendusest, ei paistnud aga ruumi keskel kokkupõrkuvate õhujugade mõju välja selle tsooni kõrgematest lokaalsetest õhuvahetuse indeksite väärtustest. Ilmselt ei jõudnud sissepuhke õhujoad piisavalt ruumi viibimistsooni, et mõjutada sealseid mõõdetud ε_p^a väärtuseid.



Joonis 5.18 Õhujoad katsel 4.1 ($\Delta t \approx 4^\circ\text{C}$) (vasakul) ja tossu ühtlane jaotus ruumis (paremal)

Horisontaalselt suunatud $2 \times 60^\circ$ õhujoaga düüstorudega katsete tulemusena võib väita, et mõlema sissepuhkeõhu temperatuuri korral saavutatakse ideaalsele segunemisele lähedane õhuvahetus. Sissepuhkeõhu temperatuuri tõus ei oma märgatavat mõju ruumi õhuvahetuse efektiivsusele, mis temperatuuri tõustes langes ruumis üldiselt vaid 1% võrra.

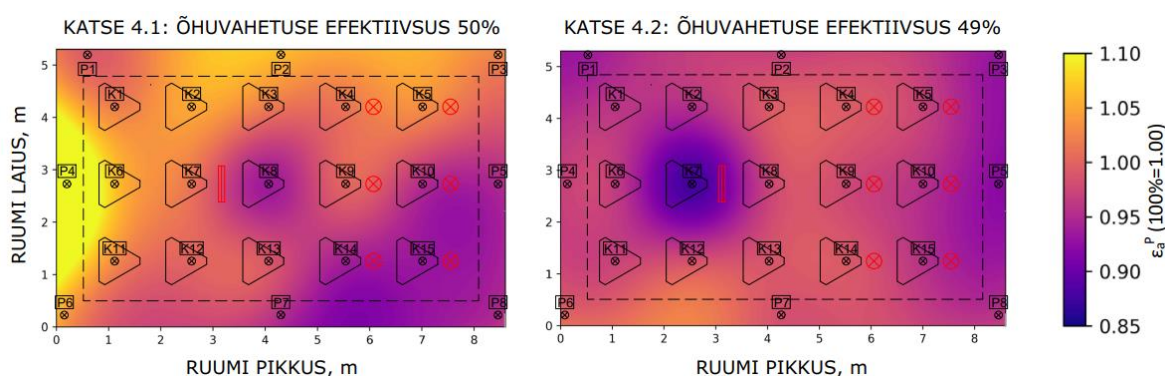
P-01			P-02			P-03
102%			107%			103%
	K-01	K-02	K-03	K-04	K-05	
	103%	105%	102%	101%	103%	
P-04	K-06	K-07	K-08	K-09	K-10	P-05
122%	108%	102%	94%	100%	95%	95%
	K-11	K-12	K-13	K-14	K-15	
	103%	100%	99%	94%	93%	
P-06			P-07			P-08
105%			95%			96%

(a) Katse 4.1 ($\Delta t \approx 4^\circ\text{C}$)

P-01			P-02			P-03
93%			97%			93%
	K-01	K-02	K-03	K-04	K-05	
	96%	95%	99%	99%	97%	
P-04	K-06	K-07*	K-08	K-09	K-10	P-05
97%	97%	88%	97%	98%	96%	92%
	K-11	K-12	K-13	K-14	K-15	
	97%	99%	99%	99%	96%	
P-06			P-07			P-08
101%			98%			97%

(b) Katse 4.2 ($\Delta t \approx 0^\circ\text{C}$)

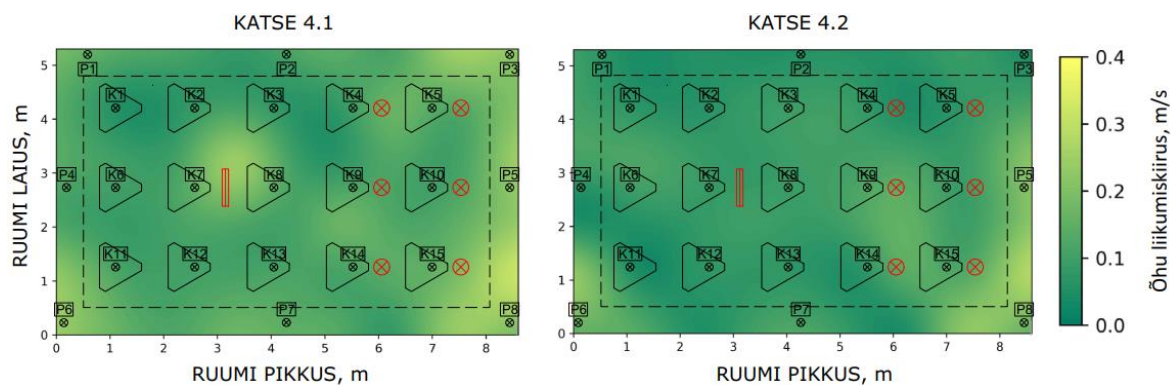
Joonis 5.19 Katsete 4.1 (a) ja 4.2 (b) lokaalsete õhuvahetuse indeksite tulemused



Joonis 5.20 Katsete 4.1 ($\Delta t \approx 4^\circ\text{C}$) ja 4.2 ($\Delta t \approx 0^\circ\text{C}$) lokaalsete õhuvahetuse indeksite jaotus ruumis väljana

Horisontaalselt suunatud $2 \times 60^\circ$ õhujoaga düüstorudega õhujaotuse korral mõõdeti kahe sissepuhkeõhu temperatuuri puhul antud õhujaotuslahendusele vastavaid õhu liikumiskiiruseid ruumis 54 punktis ühtlasel kõrgusel 1,1 meetrit põrandapinnast. Täpsemalt on õhu liikumiskiiruste mõõtmismetoodikat käsitletud alapeatükis 4.6. Madalama sissepuhkeõhu temperatuuriga katse 4.1 ($\Delta t \approx 4^\circ\text{C}$) puhul oli mõõtmistulemuste järgi viibimistsoonis kõrgusel 1,1 meetrit maksimaalne õhu liikumiskiirus 0,24 m/s, katse 4.2 ($\Delta t \approx 0^\circ\text{C}$) korral saadi vastavaks väärtuseks 0,15 m/s. Madalama sissepuhkeõhu temperatuuriga katse 4.1 korral ületati viibimistsoonis määrusega nr. 84 [25] kehtestatud õhu liikumiskiiruse piir $< 0,21$ m/s, kuid seda vaid ühes viibimistsooni mõõtepunktis, ülejäänud näitajad jäid lubatud piiridesse. Mõlema horisontaalselt suunatud õhujoaga düüstorudega lahenduse korral saavutati maksimaalne õhu liikumiskiirus ruumi otsa seinte perimeetril, kus mõõdetud maksimaalseks kiiruseks oli katsete 4.1 ja 4.2 puhul vastavalt 0,32 m/s ja 0,28 m/s. Antud punktides on kõrgemate õhu liikumiskiiruste esinemine loogiline, kuna düüsidest väljav õhk liigub esialgsel suurel kiirusel otsa seinte suunas, kus õhk liigub mööda seina ruumi, tagada õhu efektiivse segunemise. Perimeetri mõõtepunktides mõõdetud kiiruste

põhjal võib järeldada, et mõlema sissepuhkeõhu temperatuuri korral on antud düüside lahenduse puhul viibimistsooni piiril oht tõmbuse tekkeks ning sellest tulenevalt soojusliku mugavuse vähenemiseks. Katsete 4.1 ja 4.2 käigus mõõdetud õhu liikumiskiirused on esitatud tasapinnalise väljana kõrgusel 1,1 meetrit põrandast joonisel 5.21.



Joonis 5.21 Mõõdetud õhu liikumiskiiruste väljad katsete 4.1 ($\Delta t \approx 4^\circ\text{C}$) ja 4.2 ($\Delta t \approx 0^\circ\text{C}$) korral

6. JÄRELDUSED

Koolides läbiviidud ventilatsiooniagregaatide summaarsete õhuvooluhulkade mõõdistuste, pisteliselt klassiruumides mõõdetud CO₂ tasemete ning paikvaatluste tulemustena selgus, et enamasti on ventilatsioonisüsteemidega seotud probleemid kompleksed ning nende lahendamisele tuleb läheneda süsteemselt ning situatsioonipõhiselt. Peamiseks probleemiks osutusid klassirume teenindavate ventilatsiooniseadmete õhuvooluhulgad, mis ligi pooltel juhtudel töötasid projekteeritud õhuvooluhulkade suhtes alla 80%-l tootlikkusel. Mõningateks põhjusteks, miks seadmete tootlikkust on alandatud, võib lugeda klassides ventilatsioonisüsteemi poolt põhjustatud liigset müra ning tõmbuse tõttu vähenenud soojuslikku mugavust.

Analüüsitud viieteistkümnest tüüpklassist tõusis keskmine CO₂ tase õppetöö ajal üle 1000 ppm-i kolmandikul juhtudel. Teise kolmandiku puhul kerkis keskmine süsihappegaasi tase ligilähedaselt 1000 ppm-i juurde ning neljateistkümnel juhul 15st ületas maksimaalne mõõdetud kontsentratsioon 1000 ppm-i piiri. Seejuures viibis kõikides viieteistkümnnes uuritud tüüpklassis vähem inimesi, kui sinna projektiga oli ette nähtud, keskmiselt oli uuritud klasside täituvuse protsent ca 75%. Seega võib järeldada, et klasside maksimaalse täituvuse korral ületataks määrusega nr. 84 [25] seatud keskmise süsihappegaasi lubatud piirmäära 1000 ppm-i õppetöö ajal enam kui kolmandikus uuritud klassides. Lisaks tuleb arvestada, et suures enamuses uuritud koolidest, ei ole võimalik projekteeritud õhuvooluhulkadega tagada kavandatud õpilaste arvu juures süsihappegaasi taset alla 1000 ppm-i. Antud tulemustest lähtuvalt võib väita, et koolide olemasolevad ventilatsioonisüsteemid nõuavad täpsemat ülevaatamist ning enamikel juhtudel täiendamist. Saadud tulemused kattuvad suures osas varem läbiviidud uuringuga [6], mis leidis, et enamikes koolides esineb ventilatsioonisüsteemide töös puudusi, need ei tööta projekteeritud parameetritel või on üldse välja lülitatud. Nimetatud uuring oli teostatud 2015. aastal, kuid üldiselt ei ole olukord ventilatsioonisüsteemide toimivuse osas oluliselt paranenud, samas tuleb arvestada, et uuringu ja lõputöö valimid ei kattunud.

Õhujaoituse mõttes oli olemasolev olukord klassiruumides enamasti hea või rahuldav, teatud õhujaoituslahenduste puhul esines mitmel juhul iseloomulikes tsoonides liialt suuri õhu liikumiskiiruseid. Tuleb rõhutada, et ühes klassiruumis ventilatsioonisüsteemist põhjustatud soojusliku ebamugavuse mõju võib selles klassis tehtud muudatuste (nt sissepuhke temperatuuri tõus, ventilatsiooniseadme tootlikkus piiramine, elementide kinni keeramine vms) tõttu põhjustada häireid ülejäänud ventilatsioonisüsteemis ja sisekliima halvenemist teistes klassiruumides.. Kõige tõsisemad probleemid seoses õhujaoitusega ilmnisid ruumides, mille kasutusotstarvet

oli ilma ventilatsioonilahendust kaasajastamata muudetud ja , samuti ruumides, kus sissepuhkeelemendid olid takistatud mööbli või muude sisustuselementidega. Koolide ümberehituste käigus tuleb võtta arvesse muudatuste mõju ventilatsiooni toimivusele ning vajadusel kaasata konsultatsiooniks või muudatusprojekti koostamiseks projekteerija. Probleemseks osutusid klassiruumidesse paigaldatud lokaalsed ventilatsiooniseadmed, mis enamasti liigse müra tekitamise tõttu ei töötanud. Seega võiks eelistada tsentraalseid süsteeme. Kui on vajadus projekteerida klassidesse lokaalseid seadmeid, tuleb hoolikalt jälgida, et projekteeritud seade töötaks lubatud müratasemetel ning ei tekitaks tõmbust või ei põhjustaks muul viisil ruumis viibijatele ebamugavust.

Laboratoorses tingimustes uuriti koolides levinud kahe õhujaotuslahenduse toimivust – sissepuhkerestiga ja plafoonidega õhujaotuse korral. Laboratoorsete katsete tulemusel selgus, et mõlema õhujaotuslahenduse korral tagati katseruumis vähemalt ideaalsele segunevale õhuvahetusele vastav õhuvahetuse efektiivsus. Seejuures ruumiõhu temperatuuriga sama sissepuhkeõhu temperatuur või sellest 4 °C madalama temperatuur mõjutas minimaalselt õhuvahetuse efektiivsust. Võrreldes restidega õhujaotuslahendusega, saavutati plafoonidega lahenduse korral viibimistsoonis ühtlasemad lokaalsete õhuvahetuse indekse väärtused, mis näitab, et plafoonidega on teoreetiliselt võimalik ruumis tagada ühtlasem õhuvahetus.

Õhu liikumiskiiruste mõõtmistulemustest selgus, et nii sissepuhkeresti kui plafoonide korral jäid õhu liikumiskiirused viibimistsooni mõõtepunktides alla 0,21 m/s (plafoonide puhul ületas ühe mõõtepunkti väärtus antud piiri). Kuid mõlema lahenduse korral registreeriti ruumi perimeetril kõrgeid õhu liikumiskiiruseid, mis tähendab, et viibimistsooni piiril on oht tõmbuse tekkeks.

Kokkuvõttes võib järeldada, et antud kahe klassides levinud õhujaotuslahenduse korral ei tohiks enamasti esineda oluliselt probleeme õhujaotuse efektiivsusega. Samas eksisteerib oht õhujaotuslahendustele iseloomulikes tsoonides tõmbuse tekkeks, mis võib oluliselt vähendada klassis viibivate inimeste soojuslikku mugavust. Selle ohu realiseerumist võis täheldada ka klassiruumides läbiviidud paikvaatluste käigus, kus võis märgata näiteks sissepuhke lõppelementide kinni katmist. Antud lahenduste puhul saaks elementide lisamise või suurendamise teel vähendada õhu liikumiskiiruseid ruumi perimeetril, kuid samas tuleb vältida õhuvahetuse efektiivsuse langemist.

Testitud düüstorudega õhujaotuse katsete tulemustest võib järeldada, et horisontaalselt 2x60° all ja 120° all lakke suunatud düüsidega mõõdetud lahenduste korral on võimalik katses kasutatud düüstorudega ruumis tagada ideaalsele segunemisele vastav õhuvahetuse efektiivsus. Erandiks on üles suunatud õhujoaga düüsid, mille puhul

vähendas sissepuhkeõhu temperatuuri tõstmine mõnevõrra õhuvahetuse efektiivsust, muudel juhtudel ei omanud temperatuuri tõstmine olulist mõju. Samas tuleb rõhutada, et vältida tuleks ruumiõhust kõrgema temperatuuriga sissepuhkeõhu kasutamist. Katsete käigus selgus, et 120° all alla suunatud düüstorudega lahenduse korral ületavad õhu liikumiskiirused viibimistsoonis oluliselt lubatud piirmäära 0,2 m/s, mistõttu tuleks düüside puhul seda lahendust klassiruumides mitte eelistada. Düüsidega katsete puhul ilmnes, et võrreldes restide ja plafoonidega on antud düüstorude puhul lokaalsete õhuvahetuse indeksite jaotus ruumis madalama sissepuhke temperatuuri juures ebaühtlasem. Düüside puhul avaldavad õhujugadele enam mõju laealused takistused (nt talad, valgustus), mis võivad põhjustada jugade kokku põrkamist. Kokku põrkavad õhujoad suunduvad viibimistsooni kohati suuremal kiirusel, tõstes tõmbuse tekke riski, kuid samas parandades märgatavalt lokaalset õhuvahetust. Õhu liikumiskiiruse osas jäid mõõtepunktide tulemused kõikide düüsidega katsete puhul enamasti alla lubatud piirmäära 0,21 m/s, perimeetril saavutati sellest tasemest veidi kõrgemad väärtused.

Kokkuvõtlikult võib järeldada, et antud katsetes testitud düüstorude korral ei saavutata ruumis võrreldes restide või plafoonidega paremaid õhuvahetuse efektiivsuse tasemeid. Õhu liikumiskiiruse osas on tulemused viibimistsoonis kõikide nelja õhujaotuslahenduse korral suhteliselt sarnased ning jäävad enamasti alla 0,2 m/s. Samas düüside puhul on viibimistsooni piiril risk tõmbuse tekkeks madalam. Andmaks täpsemaid hinnanguid düüstorudega klassiruumi õhuvahetuse lahendamiseks, tuleks sooritada täiendavaid mõõtmisi ning kasutada tulemuste valideerimiseks erinevate tootjate lõppelemente. Lisaks tasub mainida, et tossukatsetel nähtu langeb hästi kokku mõttetulemustega, mistõttu võib pidada tossuga õhujaotuslahenduste toimivuse hindamist sobilikuks.

Järgnevalt on laboris ja koolides läbiviidud uuringute tulemuste põhjal esitatud mõningad ettepanekud klassiruumide õhukvaliteedi parandamiseks:

- Ventilatsiooniseadmed tuleb saada tööle projekteeritud õhuvooluhulkadel ja tagada regulaarne õhuvooluhulkade kontroll (näiteks läbi hoolduse), lisaks teostada süsteemide tasakaalustamine;
- Süsteemides, kus projekteeritud õhuvooluhulk inimese kohta on alla 8 l/s, tuleks hinnata võimalikkust olemasolevate süsteemide tootlikkuse tõstmiseks;
- Selgitada välja põhjused, miks ventilatsiooniagregaatide tootlikkust on alandatud ning need põhjused võimalusel likvideerida;
- Peale ventilatsioonisüsteemide projektijärgse töörežiimi taastamist ja süsteemi tasakaalustamist, hinnata klassiruumides õhujaotuse toimivust;

- Õhujaotusega seotud probleemide korral hinnata enne muudatuste kavandamist esmalt olukorda tossuga ning vajadusel teostada täiendavaid mõõtmisi;
- Probleemsete õhujaotuslahenduste parandamiseks proovida esmalt seadistada olemasolevaid õhujaotajaid, muudatuste tegemisel konsulteerida vastava süsteemi projekteerija või muu eriala spetsialistiga;
- Kui olemasoleva õhujaotuslahenduse korral ei õnnestu probleemseid olukordi likvideerida, kaaluda võimalust selle lahenduse ümberprojekteerimiseks ja -ehitamiseks.

KOKKUVÕTE

Käesolevas magistritöös uuriti Tallinna Haridusameti tellitud auditi raames viieteistkümne Tallinna üldhariduskooli ventilatsioonisüsteeme. Uurimuse käigus mõõdeti valimisse kuulunud koolides õppetöö ajal pisteliselt CO₂ kontsentratsioone hindamaks siseõhu kvaliteeti, sooritati klassirume teenindavate ventilatsiooniseadmete õhuvooluhulkade kontrollmõõdistused ning viidi läbi pistelisi paikvaatluseid ventilatsioonikambrites ja klassiruumides. Lisaks hinnati laboratoorsete katsete alusel klassiruumidele omase nelja õhujaoituslahenduse toimivust mõõtes kui kiiresti õhk ruumis vahetub ehk õhuvahetuse efektiivsust ja õhu liikumiskiirust.

Koolides läbi viidud auditi põhjal selgus, et klassirume teenindavatest ventilatsiooniseadmetest ligi pooled töötavad projektikohastest väärtustest oluliselt madalamal tootlikkusel. See tähendab, et õhuvahetus klassides on oluliselt madalam võrreldes algselt kavandatud. Mõõdetud ja projekteeritud sissepuhke õhuvooluhulkade suhte mediaanväärtus nende seadmete korral oli 57%. Sarnaseid tulemusi on saadud ka Eestis varasemalt teostatud uuringutes [6][7][8], mis viitab, et endiselt esineb klassiruumide ventileerimise osas puudujääke. Eestis on kehtiva määrusega [25] sätestatud, et õpperuumi ühes liitris siseõhus võib olla keskmiselt kuni 1000 ppm-i süsinikdioksiidi. Viieteistkümne tüüpklassi (üks igast koolist) puhul analüüsitud CO₂ kontsentratsioonide põhjal selgus, et viiel juhul ületas keskmine süsihappegaasi tase klassiruumis õppetöö ajal 1000 ppm-i piiri ning viiel korral jäid vastavad tulemused vaid pisut alla 1000 ppm-i läve. Neljateistkümnes klassiruumis ületas maksimaalne CO₂ kontsentratsioon 1000 ppm-i. Seejuures tuleb rõhutada, et kõikide klassiruumide puhul viibis mõõteperioodil nendes projektiga ette nähtud arvust vähemal hulgal õpilasi, keskmine kohaloleku tase oli 75%. Lisaks toimus kohati täiendav tuulutamine akende avamise teel. Seega võib järeldada, et enamikes uuritud tüüpklassides ei suudeta täieliku täituvuse tingimustes tagada normidekohast [25] õhukvaliteeti.

Klasside õhujaoituse olemasolevat olukorda võib hinnata enamasti heaks või rahuldavaks. Mitmete õhujaoituskeemide korral esines probleeme häiriva õhu liikumiskiirusega ehk tõmbusega, mis põhjustas soojuslikku ebamugavust. Õhuvahetuse osas olid ventilatsioonisüsteemidega varustatud klassiruumide puhul kõige kehvemas seisus enamasti klassid, milles oli toimunud või mis olid moodustatud ümberehituste käigus. Reeglina ei olnud neis ruumides ventilatsioonisüsteeme kaasajastatud. See põhjustas nendes klassides kohati olulist õhukvaliteedi langust ja tõmbusest põhjustatud soojuslikku ebamugavust.

Laboratoorsete õhujaotuslahenduste katsete tulemusena ilmnas, et uuritud koolides levinud ühe sissepuhkerestiga ja grupeeritud plafoonidega õhujaotusskeemid tagavad klassides ideaalsele segunevale õhuvahetusele vastava õhuvahetuse efektiivsuse ehk õhk ruumis vahetub normdokumentidega ette nähtud kiirusel. Samuti leiti, et sissepuhkeõhu temperatuuri tõstmine kuni ruumiõhu tasemele, ei vähenda nende lahenduste efektiivsust. Kõikide õhujaotuslahenduste korral tuleks vältida ruumiõhust kõrgemat sissepuhkeõhu temperatuuri. Sissepuhkerestiga ja plafoonidega õhujaotuse korral jäid õhu liikumiskiirused laboratoorsete mõõtmiste alusel standardi kohases viibimistsoonis (0,5 m seinast) enamasti alla lubatud maksimaalse väärtuse 0,2 m/s. Samas eksisteerib mõlemal juhul viibimistsooni piiril oht tõmbuse tekkeks, mille esinemist täheldati nende lahenduste korral ka paikvaatluste käigus. Antud probleemi võib lugeda üheks oluliseks põhjuseks, miks ventilatsiooniseadmete õhuvooluhulkasid on piiratud, kuna õhuvahetuse vähendamisel langeb õhu liikumiskiirus ruumis. Dүүstorudega õhujaotuslahendused saavutasid võrreldes sissepuhkeresti ja plafoonidega õhuvahetuse efektiivsuse osas võrdväärseid või veidi kehvemaid tulemusi. Sissepuhkeõhu temperatuuri tõstmine kuni ruumiõhu temperatuurini ei omanud olulist mõju ka enamike dүүsidega katsete puhul. Erandiks oli lakke suunatud dүүsidega lahendus, mille korral temperatuuri tõus vähendas märgatavalt õhuvahetuse efektiivsust. Dүүstorudega lahenduste juures oli viibimistsoonis tagatud enamikel juhtudel õhu liikumiskiirus alla 0,2 m/s ja võrreldes restide ning plafoonidega vähenes oluliselt oht viibimistsooni piiril tõmbuse tekkeks.

Üldistatult toimivad ühe sissepuhkerestiga ning grupeeritud plafoonide lahendused klassides õhuvahetuse efektiivsuse osas hästi, kuid tõmbusohu korral tuleks proovida elemente ümberseadistada või vajadusel õhujaotusskeem ümberehitada. Dүүstorudega õhujaotuslahenduste toimivust tuleks hinnata täiendavate katsetega. Koolides tuleks olemasolevad ventilatsioonisüsteemid saada tööle kavandatud tingimustel ja määratleda ning võimalusel likvideerida põhjused, miks ventilatsiooniseadmete tootlikkust oli piiratud. Peale süsteemide tasakaalustamist ning kontrollmõõdistusi, tuleks selgitada välja kas veel esineb klassiruumes, kus on ventilatsiooniga probleeme ja seejärel tegeleda nende lahendamiseks situatsioonipõhiselt. Õhuvahetuse esmaseks hindamiseks on sobilik kasutada tossukatseid, mida vajadusel täiendada mõõtmistega.

Antud töös esitati õhujaotuslahenduste osas esmased tulemused. Saadud tulemuste valideerimiseks tuleks sooritada suuremal hulgal lisamõõtmisi, samuti oleks vajalik testida katsetatud õhujaotusskeeme teiste tootjate analoogsete õhujaotajatega. Lisaks õhuvahetuse efektiivsusele tuleks õhujaotuslahenduste hindamisel määratleda saasteainete levik ruumis, näiteks rakendades saasteainete eemaldamise tõhususe indikaatorit, mis hindab kui kiiresti õhus levivad saasteained ruumist eemaldatakse.

SUMMARY

The purpose of this master's theses was to examine the ventilation systems of fifteen Tallinn public schools, as commissioned by the Tallinn Board of Education's audit. In the course of the study, CO₂ concentrations were randomly measured in the sampled schools during class hours to assess indoor air quality, control measurements of airflows in the air handling equipment (AHU) of classrooms were carried out, and random on-site inspections of ventilation chambers and classrooms were done. In addition, the performance of the four classroom air distribution solutions was assessed based on laboratory experiments by measuring how fast the air in the room changes, ie air exchange efficiency and the speed of air movement.

An audit conducted in schools revealed that almost half of the AHU-s serving the classrooms operated at significantly lower airflows than the design values. This means that the air exchange in the classrooms is significantly lower than originally planned. The median ratio of the measured and designed supply airflow rates for these AHU-s was 57%. Similar results have been obtained in previous studies conducted in Estonia [6][7][8], which indicates that there are still shortcomings in the ventilation of classrooms. In Estonia, the current regulation [25] stipulates that an average of up to 1000 ppm of carbon dioxide can be contained in one liter of indoor air in a study room. The CO₂ concentrations analyzed for the fifteen standard classes (one from each school) showed that in five cases, the average level of carbon dioxide in the classroom during classes exceeded 1000 ppm and in five cases the corresponding results were only slightly below the 1000 ppm threshold. In fourteen classrooms, the maximum CO₂ concentration exceeded 1000 ppm. It should be emphasized that all classrooms had a smaller number of students during the measurement period than according to the project, with an average attendance rate of 75%. Furthermore, additional ventilation was provided in some cases by opening the windows. Thus, it can be concluded that in most of the standard classrooms studied, the standardized [25] air quality cannot be ensured under full load conditions.

The current situation of classroom air distribution can usually be assessed as good or satisfactory. In several air distribution schemes, there were problems with the disturbing air velocities aka drafts, which caused thermal discomfort. In terms of air exchange, classrooms with ventilation systems, in which the renovations had taken place or were formed during reconstruction, were mostly in the worst condition. Generally, the ventilation systems in these rooms had not been modernized. This sometimes caused significant deterioration in air quality and thermal discomfort in these classes.

As a result of experiments with laboratory air distribution solutions, it was found that the air distribution schemes with a single supply grille and grouped supply valves commonly used in the studied schools, ensure the air exchange efficiency corresponding to the ideal mixing in the classroom, ie the air in the room changes at the prescribed speed. It was also found that raising the supply air temperature to the room air level does not reduce the effectiveness of these solutions. All air distribution solutions should avoid supply air temperatures higher than room air. In the case of air distribution with a supply grille or grouped supply valves, the air velocities in the occupied zone (0.5 m from the wall) were usually below the maximum permissible value of 0.2 m / s based on laboratory measurements. At the same time, in both cases, there is a risk of a draft at the border of the occupied zone, which was also observed during on-site inspections with these solutions. This problem can be considered as one of the important reasons why the airflow rates of AHU-s are lowered because the air velocities in the room decrease when the air exchange is reduced. Perforated duct diffuser air distribution solutions achieved equivalent or slightly poorer results in terms of air exchange efficiency compared to the supply air grille and supply valves. Raising the inlet air temperature to room temperature did not significantly affect most duct diffuser experiments. The exception was the solution with nozzles directed to the ceiling, in which case the increase in temperature significantly reduced the air Exchange efficiency. With perforated duct diffuser solutions, the air velocity in the occupied zone was ensured in most cases below 0,2 m/s, and the risk of the draft at the boundary of the occupied zone was significantly reduced compared to supply grille and supply air valves solutions.

In general, a single supply grille and grouped supply air valve solutions in the classroom work well in terms of air exchange efficiency, but if there is a risk of the draft, the elements should be readjusted or the air distribution scheme rebuilt if necessary. The performance of air distribution solutions with perforated duct diffusers should be evaluated by additional tests. In schools, existing ventilation systems should be brought into operation under the intended conditions and the reasons for the limited airflows of AHU-s should be identified and, if possible, eliminated. After rebalancing the systems and control measurements, whether there are still classrooms with problematic ventilation should be determined and then addressed on a case-by-case basis. For the initial assessment of air exchange, it is appropriate to test air distribution with smoke, supplemented by measurements if necessary.

In this work, preliminary results were presented for air distribution solutions. To validate the results obtained, several additional measurements should be performed and it would be necessary to test the measured air distribution schemes with alternative elements from other manufacturers. In addition to the air Exchange efficiency, the assessment of

air distribution solutions should identify the distribution of pollutants in the room, for example by contaminant removal effectiveness indicator, that assesses how quickly airborne pollutants are removed from the room.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] O. Toyinbo *et al.*, „Building characteristics, indoor environmental quality, and mathematics achievement in Finnish elementary schools,” *Building and Environment*, kd. 106, pp. 114-121, august 2016, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.04.030
- [2] F. R. d’Amrosio Alfano *et al.*, *Indoor Environment and Energy Efficiency in Schools. Part 1 Principles*. Turkey: Özgün Offset, 2010.
- [3] D. L. Johnson, R. A. Lynch, E. L. Floyd, J. Wang, J. N. Bartels, „Indoor air quality in classrooms: Environmental measures and effective ventilation rate modeling in urban elementary schools,” *Building and Environment*, kd. 136, pp. 185-197, mai 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.03.040
- [4] T. M. Stafford, „Indoor air quality and academic performance,” *Journal of Environmental Economics and Management*, kd. 70, pp. 34-50, märts 2015, doi: 10.1016/j.jeem.2014.11.002
- [5] O. Seppänen, „Ventilation Strategies for Good Indoor Air Quality and Energy Efficiency,” *International Journal of ventilation*, kd. 6, no. 4, pp. 297-306, märts 2016, doi: 10.1080/14733315.2008.11683785
- [6] J. Kurnitski, M. Murdvee, T.-A. Kõiv, M. Teichmann, *Sisekliima, õpitulemus, tööviljakus*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2015
- [7] A. Mikola ja T.-A. Kõiv, *Indoor Climate Problems in Apartment and School Buildings*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2013
- [8] K. Pilt, T. Jõesaar, A. Vabamägi, T. Kaart, S. Vessmann, K. Kirsimägi, *Õppeasutuste sisekliima seireprogramm*. Tartu: SA Eesti Mükoloogiuuringute Keskus, 2017
- [9] E. Mundt, H. M. Mathisen, P. V. Nielsen, A. Moser, *Ventilation Effectiveness*. Forssa: Forssan Kirjapaino OY, 2004
- [10] T. Tark ja I. Valgma, *Tallinna linna haridusasutuste ventilatsioonisüsteemide audit*. Tallinn: Hevac OÜ, 2021
- [11] T. J. Duffield, „School ventilations. Its effect on the health of the pupil,” *American Journal of Public Health*, kd. 17, no. 12, pp. 1226-1229, detsember 1927, doi: 10.2105/AJPH.17.12.1226

- [12] Zs. Bakó-Biró, D. J. Clements-Croome, N. Kochhar, H.B. Awbi, M.J. Williams, „Ventilation rates in schools and pupils' performance,” *Building and Environment*, kd. 48, pp. 215-223, veebruar 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2011.08.018
- [13] P. Wargocki ja D. P. Wyon, „Providing better thermal and air quality conditions in school classrooms would be cost-effective,” *Building and Environment*, kd. 59, pp. 581-589, jaanuar 2013, doi: 10.1016/j.buildenv.2012.10.007
- [14] E. Simons, S.-A. Hwang, E. F. Fitzgerald, C. Kielb, S. Lin, „The Impact of School Building Conditions on Student Absenteeism in Upstate New York,” *Americal Journal of Public Health*, kd. 100, no. 9, pp. 1679-1686, september 2010, doi: 10.2105/AJPH.2009.165324
- [15] S. Batterman, „Review and Extension of CO₂-Based Methods to Determine Ventilation Rates with Application to School Classrooms,” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, kd. 14, no. 2, pp. 145, veebruar 2017, doi: 10.3390/ijerph14020145
- [16] K.-C. Chung ja S.-P. Hsu, „Effect of ventilation pattern on room air and contaminant distribution,” *Building and Environment*, kd. 36, no. 9, pp. 989-998, november 2001, doi: 10.1016/s0360-1323(00)00051-2
- [17] E. Lichtner ja M. Kriegel, „Pathogen Spread and Air Quality Indoors - Ventilation Effectiveness in a Classroom,” *Technische Universität Berlin Publications*, september 2021, doi: 10.14279/depositonce-12437
- [18] R. Kosonen ja P. Mustakallio, „Air distribution in a classroom,” *REHVA Journal*, pp. 14-16, mai 2015. Loetud aadressil: <https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/air-distribution-in-a-classroom>. Kasutatud 06.02.2022.
- [19] *Hoonete energiatõhusus. Hoonete ventilatsioon. Osa 1: Sisekeskkonna lähteandmed hoonete energiatõhususe projekteerimiseks ja hindamiseks, lähtudes siseõhu kvaliteedist, soojuslikust keskkonnast, valgustusest ja akustikast. Moodul M1-6. Eesti standard EVS-EN 16798-1:2019+NA:2019. Tallinn: Eesti Standardiamet, 2019*
- [20] Tehnilised nõuded mittelehoonetele 2021. [Online]. Loetud aadressil: <https://nouded.rkas.ee/>. Kasutatud 29.03.2022
- [21] E. Abel, H. Voll, T. Tark, *Hoonete energiatarve ja sisekliima*. Tallinn: OÜ Presshouse, 2014

- [22] T. Salthammer *et al.*, „Children's well-being at schools: Impact of climatic conditions and air pollution,” *Environment International*, kd. 96, pp. 196-210, mai 2016, doi: 10.1016/j.envint.2016.05.009
- [23] Indoor Air Quality in Schools. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.visualistan.com/2018/12/indoor-air-quality-in-schools.html>. Kasutatud 29.03.2022
- [24] P. Wargocki, D. P. Wyon, „The Effects of Moderately Raised Classroom Temperatures and Classroom Ventilation Rate on the Performance of Schoolwork by Children (RP-1257),” *HVAC&R Research*, kd. 13, no. 2, pp. 193-220, veebruar 2011, doi: 10.1080/10789669.2007.10390951
- [25] Vabariigi Valitsuse määrus nr. 84 „Tervisekaitsenõuded koolidele”. RT I, 31.05.2013, 12.
- [26] Sotsiaalministri määrus nr. 109 „Tervisekaitsenõuded koolidele”. RTL 2003, 99, 1491.
- [27] Sotsiaalministri määrus nr. 47 „Kooli tervisekaitsenõuded”. RTL 2000, 86, 1286.
- [28] *Mitteeluhoonete ventilatsioon. Üldnõuded ventilatsiooni- ja ruumiõhu konditsioneerimissüsteemidele. Eesti rahvuslik lisa standardile EVS-EN 16798-3:2017. Eesti standard EVS 906:2018. Tallinn: Eesti Standardiamet, 2018*
- [29] *Sisekeskkonna algandmed hoonete energiatõhususe projekteerimiseks ja hindamiseks, lähtudes siseõhu kvaliteedist, soojustikust mugavusest, valgustusest ja akustikast. Eesti standard EVS-EN 15251:2007. Tallinn: Eesti Standardiamet, 2007*
- [30] *MITTEELUHOONETE VENTILATSIOON. Üldnõuded ventilatsiooni- ja ruumiõhu konditsioneerimissüsteemidele. Eesti standard EVS-EN 13779:2007/AC:2010. Tallinn: Eesti Standardiamet, 2006*
- [31] *Mitteeluhoonete ventilatsioon. Üldnõuded ventilatsiooni- ja ruumiõhu konditsioneerimissüsteemidele. Eesti rahvuslik lisa standardile EVS-EN 13779:2007. Eesti standard EVS 906:2010. Tallinn: Eesti Standardiamet, 2010*
- [32] *Hoonete ventilatsiooni projekteerimine. Osa 1: Üldnõuded. Eesti standard EVS 845.1:2004. Tallinn: Eesti Standardiamet, 2004*
- [33] *Hoonete ventilatsiooni projekteerimismõõt 1. osa. Eesti projekteerimismõõt EPN 18.3.1. Tallinn, 1999*

- [34] *HOONETE VENTILATSIOON. Katseprotseduurid ja mõõtmismeetodid paigaldatud ventilatsiooni- ja õhukonditsioneerimissüsteemide üleandmiseks*. Eesti standard EVS-EN 12599:2012. Tallinn: Eesti Standardiamet, 2012
- [35] P. Müller, C. Kandzia, R. Kosonen, A. K. Melikov, P. V. Nielsen, *Mixing Ventilation*.
- [36] G. Cao *et al.*, „A review of the performance of different ventilation and airflow distribution systems in buildings,” *Building and Environment*, kd. 73, pp. 171-186, märts 2014, doi: 10.1016/j.buildenv.2013.12.009
- [37] R. Kosonen, A. Melikov, E. Mundt, P. Mustakallio, P. V. Nielsen, *Displacement Ventilation*. Forssa: Forssan Kirjapaino OY, 2017
- [38] A. Novoselac, J. Srebric, „Comparison of Air Exchange Efficiency and Contaminant Removal Effectiveness as IAQ Indices,” *ASHRAE Transactions*, kd. 109, no. 2, jaanuar 2003. [Online]. Loetud aadressil: https://www.researchgate.net/publication/242563253_Comparison_of_Air_Exchange_Efficiency_and_Contaminant_Removal_Effectiveness_as_IAQ_Indices. 03.04.2022
- [39] J. Rehand. *CO₂ märkegaasi meetodite kasutamine ventilatsiooni toimivuse hindamisel*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2016
- [40] *Thermal performance of buildings and materials - Determination of specific airflow rate in buildings - Tracer gas dilution method*. Eesti standard EVS-EN ISO 12569:2017. Tallinn: Eesti Standardiamet, 2017
- [41] *Indoor air - Part 8: Determination of local mean ages of air in buildings for characterizing ventilation conditions*. ISO 16000-8. Genf: International Organization for Standardization, 2007
- [42] Datasheet COMFORT CO₂. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.adeunis.com/en/produit/iaq-co2-temperature-humidity/>. 03.04.2022
- [43] MX1102A Datasheet. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/mx1102a/>. Kasutatud 09.04.2022
- [44] Testo 440 dP Datasheet. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.testo.com/en-US/testo-440-dp/p/0560-4402>. Kasutatud 09.04.2022

- [45] Kern KFB Datasheet. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.kern-sohn.com/en/FKB>. Kasutatud 09.04.2022
- [46] ComfortSense Mini. [Online]. Loetud aadressil: https://d3pcsg2wj9izr.cloudfront.net/files/55006/download/391028/PI_242_ComfortSense_Mini.pdf. Kasutatud 11.05.2022
- [47] A. Kesküll. *SARS-Cov-2 leviku hindamine CO₂ märkegaasi meetodiga koosolekuruumi, klassiruumi ja avatud kontori näitel*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2021
- [48] H. Poolmaa. *Ventilatsiooni soojustagastitega seotud vigade mõju nende efektiivsusele ja soojustarbele*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2021
- [49] Riigikogu seadus „Põhikooli- ja gümnaasiumi seadus“. RT I 2010, 41, 240.
- [50] NORDDiffuser – Õhujaotajad. [Online]. Loetud aadressil: https://pim.etsnord.com/data/RDT-11_NORDDiffuser_et.pdf. Kasutatud 11.05.2022
- [51] DSP Düstoru. [Online]. Loetud aadressil: https://pim.etsnord.com/data/RDT-11_DSP_et.pdf. Kasutatud 20.03.2022
- [52] ACTIVENT Technical catalogue. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.flaktgroup.com/api/v1/Documents/f77e9203-ccfc-4ff8-a92b-459f39424fc2?analytics=0>. Kasutatud 20.03.2022
- [53] *Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*. ISO 7730:2005. Genf: International Organization for Standardization, 2005