



TALLINNA TEHNICAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

SISEKLIIMA HINDAMINE MÕÕDETUD ÕHU PARAMEETRITE JA KASUTAJATE TAGASISIDE PÕHJAL

INDOOR CLIMATE ASSESSMENT BASED ON MEASURED AIR PARAMETERS AND USER FEEDBACK

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Linda Mai Vahtra

Üliõpilaskood 207020EAKI

Juhendaja: Martin Thalfeldt, professor
Helena Kuivjõgi, nooremteadur

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

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

22. mai 2024

Autor: Linda Mai Vahtra

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

22. mai 2024

Juhendaja: Martin Thalfeldt

/ allkirjastatud digitaalselt /

Helena Kuivjõgi

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Linda Mai Vahtra (*autori nimi*)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Sisekliima hindamine mõõdetud õhu parameetrite ja kasutajate tagasiside põhjal

mille juhendaja on Martin Thalfeldt ja Helena Kuivjõgi.

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.

22. mai 2024

/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.

TalTech Instituudi nimetus

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Linda Mai Vahtra, 207020EAKI (nimi, üliõpilaskood)
Õppekava, peeriala: EAKI02/19, Hoonete sisekliima ja veetehnika (kood ja nimetus)
Juhendaja(d): Professor, Martin Thalfeldt, 6202505 (amet, nimi, telefon)
Nooremteadur, Helena Kuivjõgi (amet, nimi)

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Sisekliima hindamine mõõdetud õhu parameetrite ja kasutajate tagasiside põhjal

(inglise keeles) Indoor climate assessment based on measured air parameters and user feedback

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Reaalajas kasutajate tagasiside kogumine.
2. Võrrelda mõõdetud ruumiõhu parameetreid reaalajas kogutud kasutajate tagasisidega.
3. Analüüsida ja tuua välja parandusettepanekud olemasolevale tagasiside küsimise meetodile.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjanduse ülevaate koostamine, mõõtmiste ettevalmistused ja alustamine	27.02.2024
2.	Ruumide õhuvahetuse ja saasteainete piirmäärade hindamine	17.03.2024
3.	Mõõtmiste teostamine, tagasiside küsimine	15.04.2024
4.	Mõõtetulemuste ja tagasiside analüüs; jooniste ja tabelite vormistamine	21.04.2024
5.	Sisekliima mõõdetud andmete võrdlemine sisekliima piirmääradega	28.04.2024
6.	Tagasiside võrdlus mõõdetud andmetega ja statistiline analüüs	15.05.2024
7.	Töö lõplik vormistamine	22.05.2024

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 22. mai 2024. a

Üliõpilane: Linda Mai Vahtra 22. mai 2024. a
/allkirjastatud digitaalselt/

Juhendaja: Martin Thalfeldt

..... 22. mai 2024.a
/allkirjastatud digitaalselt /

Helena Kuivjõgi

..... 22. mai 2024. a
/allkirjastatud digitaalselt /

SISUKORD

EESSÕNA	8
Lühendite ja tähiste loetelu	9
1. SISSEJUHATUS.....	10
2. TEOREETILISED ALUSED	12
2.1 Kirjanduse ülevaade.....	12
2.2 EDIAQI projekti tutvustus	14
2.3 Määrused ja standardid	15
2.3.1 Standard EVS-EN 16798-1:2019/NA:2019 [12].....	15
2.3.2 EVS 906:2018 Mitteeluhoonete ventilatsioon [13].....	17
2.3.3 Vabariigi valitsuse määrus nr 84. [14].....	17
2.4 Õhukvaliteet	18
2.4.1 Välisõhu saastatus	18
2.4.2 Siseõhu saastatus.....	19
2.4.3 Saasteainete eemaldamise efektiivsus.....	20
2.5 Soojuslik sisekliima	20
2.5.1 Temperatuur.....	21
2.5.2 Metabolism ja riietus.....	22
2.5.3 Soojusliku sisekliima tajumine.....	22
2.6 Sisekliima tagasiside kogumine	25
3. METOODIKA.....	26
3.1 Ruumide valik	26
3.1.1 Ruumide kirjeldus.....	27
3.2 Operatiivse temperatuuri leidmine	30
3.2.1 Keskmise kiirgustemperatuuri leidmine	31
3.3 Sisekliimaklasside piiride määramine arvutuslikult	33
3.3.1 Arvutuse näide U06 304 põhjal.....	33
3.4 Mõõteandmete kogumine.....	34
3.4.1 Thinnect veebiplatvorm ja andurid.....	35
3.4.2 Aranet andurid	35
3.4.3 BMS andurid	36
3.5 Reaalajas tagasiside küsimine	37
3.6 Andmeanalüüs.....	39
4. TULEMUSED JA ANALÜÜS	40
4.1 Tagasiside arv nädalate lõikes	40
4.2 Tagasiside jaotus	42
4.3 Tagasiside soojuslikule mugavusele	43

4.3.1	Temperatuurid tagasisidele eelneval tunnil.....	43
4.3.2	Keskmine temperatuur	47
4.3.3	Temperatuuri kõikumine.....	48
4.4	Tagasiside õhukvaliteedile.....	49
4.4.1	CO ₂ tase tagasisidele eelneval tunnil	49
4.4.2	Õhukvaliteedi klassifitseerimine arvutuslikult	51
4.4.3	Keskmine õhuvooluhulk.....	52
4.5	Andurite mõõtetulemused	52
4.6	Järeldused	54
KOKKUVÕTE		56
SUMMARY.....		57
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU		58
LISA CO ₂ tase tagasiside andmisele eelneval tunnil		62

EESSÕNA

Käesoleva magistritöö teema on välja pakutud Martin Thalfeldti poolt. Lõputöö keskendub reaalses kasutajate tagasiside kogumisele sisekliima hindamisel. Uuritakse seost kasutajate tagasiside ning mõõtetulemuste vahel. Lõputöö valmib üleeuroopalise pilootprojekti EDIAQI raames, mille tutvustus on toodud töö teoreetilises osas. Autor soovib tänada Martin Thalfeldti ja Helena Kuivjõgi abi ning juhendamise eest lõputöö koostamisel.

Võtmesõnad: ülikooli ruumide sisekliima, kasutajate tagasiside, subjektiivne tagasiside kogumine, reaalses tagasiside kogumine, EDIAQI, magistritöö.

Lühendite ja tähiste loetelu

BMS – hoone automaatika süsteem, *Building Management System*

ppm – mõõtühik kontsentratsiooni väljendamiseks, *parts per million* ehk osad miljoni kohta

PM – peenosakesed, *particulate matter*

VOC – lenduvad orgaanilised ühendid, *volatile organic compounds*

1. SISSEJUHATUS

Viimastel aastakümnetel on siseõhu kvaliteedi jälgimine saanud rohkem tähelepanu. Õpi- ja töökeskkonnas on mugava sisekliima tagamine oluline nii tervise kui produktiivsuse seisukohalt. Halb sisekliima võib põhjustada selliseid terviseprobleeme nagu hingamisteede vaevused ja peavalud. Toimiv ventilatsioonisüsteem aitab viirushaiguste levikut rahvarohketes ruumides vähendada. Kui ventilatsiooni kasutusaeg on liiga lühike kannatab õhukvaliteet. Seetõttu on üha kasvav huvi ja tähelepanu suunatud siseruumide õhukvaliteedi ja üldise sisekeskkonna parendamisele. [1]

Käesoleva lõputöö raames keskendutakse reaajas kasutajate tagasiside kogumisele veebiplatvormi kaudu ja selle potentsiaalsele rakendamisele ruumiõhu kvaliteedi hindamisel. Eesmärk on teha kogutud andmete analüüs ja selgitada välja, kas kasutajate tagasiside ja mõõtetulemuste vahel on seos ning kas need saab omavahel vastavusse viia. Lisaks tuvastada võimalikke puudusi sisekliimatingimustes.

Sisekliima tagasiside on subjektiivne, sest inimesed võivad sisekliimat tajuda erinevalt [2]. Kasutaja hindab temperatuuri operatiivse temperatuuri järgi [2]. Seega ei pruugi soojuslikuks mugavuseks eelistatud temperatuur ja standard kattuda. Lisaks on naiste ja meeste mugavustemperatuurid erinevad [3]. Töö keskendub tagasiside küsimisele reaajas. Uuringuid, mis tagasiside reaajas kogumist käsitlevad, on vähe. Analüüsitakse, kas sisekliimale seatud piirid vastavad enamjaolt personaalsele eelistusele.

Mure õhusaasteainete, nagu peenosakesed ja lenduvad ühendid, mõjust tervisele on kasvav [4]. Seni ei ole nende saasteainete mõõtmiseks saadaval olnud odavamaid seadmeid, mis jõuaks laialdasemalt kasutusse [5]. Ainult temperatuuri mõõtes ei saa hinnata, kas kasutajad on rahul, tuleb arvestada ka õhukvaliteedi näitajaid. Vahel esinevad kaebused ka siis, kui temperatuur ja süsihappegaasi kontsentratsioon on teise sisekliimaklassi piirides. Põhjuseks võivad olla õhusaasteained, mis mõõtmistulemustes ei kajastunud. [4]

Sisekliima mõõtmiseks kasutatakse TalTech hoone automaatika süsteemi andureid ja tootja Aranet andureid. Hoone automaatika süsteemi andurite mõõteandmed on kättesaadavad serverist. Aranet anduritel on andmete kogumiseks vajalik seadmega ühenduv mobiilirakendus.

Lõputöö järgnevas peatükis antakse teemaga seotud kirjanduse ülevaade ning käsitletakse töö teoreetilisi aluseid. Kolmandas peatükis kirjeldatakse mõõtmiste, tagasiside küsimise ja analüüsi metoodikat. Neljandas osas esitatakse töö tulemused, analüüs ja järeldused.

2. TEOREETILISED ALUSED

2.1 Kirjanduse ülevaade

Sisekliima avaldab mõju õpitulemustele ning produktiivsusele ja tööviljakusele. Tallinna Tehnikaülikooli läbiviidud uuringu käigus tehti sisekliima mõõtmised kuues koolis ja kuues büroohoones. Koolides on probleeme puuduliku ventilatsiooniga. Süsihappegaasi tase tõuseb liiga kõrgeks põhjustades märkimisväärset õpitulemuste langust. Mõnedes bürooruumides esineb kütteperioodil ülekuumenemist. Välja on toodud rahaline kahju seoses tööviljakuse langusega. [1]

Siseõhu kvaliteedi laialdasemale jälgimisele on kaasa aidanud asjade interneti (inglise keeles *Internet of things*, lühend IoT) kiire areng. IoT võimaldab taskukohasemate sensorite ja reaalajas jälgimise abil võtta kasutusele meetmed õhukvaliteedi parandamiseks. S. Zampolli *et al.* arendab uurimustöö käigus madala maksumusega tiptasemel elektroonilist andurit, mis mõõdab lisaks temperatuurile ja suhtelisele niiskusele bioloogilisi ja keemilisi saasteaineid hoones, mis on vajalikud usaldusväärse teabe ja saasteainete kontsentratsiooni saamiseks. Ventilatsioonisüsteemiga ühendatud mõõtmisseadmed võimaldavad jälgida saasteainete kontsentratsiooni siseruumides ning parandada läbi automaatika õhukvaliteeti. Õhukvaliteedi jälgimine aitab vähendada haiguste riski. Eesmärk on õhukvaliteedi monitoorimine sensoritega kättesaadavamaks muuta ja vähendada haigete hoonete sündroomiga kaasnevaid vaevusi. [5]

J. Kang ja K. Hwang uurimuse peamine eesmärk on leida usaldusväärne meetod siseõhu kvaliteedi hindamise indeksi arvutamiseks. Uuringu käigus töötatakse samuti välja tavakasutajale kättesaadav õhukvaliteedi andur, mille ekraanilt või serverist on reaalajas võimalik siseõhu kvaliteedi indeksit jälgida. Andur mõõdab erinevaid õhusaasteaineid, nagu PM, VOC, temperatuur ja suhteline niiskus, ning annab tavakasutajale tagasisideks kergesti jälgitava sisekliima indeksi, kas õhukvaliteet on hea, keskmine või ebatervislik. Indeksi arvutamisel ja kuvatava tulemuse kategoriseerimisel heaks/halvaks võetakse arvesse riiklikke saasteainete piirmäärasid. [6]

Sunyoung Kim'i ja Eric Paulos'i uurimus leiab, et saasteaine, näiteks peenosakeste kontsentratsiooni, visuaalne kuvamine anduri ekraanil tõstab inimeste teadlikkust ümbritsevast sisekliimast. Lisaks järeldatakse, et kui serverisüsteemi kuvada

võrdluseks ka kogukonna, näiteks naabrite, õhukvaliteedi andmeid, siis on inimestel suurem motivatsioon end ümbritseva keskkonna siseõhu kvaliteeti parandada. [7]

Rasmus Kaveri 2020. aasta lõputöös viiakse läbi sisekliima tagasiside küsitlus, kus büroohoone kasutajatele esitati küsitlus elektroonilisel kujul meili teel. Küsimustiku põhjana kasutatakse CEN/TR 16798-2:2019 standardi lisas E olevat subjektiivset hindamise meetodikat. Lisaks sisekliimat puudutavatele küsimustele uuritakse tömbustunde, töölaua paiknevuse, tööl viibimise aja, valgustuse, päikesevalguse ja müra kohta. Lisaks koostati sisekliima küsitluse tulemuste põhjal Fangeri graafikuga kattuvad punktid. [8]

Kyle Stas Konis'i kasutab bürooones viibijatelt reaalsajas tagasiside kogumiseks interaktiivset seadet kasutajate töölaual koos temperatuuri, õhukiiruse ja valgustuse anduritega. Seadmel saab liuguri liigutamisega anda hinnangut sisekliimale 7-palli skaalal. Seadmel on erinevad režiimid: vastaja annab tagasiside talle sobival hetkel või seade annab vilgutusega märku, et antaks tagasisidet. Andmesisestusprotsess on piisavalt lihtne ja intuitiivne, nii et seadme juhiseid ega õpetusi pole vaja. Leiti, et kogutud andmed võivad aidata tuvastada ebamugavuse sagedust ja ulatust ruumilise ja ajalise detailsusega. Tehti mõõtmiste ja hinnangute analüüs. Uurimistöö viitab, et edaspidi võiks interaktiivset tagasiside kogumise tehnoloogiat edasi arendada ning erinevates kontekstides rakendada ning analüüsida, kuidas saadud tagasiside võiks tehnosüsteemide töös arvestada. [9]

Seni on tegeletud taskukohaste õhukvaliteedi andurite väljatöötamise ja laiema kasutuselevõttuga. Edaspidi tuleks kontrollida nende usaldusväärsust ja mõõtetäpsust. Reaalsajas kasutajate tagasiside kogumise uuringuid on tehtud vähe. Lõputöö keskendub tagasiside kogumisele kasutajale sobival hetkel reaalsajas. Eesmärk on uurida dünaamilist lähenemist sisekliima hindamisele. Lõputöö pakub uudset lähenemist, võimaldades reaalsajas tagasiside kogumist ülikooli ruumides, kus kasutajad vahetuvad suuremal määral kui näiteks kontoriruumides. Tavaliselt ei ole ühiskondlike hoonete kasutajad sisekliima hindamisele kaasatud või ei ole võimalus selleks lihtsasti ligipääsetav. Reaalsajas tagasiside kogumine on samm sisekliima laiema hindamise ja parandamise suunas.

2.2 EDIAQI projekti tutvustus

EDIAQI projekti raames uuritakse nelja aasta jooksul siseõhu saastatust Euroopa linnades, kasutades lühiajalist ja pikaajalisi mõõtmisi. Projekti eesmärk on mõista siseõhu saasteallikaid, kokkupuuteviise ja tervisemõjusid. EDIAQI projekt ühendab üheteistkümnest Euroopa riigist organisatsioone erinevatest valdkondadest, nagu keskkonnateadus ja -tehnoloogia, meditsiin ja poliitika. [4]

Eesti on üks kolmest pilootriigist. Siseõhuparameetreid ja kasutajate rahulolu uuritakse mitmetes erineva otstarbega hoonetes, nagu bürood, sotsiaalhoolekandetasutused, koolid ja lasteaiad [4]. Lõputöö keskendub ruumiõhu parameetrite ja kasutajate tagasiside analüüsimisele Tallinna Tehnikaülikooli ruumides.

Siseõhu saasteainete teema on Euroopas päevakorras eriti pärast pandeemia puhangut. Teadlased on leidnud, et keskmiselt 15% kogu maailma COVID-19 põhjustatud surmajuhtumitest võib olla seotud pikaajalise kokkupuutega õhusaastega [10]. Kuigi siseõhukvaliteedi halvenemine kujutab endast suurt terviseriski, mõjutab see inimesi erineval viisil. Õhusaastele on haavatavamad lapsed, eakad ja hingamisteede haigustega inimesed. [11]

Vaatamata küllaltki ulatuslikele siseõhu kvaliteedi uuringutele on arusaam saasteainete teemast siiski üsna piiratud, peamiselt seetõttu, et õhukvaliteedi seire Euroopa Liidus keskendub peamiselt välisõhu kvaliteedile ja sisekeskkonna jaoks puuduvad regulatiivsed nõuded. [4]

EDIAQI eesmärk on anda suuniseid ja parandada teadlikkust siseõhu kvaliteedi edendamiseks Euroopas ja mujal, võimaldades kasutajasõbralikku juurdepääsu teadmistebaasile siseõhu saasteallikate ja nendega seotud riskitegurite kohta. EDIAQI projekti raames tahetakse iseloomustada mitme Euroopa linna keemilisi ja bioloogilisi saasteallikaid ning hoone materjalidest ja mööblist eralduvaid emissioone. Projekti käigus võetakse kasutusele odavapoolsed ja kasutajasõbralikud seirelahendused, mis loovad uusi teadmisi siseruumides tekkivate saasteainete kohta. Projekti tulemused peaksid olema abiks sisekliima standardite ülevaatamisel ja täiendamisel seiremeetmetega. [4]

2.3 Määrused ja standardid

Järgnevalt käsitletakse standardeid ja määrusi, milles töös lähtutakse.

2.3.1 Standard EVS-EN 16798-1:2019/NA:2019 [12]

Standardi pealkiri. HOONETE ENERGIATÕHUSUS Hoonete ventilatsioon Osa 1: Sisekeskkonna lähteandmed hoonete energiatõhususe projekteerimiseks ja hindamiseks, lähtudes siseõhu kvaliteedist, soojuslikust keskkonnast, valgustusest ja akustikast. Moodul M1-6.

Standard asendab standardit EN 15251:2007. Standard seab kriteeriumid sisekeskkonna projekteerimiseks ja hoonete energiaarvutuseks. Toodud on kriteeriumid kütte- ja jahutusperioodi jaoks. Eelmine standard EN 15251 oli peamiselt hoonete kütte, jahutus- ja ventilatsioonisüsteemide dimensioneerimiseks ning ei sobinud energiaarvutustes kasutamiseks ning soojusliku sisekeskkonna hindamiseks.

Siseõhu kvaliteedi projekteerimine. Siseõhu kvaliteet tuleb tagada saasteallikate eemaldamisega ventilatsiooni ja võimaliku õhu puhastamisega. Ehitusmaterjalide, hoolduse ja mööbli valik mõjutab mitteinimtekkeliste saasteainete emissiooni ruumides. Ventilatsiooni õhuvooluhulk peab arvesse võtma ka mitteinimtekkeliste saasteaine emissiooni tasemeid. Ventilatsiooni õhuvooluhulga arvutustes peab arvestama ruumi hõivatust ja muutuvaid saasteaine kontsentratsioone. Ventilatsioon on minimaalsel tasemel vajalik ka kasutusajaväliselt või tuleb see käivitada enne ruumide kasutust, et vältida liigset saasteainete kogunemist ruumi.

Nõuded CO₂ tasemele mitteeluhoonetes. Tabel 1 esitatakse CO₂ kontsentratsiooni piirväärtused sisekliimaklasside kaupa.

Tabel 1. Vaikimisi arvutuslik CO₂ kontsentratsioon, eeldades, et inimese CO₂ eraldus on 20 L/h.

Kategooria	Vastav CO ₂ absoluutkontsentratsioon kui välisõhu tasemeks on 400 ppm, ppm
I	950
II	1100
III	1750

Nõuded õhuvooluhulkadele mitteeluhoonetes

Tervislikest põhjustest tulenevalt ei tohi minimaalne õhuvooluhulk olla alla 4 l/s inimese kohta. Standardijärgsed õhuvooluhulgad eeldavad ruumis täielikku segunemist. Kui ventilatsiooni efektiivsus on alla ühe tuleb ventilatsiooni tasemeid reguleerida.

Ventilatsiooni projekteerimisväärtus koosneb kahest komponendist: ventilatsioon ruumis viibijate saaste eemaldamiseks ning ventilatsioon hoonest ja süsteemidest saaste eemaldamiseks.

Inimheitmete eemaldamiseks nõutud õhuvooluhulgad esitatakse Tabel 2.

Tabel 2. Ventilatsiooni projekteerimisväärtused inimheitmete lahjendamiseks

Kategooria	Õhuvooluhulk isiku kohta, l/s
I	10
II	7
III	4

Hoone saaste jaoks arvutatakse ventilatsiooni tasemed Tabel 3 kohaselt. Vaikimisi on hoone madala saastusega.

Tabel 3. Ventilatsiooni projekteerimisväärtused saaste lahjendamiseks hoonest

Kategooria	Väga madala saastusega hoone l/(s *m ²)	Madala saastusega hoone l/(s *m ²)	Ilma madala saastusega hoone l/(s *m ²)
I	0,5	1,0	2,0
II	0,35	0,7	1,4
III	0,2	0,4	0,8

2.3.2 EVS 906:2018 Mitteeluhoonete ventilatsioon [13]

Pealkiri. Mitteeluhoonete ventilatsioon. Üldnõuded ventilatsiooni- ja ruumiõhu konditsioneerimissüsteemidele. Eesti rahvuslik lisa standardile EVS-EN 16798-3:2017 .

Standard on rakendatav koos põhistandardiga EVS-EN 16798 .

Nõuded CO₂ tasemele mitteeluhoonetes. CO₂ kontsentratsioon ei tohi klassiruumides õppetöö ajal ületada 1000 ppm-i ning koosolekuruumides 1200 ppm-i.

Nõuded õhuvooluhulkadele mitteeluhoonetes. Õhuvooluhulgad võib määrata arvutuse teel, lähtudes ohtlike ainete, liigsoojuse või liigniiskuse eraldumisest ruumis. Metoodika toodud standardi Lisas B.

Standardi Lisas B on esitatud normarvud, millele peab sissepuhke õhuvooluhulk vähemalt vastama. Tabel 4 tuuakse töös käsitletud ruumide ventilatsiooni normarvud.

Tabel 4. Ventilatsiooni normatiivarvud

Ruum/kasutus	Õhuvooluhulk isiku kohta, l/s	Õhuvooluhulk ruutmeetri kohta, l/s
Klassiruum	8	4
Auditoorium	8	6
Kontor	10	1,5

2.3.3 Vabariigi valitsuse määrus nr 84. [14]

Määrusega kehtestatakse tervisekaitsenõuded koolidele, sh ülikoolide sisekliimale.

Nõuded CO₂ tasemele mitteeluhoonetes. Õpperuumi ühes liitris siseõhus võib olla keskmiselt kuni 1000 mikrolitrit (ppm) süsinikdioksiidi.

Nõudeid õhuvooluhulkade kohta ei ole määruses esitatud.

2.4 Õhukvaliteet

Lõputöö üks eesmärk on tagasiside ja mõõteandmete analüüsis hinnata ruumi õhukvaliteeti. Õhukvaliteedi hindamisel lähtutakse peamiselt CO₂ kontsentratsioonist ruumis [12].

Õhukvaliteedi puhul on inimese taju oluline, kuid alati õhukvaliteedi hindamiseks sellest ei piisa. Lõhnavaba õhk ei tähenda alati head õhukvaliteeti. [15]

Siseõhk sisaldab erinevaid orgaanilisi ja anorgaanilisi gaasilisi saasteaineid. Inimesed eraldavad ruumiõhku anorgaanilist süsihappegaasi. Orgaanilistest saasteainetest on tuntumad aromaatsed süsivesinikud, mida nimetatakse VOC-ideks ehk lenduvateks orgaanilisteks ühenditeks. Orgaaniliste saasteainete kontsentratsioonid on siseõhus üldiselt alla 1 ppm-i, hästi ventileeritud ruumides aga 0,1 ppm. Paljusid inimestelt ja materjalidelt eraldunud saasteained võib tajuda kui lõhnu. [15]

Tahkete osakeste kontsentratsiooni väljendatakse näiteks PM-i (*particular matter*) tasemetena. [15]

PM₁₀ on suuremate kui 10 µm osakeste kontsentratsiooni µg/m³;

PM_{2,5} on suuremate kui 2,5 µm osakeste kontsentratsiooni µg/m³.

Need võivad tekkida looduslike protsesside, nagu põlemise ja erosiooni ning inimtegevuse käigus. Samuti kuuluvad siia viirused, suits, baktereid kandvad osakesed, õietolm ja seeneeosed. [15]

Osakesed, mille diameeter on väiksem kui 10 µm jäävad õhku heljuma, liiguvad õhuga kaasa ning ei sadestu. Sisse hingates võivad sellised osakesed jõuda kopsudesse. Kopsudes sadestunud saasteained võivad aja jooksul põhjustada tervise halvenemist. [15]

2.4.1 Välisõhu saastatus

Saasteainete kontsentratsiooni välisõhus võib suurel määral varieeruda. Välisõhus on peamine tahkete saasteainete allikas liiklus ja tööstuste heitgaasid. Saasteainete kontsentratsioon on kõrgem liikluse tipptundide ajal ning suurte teede ääres.

Maapiirkondades on õhk märgatavalt puhtam. Saaste kontsentratsiooni mõjutab ka tuule suund. [15]

Saasteainete kontsentratsiooni mõõdavad kohalikud keskkonnatalitlused. TalTechile lähim saasteainete seirejaam asub Tallinnas Õismäe teel. [16]

2.4.2 Siseõhu saastatus

Tüüpilised hoonesisesed saasteallikad on sisustus, ehitusmaterjalid, kontoriseadmed, inimesed, allergeenide allikad ja sissepuhkeõhk. [15]

Materjalide ja sisustuse lenduvate orgaaniliste ainete emissioon kahaneb aja jooksul võrreldes esialgsega poole võrra. Soovitatav on valida materjale, mis ei põhjusta soovimatuid emissioone. [15]

Inimesed ja nende tegevus on tavaliselt kõige suurem saasteainete allikas siseõhus. Tahketest saasteainetest võib leida peamiselt naha- ja riideosakesi. Inimese poolt eraldatud osakeste tekkimine oleneb inimese tegevusest ja aktiivsusest. [15]

Inimesed mõjutavad ruumi CO₂ sisaldust olulisel määral. CO₂ on hea indikaator ning koos sellega saab hinnata ka teisi inimeselt eraldunud saasteainete taset. CO₂ üksi probleeme ei tekita ja tavaliselt sisekliima tajumist ei mõjuta. [15]

Allergeenid võivad pärineda koduloomadelt ja tolmukestadelt. Allergeenid, näiteks fragmendid kassi või koera karvadest, kinnituvad väikeste osakeste külge ning jäävad õhku hõljuma pikaks ajaks. Seega ei pea ärrituseks otseselt loomaga kokku puutumagi. [15]

Saasteained võivad ruumi jõuda ka sissepuhkeõhu kaudu. Kui õhuvõtuavad paiknevad tiheda liikluskoormusega tänava suunas võib sissepuhkeõhku jõuda autode heitgaase ja tolmu. Tolmu eemaldamiseks saab kasutada filtreid, kuid gaasilisi aineid need kinni ei pea. [15]

2.4.3 Saasteainete eemaldamise efektiivsus

Õhuvahetuse efektiivsus inglise keeles *contaminant removal effectiveness (CRE)* iseloomustab ventilatsiooni võimet eemaldada ruumist saasteaineid. Ideaalolukorras on õhk ruumis on täielikult segunenud ning saasteainete hulk ruumi ulatuses on sama. [17]

Üks võimalus õhuvahetuse efektiivsuse kindlaks tegemiseks on võrrelda väljatõmbeõhu ja ruumiõhu keskmist süsihappegaasi sisaldust. [17]

$$CRE = \frac{\text{konsentratsioon väljatõmbeõhus}}{\text{keskmine konsentratsioon ruumiõhus}} \quad (2.1)$$

Valemit 2.1 saab rakendada üksikute ruumide ja tsoonide korral. Ruumis peavad olema määratletud sissepuhke- ja väljatõmbeavad. Usaldusväärsete tulemuste saamiseks ei tohiks olla suuri avasid ega uksi. Seega ei sobi valem rakendamiseks eraldiseisvalt siirdeõhuga lahendatud ruumide korral. Kui kaks kõrvuti asetsevat ruumi on ühendatud suure avaga tuleks neid käsitleda ühe tsoonina. Iga väljatõmbe ava juures on vajalik mõõtesead. Seetõttu on hea kui on olemas ventilatsiooni projekt. [17]

Hea tulemuse korral on süsihappegaasi kontsentratsioon ruumis võrreldes väljatõmbeõhu süsihappegaasi kontsentratsiooniga madal. Väljatõmbeõhu süsihappegaasi sisaldus sõltub selle vabanemise kiirusest. [17]

Kui saasteallikad, näiteks kontoriruumide puhul töökohad, on teada tuleks projekteerides lähtuda saasteallika asukohast. Vastasel juhul tuleks projekteerimise etapis leida lahendus, kuidas õhuvahetus ruumis toimuks kõige kiiremini. [17]

2.5 Soojuslik sisekliima

Lõputöö üks eesmärk on tagasiside ja mõõteandmete analüüsis hinnata ruumi soojuslikku mugavust.

Soojuslik sisekliima ja mugavus on inimestele oluline, kuid inimesed võivad seda erinevalt hinnata. Soojusliku mugavuse nõuded rakenduvad viibimistsooni piires. [15]

2.5.1 Temperatuur

Soojusliku mugavuse hindamisel lähtutakse peamiselt õhutemperatuurist.

Õhutemperatuur on soojusliku sisekliima iseloomustamiseks lihtsasti arusaadav ja mõõdetav. Soojusliku sisekliima tunnetust võivad mõjutada ka ümbritsevate pindade temperatuurid ja õhu liikumise kiirus. [15]

Operatiivne temperatuur, mis saadakse ruumiõhu temperatuuri ja ümbritsevate pindade keskmise temperatuuri alusel, on soojusliku mugavuse kirjeldamiseks parem kriteerium. [15]

Tuuletõmbuse vältimiseks tuleb ventilatsiooni projekteerimisel kontrollida, et sissepuhkeõhu kiirus ei ületaks kontoriruumides, auditooriumites, klassiruumides jm 0,20 m/s. Tuuletõmbus võib põhjustada kehatemperatuuri langust ning haigestumist. [13]

Tänapäevased hooned on tavaliselt hea soojustakistusega akendega ning hästi soojustatud. Isegi talvel on ruumi seinapindade temperatuurid lähedased ruumiõhu temperatuurile. Aknad on küll jahedamad, aga kui need väga suured ei ole, on operatiivne temperatuur ikkagi võrdväärne ruumiõhu temperatuuriga. [15]

Suured klaaspinnad avaldavad negatiivset mõju temperatuuri tajumisel. Seega suurte klaaspindadega ruumide puhul tuleks operatiivset temperatuuri siiski arvesse võtta. Mida suurem on madala temperatuuriga aknapind, seda madalam on operatiivne temperatuur võrreldes õhutemperatuuriga. Selle kompenseerimiseks on vajalik kõrgem ruumiõhu temperatuur. [15]

Kui akna all on küttekehad, näiteks radiaatorid, siis kompenseerivad need aknapinna madalat temperatuuri. Uutel suurte klaaspindadega büroohonetel on tarindite soojapidavus tihti nii hea, et termostaatidega varustatud küttekehad tööpäeva jooksul töötama ei peagi, vaid ainult töövälisel ajal. Väikene soojuskadu saab kaetud valgustuse, seadmete ja inimeste poolt eraldatud soojusega. Sel juhul akende all paiknevad küttekehad operatiivset temperatuuri ei tõsta. [15]

2.5.2 Metabolism ja riietus

Inimese elutegevuse käigus eraldub konvektsiooni, aurumise ja kiirguse teel soojust. Ainevahetuse ehk metabolismi mõistet kasutatakse elusorganismide elus püsimiseks vajalike protsesside kirjeldamiseks. Metabolismi ühikuks on 1. met. Metabolismi suurus sõltub inimese tegevuse aktiivsusest. Üks met on võrdne rahulikus olekus oleva inimese ainevahetusega. Istuvas asendis laua taga töötades on metabolismi suurus 1,5 met. Raske füüsilise töö tegemine on võrdväärne umbes 4,5 met'iga. 1 met puhul on soojusvooluks inimese keha pinna ruutmeetrilt 58,2 Watti. [15]

Soojusliku sisekliima tajumine sõltub otseselt ka riietusest. Riietuse soojustakistust mõõdetakse riietuse ühikutes, clo. 0,5 clo vastab kergele toa riietusele, 1,5 clo soojale toariietusele. [15]

2.5.3 Soojusliku sisekliima tajumine

Vastavalt standardile EVS-EN 16798-1:2019+NA:2019 [12] jagatakse sisekliima sisekeskkonna kvaliteedi alusel nelja kategooriasse. Kategooriad on seotud ruumis viibijate ootustega: kõrge, keskmine, tagasihoidlik ja madal ootuse tase. Kõrge tase võidakse valida kui tegemist on haavatavamate ühiskonnakihtidega, näiteks laste, vanurite, puuetega inimestega. Tavaliselt on nõutud keskmine tase. Madal tase ei põhjusta otseseid terviseriske, kuid võib põhjustada kaebusi ja ebamugavustunnet. [12]

Sisekliimaklasside piiride määramisel on lähtutud tabelist 5.

Tabel 5. Sisekliimaklasside temperatuurivahemikud [12]

Hoone või ruumi tüüp	Kategooria	Temperatuurivahemik kütteperioodiks, C
Kontorid ja ruumid sarnase tegevusega (konverentsiruumid, auditoorium, klassiruumid)	I	21 kuni 23
	II	20 kuni 24
	III	19 kuni 25

Ebamugavustunne võib omakorda viidata haige hoone sündroomile. Mõiste haige hoone sündroom viitab mittespetsiifilistele kaebustele, sealhulgas ülemiste hingamisteede ärritus, peavalud, väsimus, lööve ja silmade kuivus. Haige hoone sündroom on kasvav

probleem. See on kaasnenud energiatõhusamate õhutihedate hoonete rajamisega, kus loomulik ventilatsioon läbi ebatiheduste on vähenenud, kuid mehaaniline ventilatsioonisüsteem, kas puudub või ei vasta vajadusele. Üldiselt on mitte-tööstuslikes siseruumides kokkupuude keemiliste, füüsiliste ja bioloogiliste saasteainetega madal, kuid väga levinud. Hoone siseõhu kvaliteedi hindamine on haige hoone sündroomi tuvastamiseks olulisel kohal. [18]

Rahvusvaheliselt tuntud standardis ISO 7730:2005 [19] on lahti kirjutatud Taani professor Fanger'i poolt loodud PMV ja PPD indeksite arvutus, mis näitavad seost inimese taju ja sisekliima parameetrite vahel. Seos võtab arvesse õhutemperatuuri, kiirgustemperatuure, õhu liikumist, niiskust, metabolismi suurust ja riietuse tüüpi [15].

PMV (*predicted mean vote*) indeks näitab, kuidas suurem inimrühm soojustundlikkuse keskmist väärtust seitsmepunktilisel skaalal, esitatakse tabelis 6 [19].

Tabel 6. PMV skaala [19]

+3	Palav
+2	Soe
+1	Kergelt soe
0	Keskmine
-1	Kergelt jahe
-2	Jahe
-3	Külm

PMV keskmise hinde kaudu saab leida PPD (*predicted percentage of dissatisfied*) indeksi, näitab soojuslikult sisekliimaga rahulolematute inimeste protsenti suuremas inimgrupis [19].

Standardis EVS-EN 16798-1:2019+NA:2019 [12] tuuakse soovituslikud PPD vahemikud erinevate sisekliimaklasside jaoks, esitatakse Tabel 7.

Tabel 7. Kategoriad mehaaniliselt köetud ja jahutatud hoonete arvutuseks [12]

Kategooria	Keha kui terviku termiline seisund	
	Proгноositud rahulolematute protsent PPD %	Proгноositud keskmine soojustunnetus PMV
I	<6	-0,2 < PMV < +0,2
II	<10	-0,5 < PMV < +0,5
III	<15	-0,7 < PMV < +0,7
IV	<25	-1,0 < PMV < +1,0

Tabelis 8 esitatakse kontorite, auditooriumite ja klassiruumide operatiivtemperatuurid sisekliimaklasside kaupa.

Tabel 8. Sise-operatiivtemperatuuri vaikumisi projekteerimisväärtused talvel ja suvel

Hoone/ruumi tüüp	Kategooria	Operatiivtemperatuur C	
		Minimaalne kütte jaoks (talveperiood)	Maksimaalne jahutuse jaoks (suveperiood)
Kontorid ja ruumid sarnase tegevusega (üksikud kontorid, avatud planeeringuga kontorid, konverentsiruumid, auditoorium, kohvik, restoran, klassiruum Istuv 1,2 met		Umbes 1,0 clo	Umbes 0,5 clo
	I	21,0	25,5
	II	20,0	26,0
	III	19,0	27,0
	IV	18,0	28,0

2.6 Sisekliima tagasiside kogumine

Lõputöö peamine eesmärk on reaajas tagasiside kogumine.

Standardi CEN/TR 16798-2:2019 [2] Lisa E kohaselt saab sisekeskkonna üldiseks hindamiseks kasutada elanike subjektiivseid arvamusi. Võib kasutada igapäevast, iganädalast, igakuist hindamist küsimustikele vastamise näol, et saada infot sisekeskkonna, soojustundlikkuse ja tajutava õhukvaliteedi üldisest aktsepteerimisest. Küsimustikud võib kasutajatele täitmiseks anda paberkujul või veebiteel. Küsimustikud tuleks kätte jagada hommikupoolikul või pärastlõunal, kuid mitte kohe hommikul saabudes ega pärast lõunapausi. Tulemused võib esitada keskmiste väärtustena või sektordiagrammina. [2]

Tabel 9 esitatakse näited küsimustest, mis on sobivad sisekliima subjektiivseks hindamiseks. Lisaks võib küsida, kas eelistatakse kõrgemat, madalamat või sama temperatuuri.

Tabel 9. Subjektiivse hindamise küsimuste näited [2]

Kuidas hindad soojuslikku mugavust?	Kuidas tajud temperatuuri?
Palav	Selgelt vastuvõetav
Soe	
Kergelt soe	Vastuvõetav
Keskmine	Mittevastuvõetav
Kergelt jahe	
Jahe	Selgelt mittevastuvõetav
Külm	
Kuidas hindad õhukvaliteeti?	Kuidas tajud lõhnade intensiivsust?
Selgelt vastuvõetav	Lõhnu ei ole
Vastuvõetav	Kerged lõhnad
Mittevastuvõetav	Mõõdukad lõhnad
Selgelt mittevastuvõetav	Häirivad lõhnad
	Väga häirivad lõhnad
	Talumatud lõhnad

3. METOODIKA

Antud peatükis esitatakse ülevaade lõputöö koostamisel rakendatud meetodikatest, tuuakse välja uuritavad ruumid ja mõõteseadmed. Peatükis käsitletakse kolme põhilist teemavaldkonda: sisekliimaklasside piiride määramine, mõõteandmete kogumine, tagasiside reaalajas kogumine ja andmeanalüüs.

Lõputöös keskendutakse reaalajas tagasiside kogumisele. Tagasiside kogumiseks kasutatakse Thinnect platvormi. Alustati tagasiside küsimise plakatite ja Aranet andurite paigaldamisega ruumidesse. Seejärel koguti kahe kuu jooksul tagasiside ja mõõteandmeid. Edasi võrreldi mõõdetud ruumiõhu parameetreid reaalajas kogutud kasutajate tagasisidega. Andmete ja tagasiside analüüs põhineb peamiselt õhutemperatuuril ja CO₂ kontsentratsiooni uurimisel.

3.1 Ruumide valik

Hoone sisekliimat tuleb hinnata selle iseloomulike ruumide põhjal. Iseloomulikud ruumid on hoones kõige tavapärasemalt esinevad ning pidevalt viibitavad töö- või eluruumid [20]. Ülikoolis on nendeks ruumideks auditooriumid, klassiruumid ja kontorid.

EDIAQI projekti valitud ruumidega on kaetud suurem osa peamaja korpustest ning esindatud erineva suuruse ja kasutusega ruumid. Lisaks on neli ruumi Ehituse Mäemajast (CON). Valitud ruumid on jagatud ruumipaigutuse kaupa ja toodud Tabel 10.

Tabel 10. Valitud ruumid ruumipaigutuse kaupa

Auditoorium >100 kohta	Klassiruum	Kontorid/väiksemad koosolekuruumid
U03-103	U05-104	U03-209
U04-103	U05-105	U04-211
U05-103	U06-201	U06-222
STU-201	U06-304	CON-206
	CON-309	CON-207
	CON-310	

3.1.1 Ruumide kirjeldus

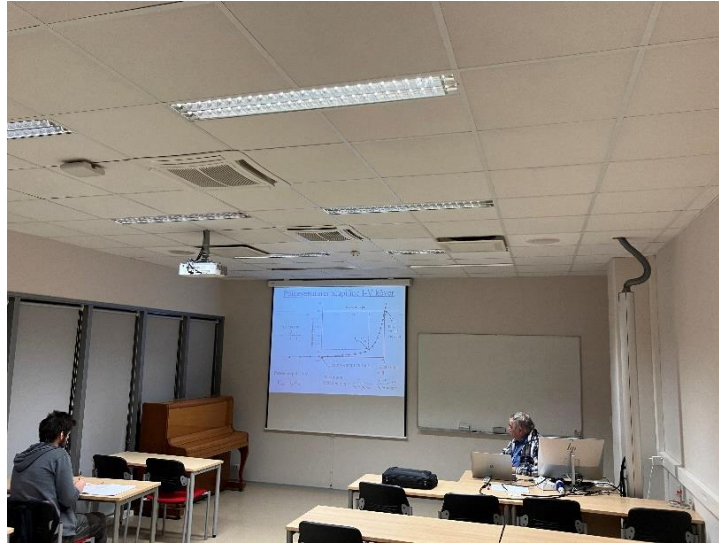
Põhjalikum analüüs tehakse ruumidele U06-304, U06-222, U06-201, U03-103, U04-103, U05-103 ja U05-105. Joonistel 1 kuni 7 kirjeldatakse õhujaotajate paigutust nendes ruumides.



Joonis 1. Auditoorium U06-304, akna pool neli sissepuhke ja seina pool neli väljatõmbe õhujaotajat



Joonis 2. Koosolekuruum U06-222, akna pool kaks sissepuhke õhujaotajat ja seina pool väljatõmberest



Joonis 3. Klassiruum U06-201, ukse pool kaks sissepuhke ja seina pool kaks väljatõmbe õhujaotajat



Joonis 4. Auditorium U04-103, tagaseinas väljatõmberestid ja uksepoolse seina vastas sissepuhke õhujaotajad [21]



Joonis 5. Auditorium U04-103, tagaseinas väljatõmberestid ja uksepoolse seina vastas sissepuhke õhujaotajad



Joonis 6. U05-103, tagaseinas väljatõmberestid ja uksepoolse seina vastas sissepuhke õhujaotajad. Alumisel fotol seina ääres valged sissepuhke õhujaotajad, analoogsed ruumides U03-103 ja U04-103 sama paigutusega.



Joonis 7. U05-105, akende pool väljatõmbe ja seina pool sissepuhke õhujaotajad [21]

Ruumide U06-304, U06-222, U06-201 ja U05-105 puhul on tegemist seguneva õhujaotusega. Segunev õhujaotus põhineb tavaliselt ruumiõhust jahedama õhu suurel algiirusel ruumi suunamisel, mis seejärel seguneb ruumi õhuga [17].

U04-103 ja U05-103 on lähimad läbivale õhuvahetusele. Läbiv õhuvahetus on kiireim viis ruumi õhutamiseks. Sissepuhkeõhk antakse ruumi üle terve seina- või laepinna. Õhk liigub ruumiõhuga segunemata läbi ruumi. Õhuvoolukiirus peab stabiilse läbiva õhujaotuse saavutamiseks olema suurem kui inimeste ja tegevuste põhjustatud õhuvoolukiirus. Läbiva õhujaotuse puhul on tegemist ideaalse olukorraga, mis hõivatud ruumide puhul täielikult saavutatav ei ole [15]. Jooniselt 6 on näha, et sissepuhke õhujaotajad ega väljatõmbe restid ei paikne terve seina ulatuses. Samuti on ühe õhujaotaja ees takistuseks klaver.

3.2 Operatiivse temperatuuri leidmine

Operatiivne temperatuur otsustati leida peamaja koridori peal asuvatele auditooriumitele U03-103, U04-103 ja U05-103. Mõõtetulemuste ning tagasiside kõrvutamisel jäi silma, et tagasisideks oli mitmetel kordadel antud jahe, kuigi temperatuur võis olla II sisekliimaklassi piirides. Nimetatud auditooriumid on samasuguse planeeringuga ning suurte akna pindadega (joonis 8).



Joonis 8. Auditoorium U04-103.

Operatiivset temperatuuri on võimalik arvutada valemiga 3.1 [15].

$$t_{op} = \frac{\alpha_k * t_{\bar{o}} + \alpha_r * \bar{t}_r}{\alpha_k + \alpha_r} \quad (3.1)$$

Kus

α_k on konvektiivne soojusülekanne tegur nahapinna ja õhu vahel;

α_r on kiirguslik soojusülekanne tegur ümbritsevate pindade ja nahapinna vahel;

t_0 on õhutemperatuur;

\bar{t}_r on keskmine kiirgustemperatuur ümbritsevatele pindadele, tuletatud absoluutsetest kiirgustemperatuuridest T_{ri}

Kehtib võrrand 3.2 [15].

$$(\bar{t}_r + 273)^4 = \sum_1^n (T_{ri}^4 * F_i) \quad (3.2)$$

F_i on pinna nurgategur.

Tavatingimustel on pinna soojusülekanne tegurite väärtused praktiliselt samad ja operatiivne temperatuur väljendub kujul 3.3 [15].

$$t_{op} = \frac{t_0 + \bar{t}_r}{2} \quad (3.3)$$

3.2.1 Keskmise kiirgustemperatuuri leidmine

Keskmine kiirgustemperatuur arvutatakse ümbritsevate pindade temperatuuri kaudu vastavalt standardile EVS-EN ISO 7726:2003 [22]. Meetodi kasutamiseks on vaja leida inimese ja ümbritsevate pindade vahelised nurgategurid.

Enamikul ehitusmaterjalidel on kõrge kiirgusvõime ning eeldatakse, et kõik pinnad ruumis on mustad. Seejärel kasutakse seost 3.4 [22].

$$\bar{T}_r^4 = T_1^4 F_{p-1} + T_2^4 F_{p-2} + \dots + T_N^4 F_{p-N} \quad (3.4)$$

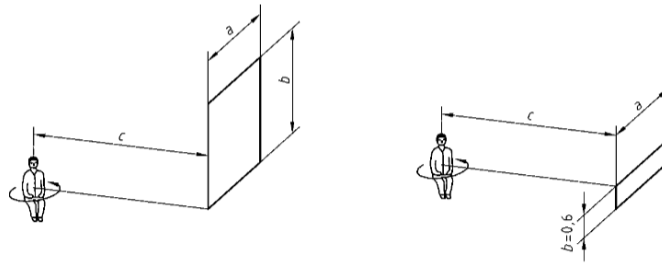
Kus

\bar{T}_r on keskmine kiirgustemperatuur kelvinites;

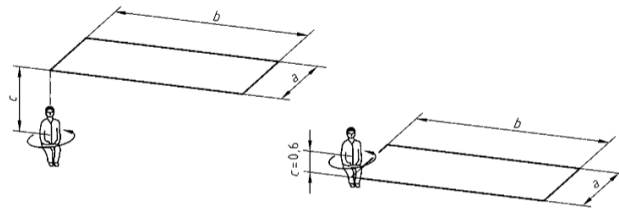
T_N on pinna N pinnatemperatuur kelvinites;

F_{p-N} on nurgategur pinna N ja inimese vahel.

Standardis EVS-EN ISO 7726:2003 [22] on toodud diagrammid erineva paigutusega ristkülikukujuliste pindade nurgategurite leidmiseks. Nurgategurite leidmiseks on vaja teada ristkülikukujulise pinna mõõtmeid ja inimese kaugust nendest (Joonis 9 ja 10).





Joonis 9. Istuva inimese ja vertikaalse ristküliku (allpool või ülevalpool inimese keset) vahelise nurgateguri keskvaärtuse leidmine [22]



Joonis 10. Istuva inimese ja horisontaalse ristküliku (põranda või lae) vahelise nurgateguri keskvaärtuse leidmine [22]

Kasutatavad mõõteseadmed. Kauguste mõõtmiseks kasutatakse tootja Bosch distantismõõturit ning pinnatemperatuuride leidmiseks tootja Flir Systems AB termokaamerat. Tabel 11 on esitatud seadmete tehnilised andmed.

Tabel 11. Operatiivse temperatuuri leidmiseks kasutatavate seadmete tehnilised andmed [23], [24].

Mõõteseade	Flir B50	GLM 40 PROFESSIONAL
Kirjeldus	Termokaamera	Laserkaugusmõõtja
Illustreeriv pilt		
Mõõtepiirkond	-20°C kuni 120°C	0,15 kuni 40 m
Resolutsioon	140 x 140 pikslit	
Mõõtetäpsus	±2%, ±2°C	±1,5 mm

3.3 Sisekliimaklasside piiride määramine arvutuslikult

Sisekliimaklasside piiride arvutuslikuks määramiseks arvutatakse CO₂ piirkontsentratsioonid võttes arvesse ruumide pindala, materjalide emissioone (Tabel 3) ja õhuvooluhulka inimese kohta (Tabel 2).

3.3.1 Arvutuse näide U06 304 põhjal

Tabelites 12, 13, 14 ja 15 tuuakse U06-304 näitel sisekliimaklasside piiride määramine arvutuslikult.

Ruumi pindala: 77 m²

Inimeste arv vastavalt laudade ja toolide arvule: 39

Süsihappegaasi eraldus inimese kohta: 20 l/h

Süsihappegaasi sisaldus: 400 ppm

Tabel 12. Õhuvooluhulk inimeste arvu põhjal

Õhuvooluhulk inimeste arvu põhjal, I klass:	$39 \text{ inimest} * 10 \frac{l}{s * inimene} = 390 \text{ l/s}$
Õhuvooluhulk inimeste arvu põhjal, II klass:	$39 \text{ inimest} * 7 \frac{l}{s * inimene} = 273 \text{ l/s}$
Õhuvooluhulk inimeste arvu põhjal, III klass:	$39 \text{ inimest} * 4 \frac{l}{s * inimene} = 156 \text{ l/s}$

Tabel 13. Õhuvooluhulgad sisekliimaklasside kaupa emissioonide põhjal

Õhuvooluhulk emissioonide põhjal, I klass:	$1 \frac{l}{s * m^2} * 77m^2 = 77 \text{ l/s}$
Õhuvooluhulk emissioonide põhjal, II klass:	$0,7 \frac{l}{s * m^2} * 77m^2 = 53,9 \text{ l/s}$
Õhuvooluhulk emissioonide põhjal, III klass:	$0,4 \frac{l}{s * m^2} * 77m^2 = 30,8 \text{ l/s}$

Tabel 14. Õhuvooluhulk kokku

Õhuvooluhulk, I klass:	$390 \frac{l}{s} + 77 \frac{l}{s} = 467 l/s$
Õhuvooluhulk, II klass:	$273 \frac{l}{s} + 53,9 \frac{l}{s} = 326,9 l/s$
Õhuvooluhulk, III klass:	$156 \frac{l}{s} + 30,8 \frac{l}{s} = 186,8 l/s$

Tabel 15. Sisekliimaklassidele vastavad süsihappegaasi tasemed

Süsihappegaasi tase, I klass:	$400 ppm + \frac{39 in * 20 \frac{l}{h}}{467 \frac{l}{s}} * \frac{10^6}{3600} = 864 ppm$
Süsihappegaasi tase, II klass:	$400 ppm + \frac{39 in * 20 \frac{l}{h}}{326,9 \frac{l}{s}} * \frac{10^6}{3600} = 1062 ppm$
Süsihappegaasi tase, III klass:	$400 ppm + \frac{39 in * 20 \frac{l}{h}}{186,8 \frac{l}{s}} * \frac{10^6}{3600} = 1559 ppm$

3.4 Mõõteandmete kogumine

Tagasiside hindamisel lähtutakse kahte tüüpi anduritest: hoone automaatika andurid, ning Aranet andurid. Viimased on ruumidesse, millele lõputöö peamiselt keskendub, paigaldatud lisaks mõõteandmete kogumiseks, usaldusväärseks ja topelt mõõtmiseks.

Ruumides U06-201, U06-222 ja U03-103 paiknevad BMS andurid ukse kõrval. Ruumis U06-304 uksest umbes kolme meetri kaugusel samas seinas. Auditoriumis U05-103 paikneb BMS andur ruumi tagaseinas ja auditoriumis U04-103 väljatõmbekanalisis.

Aranet andurite paigaldamisel jälgiti, et anduritele ei mõjuks kiirgust lähedalasuvatest soojusallikatest. Sellisel juhul ei oleks mõõdetav temperatuur tegelik õhutemperatuur, vaid õhu temperatuuri ja keskmise kiirgustemperatuuri vahepealne temperatuur. [22]

3.4.1 Thinnect veebiplatvorm ja andurid

Thinnect OÜ pakub õhukvaliteedi monitoorimise lahendust, mis koosneb anduritest ja pilvetöölauast, kuhu erinevatest ruumidest tulev andmestik kuvatakse. [25]

Andurid on sobivad põhjalikuks õhukvaliteedi analüüsiks ning mõõdavad temperatuuri, suhtelist niiskust, süsihappegaasi (CO₂) kontsentratsiooni, lenduvaid orgaanilisi ühendeid (inglise keeles *Volatile organic compounds*, lühendiga VOC), osooni (O₃), peenosakesi (inglise keeles *Particulate matter*, lühendiga PM_{2.5}). [25]

Paraku tagasiside kogumise perioodi jooksul nimetatud andurid üheski ruumis tööle ei hakanud ning peenosakeste ja lenduvate ühendite mõõteandmeid ei saanud (joonis 11).




Joonis 11. Thinnect andur [25]

3.4.2 Aranet andurid

Aranet4 anduri puhul on tegemist kaasaskantava juhtmevaba anduriga. Andur on mõeldud kasutamiseks koos Aranet Home mobiilirakendusega, kust saab kogutud andmed .csv faili kujul alla laadida. Tabel 16 tuuakse andurit tehnilised andmed.

Tabel 16. Aranet tehnilised andmed [27]

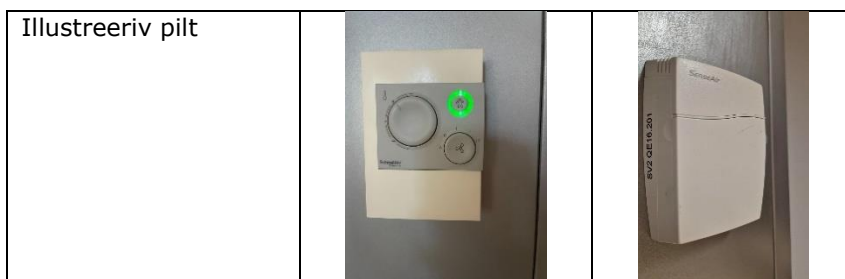
Mõõteseadme nimetus	Aranet4 HOME
Mõõdetavad parameetrid	Temperatuur CO ₂ kontsentratsioon Suhteline õhuniiskus Atmosfäärirõhk
Mõõtepiirkond	0 °C kuni 50 °C 0-9999 ppm 0-85 % 600-1100 hPa
Mõõtetäpsus	±0,3°C ±30 ppm ±3 % +3 hPa / -2 hPa
Illustreeriv pilt	

3.4.3 BMS andurid

Tabel 17 tuuakse hoone automaatika andurite tehnilised andmed.

Tabel 17. BMS andurite tehnilised andmed [28], [29]

Mõõteseadme nimetus	Schneider STR610	SenseAir aSENSE VAV h.Display
Mõõdetavad parameetrid	Temperatuur	Temperatuur CO ₂ kontsentratsioon
Mõõtepiirkond	0 °C kuni 50 °C	0 °C kuni 50 °C 0 - 2000 ppm
Mõõtetäpsus	±3°C	±1°C ±20 ppm



3.5 Reaalajas tagasiside küsimine

Thinnect platvorm võimaldab lisaks mõõteandmete kogumisele ning kuvamisele tagasiside küsimist kasutajatelt. Iga ruumi kohta on genereeritud QR-kood, mis viib veebiaknale, kus saab anda tagasisidet just konkreetse ruumi kohta. Plakat esitatakse joonisel 12 ja veebiaknad joonisel 13.

Ruumide lõikes on küsimused samad. Küsimuste koostamisel on lähtunud standardis CEN/TR 16798-2:2019 [2] toodud subjektiivse sisekliima hindamise küsimuste näidetest. Küsimuste mahu kompaktsena hoidmise eesmärgil ei ole peatükis 2.6 tabelis 9 toodud küsimusi rakendatud täies mahus. Küsimused ja vastuste variandid esitatakse tabelis 18.

Tabel 18. Tagasiside küsimustik

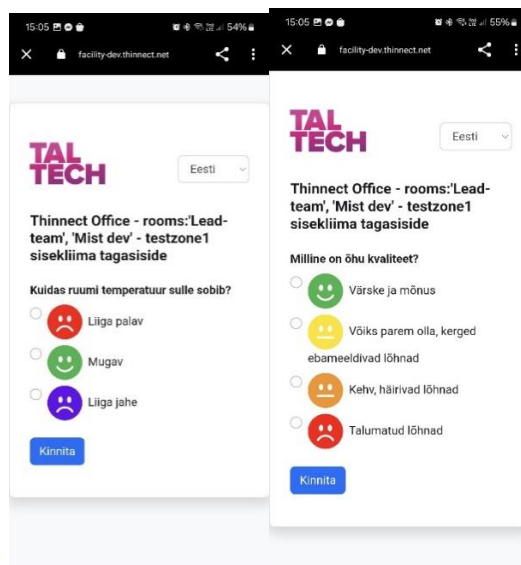
Küsimus	Vastuste variandid			
Kuidas sulle ruumi temperatuur sobib?	Jahe	Mugav	Palav	
Milline on õhukvaliteet?	Värske ja mõnus	Võiks parem olla	Kehv	Talumatu

Uuritavate ruumide uste juurde paigaldati plakatid QR-koodiga tagasiside küsimiseks (Joonis 12. Sisekliima tagasiside küsimise plakat). Skännides QR-koodi avaneb veebiaken, kus saab hinnata ruumi temperatuuri ja õhukvaliteeti (Joonis 13). Mõnedesse auditooriumitesse ja klassiruumidesse on lisaks pandud QR-koodi kleepsud laudadele, et rohkem tagasisidet koguda (Joonis 14).

Andmed on Thinnect pilveplatvormilt alla laaditavad .csv faili kujul. Kui viie minuti jooksul annavad tagasisidet mitu kasutajat kuvatakse tagasiside tulemuse keskmine.



Joonis 12. Sisekliima tagasiside küsimise plakat



Joonis 13. Tagasiside küsimustiku veebiaknad



Joonis 14. Tagasiside QR-kood laual

3.6 Andmeanalüüs

Oluline osa tööst oli võrrelda mõõdetud ruumiõhu parameetreid reaajas kogutud kasutajate tagasisidega. Andmeanalüüsiks on peamiselt kasutatud Microsoft Exceli võimalusi.

Mõnede graafikute tarvis kasutati programmi abi, sest mõõteandmete failid on väga mahukad ning nende manuaalselt läbi töötamine ei ole otstarbekas ning vead on lihtsad tekkima. Andmete sorteerimiseks ja Exceli jaoks ettevalmistamiseks kasutati *Jupyter Notebooki*, mis on interaktiivne keskkond *Pythoni* programmeerimiskeele jaoks. Esimese sammuna loeti sisse mõõtetulemuste andmefailid. Seejärel viidi läbi andmete sorteerimine ja vastavusse panek. Puuduvate andmete korral teostati vastavalt vajadusele andmete puhastamine ja vormindamine. Seejärel jätkati andmete analüüsimist ja visualiseerimist Excelis.

4. TULEMUSED JA ANALÜÜS

Tagasiside kogumiseks võimaluste loomine oli lõputöö mõõteperioodi jooksul algusjärgus. Tagasiside kogumise võimalust loodi ruumidesse järk-järgult. Tagasiside arvu ja jaotust nädalate lõikes vaadeldakse peatükis 4.1 perioodil 22. jaanuar kuni 19. mai.

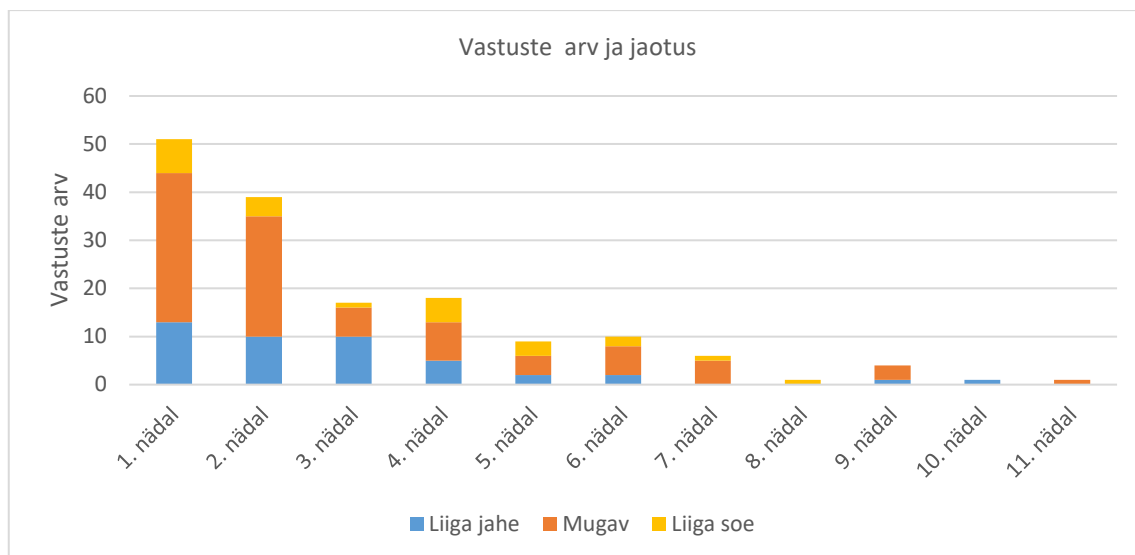
Põhjalikumalt analüüsitakse peatükkides 4.3 ja 4.4 tagasiside vahemikus 22. jaanuar kuni 15. aprill ruumides U06-304, U06-222, U06-201, U03-103, U04-103, U05-103 ja U05-105. U06-304, U06-222 ja U06-201 ruumide graafikud on Aranet andurite põhjal, teised ruumid BMS andurite põhjal.

4.1 Tagasiside arv nädalate lõikes

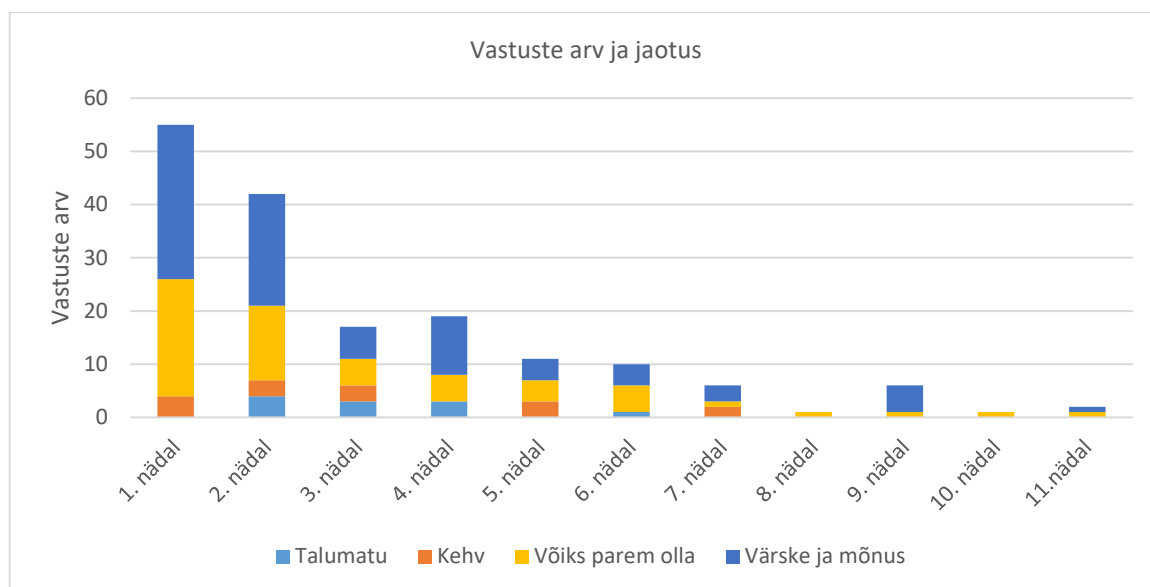
Tagasiside vastuste arvu ja jaotust analüüsitakse kõigis tabelis 10. nimetatud ruumides üheteistkümne nädala jooksul alates vastavasse ruumi QR- koodi paigaldamisest.

Joonistel 15 ja 16 on näha, et nädalate lõikes on vastuste arv languse trendis, erandiga neljandal nädalal. Jooniselt 16 on näha, et esimesel nädal on tagasiside antud kõige enam 56 korral, teisel nädalal 13 korral vähem. Alates kolmandast nädalast väheneb saadud tagasiside arv võrreldes esimese kahe nädalaga üle kahe korra. Viimastel nädalatel on ruumide peale kokku ainult paar vastajat. Väike erinevus vastuste arvus joonistel 15 ja 16 tuleb sisse sellest, et mõnedel juhtudel on vastatud ainult esimesele küsimusele õhukvaliteedi kohta või tulenevalt viie minuti keskmise arvutusest.

Ülikooli loengute tarbeks on kindlaks määratud klassiruumid ja auditooriumid ning ülikooli töötajatel on oma kindlad kontoriruumid. Seega on ruumis viibijad nädalate kaupa enamjaolt samad. Tõenäoliselt on esimesel kahel tagasiside kogumise nädalal, kui QR-koodi esmakordselt avatakse, inimlik huvi, mis on selle taga ning sellepärast saadud vastuseid rohkem kui järgnevatel nädalatel. Tagasiside vastuse hindamisel tuleb hinnata sellele eelnenud viibimisperioodi.



Joonis 15. Vastuste arv ja hinnang temperatuurile nädalate lõikes



Joonis 16. Vastuste arv ja hinnang õhukvaliteedile nädalate lõikes

Auditooriumitesse U03-103, U04-103 ja U05-103 ning klassiruumi U05-105 on paigaldatud laudadele tagasiside küsimise QR-klepsud. Klassiruumidesse U06-201 ja U06-304 klepse pandud ei ole. Auditooriumites on kohtade arv suurem ja potentsiaalseid vastajaid rohkem. Klassiruumide puhul on kohtade arv samas suurusjärgus ning võrreldav. Esimesel kolmel nädalal on kogutud tagasiside puhul märgata, et klassiruumist U05-105 tuleb võrreldes U06-201 ja U06-304 klassiruumidega kaks korda rohkem tagasisidet, kuid edaspidi suurt erinevust ei ole, on üksikud vastajad või üldse mitte.

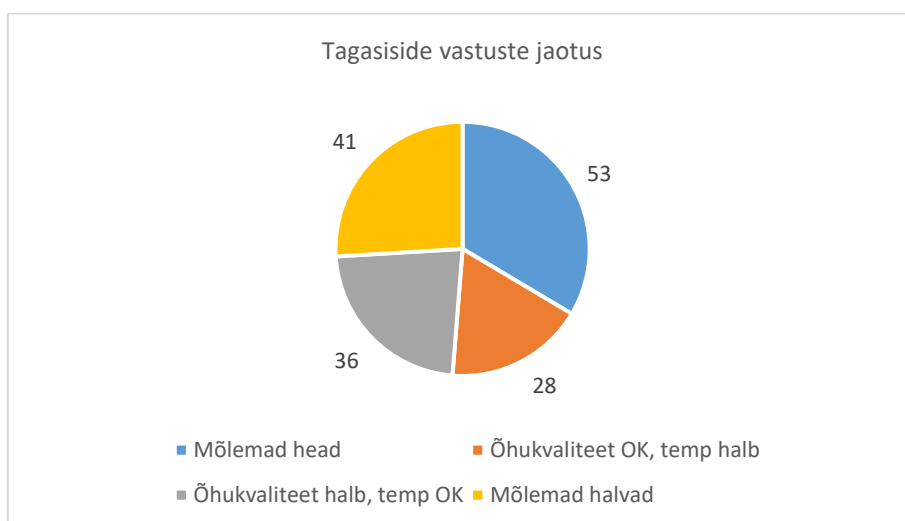
4.2 Tagasiside jaotus

Joonistel 17 ja 18 on toodud tagasiside vastuste jaotus. Sektordiagrammid sisaldavad tagasisidet kõigist ruumidest üheteistkümne nädala jooksul. Üheteistkümne nädala jooksul tuli kõigi ruumide peale tagasisidet 158 korral. 53 korral on olnud õhukvaliteet kui ka temperatuur head. See tähendab, et umbes 34 % kordadest on kasutajate arvates sisekliima olnud ideaalne.

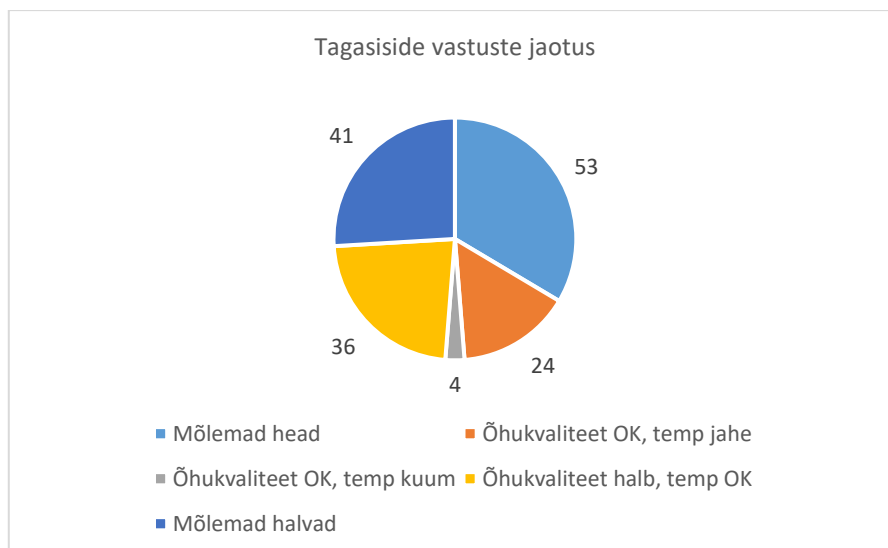
Õhukvaliteeti on peetud väga heaks, kuid temperatuuri üle kurdetud 28 korral. See moodustab umbes 18% antud tagasisidest. Enamikul neist juhtudest, täpsemalt 24 korral, on olnud liiga jahe. See tähendab, et umbes 15% tagasisidest on kasutajate arvates temperatuur olnud liiga madal. Ülejäänud 4 korral on olnud liiga kuum.

41 korral on kurdetud nii temperatuuri kui õhukvaliteedi üle. See moodustab umbes 26% kõigist vastustest. Lõpuks on olnud 36 juhtumit, kus õhukvaliteet on olnud halb, kuid temperatuur on olnud korras. See moodustab umbes 23% kõigist tagasisidetest.

Kuigi informatiivne oleks küsida lisaks vastajate sugu vanust ning lisa küsimusi näiteks akende avatuse, tuuletõmbuse, peale puhumise, võimaliku räiguse kohta ei ole seda tehtud, sest eesmärk on keskenduda õhukvaliteedi hindamisele ja soojuslikule mugavusele ning tõenäoliselt vähendaks küsimuste lisamine vastajate arvu. Eesmärk on koguda võimalikult palju tagasisidet ja näha, kas enamus on rahul.



Joonis 17. Tagasiside vastuste jaotus, temperatuur üldiselt



Joonis 18. Tagasiside vastuste jaotus, temperatuur vastaval jahe või palav

4.3 Tagasiside soojuslikule mugavusele

4.3.1 Temperatuurid tagasisidele eelneval tunnil

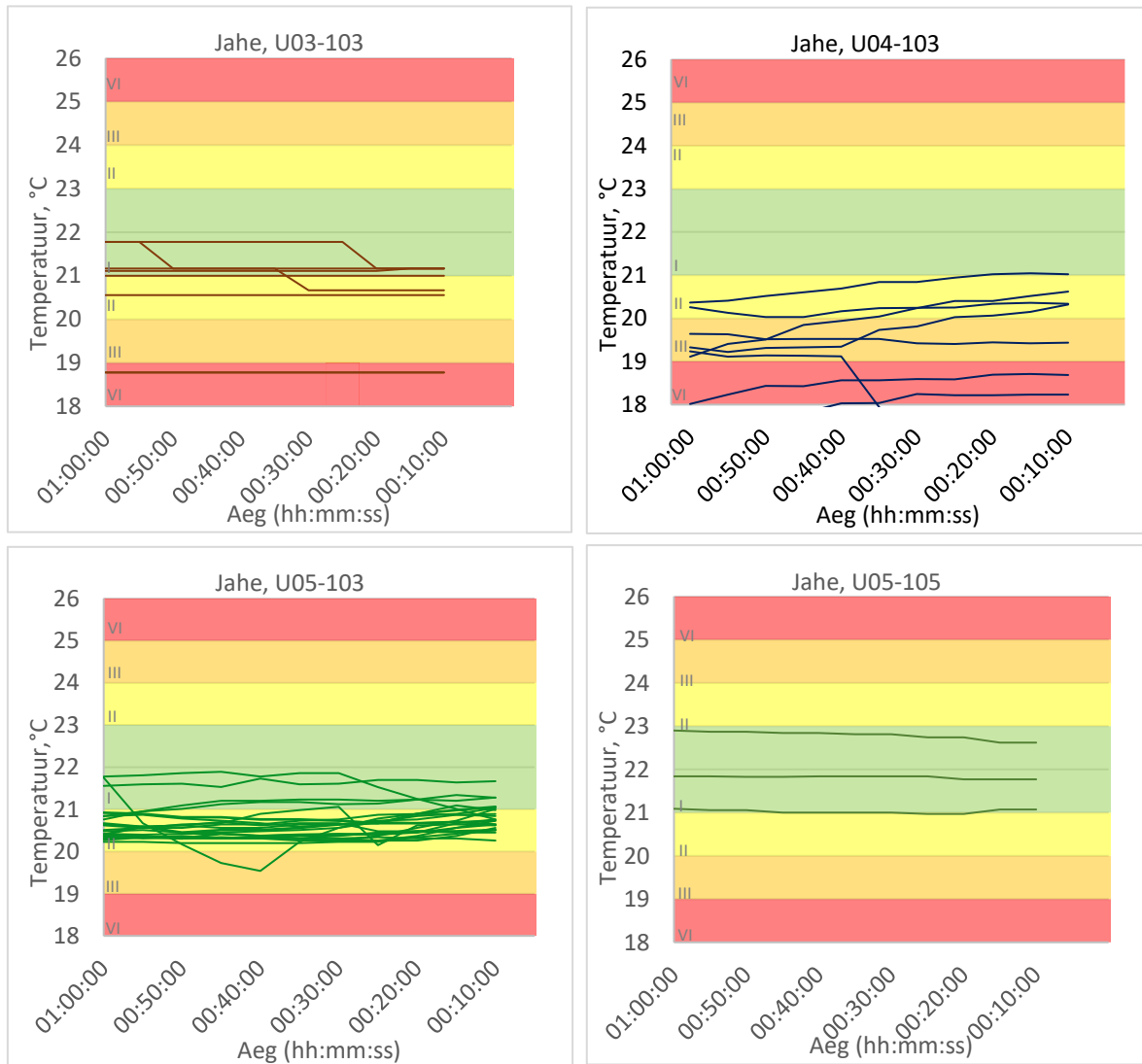
Ruumidele U06-304, U06-222, U06-201, U03-103, U04-103, U05-103 ja U05-105 tehakse põhjalikum analüüs. Tegu on klassiruumide ja auditooriumitega, kust tuli võrreldes ülejäänud ruumidega rohkem tagasisidet.

Joonistel 19, 20 ja 21 kujutatakse vastavalt tabelile 19 sisekliimaklasside temperatuurivahemikke ning temperatuuri tagasiside andmisele eelneva tunni jooksul. Sisekliimaklassid tähistatakse joonistel vastava Rooma numbriga ning eristatakse värvidega. Joonised on kategoriseeritud vastavalt antud tagasisidele: jahe, mugav või palav.

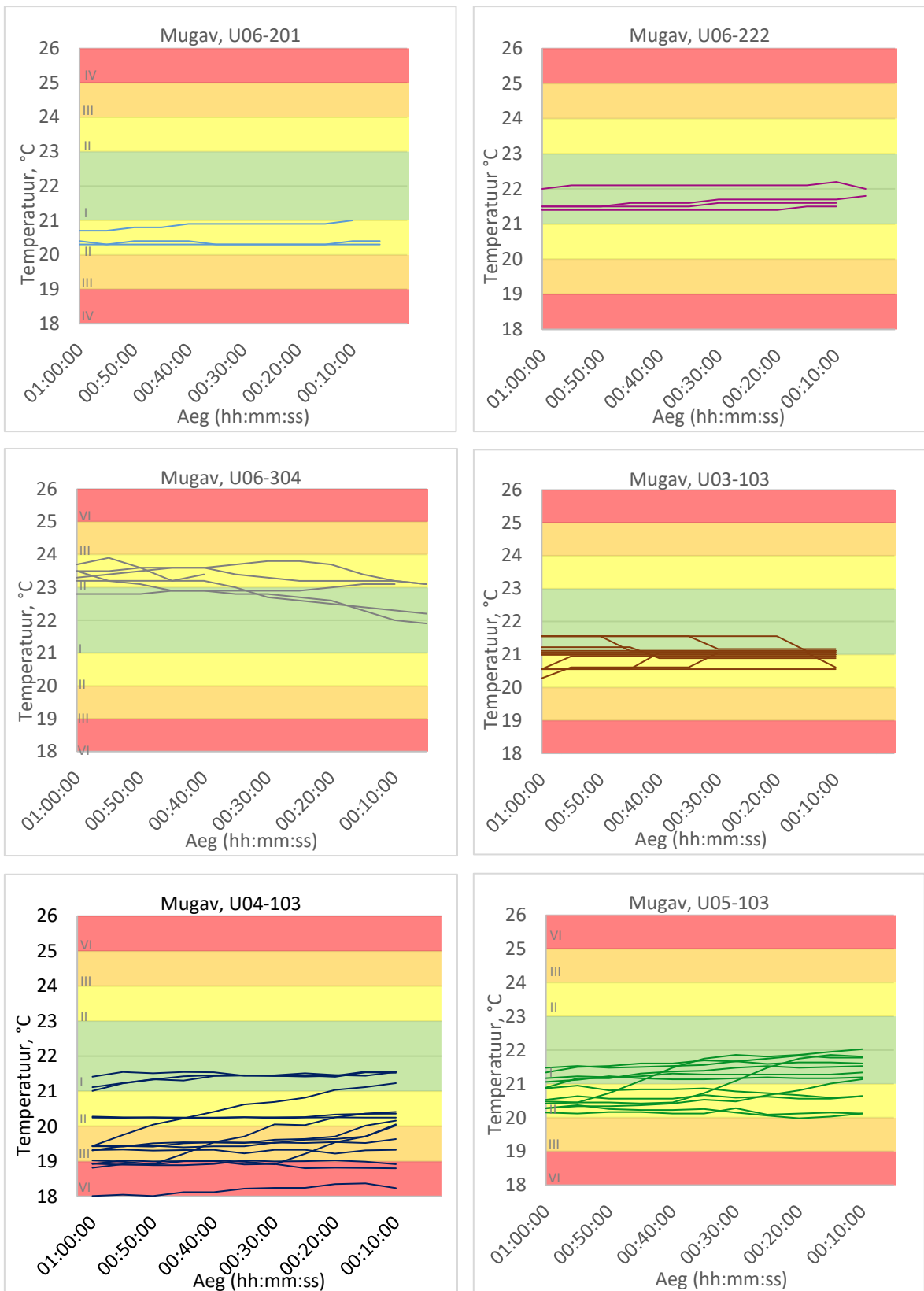
Tabel 19. Temperatuurivahemikud [12]

Ruumi tüüp	Kategooria	Temperatuurivahemik kütteperioodiks, °C Riietus umbes 1,0 clo	Temperatuurivahemik kütteperioodiks, °C Riietus umbes 0,5 clo
Kontorid ja ruumid sarnase aktiivsusega (lisaks konverentsiruumid, auditooriumid, klassiruumid) Istuv aktiivsus umbes 1,2 met	I	21,0 kuni 23,0	23,5 kuni 25,5
	II	20,0 kuni 24,0	23,0 kuni 26,0
	II	19,0 kuni 25,0	22,0 kuni 27,0
	IV	17,0 kuni 25,0	21,0 kuni 28,0

Joonise 19 graafikutelt nähtub, et kuigi kasutajate arvates on ruumis jahe, on temperatuur olnud kolme ruumi puhul üldiselt vastavuses I ja II sisekliimaklassi piiridega. Ruumis U03-103 on ühele tagasisidele eelnev temperatuur olnud 18,8 °C. Erinevust on märgata ruumiga U04-103 kui temperatuur on valdavalt alla 20 °C III või IV sisekliimaklassis, ühel juhul lausa 16 °C. Ruumides U06-304, U06-222 ja U06-201 ei ole jaheduse üle kurdetud.

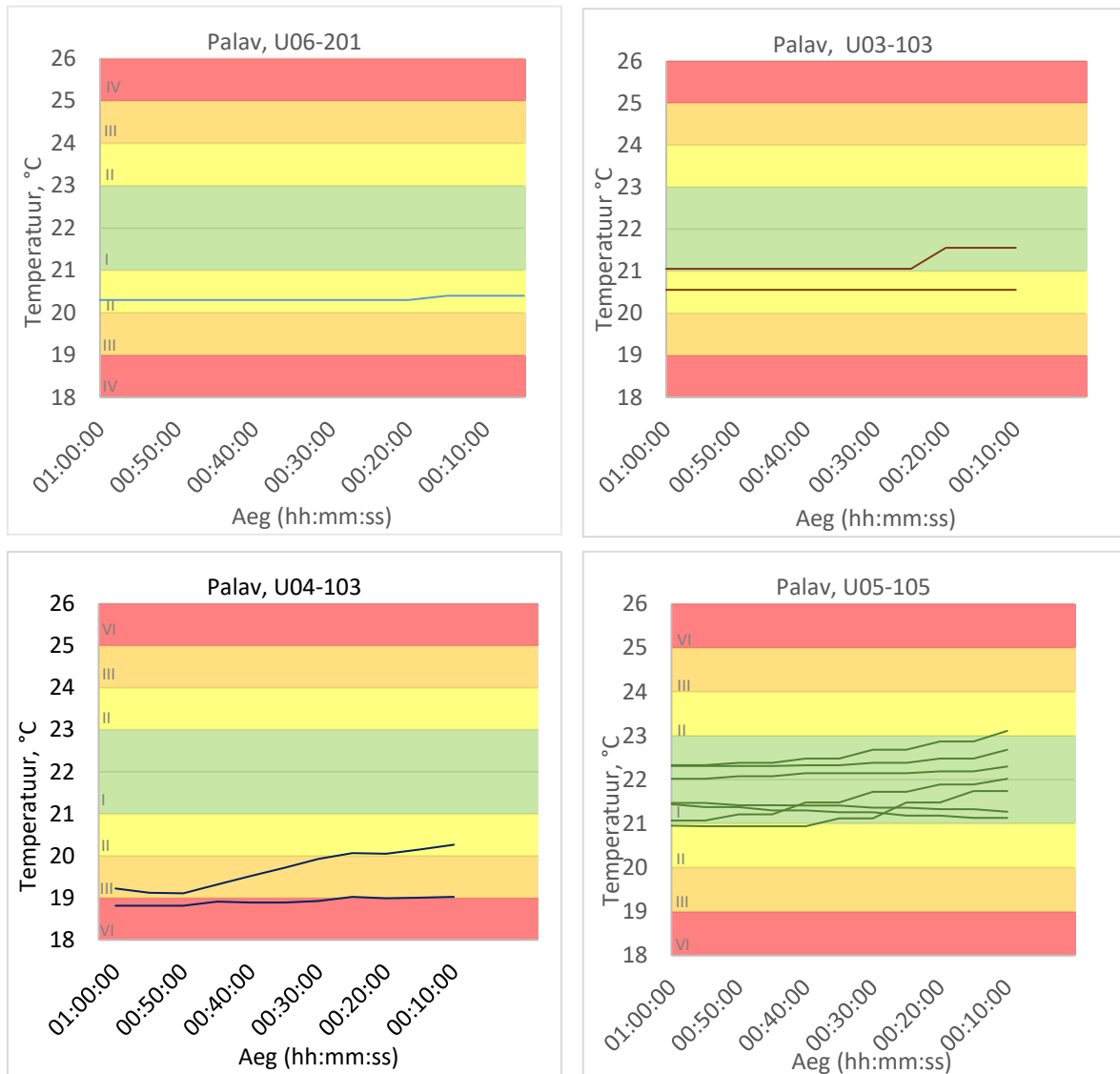


Joonis 19. Mõõdetud ruumi temperatuurid vahetult enne tagasiside „jahe“ andmist



Joonis 20. Mõõdetud ruumi temperatuurid vahetult enne tagasiside „mugav“ andmist

Joonise 20 graafikutelt on näha, et mugava tagasiside korral on temperatuur I ja II sisekliimaklassi piirides. Erandiks on taas ruum U04-103. Kuigi kasutajad tunnevad end mugavalt on temperatuur üle pooltel juhtudel II sisekliimaklassi piiridest madalam. Mugavaks on hinnatud ka 18 °C temperatuur, mille puhul võiks arvata, et kasutajal on jahe.



Joonis 21. Mõõdetud ruumi temperatuurid vahetult enne „palav“ tagasiside andmist

Joonisel 21 esitatakse temperatuurid tagasiside palav korral. Mõõtmised toimusid talvisel perioodil, palavuse üle ei ole palju kaevatud. Sellest võib järeldada, et üle kütmist pigem ei esine. Klassiruumist U05-105 on tulnud teiste ruumidega võrreldes tagasisidet liiga kõrge temperatuuri kohta rohkem, aga temperatuur on olnud I sisekliimaklassis. Põhjuseks ei saanud olla õhuringluse puudumine, sest tagasisidele eelneva tunni jooksul on kõigil juhtudel ventilatsioon töötanud. Auditoriumis U06-201 on palavuse üle kurdetud jaanuaris kell 17:55 õhtul kui päike juba loojunud oli. Muudel

juhtudel on palavuse üle kaevatud märtsis ja aprillis päevastel aegadel ning võimalik põhjus võib olla liigses päikesekiirguse jõudmises ruumi.

Üldiselt on näha, et olenemata kasutajate tagasisidest, on temperatuur nõutele vastav. Ruum U04-103 võib vajada täiendavat reguleerimist, sest temperatuur on kohati alla 19 °C, ühel juhul langenud isegi 16 °C-ni.

Operatiivne temperatuur. Vaatluse all olevatest ruumidest kurdeti jaheduse üle rohkem U03-103, U04-103 ja U05-105 auditooriumites. Ruumis U05-103 on 64% juhtudest hinnatud temperatuuri jahedaks. Ruumides U04-103 ja U03-103 kurdeti temperatuuri jaheduse üle mõlemal juhul 32% tagasisidest. Nimetatud ruumides on samasuguse ruumilahendus ja suured aknapinnad. Nendele ruumidele arvutati lisaks operatiivne temperatuur, sest õhutemperatuur vastas normidele.

Päeval, mil teostati auditooriumite pinnatemperatuuride mõõtmine oli ilm pilves ja välisõhu temperatuur 0,7 °C. Tabelis 20 esitatakse auditooriumite õhutemperatuurid ja operatiivsed temperatuurid. Erinevus on maksimaalselt 0,5 °C ning tõenäoliselt operatiivse ja õhutemperatuuri suur vahe ei saanud ebamugavuse põhjuseks olla.

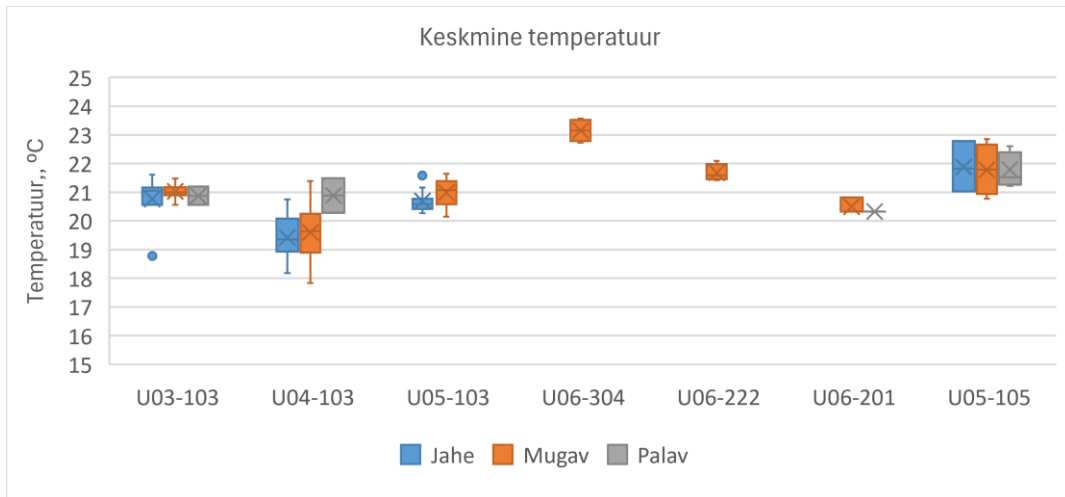
Tabel 20. Auditooriumite operatiivsed temperatuurid

Auditoorium	Õhutemperatuur ruumis, °C	Operatiivne temperatuur ruumi keskel, °C
U03-103	20,2	19,9
U04-103	21,6	21,1
U05-103	20,8	20,5

4.3.2 Keskmise temperatuur

Joonisel 22 on esitatud keskmised temperatuurid ruumides tagasisidele eelneva tunni jooksul. Joonise 22 põhjal on näha, et ruumidest, kust on tulnud jaheduse kurtmist on keskmine temperatuur peaaegu sama mugavaks hinnatud temperatuuriga, erinevus on umbes 0,2 °C. U04-103 puhul on näha tagasiside palav korral on keskmine temperatuur olnud kraadi võrra kõrgem.

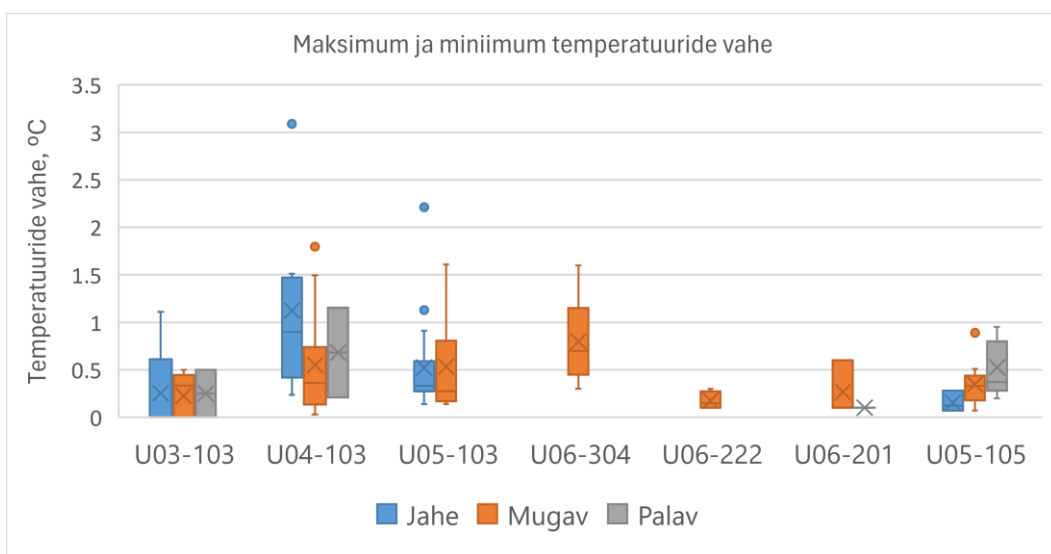
Kasutajate poolt on keskmiselt kõige mugavamaks peetud temperatuuri 21 °C, mis vastab I sisekliimaklassile. Suuri erinevusi jaheda ja palava tagasisidega ei ole. Keskmine temperatuur jaheda tagasiside korral on 20,5 °C ja palava korral 21,4 °C.



Joonis 22. Keskmine temperatuur tunni jooksul vahetult enne tagasiside andmist

4.3.3 Temperatuuri kõikumine

Jooniselt 23 on näha, et maksimaalselt on tagasiside andmisele eelneva tunni jooksul temperatuur kõikunud 3 °C võrra ruumis U04-103, kus see langes 19 °C kuni 16 °C. Põhjuseks võis olla avatud aken. Samuti on selle ruumi puhul näha, et jaheda ja palava tagasiside puhul on kõikumine olnud suurem kui mugava korral. Teiste ruumide kohta seda öelda ei saa. Ruumis U05-103 on temperatuur maksimaalselt langenud 2,2 °C. Samas esineb kõigi ruumide puhul temperatuuri kõikumist ka mugava tagasiside korral. Jooniste 19 ja 21 põhjal saab öelda, et kui temperatuuri kõikumist on esinenud, siis jaheda tagasiside puhul on temperatuur kukkunud ja palava korral tõusnud.



Joonis 23. Temperatuuri kõikumine ruumides tunni jooksul vahetult enne tagasiside andmist

Üldiselt temperatuuri kõikumise ja tagasiside kohta kindlaid seoseid välja tuua ei ole võimalik. Ainult ruumi U04-103 puhul on näha, et temperatuur on jaheda tagasiside puhul kõikunud keskmiselt rohkem kui mugava tagasiside puhul.

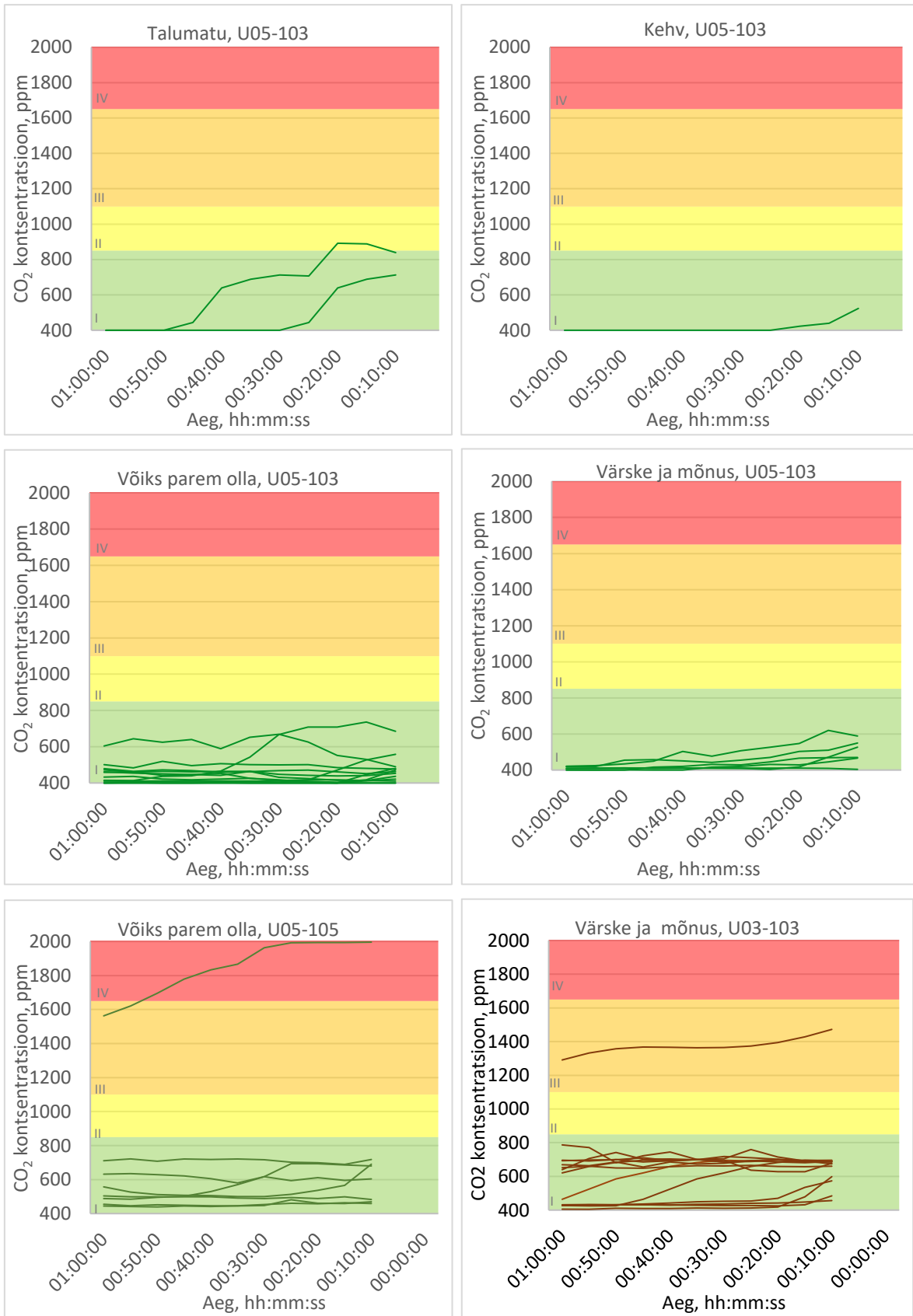
Tuleb arvestada, et mõnedest ruumidest on saadud ainult üksikud tagasisided ja selle põhjal ei saa kindlaid järeldusi teha. Seda eriti tagasiside palav puhul, sest tegemist on talvise perioodiga.

4.4 Tagasiside õhukvaliteedile

4.4.1 CO₂ tase tagasisidele eelneval tunnil

Õhukvaliteedi klassifitseerimise piirväärtuste leidmiseks kasutatakse standardi EVS-EN 16798-1:2019/NA:2019 [12] tunnetuslikul õhukvaliteedil põhinevat meetodit arvestusega 2 m² inimese kohta.

Süsihappegaasi tase püsib üksikute eranditega tagasiside andmisele eelneval tunnil olenemata tagasisidest I sisekliimaklassis. Joonisel 24 on toodud mõned näited. Kõigi ruumide CO₂ tasemed vahetult enne tagasiside andmist on leitavad Lisast.



Joonis 24. Mõõdetud ruumi CO₂ kontsentratsioonid vahetult enne tagasiside andmist

Mõõteandmete ja tagasiside vahel korrelatsiooni välja tuua ei saa. Kui kasutajad on andnud tagasisideks, et õhukvaliteet on talumatu või kehv, on CO₂ tase tegelikult olnud kõikidel juhtudel I või II sisekliimaklassis ehk alla 1100 ppm-i.

Üksikutel juhtudel, kui CO₂ tase on III või IV sisekliimaklassis on tagasisideks antud, et õhukvaliteet võiks parem olla või värske ja mõnus, mitte talumatu või kehv. CO₂ kontsentratsiooni kasutatakse siseruumides sageli õhukvaliteedi indikaatorina. CO₂ tase üle 1100 ppm võib viidata siseruumide õhukvaliteedi probleemidele, aga see ei tähenda tingimata, et inimesed tunneksid õhukvaliteedi halvenemist või muutusi. Kuigi CO₂ tase võib olla kõrge, võivad inimesed siiski tajuda õhku värskena [26]. Seda ilmestavad Joonisel 17. ruumide U03-103 ja U05-105 graafikud, kus õhukvaliteeti on hinnatud vastavalt värskeks või võiks parem olla, kuigi CO₂ tase on ühel juhul isegi 2000 ppm-i. Seega, kuigi CO₂ tase on oluline õhukvaliteedi indikaator, ei pruugi see alati otseselt mõjutada inimeste tajutavat õhukvaliteeti.

4.4.2 Õhukvaliteedi klassifitseerimine arvutuslikult

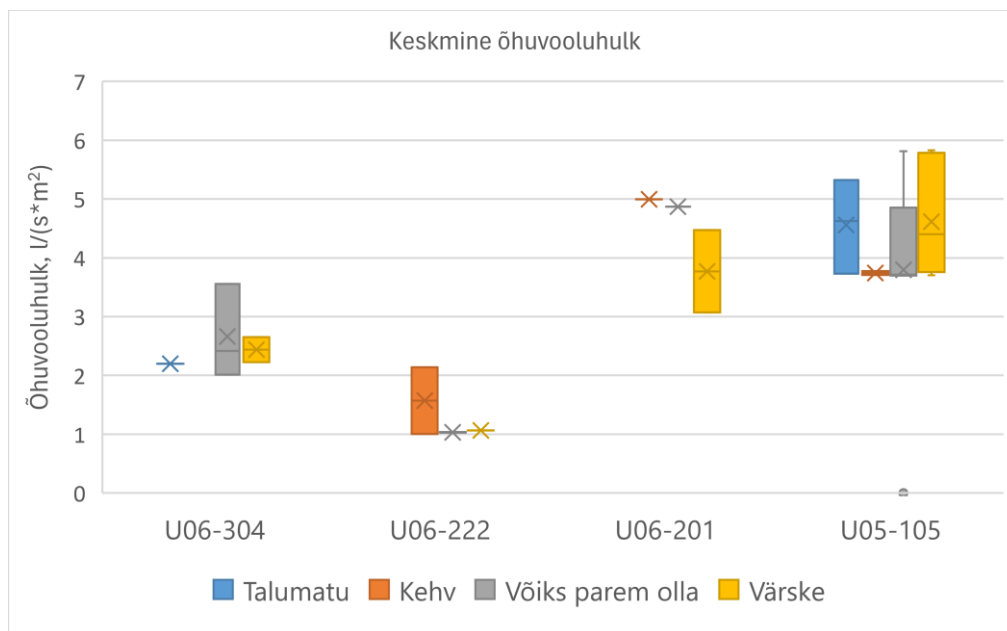
Tabelis 21 esitatakse sisekliimaklasside klassifitseerimisel lähtunud piirväärtustest ning piirkontsentratsioonid konkreetses ruumis. I ja II sisekliimaklassi puhul on need küllaltki sarnased.

Tabel 21. Ruumide arvutuslikud sisekliimaklasside piirid

Sisekliimaklass	Piirväärtused joonistel, ppm	Arvutuslik, ppm					
		U03- 103	U04- 103	U05- 103	U06- 201	U06- 222	U06- 304
I	850	889	902	898	868	841	864
II	1100	1099	1117	1111	1068	1030	1063
III	1650	1623	1655	1644	1570	1503	1560

4.4.3 Keskmise õhuvooluhulk

Joonisel 25 on esitatud ruumide õhuvooluhulgad ruutmeetri kohta tagasisidele eelneva tunni jooksul. Vastavalt tabelile 4 on klassiruumide ventilatsiooni normarv $4 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$, ja kontoris $1,5 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$. Kontoris U06-222 on nõue täidetud kehva tagasiside korral.



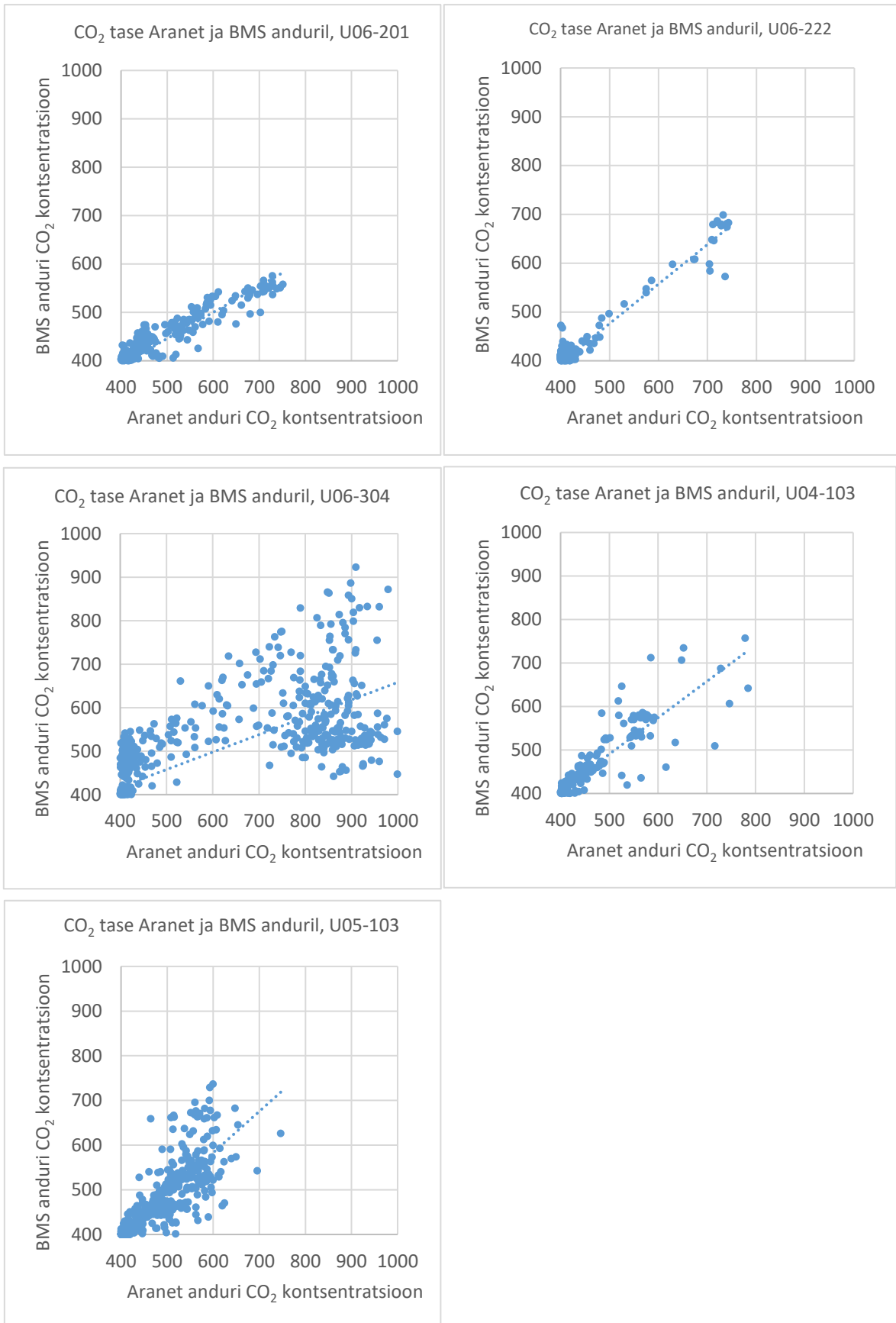
Joonis 25. Keskmise õhuvooluhulk ruumides tunni jooksul vahetult enne tagasiside

Klassiruumis U06-201 on norm täidetud kehva ja võiks parem olla tagasiside korral ja klassiruumis U05-105 talumatu ja värske tagasiside korral. Ruumis U06-304 jääb õhuvooluhulk ruutmeetri kohta olenemata tagasisidest alla normi.

4.5 Andurite mõõtetulemused

Ruumides U06-304, U06-222, U06-201, U04-103 ja U05-103 võrreldakse BMS ja Aranet andurite mõõdetud CO_2 kontsentratsioone.

Joonise 26 graafikutel esitatakse samade ruumide Aranet ja BMS andurite CO_2 kontsentratsioonid nelja päeva jooksul. Graafikutel on märgata, et Aranet andur näitab üksikute eranditega alati suuremat kontsentratsiooni kui BMS andur. Näiteks ei ole ühtegi olukorda, kus BMS anduri mõõtetulemus oleks üle 800 ppm-i, aga Aranet oma 400 ppm-i juures, vastupidi aga küll.



Joonis 26. CO₂ kontsentratsioonid Aranet ja BMS anduritel

Koosolekuruumis U06-222 on näha kontsentratsioonide lineaarset 1:1 kasvamist. Mõõtepunktid on trendijoone lähedal. See tähendab, et mõõtetulemused BMS ja Aranet anduritel on enam-vähem samad ja õhuvahetuse efektiivsus nende andurite järgi, arvestades, et Aranet andur on väljatõmbe juures, on 100%. Ruumi U06-201 puhul on märgata, et Aranet anduri mõõtetulemus on suurem BMS anduri mõõtetulemusest, suhe on umbes 6:5. See teeb õhuvahetuse efektiivsuseks 120%.

Teiste ruumide mõõtetulemuste vahel korrelatsiooni ei tähelda. Mõõtepunktid on trendijoone suhtes laiali valgunud. Mõõtetulemuste vahe võib olla kuni 600 ppm-i. See võib kohati tähendada, et õhuvahetuse efektiivsus on väga kõrge, kuid tõenäolisem on, et andurid on kalibreerimata ning õhuvahetuse efektiivsust ei ole nende põhjal võimalik adekvaatselt hinnata. Lisaks ei mõõda ruumi BMS andur päris viibimistsoonis, vaid ukse juures ning seal tuleb ilmselt samuti viga sisse.

4.6 Järeldused

Reaalajas QR-koodiga tagasiside küsimine on uuenduslik meetod ning see võimaldab automatiseerida tagasiside ja ruumiõhuparameetrite analüüsi. QR-koodi tagasiside küsimise üks miinuseid on see, et inimesed, kes ei ole harjunud kasutama nutiseadmeid, ei pruugi osata seda kasutada ning nii jääb nende tagasiside saamata.

Nädalate lõikes vastajate arv langes. Kogutud tagasiside arv on kolmandaks nädalaks võrreldes esimese nädalaga kukkunud üle kahe korra ning langeb edasi veelgi. Alates kaheksandast nädalast laekuvad vaid üksikud tagasisided. Ruumikasutajatele on tagasiside andmine lisakohustus, millest nemad otseselt mingit kasu ei saa. Seega puudub motivatsioon järjepidevalt tagasiside anda. Kasutajate vastamise aktiivsust aitaks ilmselt üleval hoida mõni auhinnaline loos vastajate vahel, kuid see tõstaks tehnilist keerukust. Samas kui sisekliima oleks tõesti halb antaks tõenäoliselt tagasisidet rohkem. Tagasisidega võiks tuvastada probleeme, aga mõõtmised näitavad, et üldiselt on Tehnikaülikooli peamaja vaadeldavates ruumides sisekliima hea.

Temperatuuri ja süsihappegaasi kontsentratsiooni ruumides analüüsiti tagasiside andmisele eelneval tunnil. Temperatuuride põhjal võib öelda, et sisekliima on üldiselt korras ja püsib I ja II sisekliimaklassis, kuigi see ei pruugi kasutajate arvamusega ühtida. Erandiks oli auditoorium U04-103, kus temperatuur oli üldiselt III sisekliimaklassis alla 20 °C. Keskmine temperatuur oli auditooriumis nii mugava kui

jaheda tagasiside korral alla 20 °C. Kui temperatuuri kõikumist on esinenud, siis jaheda tagasiside puhul on temperatuur kukkunud ja palava korral tõusnud, kuid kõikumist oli ka mugava tagasiside korral. Üldistavaid järeldusi ei saa teha.

Süsihappegaasi tase püsib üksikute eranditega tagasiside andmisele eelneval tunnil olenemata tagasisidest I sisekliimaklassis. Kui tagasisideks on antud kehv või talumatu, on CO₂ tase olnud kõikidel juhtudel I või II sisekliimaklassis alla 1100 ppm-i. Mõõteandmete ja tagasiside vahel korrelatsiooni välja tuua ei saa.

Edaspidi võiks pikema perioodi, näiteks aasta, jooksul jälgida, kas kasutajatelt tuleb märgatavalt kurtvat tagasisidet. Kui tagasiside on valdavalt positiivne või kogutud tagasiside minimaalne, võib autori arvates teha järelduse, et sisekliima on hea. Sel juhul ei ole vaadeldud ruumides ilmingimata vajadust uuringuga jätkata. Ülikooli puhul võib rakendada ressursi järgmiste ruumide kaardistamisele.

Variant oleks ruumidesse paigaldada lisaks tahvelarvutid/ekraanid, kus kasutaja saab möödaminnes kiiresti vastata. Üks suund oleks tagasiside ankeedi juures lisaks kuvada hetke ruumiõhu parameetreid ning uurida, kas siis esinevad mõõteandmete ja kogutud tagasiside vahel märgatavamad seosed. Tagasiside küsimustikus võiks olla vabatahtlikuks vastamiseks lisa lahter „muud tähelepanekud“, kust võib ka kasulikku informatsiooni saada.

Tuleks pöörata tähelepanu, et ruumis tagasiside kogumisega alustades, oleks kõik vajalikud andurid töökorras. Suurem hulk tagasisidest tuleb esimesel nädalal. Kui ruumis mõni andur ei tööta on hiljem põhjalikum analüüs raskendatud.

Töös tuli välja, et hoone automaatika ja Aranet andurite süsihappegaasi kontsentratsioonide mõõtetulemused on kohati väga erinevad. Edaspidi võiks uurida, mis võib olla selle põhjuseks. Samuti oleks hea leida võimalused õhu parameetrite mõõtmiseks viibimistsoonis. Lõputöö käigus ei saanud EDIAQI projekti raames paigaldatud Thinnecti andurite mõõteandmeid kasutada. Kuid mõned paigaldatud andurid on hetkel viibimistsoonist väljas, BMS anduritega samas piirkonnas. Ventilatsiooni efektiivsuse ja sisekliima hindamiseks oleks hea leida võimalus andurite paigaldamiseks viibimistsooni.

KOKKUVÕTE

Lõputöö keskendub sisekliima parameetrite, nagu temperatuur ja süsihappegaasi tase, mõõtmisele ning kasutajate reaalajas tagasiside kogumisele veebiplatvormi kaudu. Eesmärgiks on analüüsida kasutajate tagasiside ja mõõdetud parameetrite seost ning tuvastada võimalikke puudusi sisekliimatingimustes.

Töö eesmärgi täitmiseks teostati TalTech peamaja ruumides mõõtmisi ning koguti reaalajas tagasiside temperatuuri ja õhukvaliteedi kohta. Mõõdetud parameetrid ja kasutajate tagasiside pandi vastavusse ning püüti leida võimalikke seoseid.

Nädalate lõikes tagasiside andmine langes märgatavalt. Samas on positiivne, et selline võimalus ruumides on, sest tõenäoliselt kehvema sisekliima korral antaks tagasisidet rohkem ning see aitab võimalikke probleeme tuvastada. Töös vaadeldud ruumides oli ruumiõhu parameetrite põhjal sisekliima valdavalt hea. PMV ja PPD indeksite arvutamiseks saadi tagasisidet liiga vähe.

Vaadeldi tagasisidele eelnenud tunni õhutemperatuuri ning süsihappegaasi kontsentratsiooni ruumides. Valdavalt oli temperatuur I ja II sisekliimaklassi piirides. Süsihappegaasi tase oli üldiselt I sisekliimaklassis ehk alla 850 ppm-i. Leiti, et kasutajate tagasiside ei pruugi mõõdetud ruumiõhu parameetritega ühtida. Mõõtetulemuste ja kasutajate tagasiside vahel kindlat seost ei tuvastatud.

Mõnedes auditooriumitest saadi võrreldes kogu ruumist saadud tagasisidega jaheda temperatuuri kohta tagasisidet suhteliselt palju. Nendele ruumidele arvutati operatiivne temperatuur ruumi keskel, mis oli maksimaalselt 0,5 °C erinev mõõdetud õhutemperatuurist. Seega tõenäoliselt mõjutasid kasutajate mugavustunnet muud tegurid.

Edaspidi võiks jälgida kasutajate tagasisidet näiteks aasta jooksul. Kui tagasiside on valdavalt positiivne või minimaalne, võib järeldada, et sisekliima on hea ja uuringuga edasi liikuda järgmistesse ruumidesse. Töös ilmnes, et hoone automaatika ja Araneti andurite süsihappegaasi mõõtetulemused on kohati väga erinevad. Võiks uurida, selle põhjusi. Samuti oleks hea leida lahendused andurite paigaldamiseks viibimistsooni.

SUMMARY

The thesis focuses on measuring indoor climate parameters, such as temperature and carbon dioxide levels, and collecting real-time user feedback via a web platform. The aim is to analyze the relationship between user feedback and measured parameters and identify potential deficiencies in indoor climate conditions.

To achieve the objective, measurements were conducted in the main building of TalTech from January 22 to April 15, and real-time feedback on temperature and air quality was collected. The measured parameters were matched with user feedback to identify possible correlations.

Feedback frequency decreased significantly over the weeks. Continuously requesting open-ended feedback does not seem to work effectively. However, having the option available is positive, as it likely prompts more feedback when indoor climate conditions are poor, helping to identify potential issues. The indoor climate in the examined rooms was generally good based on the air quality parameters. Insufficient feedback was received to calculate the PMV and PPD indices.

The air temperature and carbon dioxide concentration in the rooms in the hour preceding the feedback were observed. The temperature mostly fell within the boundaries of indoor climate classes I and II. The carbon dioxide level was generally within indoor climate class I, i.e., below 850 ppm. It was found that user feedback does not necessarily correlate with measured indoor air parameters. No definitive correlation was identified between measurement results and user feedback.

Some auditoriums received relatively more feedback about cold temperatures compared to other rooms. For these rooms, the operative temperature in the middle of the room was calculated, which differed by a maximum of 0.5°C from the measured air temperature. Therefore, other factors likely influenced user comfort.

In the future, user feedback could be monitored over a year. If the feedback is predominantly positive or minimal, it can be concluded that the indoor climate is good, allowing the study to proceed to other rooms. The study found significant discrepancies between the carbon dioxide measurements of the building's automation system and Aranet sensors. The reasons for this should be investigated. Additionally, solutions should be found for placing sensors in the occupancy zone.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] J. Kurnitski, M. Murdvee, T.-A. Kõiv, M. Teichmann, Sisekliima, õpitulemus, tööviljakus. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2015
- [2] Hoonete energiatõhusus. Hoonete ventilatsioon. Osa 2: EN 16798-1 nõuete tõlgendus. Sisekeskkonna lähteandmed hoonete energiatõhususe projekteerimiseks ja hindamiseks siseõhu kvaliteedi, soojusliku mugavuse, valgustuse ja akustika osas. (Moodul M1-6). Standard CEN/TR 16798-2:2019, MTÜ Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, Tallinn, Eesti, 2019
- [3] B. Kingma ja W. Van Marken Lichtenbelt, "Energy consumption in buildings and female thermal demand," Nature Clim Change, köite nr 5, seeria nr 12, lk 1054–1056, dets. 2015, doi: 10.1038/nclimate2741.
- [4] "Description of the project | EDIAQI Project." Kasutatud: 9. aprill 2024. [Online]. Loetud aadressil: <https://ediaqi.eu/project-description>.
- [5] S. Zampolli et al., „An electronic nose based on solid state sensor arrays for low-cost indoor air quality monitoring applications“, Sensors and Actuators B: Chemical, kd 101, nr 1, lk 39–46, juuni 2004, doi: 10.1016/j.snb.2004.02.024.
- [6] J. Kang ja K.-I. Hwang, „A Comprehensive Real-Time Indoor Air-Quality Level Indicator“, Sustainability, kd 8, nr 9, Art. nr 9, sept 2016, doi: 10.3390/su8090881.
- [7] S. Kim ja E. Paulos, „InAir: sharing indoor air quality measurements and visualizations“, Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Atlanta Georgia USA: ACM, apr 2010, lk 1861–1870. doi: 10.1145/1753326.1753605.
- [8] R. Kaver, „Soojuslik mugavus 4-toru kiirguspaneelidega liginullenergiahoone büroopindade näitel“, magistritöö, Inseneriteaduskond, Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, Eesti, 2020.
- [9] K. S. Konis, „Leveraging ubiquitous computing as a platform for collecting real-time occupant feedback in buildings“, Intelligent Buildings International, kd 5, nr 3, lk 150–161, juuli 2013, doi: 10.1080/17508975.2013.781499.

- [10] A. Pozzer, F. Dominici, A. Haines, C. Witt, T. Münzel, ja J. Lelieveld, „Regional and global contributions of air pollution to risk of death from COVID-19“, *Cardiovascular Research*, kd 116, nr 14, lk 2247–2253, dets 2020, doi: 10.1093/cvr/cvaa288.
- [11] B. Paital, P. K. Agrawal, „Air pollution by NO₂ and PM_{2.5} explains COVID-19 infection severity by overexpression of angiotensin-converting enzyme 2 in respiratory cells: a review“, *Environmental Chemistry Letters* (2021), kd 19, lk 25-42, sept 2020, doi: 10.1007/s10311-020-01091-w
- [12] Hoonete energiatõhusus. Hoonete ventilatsioon. Osa 1: Sisekeskkonna lähteandmed hoonete energiatõhususe projekteerimiseks ja hindamiseks, lähtudes siseõhu kvaliteedist, soojuslikust keskkonnast, valgustusest ja akustikast., EVS-EN 16798-1:2019+NA:2019, MTÜ Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, Tallinn, Eesti, Okt. 2019
- [13] Mitteleuhoonete ventilatsioon. Üldnõuded ventilatsiooni- ja ruumiõhu konditsioneerimissüsteemidele. Eesti rahvuslik lisa standardile EVS-EN 16798-3:2017, EVS 906:2018, MTÜ Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, Tallinn, Eesti, Veebr. 2018.
- [14] „Vabariigi Valitsuse määrus nr. 84 „Tervisekaitse nõuded koolidele“. RT I, 31.05.2013, 12.
- [15] E. Abel, H. Voll, T. Tark, Hoonete energiatarve ja sisekliima. Tallinn: OÜ Presshouse, 2014
- [16] „Eesti õhukvaliteedi juhtimissüsteem“. Kasutatud: 23. aprill 2024. [Online]. Loetud aadressil: <https://ohuseire.ee/>
- [17] E. Mundt, H. M. Mathisen, P. V. Nielsen, A. Moser, Ventilation Effectiveness. Forssa: Forssan Kirjapaino OY, 2004
- [18] C. Molina, C. Pickering, O. Valbjorn ja M. De Bortoli, „Sick buildings syndrome. A practical guide.“, jaan 1989, Kasutatud: 10. märts 2024. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.aivc.org/resource/sick-buildings-syndrome-practical-guide>

- [19] 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, MTÜ Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, Tallinn, Eesti, Nov. 2005
- [20] M. Thalfeldt ja J. Kurnitski, „Olemasolevate hoonete sisekliima hindamise juhend 2016“. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2016f
- [21] „Konverentsiruumid | Tallinna Tehnikaülikool (TalTech)“. Kasutatud: 22. mai 2024. [Online]. Loetud aadressil: at: <https://taltech.ee/konverentsikeskus/konverentsiruumid>
- [22] Keskkonna soojuslikud omadused. Mõõtevahendid füüsikaliste suuruste mõõtmiseks, EVS_EN ISO 7726:2003, MTÜ Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, Tallinn, Eesti, Apr. 2003
- [23] „FLIR B50 FLIR SYSTEMS AB - Infrared camera | LCD 3,5"; 140x140; - 20÷120°C; Focus: manual; FLIRB50 | TME - Elektroonilise osad (WFS)“. Kasutatud: 22. aprill 2024. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.tme.eu/ee/details/flirb50/infrapunakaamerad-flir/flir-systems-ab/flir-b50/>
- [24] „GLM 40 Laserkaugusmõõtjad | Bosch Professional“. Kasutatud: 22. aprill 2024. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.bosch-professional.com/ee/et/products/glm-40-06010729000>
- [25] J. Preden, „Thinnect | Siseruumide õhukvaliteedi jälgimine“, Thinnect. Kasutatud: 19. veebruar 2024. [Online]. Loetud aadressil: <https://thinnect.com/et/airpurity/>
- [26] S. Domínguez-Amarillo, J. Fernández-Agüera, S. Cesteros-García, ja R. A. González-Lezcano, „Bad Air Can Also Kill: Residential Indoor Air Quality and Pollutant Exposure Risk during the COVID-19 Crisis“, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, kd 17, nr 19, Art. nr 19, jaan 2020, doi: 10.3390/ijerph17197183.

- [27] „Aranet4 andmeleht“. Kasutatud: 22. mai 2024. [Online]. Loetud aadressil:
https://pim.etsnord.com/data/RDT-38_Aranet4_andmeleht_et.pdf
- [28] „Product datasheet“. Kasutatud: 22. mai 2024. [Online]. Loetud aadressil:
[file:///C:/Users/linda/Downloads/Schneider%20Electric_European-HVAC-Sensors_STR610%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/linda/Downloads/Schneider%20Electric_European-HVAC-Sensors_STR610%20(1).pdf)
- [29] „aSENSE“. Kasutatud: 22. mai 2024. [Online]. Loetud aadressil:
<https://senseair.com/product/asense/>

LISA CO₂ tase tagasiside andmisele eelneval tunnil

