



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**SOOJUSLIK MUGAVUS 4-TORU
KIIRGUSPANEELIDEGA
LIGINULLENERGIAHOONE BÜROOPINDADE
NÄITEL**

**THERMAL COMFORT IN OFFICE SPACES IN A NEARLY
ZERO-ENERGY OFFICE BUILDING WITH 4-PIPE
RADIANT CEILING PANELS**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Rasmus Kaver

Üliõpilaskood: 153836EAKI

Juhendaja: Martin Kiil, doktorant

(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.

"....." 201.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Rasmus Kaver, (sünnikuupäev: 03.10.1995)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Soojuslik mugavus 4-toru kiirguspaneelidega liginullenergiahoone büroopindade näitel”,

mille juhendaja on Martin Kiil,

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.

¹*Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.*

_____ (allkiri)

_____ (kuupäev)

TTÜ Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Rasmus Kaver 153836EAKI
Õppekava, peeriala: EAKI02/15 – Hoonete sisekliima ja veetehnika
Juhendaja(d): Doktorant, Martin Kiil, +3725189963
Konsultant: -

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Soojuslik mugavus 4-toru kiirguspaneelidega liginullenergiahoone büroopindade näitel

(inglise keeles) Thermal comfort in office spaces in a nearly zero-energy office building with 4-pipe radiant ceiling panels

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Hinnata lagikütte- ja jahutuse mõju soojuslikule mugavusele büroohoones läbi mõõtmiste ning sisekliima küsitluse läbiviimise.
2. Analüüsida soojusliku sisekliima vastavust suve-, ülemineku- ja talveperioodil

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Mõõtmised suveperioodil.	29.08.19
2.	Mõõtmised üleminekuperioodil	20.11.19
3.	(Mõõtmised kütteperioodil)	(18.02.20)
4.	Sisekliima küsitlused	jooksvalt
5.	Kirjanduse ülevaade	03.04.20
6.	Teooria ja metoodika peatükk	03.04.20
7.	Tulemuste koondamine ja analüüs	15.04.20
8.	Töö kokku kirjutamine ja vormistamine, plakat	20.05.20
9.	Presentatsioon	25.05.20

Töö keel: eesti **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 25. mai 2020a

Üliõpilane: ".....".....2020a
/allkiri/

Juhendaja: ".....".....2020a
/allkiri/

Konsultant: ".....".....2020a
/allkiri/

Programmijuht: ".....".....2020a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA	7
Lühendite ja tähiste loetelu.....	8
SISSEJUHATUS	9
1. TEOORIA.....	10
1.1 Kirjanduse ülevaade	10
1.2 Soojuslik mugavus.....	10
1.3 Soojusliku mugavuse hindamine	11
1.4 Sisekliima klassid	14
2. METOODIKA	16
2.1 Uuritava hoone tutvustus	16
2.1.1 Hoone lähteandmed	16
2.1.2 Hoone tehnosüsteemid.....	17
2.1.3 Kütte- ja jahutussüsteemi kirjeldus	17
2.2 Mõõtmised	17
2.2.1 Mõõtepunktide asukohad.....	19
2.3 Sisekliima küsitlus.....	20
3. MÕÕTMISTE TULEMUSED JA ANALÜÜS.....	22
3.1 Õhu liikumise kiirused	22
3.2 Õhu temperatuur	26
3.3 Koondtabelid	28
3.4 Tõmbusindeks.....	30
3.5 PMV ja PDD.....	31
3.6 Sisekliima küsitlus.....	32
3.7 Järeldused	36
KOKKUVÕTE	39
SUMMARY	40
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	41
LISAD	43

EESSÕNA

Käesolev magistritöö on valminud osana Martin Kiili doktoritööst. Töö lähteandmed on kogutud Omniva logistikakeskuse büroos 01.08.2019, 29.08.2019, 20.11.2019 ning 18.02.2020 teostatud mõõtmistel. Hoone ligipääsu ning automaatika andmete eest soovib autor tänada Omniva hooldusjuhti Toivo Kiho. Juhendamise, teemakohase informatsiooni ning mõõtmistega on aidanud Martin Kiil.

Töös uuritakse 4-toru kiirguspaneelidega liginullenergiahoone büroo-osa soojuslikku sisekliimat, hoone kasutajate soojuslikku mugavust ning sisekliima klassi kuuluvust.

Lühendite ja tähiste loetelu

- CEN – Comité Européen de Normalisation, Euroopa standardimisorganisatsioon;
- DR– (draught rate) tuuletõmbusest häiritud inimeste protsent, tõmbusindeks (%);
- EN – Europäische norm, Euroopa standard;
- EVS – Eesti vabariigi standard;
- ISO – International Organization for Standardization, Rahvusvaheline standardiorganisatsioon;
- g – akna päikesefaktor;
- PMV - (predicted mean vote) tõenäosuslik soojusliku mugavuse indeks;
- PPD – (predicted percentage dissatisfied) tõenäosuslik soojusliku mugavusega rahulolematute indeks (%);
- RH – (relative humidity) suhteline õhuniiskus (%);
- t_o – operatiivne temperatuur (°C);
- T_u – turbulentsuse intensiivsus;
- VÕT - Välisõhutemperatuur.

SISSEJUHATUS

Inimesed veedavad ligi kolmandik oma elust tööl, mistõttu sõltub otseselt nende produktiivsus ka nende mugavusest [1]. Suurimaks mõjutajaks peetakse soojuslikku sisekliimat. Ainuüksi temperatuuri ühekraadine tõus vahemikus +25 kuni +30 °C kahandab töötaja produktiivsust 2 % võrra. [2]

Kiirguspaneelidega kütte- ja jahutussüsteeme kasutatakse maailmas järjest enam nende passiivsuse, vähese hoolduse ja madalama energiakulu tõttu. Sisekliima tagamisel kiirguspaneelidega võib vähendada hoone kütte- ning jahutussüsteemi CO₂ jalajälge ligi 20-30%. [3]

Antud magistritöö eesmärgiks on hinnata 4-toru kiirguspaneelidega Omniva logistikakeskuse büroopinna soojuslikku mugavust. Töö raames viiakse läbi õhu liikumise kiiruste, õhu temperatuuride, operatiivse temperatuuri, suhtelise niiskuse lühiajalised mõõtmised. Hinnatakse eelmainitud parameetrite sisekliima klassi kuuluvust, arvutatakse nende põhjal *PMV* ja *PPD* ning turbulentsi ja tõmbusindeksi väärtused. Samuti hinnatakse nende väärtusi subjektiivselt sisekliima küsitluste põhjal. Varasemalt on Eestis teostatud teisigi soojusliku sisekliima uurimusi, kuid pole veel tähelepanu pööranud kiirguspaneelidega hoonetele.

Esimeses peatükis käsitletakse soojusliku sisekliima teoreetilisi aluseid ning hindamist. Teises peatükis tehakse ülevaade hoone iseloomust ning tutvustakse meetodikat. Lõpetuseks tuuakse välja mõõtmistulemused ning sisekliima küsitluste vastused ja analüüsitakse neid.

1. TEOORIA

1.1 Kirjanduse ülevaade

Eestis on järjest enam hakatud teostama hoonete sisekliima uuringuid, mis käsitlevad just soojuslikku mugavust. Kõige hilisemalt avaldatud artikkel on viie erineva sisekliima tagamise süsteemiga Harjumaal paikneva hoone kohta. Uuringus rakendati sisekliima parameetrite hindamiseks ISO 7730 standardi metoodikat ning viidi läbi sisekliima subjektiivse hindamise küsitlus. Uuringust selgub, et kui üldiselt on büroode õhu temperatuurid pigem projekteeritud väärtustest suuremad kui madalamad. Samuti tuli välja, et aktiivse jahutussüsteemi mittekasutamine alati ei vähenda tõmbustunnet ning õhu liikumise kiiruseid, kuid nende kasutamisel tuleb alati töökohtade asetus hästi läbi mõelda. [4]

Maailmas on tehtud palju soojuslike sisekliima uuringuid, kuid selliseid, mis käsitleks 4-toru kiirguspaneelidega büroohooneid on vähe. 2019. aasta suvel viidi läbi soojusliku sisekliima uuring ning sisekliima subjektiivse hindamise küsitlus rekonstrueeritud bürooones Hiinas, Suzhou linnas. Mõõtmistulemustest selgus, et keskmine õhu temperatuur oli +26,0 °C, keskmine õhu liikumise kiirus 0,08 m/s, tõmbustunde indeks oli 2 %, suhteline niiskus 23 %, *PMV* 0,29 ning *PPD* 13,74 %. Küsitlustest selgus, et tegelik rahulolematute hulk oli palju väiksem, kui arvutuslik. Mõõtmispäeval oli väljas +39,4 °C ning suhteline niiskus 43,1 %. [5]

Autorile teadaolevalt pole Eestis varem kiirguspaneelidega hoones taolisi sisekliima mõõtmisi läbiviidud.

1.2 Soojuslik mugavus

Soojuslik mugavus on inimese meeleseisund, mis väljendub rahulolus ümbritsevas keskkonna kliima suhtes. Inimese soojuslik tunnetus on põhiliselt seotud tema keha soojusliku tasakaaluga. Soojuslikku tasakaalu mõjutavad mitmed tegurid: õhu temperatuur, keskmine kiirguslik temperatuur, õhu liikumise kiirus, õhu suhteline niiskus. [6]

Soojuslik mugavus käib käsikäes ka muude oluliste sisekliima komponentidega. Kui inimene ei tunne end töökeskkonnas mugavalt, siis tööviljakus kannatab, seega soojuslik mugavus on otseselt seotud töötamise efektiivsusega. [7]

Soojuslikku ebamugavust võib tekitada liiga kuum või liiga jahe keskkond, samuti ka ühe kehaosa temperatuuri muutus. Kõige harilikumad kohalikud soojusliku ebamugavustunde tekitajad on kiirgustemperatuuri asümmeetria, tõmbustunne, vertikaalsed õhutemperatuuride erinevused ja põrandapinna temperatuurid. Individuaalsete erinevuste tõttu on võimatu luua keskkonda, mis rahuldaks kõikide inimeste vajadusi. Alati on rahulolematuid, kuid võimalus on luua keskkond, mida aktsepteerivad enamik. Üldjuhul kui inimene on tundlik ühele lokaalsele ebamugavustundetekitajale, on ta ka tundlik ka kõikidele teistele. ebamugavustundetekitajatele. [6]

Inimestel on väga efektiivne keha termoregulaatorne süsteem, mis kindlustab keha temperatuuri hoidmise keskmiselt +37 °C juures. Kui kehal on liiga soe, siis käivitub kaks protsessi - veresoone laienevad ning algab higistamine. Vastupidiselt, kui kehal on külm, algab veresoonte ahenemine ning lihaste stimuleerimine soojuse tootmiseks, mis väljendub külmavärinate näol. Kaks tingimust peavad olema täidetud, et säilitada keha soojuslik mugavus. Esimene on kombinatsioon naha temperatuurist ja keha sisetemperatuurist, mis tagavad soojusliku neutraalsuse, ning teine on keha soojustootlikkuse tasakaal - metabolismi poolt toodetud energia ja keha energiakadu peavad olema võrdsed. [7]

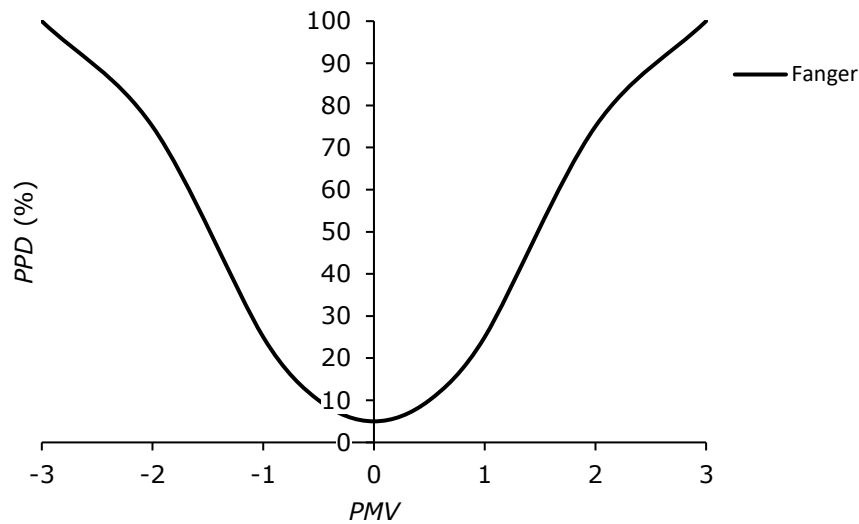
1.3 Soojusliku mugavuse hindamine

Soojusliku mugavuse hindamiseks kasutatakse põhiliselt *PMV* ning *PPD* indekseid. *PMV* (Predicted Mean Vote) ehk tõenäosuslik soojusliku mugavuse indeks näitab suure hulga inimeste soojustundlikkuse keskmist väärtust 7. punktilisel skaalal (Tabel 1), mis põhineb keha soojuslikul olekul. Soojuslik tasakaal saavutatakse, kui keha soojuskaod on võrdväärsed keha soojustootlikkusega. Harilikus keskkonnas üritab inimese termoregulaatorne süsteem automaatselt muuta naha temperatuuri ja higieritust, et säilitada soojuslik tasakaal. [6]

Tabel 1 7. punktiline *PMV* skaala [6]

+3	<i>Palav</i>
+2	Soe
+1	Kergelt soe
0	Keskmine
-1	Kergelt jahe
-2	Jahe
-3	Külm

Kui *PMV* näitab suure hulga inimeste sama keskkonna soojustundlikkuse keskmist väärtust, siis individuaalsed vastused lähevad kaotsi - seega on kasulik ära näidata inimeste arv, kes tõenäoliselt tunnevad ennast ebamugavalt. *PPD* (Predicted Percentage of Dissatisfied) ehk tõenäosuslik soojusliku mugavusega rahulolematute indeks näitab protsentuaalselt, kui palju on inimesi, kellel on vastavas keskkonnas ebamugav olla. Seega on kasulik neid kasutada koos (Joonis 1). [6]



Joonis 1 *PMV* ja *PPD* graafik Fangeri uuringu põhjal. [6]

$$PMV = [0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,028] \cdot [(M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)] \quad (1)$$

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028 \cdot (M - W) - I_{cl} \cdot \{3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)\} \quad (2)$$

$$h_c = \begin{cases} 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25}, & \text{kui } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} > 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \\ 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}}, & \text{kui } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} < 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad (3)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290l_{cl}, & \text{kui } l_{cl} \leq 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \\ 1,05 + 0,645l_{cl}, & \text{kui } l_{cl} > 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \end{cases} \quad (4)$$

kus

M on metabolismi tase (W/m^2);

W on efektiivne mehaaniline võimsus (W/m^2);

I_{cl} on riietuse soojusisolatsioon ($m^2 \cdot K/W$);
 f_{cl} on riietuse pindalategur;
 t_a on õhutemperatuur ($^{\circ}C$);
 \bar{t}_r on keskmine kiirgustemperatuur ($^{\circ}C$);
 v_{ar} on suhteline õhu kiirus (m/s);
 p_a on veeauru osarõhk (Pa);
 h_c on konvektiivne soojusülekanne koefitsient [$W/(m^2 \cdot K)$];
 t_{cl} on riietuse pinnatemperatuur ($^{\circ}C$).

PMV d võib arvutada erinevatele riietuse, metabolismi, õhu temperatuuri, keskmise kiirgustemperatuuri, õhu liikumise kiiruse, õhu niiskuse variatsioonidele valemite nr 1 kuni 4 järgi.

Kui PMV väärtus on arvatud, saab PPD leida valemi nr (5) järgi.

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2) \quad (5)$$

Tabel 2 Inimeste seas läbi viidud uuringu tulemused

PMV	PPD	Inimeste tõenäosuslik valik (%)		
		0	-1, 0, 1	-2, -1, 0, 1, -2
2	75	5	25	75
1	25	30	75	95
0,5	10	55	90	98
0	5	60	95	100
-0,5	10	55	90	98
-1	25	30	75	95
-2	75	5	25	75

DR (Draught) ehk tõmbustunde indeks väljendab protsentuaalselt inimeste arvu, kes saavad olema häiritud tõmbusest. Tõmbustunde indeks arvutatakse valemi nr (6) järgi.

$$DR = (34 - t_{a,l})(\bar{v}_{a,l} - 0,05)^{0,62}(0,37 \cdot \bar{v}_{a,l} \cdot Tu + 3,14) \quad (6)$$

Kui $\bar{v}_{a,l} < 0,05 \frac{m}{s}$, kasutage $\bar{v}_{a,l} = 0,05 \frac{m}{s}$

Kui $DR > 100\%$, kasutage $DR = 100\%$

kus

$t_{a,l}$ on lokaalne õhu temperatuur (°C, 20-26 °C);

$\bar{v}_{a,l}$ on lokaalne keskmine õhu liikumise kiirus (m/s, < 0,5 m/s);

Tu on lokaalne turbulentsuse intensiivsus [% , 10-60% (kui pole teada, võib kasutada 40%).

1.4 Sisekliima klassid

Vastavalt standardile EVS-EN 16798 jaotatakse hoonete sisekliima nelja klassi. Selle standardi rahvuslikus lisas antakse väärtused ainult esimesele kolmele klassile. Kategooriad on seotud hoone kasutajate võimalike ootustega – kõrged, keskmised, tagasihoidlikud ning madalad. Üldjuhul projekteeritakse teise kategooria hooneid ning kõrgem tase võidakse valida, kas erivajadustega inimeste, laste, kõrgema mugavuse või muu põhjuse tõttu. Madalam kategooria ei sea ohtu tervisele, küll aga võib olla hoone kasutajatel ebamugavam. [16798]

Tabelis 3 on välja toodud *PMV* ja *PPD* piirväärtused iga kategooria kohta. Operatiivsete temperatuurid kütmisel ja jahutamisel on ära näidatud tabelis 4. Õhu temperatuuride vahemikud kütmisel ja jahutamisel on kirjeldatud tabelis 5. Samuti on lokaalsete ebamugavustunde tekitajate piirväärtused defineeritud (Tabel 6). Jahutusperioodi kohta on antud kaks õhu liikumise kiiruse piirväärtust – jahutamise olukorras ning ilma jahutuseta olukorras. Vertikaalse õhutemperatuuri erinevus on mõõdetuna 0,1 m ja 1,1 m kõrguselt.

Tabel 3 PPD ja PMV kriteeriumid [9]

Kategooria	Keha kui terviku termiline seisund	
	PPD	PMV
I	< 6	-0,2 < PMV < +0,2
II	< 10	-0,5 < PMV < +0,5
III	< 15	-0,7 < PMV < +0,7
IV		

Tabel 4 Operatiivse temperatuuri kriteeriumid vastavalt perioodile [9]

	Kategooria	Operatiivne temperatuur	
		Minimaalne kütisel	Maksimaalne jahutamisel
Kontorid ja ruumid sarnase tegevusega (üksikud kontorid, avatud planeeringuga kontorid, konverentsiruumid, auditooriumid, kohvikud, restoranid, klassiruumid) Istuv tegevus 1,2 met	I	21	25,5
	II	20	26
	III	19	27
	IV		

Tabel 5 Õhu temperatuuri vahemike kriteeriumid vastavalt perioodile [9]

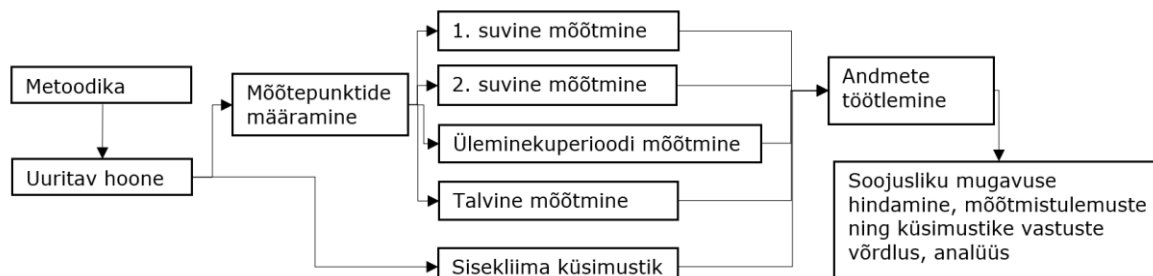
Hoone/ruumi tüüp	Kategooria	Temperatuurivahemik kütteks	Temperatuurivahemik jahutuseks
Kontorid ja ruumid sarnase tegevusega (üksikud kontorid, avatud planeeringuga kontorid, konverentsiruumid, auditooriumid, kohvikud, restoranid, klassiruumid) Istuv tegevus 1,2 met	I	21 kuni 23	23,5 kuni 25,5
	II	20 kuni 24	23 kuni 26
	III	19 kuni 25	22 kuni 27
	IV		

Tabel 6 Kohalike soojusliku ebamugavustunde tekitajate kriteeriumid

Kategooria	DR (tõmbusindeks)	Tuuletõmbus		Vertikaalne õhutemperatuuri erinevus (pea-pahkluu)	
		Talv (m/s)	Suvi (m/s)	PD (%) (rahulolematus)	Temperatuuri erinevus (K)
I	15	0.14	0,16/ 0,19	3	2
II	20	0.16	0,19/ 0,25	5	3
III	30			10	4

2. METOODIKA

Metoodika peatükis tutvustatakse uuritavat hoonet, kirjeldatakse mõõtmismetoodikat, mõõtepunktide asukohti ning küsitluse tausta.



Joonis 2 Metoodika blokk skeem

2.1 Uuritava hoone tutvustus

Uuritavaks objektis oli Rae vallas asuv Omniva logistikakeskuse büroo-osa. Hoone on kahe korruseline ning suletud netopindala on 14139 m². Büroo-osa on peegelpildis L-kujuline. Kontoriruumid asuvad mõlemal korrusel ning aknad asuvad kirde ja kagu suunas. Hoone on projekteeritud lähtudes sellest, et päevas vahetuses töötab maksimaalselt 150 inimest, sellest pooled büroo-osas.

2.1.1 Hoone lähteandmed

Tabel 7 Hoone piirdetarindite soojusläbivused [10]

Välissein VS-1	0,20 [W/(m ² *K)]
Välissein VS-1	0,21 [W/(m ² *K)]
Välissein VS-1	0,15 [W/(m ² *K)]
Välissein VS-1	0,24 [W/(m ² *K)]
Katuslagi KL-1	0,14 [W/(m ² *K)]
Katuslagi KAT-2 ja KAT-3	0,15 [W/(m ² *K)]
Aknad	0,90 [W/(m ² *K)] (g=0,3)
Uksed, klaasfassaadid	1,40 [W/(m ² *K)] (g=0,3)

Küttesüsteem on projekteeritud talvise välisõhutamperatuuri -22 °C järgi ning jahutussüsteem on projekteeritud suvise välisõhutamperatuuri +27 °C ja suhtelise õhuniiskuse 50% järgi. Temperatuuri kõikumine on lubatud ruumide keskel 1,1 m kõrgusel ±2 °C. Jahutussüsteem on projekteeritud minimaliseerimaks hoone kasutajate tõmbustunde.

2.1.2 Hoone tehnosüsteemid

Hoone soojusvarustus tagatakse kahe 500 kW terasgaasikatlaga. Maksimaalsed summaarsed soojuskoormused jagunevad järgmiselt:

- Olmeosa kiirguspaneelid 35 kW;
- Laoosa kiirguspaneelid ning õhkkardinad 520 kW;
- Ventilatsioon ning õhkkardinad 284 kW;
- Hügieeniruumide pörandaküte 8 kW;
- Soe tarbevesi 520 kW.

Hoones on lahendatud küte ja jahutus põhiliselt nelja toru kiirguspaneelidega. Riietusruumide alal on pörandakütte ja osades ruumides radiaatorküte.

Soojuskandjaks on vesi arvutuslike temperatuuridega:

Laorumide kiirhurkütte kontuuris: +80/50 °C

Olmeruumide kiirgurkütte kontuurides: +35/30 °C

Pörandakütte kontuuris: +40/35 °C

Ventilatsiooni kalorifeeride kontuuris: +60/40 °C

Sooja tarbevee kontuuris: +55/5 °C

Ventilatsioon on lahendatud seguneva õhuvahetusega. Ventilatsiooniagregaadid on varustatud soojustagastitega. Kontoriruumides on projekteeritud õhuvahetus 15 l/s inimese kohta ning kogu büroopinna õhuvahetus on 2,1 l/(s*m²).

Ventilatsiooniseadmete jahutuspatareide külmavarustus on lahendatud külmamasinaga, milleks on kondensaatori õhkjahutuse ja hüdro mooduliga välisseade, mis on paigaldatud katusele. Külmakandja parameetrid +7/12 °C ning läbi kiirgurite mineva külmakandja graafik on +16/19 °C.

2.1.3 Kütte- ja jahutussüsteemi kirjeldus

Büroopinna lakke 2,4 m kõrgusele on paigaldatud 4-toru Zehnderi kiirguspaneelid, mis on ekstraheeritud grafiidist soojusjaotusplaadiga. Tootja kodulehel on välja toodud, et tegemist on küll aktiivse jahutusega, kuid tehnoloogia põhiliselt on need passiivsed jahutusseadmed.




2.2 Mõõtmised

Soojusliku mugavuse komponentide mõõtmiseks kasutati Dantec mõõtekomplekti ComfortSense sondidega (Tabel 8). Mõõdeti õhu temperatuuri, õhu liikumise kiirust,

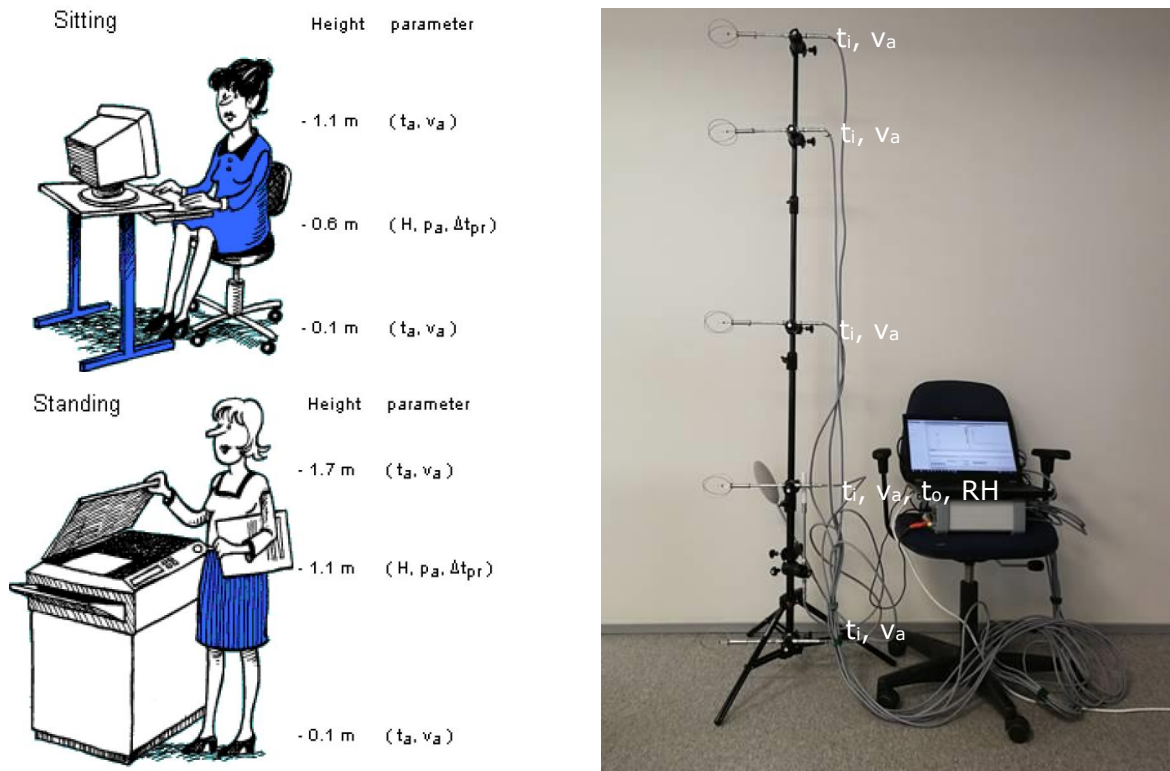
suhtelist õhuniiskust ning operatiivset temperatuuri. Mõõtmised teostati järgnevatel kuupäevadel:

- 01.08.2019 14.00-16.00, mil $V\ddot{O}T = 16,8^{\circ}\text{C}$ ja $RH = 57\%$;
- 29.08.2019 12.30-15.30, mil $V\ddot{O}T = 23,7^{\circ}\text{C}$ ja $RH = 62\%$;
- 20.11.2019 14.00-15.30 mil $V\ddot{O}T = 5,6^{\circ}\text{C}$ ja $RH = 91\%$;
- 18.02.2020 15.00-16.30 mil $V\ddot{O}T = 6,9^{\circ}\text{C}$ ja $RH = 73\%$.

Tabel 8 Mõõteseadmete tehnilised andmed

Mõõtesead	Anemomeeter (ComfortSense 54T35)	Anemomeeter (ComfortSense 54T38)	Temperatuuri- hügromeeter (ComfortSense 54T37)
Kirjeldus	Õhutemperatuuri ja õhu liikumise kiiruse sond	Operatiivse temperatuuri sond	Suhtelise õhuniiskuse sond
Illustratsioon			
Mõõtepiirkond	-20...+70 °C 0,05...10 m/s	0...+45°C	0...100 %
Resolutsioon	0,001 °C 0,001 m/s	0,001 °C	0,01 %
Mõõtetäpsus	0...+45 °C ($\pm 0,5$ K) 0...1 m/s ($\pm 0,02$ m/s)	+10...+40 °C ($\pm 0,2$ K)	+10...+30 °C ($\pm 1,5$ %)

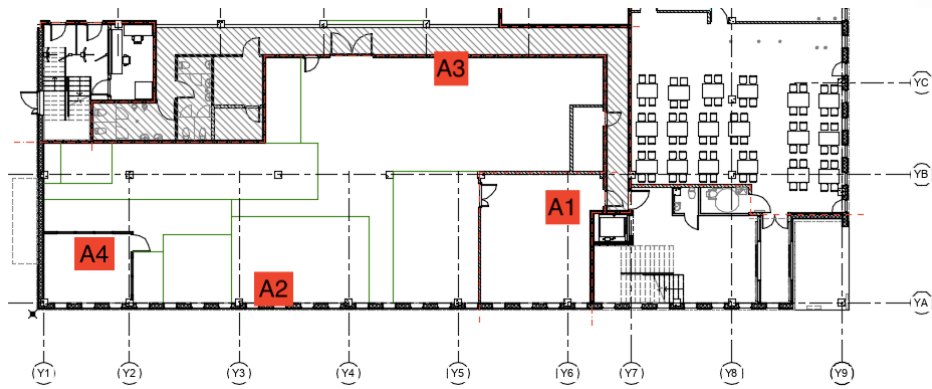
Õhu liikumise kiiruse mõõtmised viidi läbi vastavalt ISO 7730 metoodikale, kus sondid asetati inimese töökoha asendeid arvestades. Sondid paiknesid viiel kõrgusel: 0,1 m, 0,6 m, 1,1 m, 1,7 m ning 2 m (Joonis 3). Igas punktis kestis mõõtmine 180 sekundit, mil registreeriti 3600 lugemit.



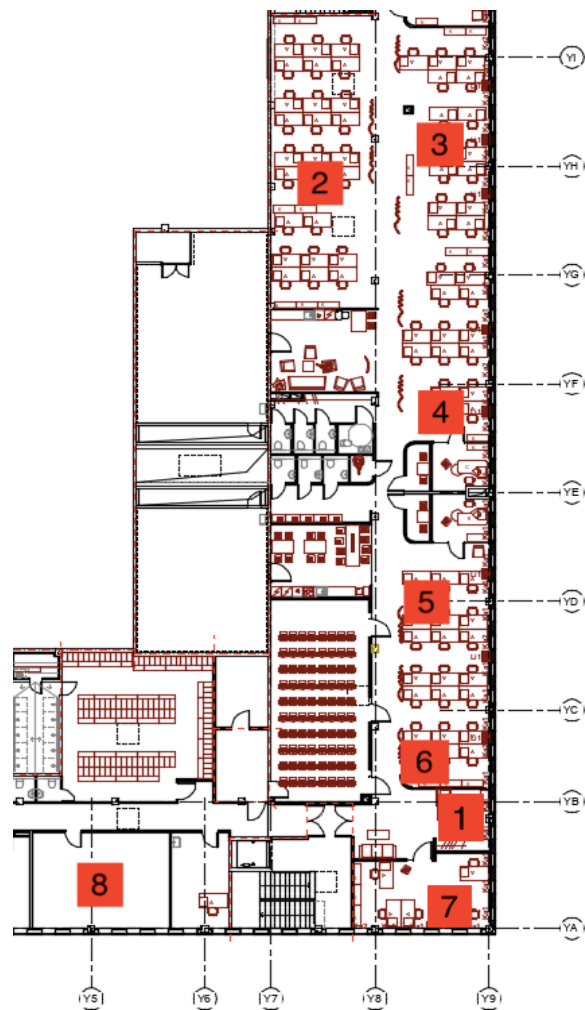
Joonis 3 Istuva asendi iseloomulikud kõrgused (vasakul üleval). Seisva tööasendi iseloomulikud kõrgused (vasakul all). Sondide kõrgused mõõteseadmel. Foto pärineb Martin Kiili isiklikust fotopangast (paremal).

2.2.1 Mõõtepunktide asukohad

Mõõtmisi teostati büroo mõlemal korrusel erinevates kohtades, et saada piisavad andmed hoone analüüsimiseks. Esimesel korral polnud võimalik 1. korrusel mõõtmisi teostada seoses ruumide ümberehitusega. Samadel põhjustel puudus järgnevatel kordadel võimalus mõõta punktis nr 8.



Joonis 4 Mõõtepunktide asukohad 1. korrusel

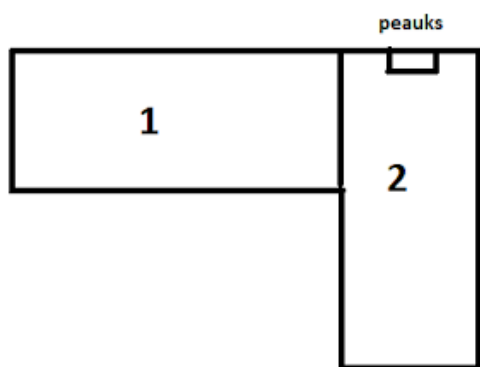


Joonis 5 Mõõtepunktide asukohad 2. korrusel

2.3 Sisekliima küsitlus

Hoone kasutajate seas viidi läbi sisekliima küsitlused jahutus-, ülemineku-, ning kütteperioodi kohta. Küsimustiku põhjana on kasutatud CEN/TR 16798-2:2019[8] standardi lisas E olevat subjektiivsete hindamiste meetodikat. Lisaks standardis olevatele ning sisekliima hindamiseks vajalikele küsimustele uuriti vastanutelt ka

töölaua paiknevuse, tööl viibimise aja, valgustuse, päikesevalguse, õhu kvaliteedi ja müra kohta, kuid mida käesolevas töös ei analüüsita. Küsimustik edastati hoone kasutajatele läbi majahaldaja meili teel. Vastajate jaoks on loodud eskiis enda asukoha lihtsamaks tuvastamiseks (Joonis 6 Hoone kuju).

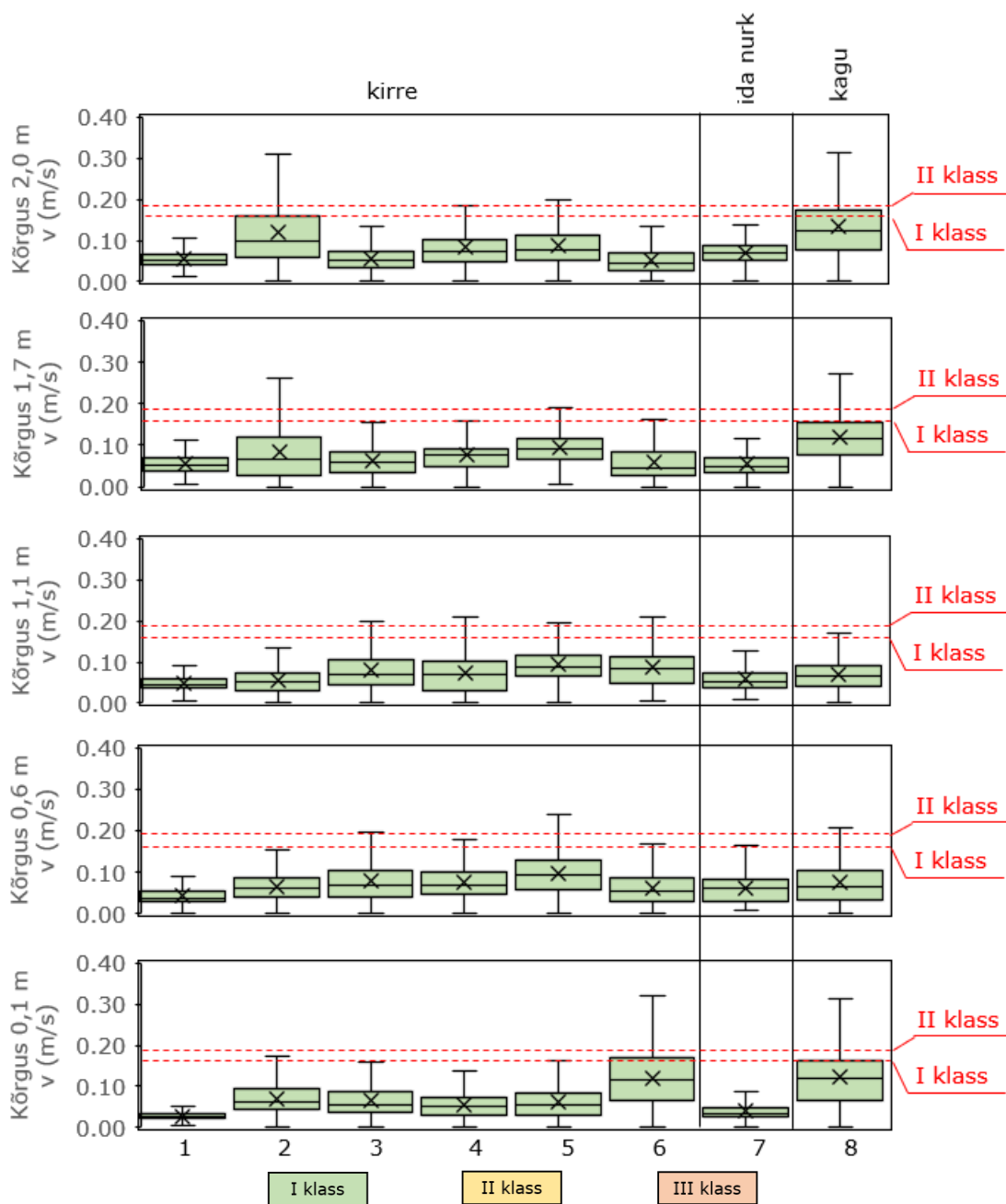


Joonis 6 Hoone kuju

3. MÕÖTMISTE TULEMUSED JA ANALÜÜS

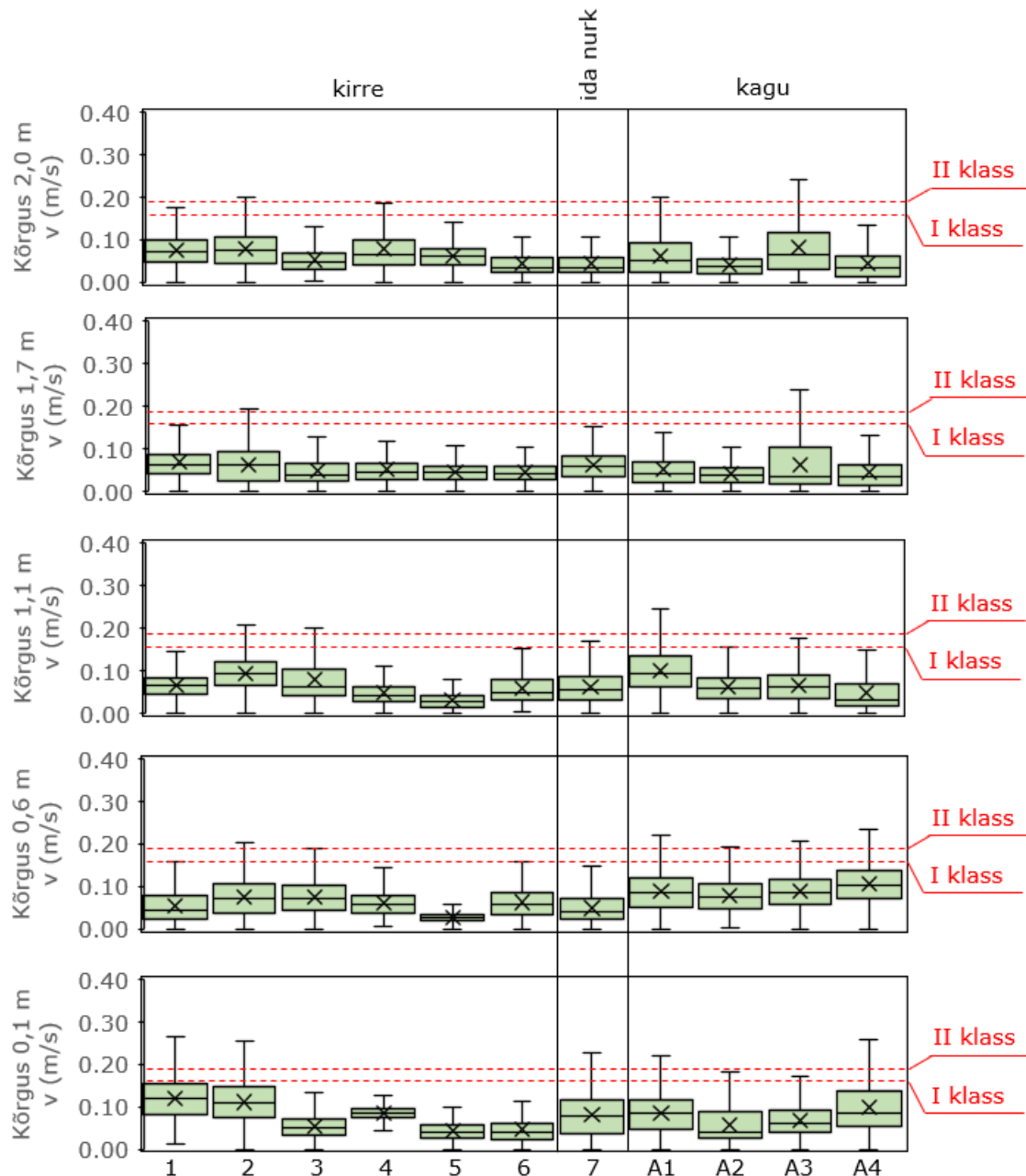
3.1 Õhu liikumise kiirused

Suvistel mõõtmistel õhu liikumiste piirväärtusteks on valitud parameetrid, mis arvestavad jahutusperioodi ilma jahutuseta olukorda. Tegemist on passiivse jahutussüsteemiga ning seetõttu on lähtutud rangematest nõetest. Esimene mõõtmine toimus 1. augustil 2019, mil väljas oli 16,8 °C ja suhteline niiskus oli 57%. Sel korral teostati kõik mõõtmised büroo teisel korrusel, kuna esimesel korrusel teostati ruumide ümberehitust, ning enamik neist hoone kirdepoolses osas.



Joonis 7 Esimese suvise mõõtmise õhu liikumise kiirused

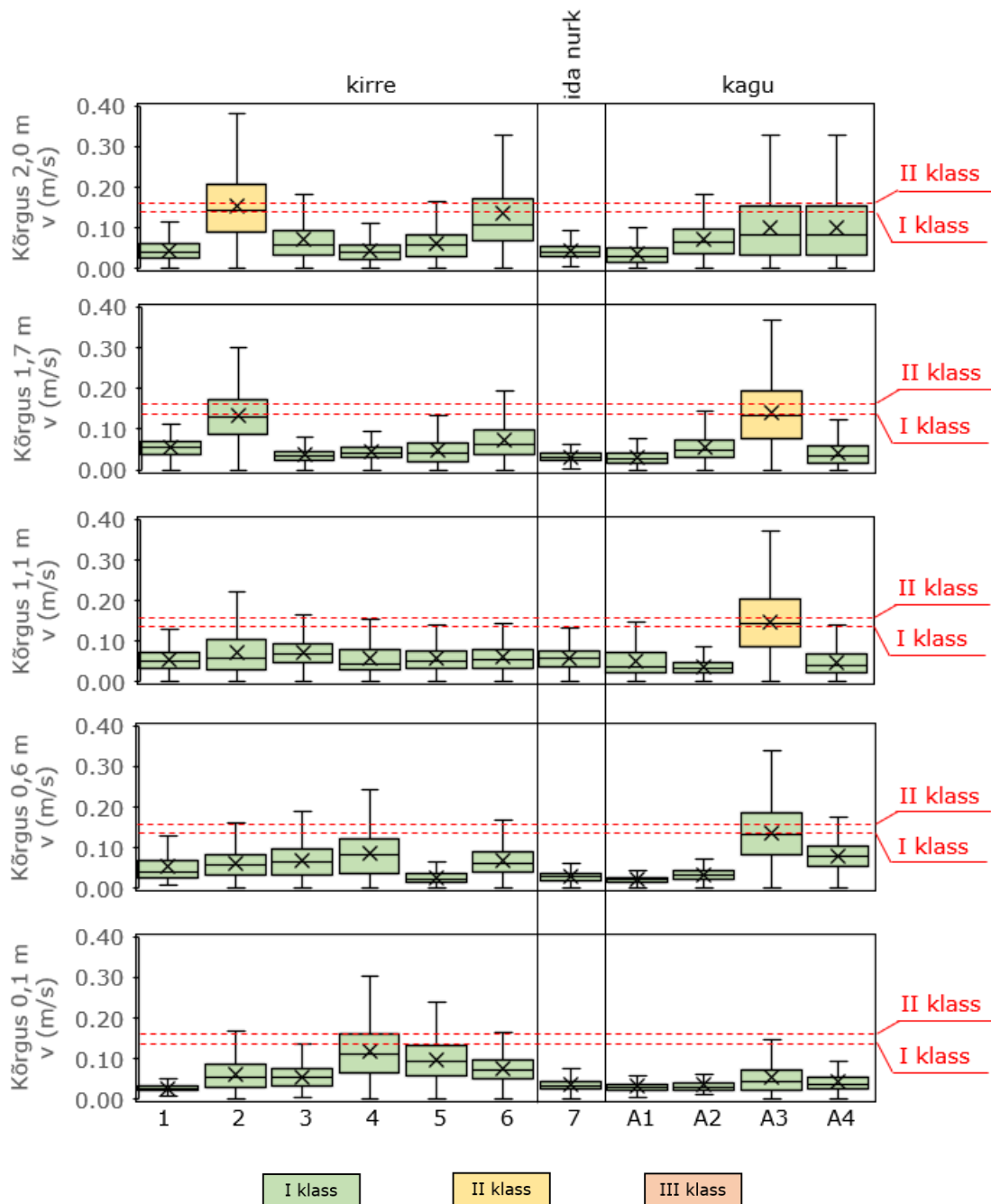
Jooniselt 7 on näha, et maksimaalsed mõõdetud kiirused lähevad kohati I ja II klassist välja, kuid mõõtmistulemuste keskmised kuuluvad Kõik sisekliima I kategooriasse. 8. mõõtepunktis jäävad kolmel kõrgusel rohkem kui 25 % registreeritud tulemustest I klassist välja, kuid see on tingitud ilmselt sellest, et ruum pole mõeldud kontoriks, vaid spordisaaliks, kus ajutiselt tehti tööd.



Joonis 8 Teise suvise mõõtmise õhu liikumise kiirused

Teise mõõtmiskorra õhu liikumise kiirused leiab jooniselt nr 8. Selleks korraks oli esimese korruse ümberehitus lõppenud ja 8. mõõtepunkti ruum vabastatud. Tol päeval oli välisõhutemperatuur 23,7 °C ja suhteline niiskus 62 %. Kõik tulemused kuuluvad

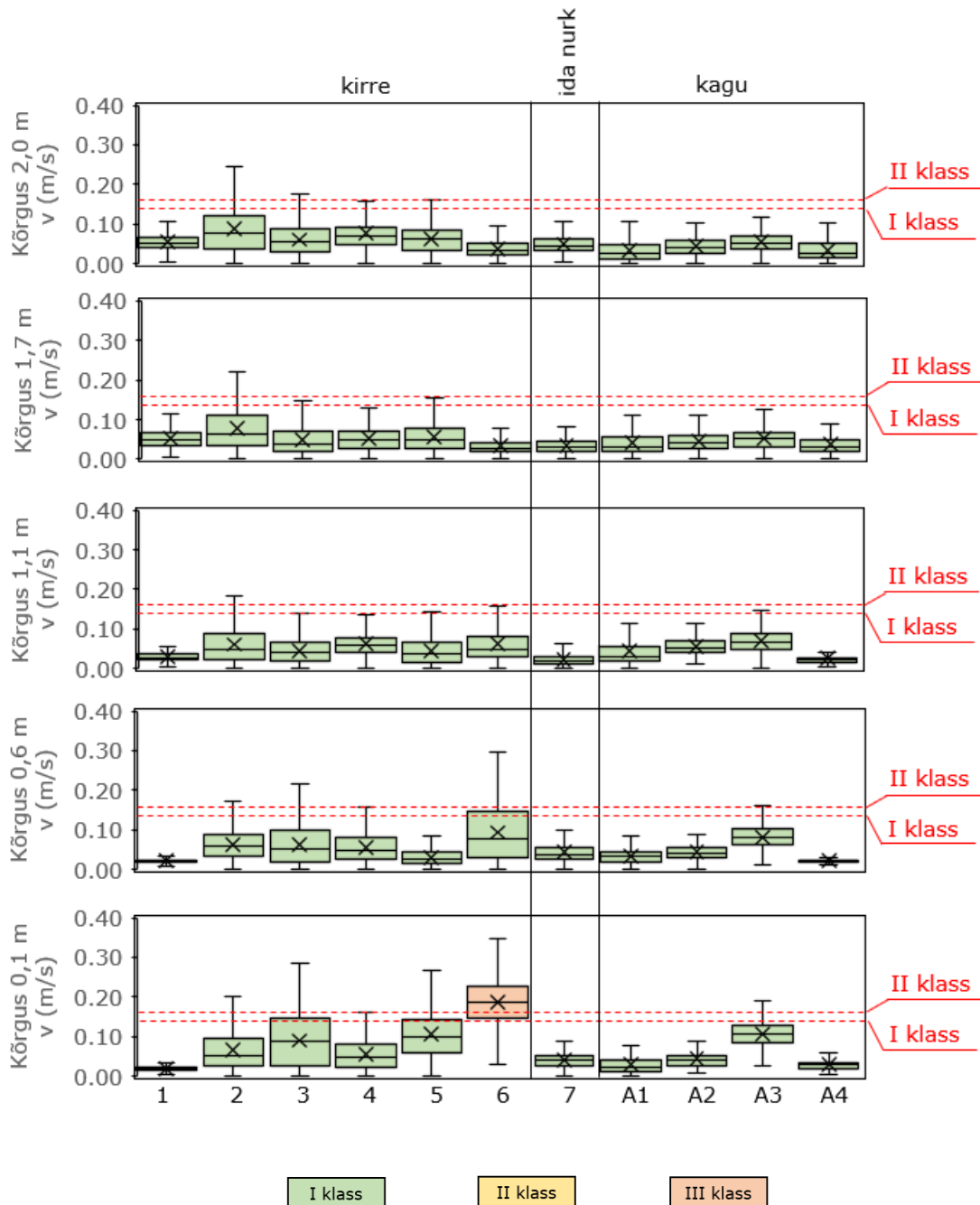
samuti sisekliima I kategooriasse. 1. mõõtepunkti kolmas kvartiil puudutab I klassi maksimaalset piirväärtust, kuid teistel kõrgustel selline nähtus puudub, siis võib olla tingitud mõõdujatest.



Joonis 9 Üleminekuajaperioodi mõõtmise õhu liikumise kiirused

Joonis 9 võib näha 20. novembri mõõtmistulemusi, mil väljas oli 5,6 °C ja suhteline niiskus oli 91 %. Ventilatsiooni sissepuhke temperatuur oli vahemikus 22,3 – 23,1 °C.

Kütteperioodil on õhu liikumise kiirused piirväärtused rangemad ning need kajastuvad ka tulemustes. Mõõtepunktis A3 on näha läbivat keskmisest suuremat õhu liikumist, sest tegemist on väikse ruumiga, kus töötab ligi 8 inimest, ning iga kohaolija väiksemgi sagimine mõjutab õhu liikumist. 0,1 m kõrgusel pole see kajastunud, kuna sond oli piiratud kapiga.



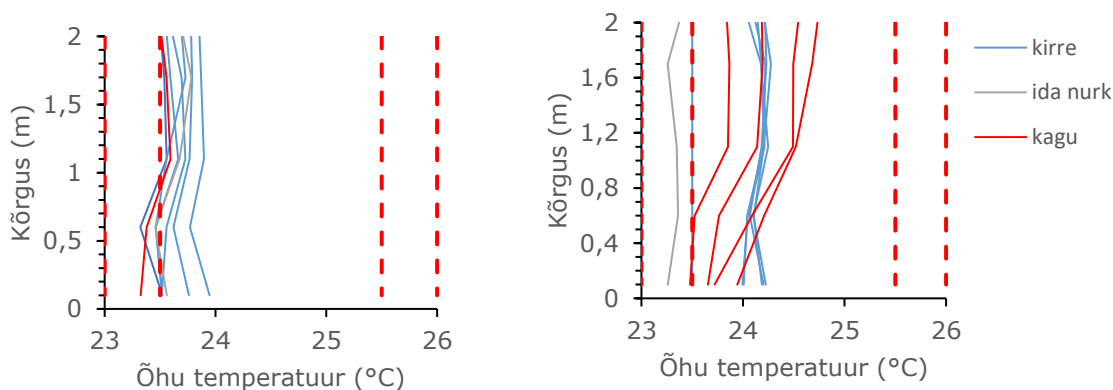
Joonis 10 Talvise mõõtmise õhu liikumise kiirused

Neljas mõõtmine teostati 18.02.2020, mil väljas oli 6,9 °C ja suhteline niiskus oli 73 % (Joonis 10). Ventilatsiooni sissepuhke temperatuurid sarnanesid eelmisele

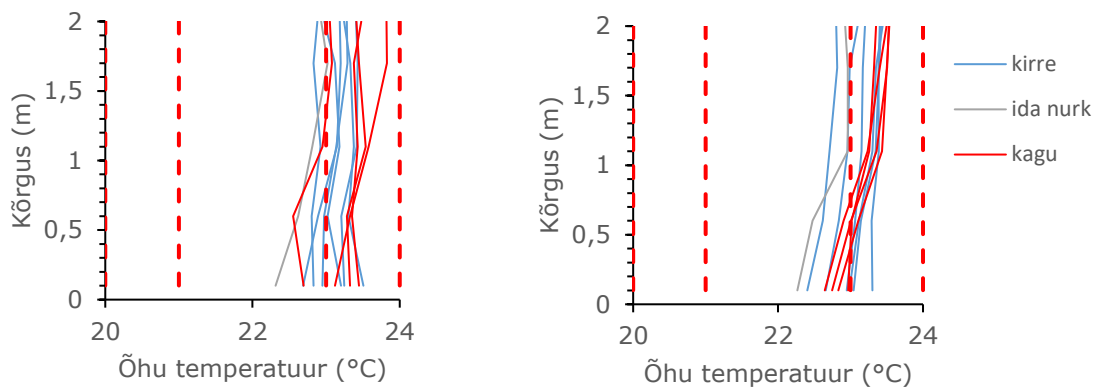
mõõtmisele, kuid tulemused on üsna erinevad. 6. mõõtepunkti madalama sondi tulemused kuuluvad III sisekliima klassi, mis on ilmselt tingitud möödujatest, kuna mõõtepunkt asus vahekäigu ääres. Selle kasuks räägib ka sama punkti 0,6 m kõrguselt mõõdetud tulemused. Ülejäänud mõõtmistulemused kuuluvad I klassi.

3.2 Õhu temperatuur

Kui kiirguspaneelidega kütte- ja jahutussüsteemi puhul võiks eeldada, et graafik joonistub välja selliselt, et põrandapinna juures on õhu temperatuur madalam, viibimistsooni piires liigub vertikaalselt üles ja lae juures on soojem. Tegelikult on aga temperatuuride kõikumine nii suvel, kui talvel väga väike. Suvel kohati on 0,1 m kõrguselt mõõdetud temperatuuri kõrgemad, kui 2 m kõrguselt. Teisel suvisel mõõtmisel on näha ebaühtlasemalt jagunenud õhu temperatuure. Kui kirde osas on temperatuurijooned koos, siis kagu osas on 2 m kõrgusel erinevate mõõtepunktide temperatuuri vahe ligi 1 °C. Üldiselt kuuluvad enamik suvised mõõdetud temperatuurid I sisekliima klassi. (Joonis 11). Jooniselt 12 on näha nii üleminekuperioodi kui ka talviseid mõõdetud õhu temperatuure. Kuna mõlema mõtmiskorra puhul oli välistemperatuur ligi +6 °C, siis on näha ka sarnaseid tulemusi. Enamik tulemustest kuuluvad II sisekliima klassi.

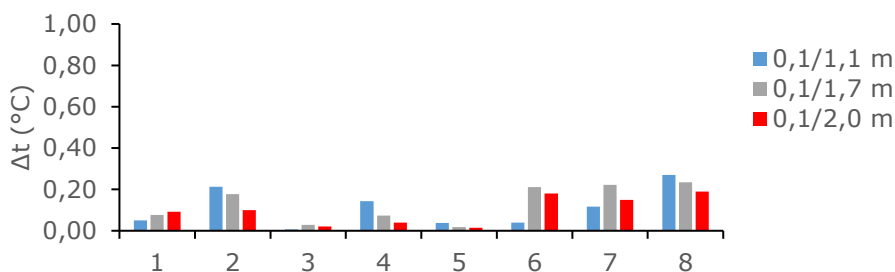


Joonis 11 Õhu temperatuurid esimesel suvisel mõõtmisel(vasakul). Õhu temperatuur teisel suvisel mõõtmistel(paremäl).

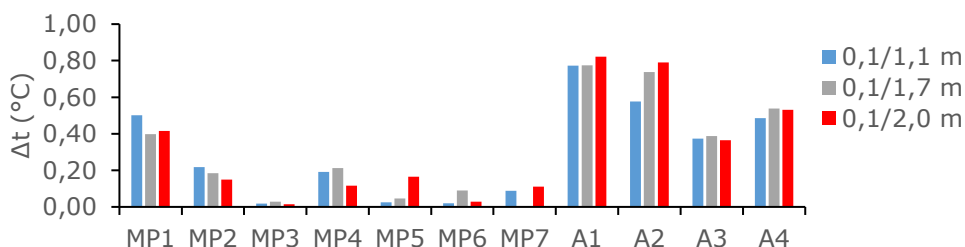


Joonis 12 Õhu temperatuurid sügisel mõõtmisel (vasakul). Õhu temperatuurid talvisel mõõtmisel (paremal).

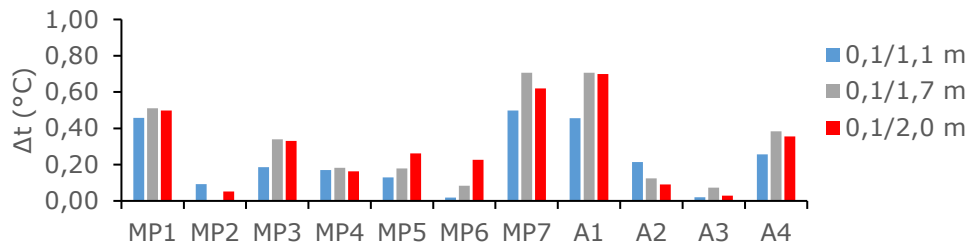
EVS-EN 16798-1 järgi on defineeritud ka vertikaalsed õhu temperatuuride vahed. I sisekliima klassi saavutab, kui on 0,1 m ja 1,1 m kõrguselt mõõdetud õhu temperatuuride erinevus on väiksem kui 2 °C. Kuna hoones mõõdeti temperatuure ka kõrgemalt, siis on ka nende kõrguste temperatuurivahed välja toodud. Kõik mõõdetud temperatuuride erinevused kuulusid I klassi (Joonis 13-16). Hoone esimese korruse ümber ehitatud osas on kõige suuremad temperatuuri erinevused.



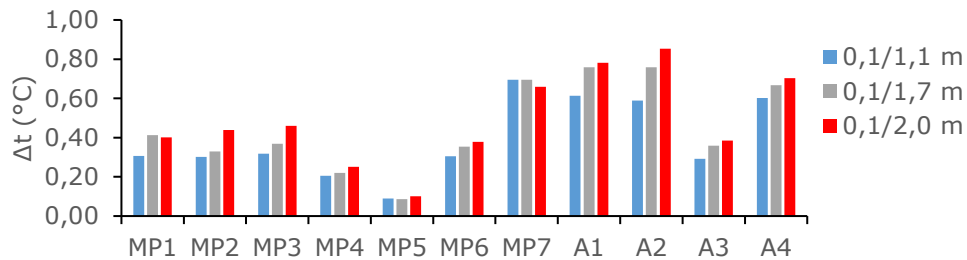
Joonis 13 Esimese suvise mõõtmise vertikaalsed temperatuuride erinevused



Joonis 14 Teise suvise mõõtmise vertikaalsed temperatuuride erinevused



Joonis 15 Üleminekuperioodi mõõtmise vertikaalsed temperatuuride erinevused



Joonis 16 Talvise mõõtmise vertikaalsed temperatuuride erinevused

3.3 Koondtabelid

Järgnevalt on esitatud turbulentsuse, tõmbustunde ning PMV ja PPD arvutustulemused ning nende lähteandmed. Tabelites on rohelisega ära värvitud I klass ning oranžiga II klass. Tabelis nr 9 võib näha, et kuigi enamus parameetreid kuulub I klassi, on siiski *PMV* ja *PPD* II klassis. Siin mängib rolli madal suhteline niiskus, millele ilma niisutus- ja kuivatussüsteemideta hoones piirväärtusi pole seatud, kuid *PMVI* ja *PPDI* on need sisse arvestatud.

Tabel 9 Esimene suvise mõõtmise koondtabel

		1	2	3	4	5	6	7	8
ti(1,1 m)	°C	23,9	23,7	23,8	23,7	23,6	23,6	23,7	23,6
va(1,1 m)	m/s	0,05	0,05	0,08	0,07	0,10	0,09	0,06	0,07
Tu(1,1 m)	%	37,0	62,1	60,0	65,3	46,1	67,6	60,4	59,9
DR(1,1 m)	%	0,0	1,6	5,7	4,9	7,3	7,2	2,5	4,4
ti(0,6 m)	°C	23,8	23,6	23,6	23,5	23,3	23,5	23,5	23,4
to(0,6 m)	°C	23,5	23,7	23,7	23,4	23,5	23,5	23,7	23,6
va(0,6 m)	m/s	0,04	0,06	0,08	0,07	0,10	0,06	0,06	0,07
RH(0,6 m)	%	38,9	36,3	36,2	36,0	36,4	36,4	36,1	37,6
PMV(0,6 m)	-	-0,4	-0,4	-0,4	-0,5	-0,5	-0,4	-0,4	-0,4
PPD(0,6 m)	%	7,9	8,3	8,1	9,3	9,5	9,0	8,6	8,9

Augusti lõpus teostatud mõõtmisel kuulusid valdavalt kõik parameetrid I klassi, sest korral oli suhteline niiskus ligi 20 % kõrgem (

Tabel 10 Teine suvise mõõtmise koondtabel

		1	2	3	4	5	6	7	A1	A2	A3	A4
ti(1,1 m)	°C	24,8	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2	23,3	24,5	24,5	23,9	24,1
va(1,1 m)	m/s	0,07	0,09	0,08	0,05	0,03	0,06	0,06	0,10	0,06	0,07	0,05
Tu(1,1 m)	%	53,5	47,5	66,6	72,1	66,1	73,6	62,7	51,3	58,8	59,9	96,6
DR(1,1 m)	%	3,2	6,8	5,5	0,0	0,0	2,4	2,9	7,6	2,9	3,6	0,0
ti(0,6 m)	°C	24,4	24,0	24,1	24,0	24,1	24,1	23,4	24,1	24,2	23,5	23,8
to(0,6 m)	°C	24,3	23,8	24,0	24,0	24,0	24,0	23,1	24,4	24,8	23,7	24,0
va(0,6 m)	m/s	0,06	0,07	0,07	0,06	0,03	0,06	0,05	0,09	0,08	0,09	0,11
RH(0,6 m)	%	58,0	57,8	57,2	57,4	57,8	58,0	59,9	58,1	57,2	59,7	58,9
PMV(0,6 m)	-	0,0	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,4	-0,1	0,0	-0,3	-0,2
PPD(0,6 m)	%	5,0	5,5	5,3	5,3	5,3	5,3	7,8	5,1	5,0	6,4	6,0

Nii ülemineku- kui talveperioodil olid valdavalt PMV ja PPD II klassi sattumise põhjustajateks kõrgemad õhu temperatuurid (Tabel 11 ja Tabel 12).

Tabel 11 Üleminekuperioodi koondtabel

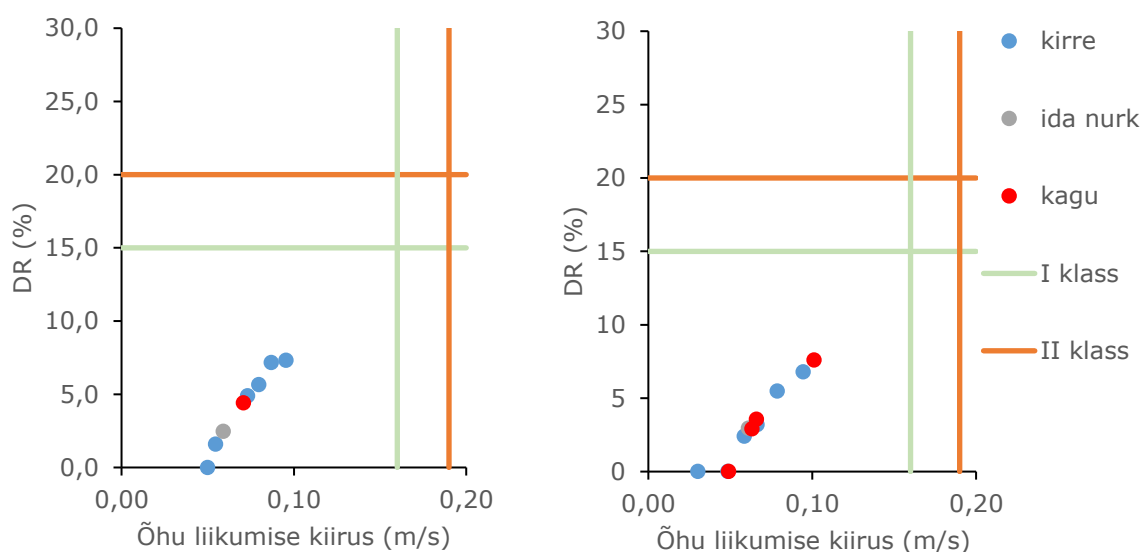
		1	2	3	4	5	6	7	A1	A2	A3	A4
ti(1,1 m)	C	23,1	22,9	23,1	23,4	23,4	23,2	22,8	23,6	23,5	23,4	23,0
va(1,1 m)	m/s	0,06	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,04	0,15	0,05
Tu(1,1 m)	%	53,7	81,1	45,6	69,7	52,7	55,1	47,1	77,1	55,8	54,3	73,8
DR(1,1 m)	%	1,9	5,7	4,7	2,7	2,0	2,8	2,7	0,9	0,0	15,3	0,0
ti(0,6 m)	C	22,9	22,8	23,0	23,2	23,3	23,0	22,6	23,3	23,3	23,4	22,6
to(0,6 m)	C	22,8	22,7	23,0	23,2	23,5	23,2	22,4	23,3	23,1	23,5	22,2
va(0,6 m)	m/s	0,05	0,06	0,07	0,09	0,03	0,07	0,03	0,02	0,03	0,13	0,08
RH(0,6 m)	%	31,4	31,2	31,3	30,3	29,3	30,1	33,5	29,4	29,6	30,1	30,4
PMV(0,6 m)	-	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,1	0,3	0,3	0,2	0,1
PPD(0,6 m)	%	5,8	5,7	6,2	6,4	6,9	6,2	5,4	6,7	6,5	6,0	5,2

Tabel 12 Talvise perioodi koondtabel

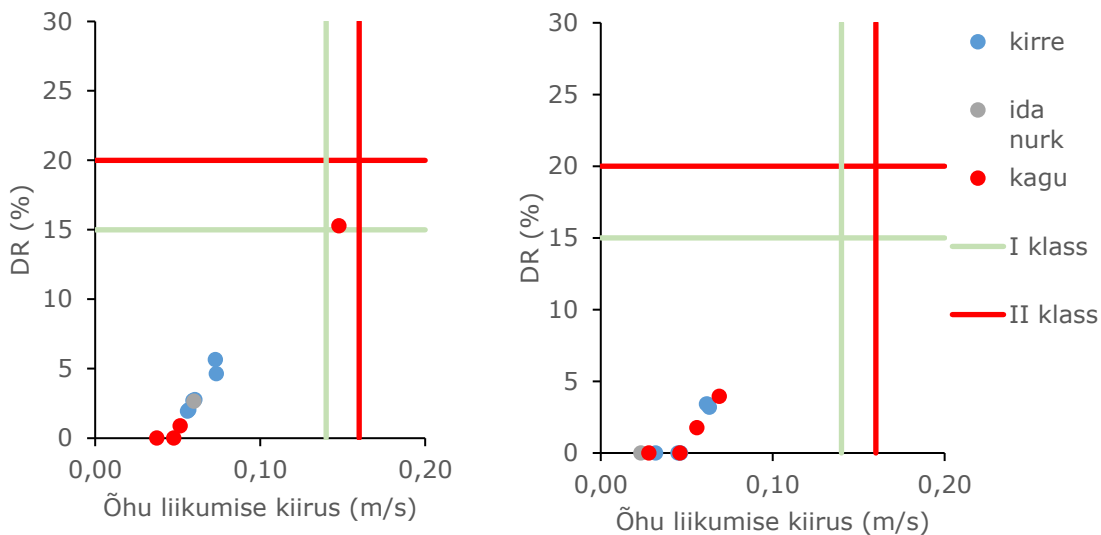
		1	2	3	4	5	6	7	A1	A2	A3	A4
ti(1,1 m)	C	22,7	23,0	23,3	23,2	23,4	23,3	23,0	23,4	23,2	23,3	23,4
va(1,1 m)	m/s	0,03	0,06	0,05	0,06	0,04	0,06	0,02	0,05	0,06	0,07	0,03
Tu(1,1 m)	%	47,3	79,9	72,4	50,2	79,1	75,5	73,9	100,0	39,4	45,8	87,2
DR(1,1 m)	%	0,0	3,4	0,0	3,2	0,0	3,4	0,0	0,0	1,7	3,9	0,0
ti(0,6 m)	C	22,6	22,8	23,1	23,1	23,3	23,1	22,5	23,0	22,9	23,0	23,1
to(0,6 m)	C	22,4	23,0	23,3	23,0	23,5	23,1	22,2	23,0	22,9	23,1	22,9
va(0,6 m)	m/s	0,02	0,06	0,06	0,05	0,03	0,09	0,04	0,03	0,04	0,08	0,02
RH(0,6 m)	%	29,7	28,7	28,4	27,7	27,2	27,7	28,3	28,1	28,4	27,7	28,5
PMV(0,6 m)	-	0,1	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2
PPD(0,6 m)	%	5,3	5,8	6,4	5,6	6,7	5,9	5,1	5,9	5,8	6,0	6,1

3.4 Tõmbusindeks

Tõmbustunde indeks I klassi piirväärtuseks on 15 % ning tulemustest on näha, et kõik peale ühe punkti büroo kagu ilmakaares kuuluvad I klassi (Joonis 17 Esimese suvise mõõtmise tõmbusindeks(vasakul). Teise suvise mõõtmise tõmbusindeks(paremal).Joonis 18 Üleminekuperioodi mõõtmise tõmbusindeks(vasakul). Talvise mõõtmise tõmbusindeks(paremal).).



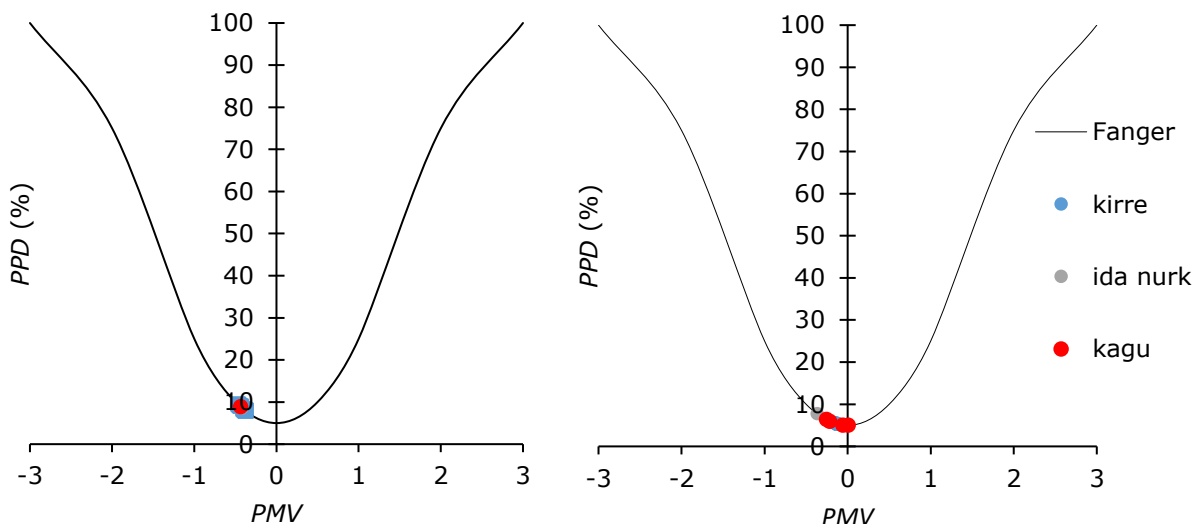
Joonis 17 Esimese suvise mõõtmise tõmbusindeks(vasakul). Teise suvise mõõtmise tõmbusindeks(paremal).



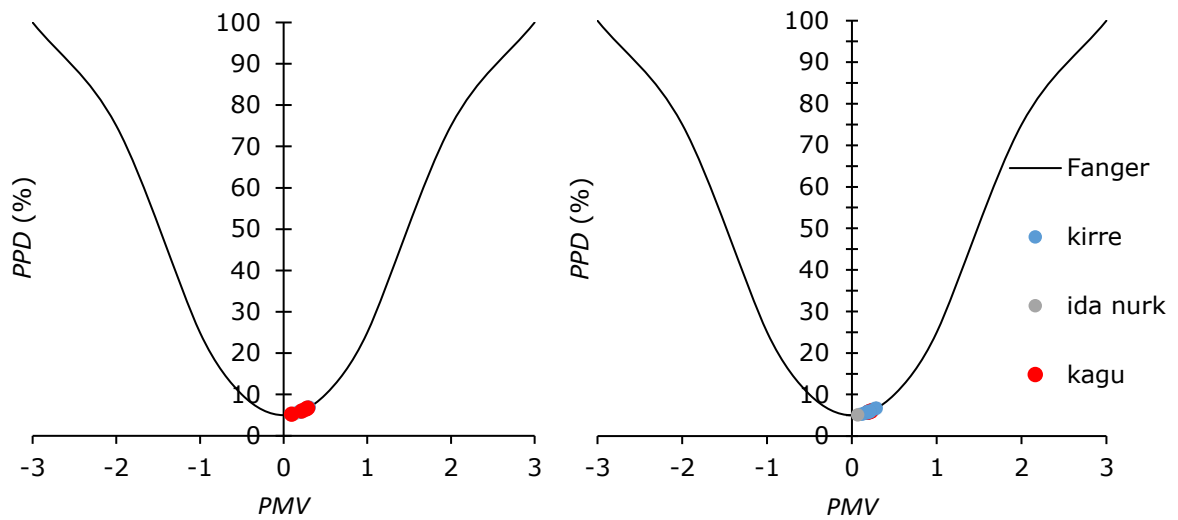
Joonis 18 Üleminekuperioodi mõõtmise tõmbusindeks(vasakul). Talvise mõõtmise tõmbusindeks(paremal).

3.5 PMV ja PDD

Arvutuslike PMV ja PPD graafikutelt on näha, et suvistel mõõtmistel on soojusliku mugavus vasakul ning üleminekuperioodil ja talvel paremal. Sellest võib järeldada, et suvel jahutatakse ja talvel köetakse liiga palju. (Joonised 19 ja 20)



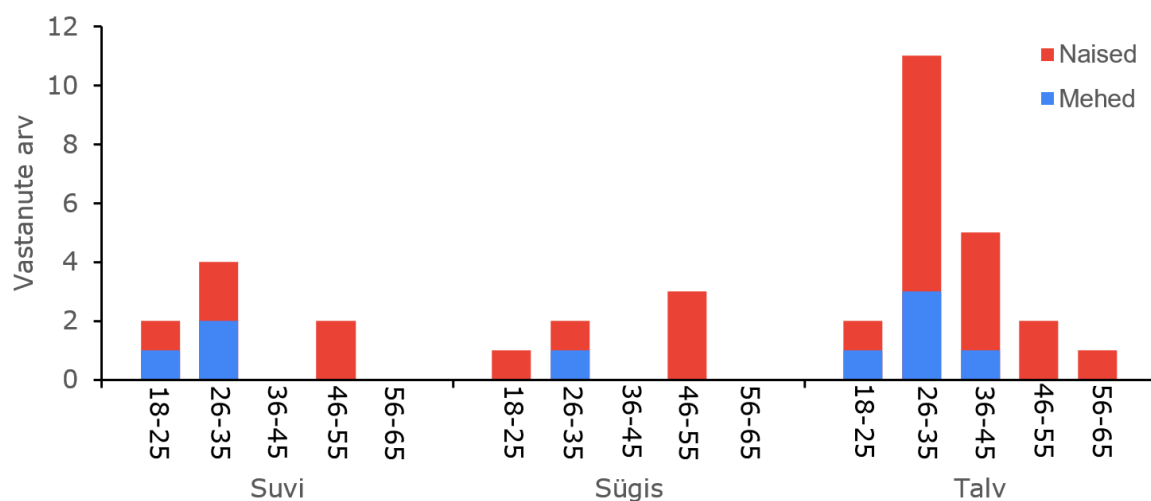
Joonis 19 Esimese suvise mõõtmise PMV ja PPD tulemused(vasakul). Teise suvise mõõtmise PMV ja PPD tulemused(paremal).



Joonis 20 Ülemineku perioodi *PMV* ja *PPD* tulemused(vasakul). Talvise mõõtmise *PMV* ja *PPD* tulemused(paremal).

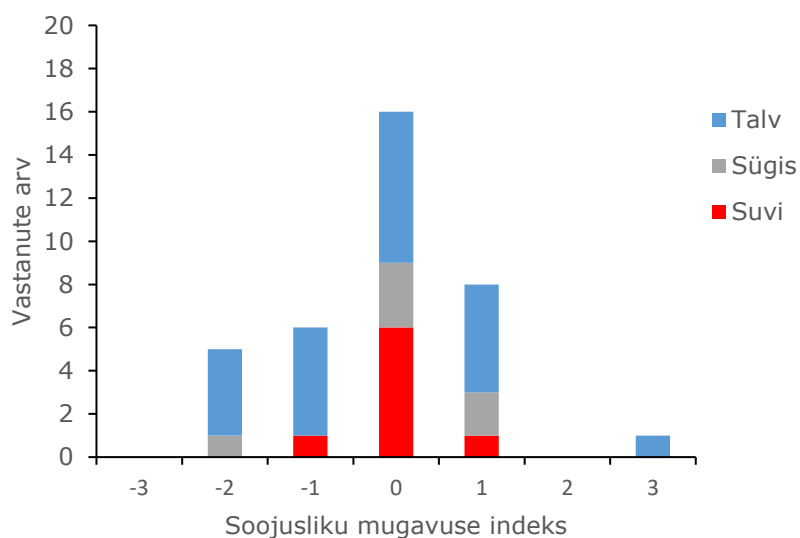
3.6 Sisekliima küsitlus

Hoone kasutajate seas viidi läbi küsitlus suve-, ülemineku- ning talveperioodi kohta. Küsitlused esitatati elektrooniliselt. Suvisele küsitlusele vastas 8, sügisele 6 ning talvisele 21 inimest.



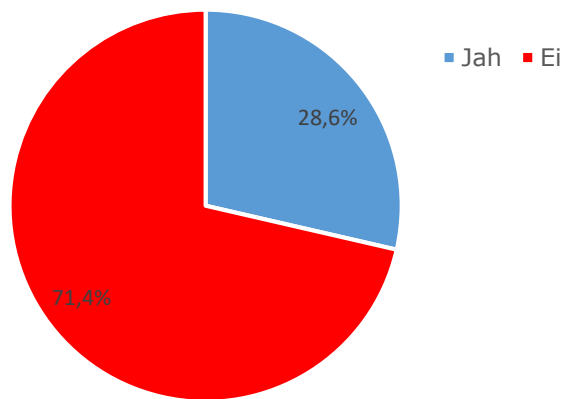
Joonis 21 Sisekliima küsitlustele vastanute sugu ja vanus

Joonis 21 võib näha, et vastanutest suurema osakaalu moodustasid naised. Suvel olid vastanutest ligi 63%, sügisel 83% ning talvel 76% naised.



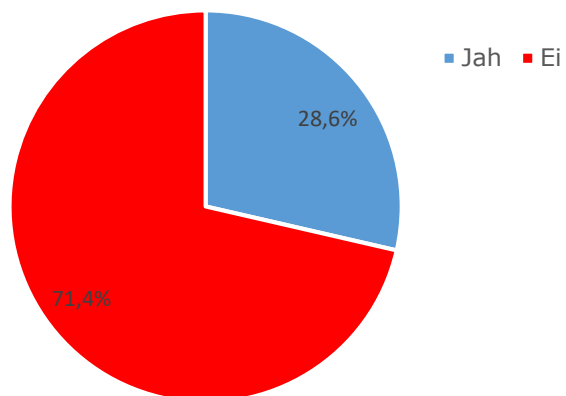
Joonis 22 Sisekliima küsitlustele vastanute soojusliku mugavuse indeks

Küsitluste tulemustest selgub, et valdav enamus on sisekliimaga rahul ja tunneb end soojuslikult mugavalt. (Joonis 22)

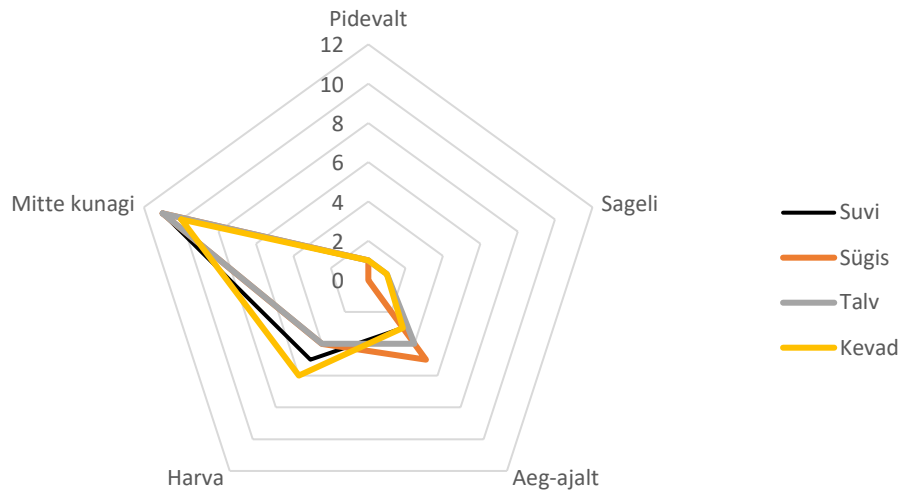


Joonis 23 Tõmbustunnet tundnud inimeste osakaal

Viimasesse küsitlusesse lisati juurde küsimused ka tõmbustunde kohta.



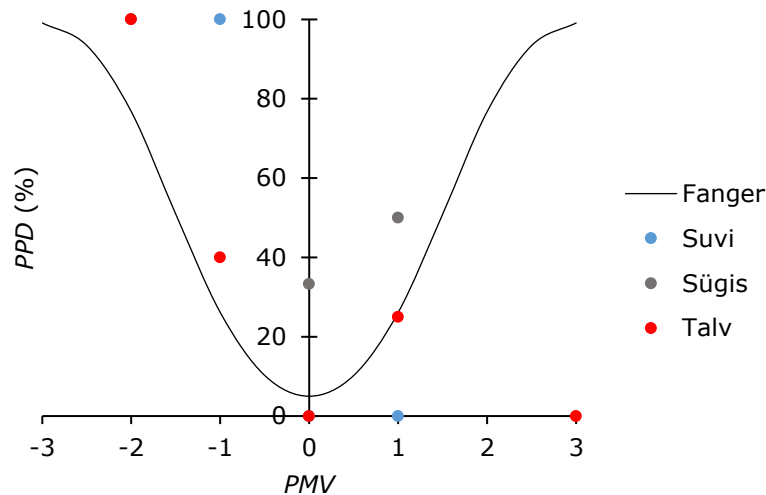
Joonis 23 on näha inimeste osakaal, kes antud ebamugavust on tundnud.



Joonis 24 Tõmbustunde sagedus

Valdav enamus ei ole mitte kunagi tundnud tõmbustunnet. Olenemata sellest, et õhu liikumise kiirused kuulusid I klassi, siis vastuste seast tuleb välja, et 4-6 inimest siiski tunneb mõnikord tõmbustunnet (Joonis 24).

Lisaks koostati sisekliima küsitluse tulemuste põhjal ka Fangeri graafikuga kattuvad punktid. Punkte pole otstarbeks ühendada vastanute vähesuse tõttu. Suurema vastuste arvu olemasoluga saaks koostada graafiku, mis teoreetiliselt peaks sarnanema Fangeri graafikuga. Kuna talvisel küsitlusel oli kõige rohkem vastajaid, siis välja jättes parempoolse punkti on ka näha sarnasust Fangeri joonega.



Joonis 25 Vastanute soojuslik mugavus

3.7 Järeldused

Üleüldiselt on tegemist tavapärase avatud kontori stillis modernse bürooga. Hoone haldaja sõnul oli projekteerimise lähteülesandes nõue kavandada niisugused kütte-, ventilatsiooni- ja jahutussüsteemide lahendused, mis välistavad pealepuhumise kaebused. Efektive õhuvahetuse tagamiseks ruumis, on kasutusel *swirl*-tüüpi õhku hästi segavad sissepuhkeelemendid, 4-toru kiirguspaneelid on jaotatud proportsionaalselt töökohtadel vahel. Palju kõneainet pakkuva avatud kontori müra ja ruumiakustika parandamiseks on osaliselt avatud büroopinnad liigendatud. Kasutusel on ka mobiilsed akustilised kergetest paneelidest vaheseinad. Autori hinnangul loovad küll väikesed aknapinnad fassaadis head eeldused soojusliku mugavuse tagamiseks läbi madalate kütte- ja jahutuskoormuste. Kuid niisuguste madalate väärtustega akna- ja seinapindade suhete korral ei pruugi päevavalgusteguri nõuded olla terve ruumi ulatuses ühtlaselt tagatud. Seega tuleks võimalusel uurida ka loomuliku päevvalguse nõudeid ning nende võimaliku mittevastavuse mõju antud olukorras.

Mõõtmised viidi läbi neljal korral. Esimesed kaks mõõtmist teostati suveperioodil eeldusel, et hoone jahutussüsteemid oleksid aktiivsed. Teisel päeval õnnestus see paremini, kui tulemuste põhjal see sisekliima klassi uuritavate parameetrite puhul ei muutnud. Ülemineku- ja talvise perioodi mõõtmised õnnestusid samuti sisekliima klasside tulemuste osas. Kuna talvise mõõtmise välisõhutemperatuur oli üle 0 kraadi, siis tuleks teostada kordusmõõtmised ka intensiivsemas kütterežiimis. Kõik mõõtmised teostati pärast lõunat eeldusel, et kõik sisekliima tagamise süsteemid oleksid ettenähtud töörežiimis.

Mõõtetulemustest selgus, et 4-toru kiirguspaneelide süsteem minimaliseerib efektiivselt õhu liikumise kiiruseid viibimistsoonis. Uutele hoonetele kehtib II sisekliima klassi nõue, antud hoonetes jäid enamus tulemusi vastavaks I sisekliima klassile. Ainult üksikute mõõtepunktide mõnedel kõrgustel tuvastati kehvemaid tulemusi kui I klass. Sügise mõõtmise punktis A3 olid 1,1 m ja 1,7 m kõrgusel II klassi kuuluvad tulemused. Punkt A3 asus hoone I korrusel ümberehitatud osas.

Suvisel ajal olid valdavalt õhu temperatuurid I klassi piires, kuid kaldusid pigem II klassi poole madalamad olema. Sügisesel ja talisel ajal olid tulemused vastupidised – õhu temperatuurid olid kõrgemad ja kuulusid enamjaolt II klassi. Töös uuriti ka õhu temperatuuri vertikaalseid erinevusi. Sisekliima I klassi tagab 0,1 m ja 1,1 m kõrguselt mõõdetud temperatuuri vahe kuni 2 °C. Maksimaalne temperatuuri vahe eelmainitud kõrgustel oli 0,75 °C. Lisaks arutati ka 0,1 m ja 2,0 m kõrguselt mõõdetud maksimaalne temperatuuride vahe, milleks oli 0,83 °C. Nende väärtustega oli õhu temperatuuri vertikaalsetes erinevustes tagatud I klass.

Autorile teadaolevalt pole kiirguspaneelide kasutamine Eestis veel laialt levinud, kuid nende kasutamine on käesoleva uuringu tulemuste põhjal ennast uuritud hoones õigustanud. Kiirguspaneelidega kütte- ning jahutussüsteem on väga hea lahendus minimaliseerimaks tõmbustunnet ja loomaks mugavat sisekliimat töötajate viibimistsoonis, mistõttu on sobilikud just kontoripindadale, kus inimesed peavad suurema osa tööpäevast viibima. Kuna tegemist on kuivjahutussüsteemiga, siis tuleb arvestada, et kõrge pealevoolutemperatuuri ning aknapinna osakaalu tõttu välisseinas on arvutuslikud jahutusvõimsused piiratud.

Kuna tegemist on kiirguspaneelidega, siis täiendavalt tasuks uurida ka kiirgustemperatuuri asümmeetriat ruumide erinevates punktides ja nende vastavust sisekliima klassidele. Järgmiseks tuleks uurida oli plaanis uurida ka hoone automaatika toimivust kiirguspaneelide juhtimise osas, kuid kahjuks ei õnnestunud autoril saada lähteandmeid õigeks ajaks.

Tulevikus tasuks uurida süsteemi tasuvust ajas ning kui suur on energiakokkuvõid kiirguspaneelidega kütte- ja jahutussüsteemi osas võrreldes teiste laialt levinud ja ennast õigustanud soojusliku sisekliima tagamise süsteemidega.

Autori hinnangul saab kokkuvõttes uuritud pindade soojusliku mugavusega igati rahule jääda ja hoone haldaja eesmärk kavandada minimaalse tõmbuse riskiga büroopind, on täidetud. Samas tuleb märkida, et tegemist on unikaalse objektiga just kasutusprofiili silmas pidades. Kui kaasaegses rendipõhises büroohoones on märksõnadeks ruumi paindlikkus ja kergesti ümber liigendamise võimalus kabinettideks, siis antud hoones ei ole see kõnealune probleem. Kuid kasutades kiirguspaneeli tavapärasel rendipõhises

büroohoones, tuleks juba projekteerimise käigus kavandada kütte-, ventilatsiooni- ja jahutussüsteemid avatud pinnast kabinetideks ja vastupidi lahenduse võimalusega. See tähendab, et kiirguspaneelide võimsuse ning mõõtmete dimensioneerimisel tuleb arvesse võtta ka kabinetilahenduse iseärasusi.

KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö eesmärk oli uurida inimeste soojuslikku mugavust 4-toru kiirguspaneelidega liginullenergiahoone kontoripindadel – Harjumaal, Rae vallas asuva Omniva logistikakeskuse büroos. Töö eesmärgi täitmiseks teostati hoones lühiajalisi mõõtmisi ning viidi läbi veebipõhiseid sisekliima küsitlusi. Töö käigus mõõdeti õhu liikumise kiirust, temperatuuri, operatiivset temperatuuri ning suhtelist niiskust. Mõõdetud parameetrite alusel arvutati *PMV* ja *PPD* indeksid, turbulentsi väärtused ja tõmbusindeksid.

Kui hinnata iga mõõtepunkti kui tervikut, siis kuulusid kõik mõõtepunktid mõõdetud õhu liikumise kiirustes seisukohast sisekliima I klassi. Üksikutes mõõtepunktides kuulusid õhu liikumise kiirused II klassi.

1,1 m kõrguselt arvatud tõmbustunde indeks kuulus 98 % mõõtepunktide I klassi. Suvised mõõdetud õhu temperatuurid kuulusid enamjaolt I klassi, sügisel ja talvel II klassi. Suvistel mõõtmistel jäid õhutemperatuurid vahemikku +23,5 kuni +24,5 °C. Sügisel ja talvisel mõõtmisel jäid õhu temperatuurid vahemikku +22,5 kuni +23,5 °C. Operatiivne temperatuur kuulus kõikidel mõõtmisel sisekliima I klassi.

Töös analüüsiti ka *PMV* ja *PPD* indekseid, mis jagunesid peaaegu võrdselt nii I kui ka II klassi vahel. Esimesel mõõtmisel oli suhteline niiskus 38 % juures, mistõttu kuulusid kõik *PMV* ja *PPD* indeksid II klassi.

Lisaks mõõtmistele viidi läbi hoone kasutajate seas läbi sisekliima küsitlused iga mõõdetava perioodi kohta subjektiivse hinnangu saamiseks.

Magistritöös uuritud liginullenergiahoone büroopindade mõõtmistulemuste põhjal leidis autor, et:

- soojusliku sisekliima parameetrid vastavad põhiliselt I ja II klassile;
- 4-toru kiirguspaneelid võiksid leida laiemat kasutust büroodes ja avalikes hoonetes, kuna korrektse projekteerimise korral minimaliseerivad ühe suurima lokaalse ebamugavustundetekitaja, milleks on tõmbustunne.

SUMMARY

The aim of this Master's thesis was to study people's thermal comfort in office spaces of Omniva Logistics Center's bureau with 4-pipe radiant ceiling panels, Rae municipality, Harju county. In order to get the results, short-term measurements were performed in the building and a web-based indoor climate questionnaires were conducted. During the observation, air velocity, temperature, operative temperature and relative humidity were measured. Based on the measured parameters, PMV and PPD indices, turbulence values and draught values were calculated.

If assessing each measuring point as a whole, all measuring points were categorized in I class in terms of velocity of indoor airflows. At some individual measuring points, air velocity speeds were categorized in II class. Class II. 98% of the points measured from the height of 1.1m were categorized I class in terms of draught.

The air temperatures measured in summer belonged mostly in I class, and in autumn and winter in II class. During the summer measurements, the air temperatures ranged from +23.5 to +24.5 ° C. During the autumn and winter measurements, the air temperatures ranged from +22.5 to +23.5 ° C. The operative temperature was measured class I in all indoor climate measurements.

The PMV and PPD indices were also analyzed in the study, which were almost equally divided between both I class and II class. In the first measurement, the relative humidity was at 38%, which is why all PMV and PPD indices were II class.

.

In addition to the measurements, indoor climate questionnaires were conducted among the users of the building to obtain a subjective assessment for each measured period.

Based on the measurement results of the office space of the nearly zero-energy building studied in the master's thesis, the author found that:

indoor climate parameters were categorized mostly in I and II class;

4-pipe radiant ceiling panels should be more used in offices and public building, in case of correct dimensioning, radiant panels minimize one of the biggest local discomfort source, draught.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] C. Meeting of the WHO Collaborating Centres in Occupational Health (2nd: 1994: Beijing and W. H. O. O. of O. Health, "Global strategy on occupational health for all: the way to health at work, recommendation of the Second Meeting of the WHO Collaborating Centres in Occupational Health, 11-14 October 1994, Beijing, China." World Health Organization, Geneva PP - Geneva.
- [2] O. A. Seppänen and W. Fisk, "Some Quantitative Relations between Indoor Environmental Quality and Work Performance or Health," *HVAC&R Res.*, vol. 12, no. 4, pp. 957–973, Oct. 2006, doi: 10.1080/10789669.2006.10391446.
- [3] E. Fabrizio, S. P. Corgnati, F. Causone, and M. Filippi, "Numerical comparison between energy and comfort performances of radiant heating and cooling systems versus air systems," *HVAC R Res.*, vol. 18, no. 4, pp. 692–708, 2012, doi: 10.1080/10789669.2011.578700.
- [4] Kiil, Simson, Thalfeldt, and Kurnitski, "A Comparative Study on Cooling Period Thermal Comfort Assessment in Modern Open Office Landscape in Estonia," *Atmosphere (Basel)*, vol. 11, no. 2, p. 127, 2020, doi: 10.3390/atmos11020127.
- [5] Z. Tian, L. Yang, X. Wu, and Z. Guan, "A Field Study of Occupant Thermal Comfort with Radiant Ceiling Cooling and Overhead Air Distribution System," *Energy Build.*, p. 109949, 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.109949.
- [6] ISO, "ISO 7730: 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," *Management*, 2005, doi: 10.1016/j.soildyn.2004.11.005.
- [7] T. Comfort *et al.*, "Thermal Comfort Booklet," *Innova AirTech Instruments A/S*. 1997.
- [8] Hoonete energiatõhusus. (2019) Hoonete ventilatsioon. Osa 1: Sisekeskkonna lähteandmed hoonete energiatõhususe projekteerimiseks ja hindamiseks, lähtudes siseõhu kvaliteedist, soojuslikust keskkonnast, valgustusest ja

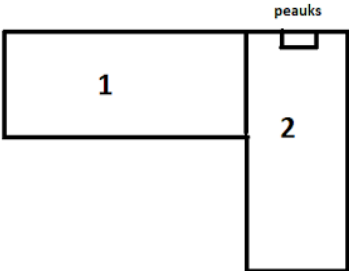
akustikast. Moodul M1-6. Eesti standardi rahvuslik lisa : Eesti standard EVS-EN 16798-1:2019/NA:2019. Tallinn : Standardiamet.

- [9] Hoonete energiatõhusus. Hoonete ventilatsioon. Osa 2: EN 16798-1 nõuete tõlgendus. Sisekeskonna lähteandmed hoonete energiatõhususe projekteerimiseks ja hindamiseks siseõhu kvaliteedi, soojusliku mugavuse, valgustuse ja akustika osas. (Moodul M1-6) : CEN/TR 16798-2:2019

- [10] D. Orlov, Omniva logistika keskuse kütte-, jahutus- ja ventilatsioonisüsteemide tööprojekt, Tallinn: Elstar, 2018.

LISAD

Lisa 1 Sisekliima küsimustiku ankeet

Küsimus	Variandid
Sugu	Mees
	Naine
Vanus	18-25
	26-35
	36-45
	46-55
	56-65
	66 +
Töökeskkond	Avatud kontor
	Kabinet (max 3 inimest)
Kui suure osa päevast viibite konkreetselt oma töölaua taga olles	Vähe (max 1-2h)
	Pool tööpäevast (kuni 4-5 h)
	Terve tööpäeva
Mitmendal korral te hoones töötate?	1
	2
Millises tsoonis (1-2 ülaloleval pildil) viibite tööpäeva jooksul enim?	1
	2
	
Kas töökohal on soe või külm (kui teie ei soovi temperatuuri muutust, märkige mugav)	Talumatult soe
	Liiga soe
	Kergelt liiga soe
	Mugav
	Kergelt liiga jahe
	Talumatult jahe
Õhu kvaliteeti	Lõhnatu
	Kerge lõhn
	Keskmine lõhn
	Tugev lõhn
	Väga tugev lõhn

					Talumatu lõhn
Kas sooviksid, et ruumi temperatuur oleks					Kõrgem
					Muutusteta
					Madalam
Kas ruumi valgustus häirib töötamist?					Jah
					Ei
Kas päike häirib töötamist?					Jah
					Ei
	Väga hea	Hea	Sobiv	Pigem mitte sobiv	Vastuvõetamatu
Ruumi temperatuur					
Õhu kvaliteet					
	Üldse ei häiri	Harva häirib	Vahel häirib	Sageli häirib	Pidevalt väga häiriv
Kuidas hindad töökohal töökaaslaste kõne ja ruumiakustikat?					
Kuidas hindad töökohal muud müra?					
Kas viimase kuu jooksul on esinenud teie töökohal tõmbustunnet või pealepuhumist?					Jah
					Ei
Kas ja kui sageli on esinenud teie töökohal tõmbustunnet või pealepuhumist?	Mitte kunagi	Harva	Aeg-ajalt	Sageli	Pidevalt
Suvel					
Sügisel					
Talvel					
Kevadel					
Kas ja kui sageli on esinenud järgnevaid probleeme?	Mitte kunagi	Harva	Aeg-ajalt	Sageli	Pidevalt
Silmade kuivus/ärritus					
Peavalu või väsimus					
Nina või kurk on kuiv/ärritunud					
Keskendumisprobleemid					