

TARTU ÜLIKOOLI KATSEKODA	ARUANNE 30.06.2017	Lehekülg 1(38)
-------------------------------------	-------------------------------	----------------

Ventilatsiooni ja sisekliima parameetrite võrdlusmõõtmised

Ventilatsiooni ja sisekliima parameetrite võrdlusmõõtmiste aruanne 2017

/Allkirjastatud digitaalselt/

Võrdlusmõõtmiste korraldaja: Martin Vilbaste, metroloogia ja analüütilise keemia teadur, Eesti õhu liikumise kiiruse ja suhtelise niiskuse tugietalonide hoidja

/Allkirjastatud digitaalselt

Dots. Koit Herodes

TÜ Keemia Instituudi katsekoja
juhataja

30. juuni 2017

/Allkirjastatud digitaalselt/

Prof. Ivo Leito

TÜ Keemia Instituudi katsekoja
nõustava kogu esimees

30. juuni 2017

Tartu 2017

TARTU ÜLIKOOLI KATSEKODA	ARUANNE 30.06.2017	Lehekülg 2(38)
-------------------------------------	-------------------------------	----------------

Ventilatsiooni ja sisekliima parameetrite võrdlusmõõtmised

SISUKORD

1.	SISSEJUHATUS	3
1.1	Võrdlusmõõtmiste korraldusest	3
1.2	Ventilatsiooni parameetrite mõõtmise ülesanded.....	3
1.3	Sisekliima parameetrite võrdlusmõõtmise ülesanded	7
2.	VÕRDLUSMÕÕTMISTES OSALENUD MÕÕTJAD.....	9
3.	VENTILATSIOONI PARAMEETRITE REFERENTSVÄÄRTUSTE ARVUTAMINE JA MÄÄRAMATUSE HINDAMINE.....	10
3.1	Õhuvoo referentsvärtus ja selle määramatus.....	10
3.2	k-faktor ja selle määramatus	11
4.	SISEKLIIMA PARAMEETRITE REFERENTSVÄÄRTUSTE ARVUTAMINE JA MÄÄRAMATUSE HINDAMINE 13	
5.	VENTILATSIOONI VÕRDLUSMÕÕTMISE TULEMUSTE ANALÜÜS	15
6.	SISEKLIIMA VÕRDLUSMÕÕTMISE TULEMUSTE ANALÜÜS.....	30
LISA 1	Ventilatsioonistendi skeem	38

TARTU ÜLIKOOLI KATSEKODA	ARUANNE 30.06.2017	Lehekülg 3(38)
-------------------------------------	-------------------------------	----------------

Ventilatsiooni ja sisekliima parameetrite võrdlusmõõtmised

1. SISSEJUHATUS

1.1 Võrdlusmõõtmiste korraldusest

Tartu Ülikooli katsekoda korraldas ajavahemikus 13.01.2017 kuni 15.05.2017 ventilatsiooni ja sisekliima parameetrite võrdlusmõõtmised. Võrdlusmõõtmised viidi läbi referentsväärtuste suhtes (ptk 3 ja 4). Võrdlusmõõtmiste korraldamisel juhinduti standardi EVS-EN ISO/IEC 17043:2010 „Conformity assessment – General requirements for proficiency testing“ nõuetest.

Võrdlusmõõtmiste tulemusi hinnatakse E_n väärtuste abil:

$$E_n = \frac{X_{lab} - X_{ref}}{\sqrt{U(X_{lab})^2 + U(X_{ref})^2}} \quad (1),$$

milles X_{lab} ja X_{ref} tähistavad vastavalt osaleja (mõõtja) poolt mõõdetud suuruse väärtust ja referentsväärtust ning $U(X_{lab})$ ja $U(X_{ref})$ tähistavad vastavalt mõõtja poolt mõõdetud suuruse laiendmääramatust ja vastava referentsväärtuse laiendmääramatust usaldusnivool $P=95\%$. Võrdlusmõõtmises osaleja tulemus loetakse rahuldavaks, kui $|E_n| \leq 1$. E_n väärtuste arvutamisel on laiendmääramatused arvutatud mitme tüvenumbri täpsusega, kuid tulemuste tabelites on vastavad laiendmääramatused esitatud mitte rohkem kui kahe tüvenumbri täpsusega. Mõõdetud väärtused on ümardatud, nii et nende kümnendkohtade arvud ühtivad vastavate laiendmääramatuste kümnendkohtade arvudega.

Võrdlusmõõtmised toimusid Tartu Ülikooli Keemia Instituudi 0. korrusel aadressil Ravila 14A, Tartu. Võrdlusmõõtmistel osales kokku 24 asutust ja 31 mõõtjat, sh 18 ventilatsiooni või sisekliima parameetrite mõõdistamise osas akrediteeritud laborit. Enamikul juhtudel sooritasid erinevate asutuste/ettevõtete töötajad mõõtmisi erinevatel päevadel. Vastavaid referentsväärtuseid registreeriti samaaegselt osalejate mõõdetud väärtustega. Igale osalejale anti tööjuhend ülesannete kirjeldusega ja paberil vorm tulemuste jaoks, millele kanti labori kontaktandmed, kasutatud mõõtevahendid ja mõõtetulemused (parandatud väärtused koos laiendmääramatustega). Täidetud vorm tuli saata skaneeritud kujul kolme nädala jooksul peale mõõtmiste sooritamist võrdlusmõõtmiste korraldajale. Osalejatel ei palutud esitada mõõtemääramatuse hindamise arvutuskäiku. Iga osaleja pidi mõõtmistel kasutama oma kaasa võetud mõõtevahendeid ja muud vajalikku varustust.

1.2 Ventilatsiooni parameetrite mõõtmise ülesanded

Ventilatsiooni võrdlusmõõtmises osalejatel oli võimalik täita nelja ülesannet, juhindudes standarditest „EVS-EN 12599:2012 Hoonete ventilatsioon. Katseprotseduurid ja mõõtmismeetodid paigaldatud ventilatsiooni- ja õhukonditsioneerimissüsteemide üleandmiseks“

TARTU ÜLIKOOLI KATSEKODA	ARUANNE 30.06.2017	Lehekülg 4(38)
-------------------------------------	-------------------------------	----------------

Ventilatsiooni ja sisekliima parameetrite võrdlusmõõtmised

ja „EVS-EN 16211:2015 Ventilation for buildings – Measurement of air flows on site – Methods“.

Esimese kolme ülesande täitmiseks kasutati ruumi seinale kinnitatud spetsiaalset stendi, milles osalejad said mõõta õhuvooge erinevate mõõtmega kanalites. Referentsmõõtevahendite rolli täitsid nii stendi väljatõmbe kui ka sissepuhke poole peal 160 mm läbimõõduga kanalisse monteeritud ja tervet kanali ristlõiget katvad tiivikanemomeetrid: TRAM-0001 väljatõmbe poolel (Joonis 1) ja T3 sissepuhke poolel. Mõlemad tiivikanemomeetrid on valmistatud OÜ Tauria poolt.

Esimese ülesande sisuks oli õhuvoogude mõõtmine viies väljatõmbe mõõtekohas (VT1 kuni VT5) ja kolmes sissepuhke mõõtekohas (SP1 kuni SP3), kasutades läbi kanali seinas olevate 12 mm läbimõõduga avade kaudu kanalisse sisestatud termoanemomeetrit või Pitot toru.

Enamikus mõõtekohtades oli võimalik mõõtjal sisestada termoanemomeetri või Pitot toru kanalisse läbi kolme risti asetseva augupaari. See võimaldas mõõtjatel valida mõõtepunkte sõltuvalt kaugustest nn häirituse kohtadest (põlved, sadulühendused, üleminekud, kanali otsad).

Teise ülesandena mõõtsid osalejad lõppelementidel tekkivate rõhulangude kaudu õhuvooge läbi vastavate lõppelementide, kasutades selleks tootja poolt määratud k-faktoreid sõltuvalt lõppelemendi avatuse astmest (asendist). Kokku mõõdeti rõhulangu viiel lõppelemendil: plafoonid Opal OPV-125, Opal OPV-160, Opal OTV-160, Onnline STQA-100 ja palfoonil Europlast DMP-125. Lisaks sellele mõõdeti viienda plafooni korral õhuvoogu kanalis, et määrata selle plafooni k-faktor.

Kolmanda ülesande sisuks oli mõõta 200 mm läbimõõduga kanalis õhuvoog korduvustingimustel kokku kümnel korral ja arvutada saadud tulemuste põhjal standardhälve. Sel viisil hinnatud standardhälve iseloomustab mõõtjast tingitud määramatuse komponenti. Näiteks ei pruugi mõõtja asetada iga mõõtmise ajal termoanemomeetri tundliku osa ava ideaalselt risti õhuvooluga kanalis.

Nii stendi väljatõmbe kui ka sissepuhke poolel paiknesid enne referentstiivikanemomeetreid laminaatorid, mis surusid maha õhupööriseid. Stendi olemusest saab aimu Joonise 2 abil ning tehniline skeem on esitatud Lisas 1.



Joonis 1 OÜ Tauria poolt valmistatud referentsmõõtevahendi rolli täitev tiivikanemomeeter koos kontrolloriga (vasakul)



Joonis 2 Esimese kolme ülesande täitmiseks konstrueeritud ventilatsioonistend

Ventilatsiooni ja sisekliima parameetrite võrdlusmõõtmised

Neljanda ülesande täitmisel said osalejad mõõta õhuvooge nn. lehrimeetodil. Sel juhul kaeti lauaplaadi sisse saetud 160 mm läbimõõduga ava täielikult mõõtelehtriga. Nimetatud ava oli teiselt poolt ühendatud OÜ Tauria poolt valmistatud väikese ventilatsioonistendiga (vt. Joonis 3). Nimetatud stendi teises otsas oli õhku imev ventilaator, mille tiiviku pöörlemise kiirust sai kontrolleri abil juhtida.



Joonis 3. OÜ Tauria poolt valmistatud väike ventilatsioonistend, mis ühendati lauaplaadis oleva avaga lehrimeetodil õhuvoogude mõõtmiseks

Neljandas ülesandes kasutati referentsõhuvoo mõõtmiseks referentstiivikanemomeetrit T4, mis paiknes väikese stendi ventilaatori ja lauaplaadi vahel asuvas 160 mm läbimõõduga ventilatsioonitorus ning kattis kogu kanali ristlõiget. Kirjeldatud meetodil toimus lehtriga õhuvoogude mõõtmine väljatõmbe režiimis. Sisepuhke režiimis õhuvoogude mõõtmiseks ühendati stendi väljund lauaplaadis oleva avaga, nii et ventilaator imes õhku läbi referentstiivikanemomeetri ja surus õhku läbi lehtri.

TARTU ÜLIKOOLI KATSEKODA	ARUANNE 30.06.2017	Lehekülg 7(38)
-------------------------------------	-------------------------------	----------------

Ventilatsiooni ja sisekliima parameetrite võrdlusmõõtmised

Referentsväärtuste leidmiseks registreeriti iga mõõtja mõõtmiste vältel referentstiivik-anemomeetritega TRAM-0001, T3 ja T4 mõõdetud õhuvoo väärtused ja standardhälbed kontrolleri kaudu arvutisse. Arvuti ekraanilt kanti mõõdetud väärtused ja standardhälbed paberil vormile, mis hiljem kanti vastavatesse Exceli andmetöötluste tabelitesse.

1.3 Sisekliima parameetrite võrdlusmõõtmise ülesanded

Sisekliima võrdlusmõõtmise raames oli võimalik osalejatel täita kolme ülesannet, juhindudes standardist „EVS-EN 15251:2007 Sisekeskkonna algandmed hoonete energiatõhususe projekteerimiseks ja hindamiseks, lähtudes siseõhu kvaliteedist, soojuslikust mugavusest, valgustusest ja akustikast“.

Esimese ülesande sisuks oli õhu temperatuuri mõõtmine kõrgustel 160 cm ja 10 cm põranda pinnast. Teises ülesande sisuks oli õhu suhtelise niiskuse mõõtmine kõrgustel 160 cm ja 10 cm põranda pinnast. Kuna peaaegu kõigil mõõtjatel oli võimalik mõõta õhu temperatuuri ja suhtelist niiskust samaaegselt, siis kujunes välja nii, et mõlemal kõrgusel mõõdeti samaaegselt nii õhu temperatuuri kui ka suhtelist niiskust.

Vastavaid referentsväärtuseid mõõdeti kolme firma Ahlborn mahtuvusliku termohügroomeetriga (tüüp - FHA646-E1C, nr. 08020160, 04020125 ja 03120988) mis olid kinnitatud rõngale. Võrdlusmõõtmisel osaleja paigutas oma mõõtevahendi kolme referentshügroomeetri lähedusse. Temperatuuri ja suhtelise niiskuse mõõtmist kõrgusel 10 cm põranda pinnast iseloomustab Joonis 4. Õhu temperatuuri mõõtmiste jälgitavus ulatub Eesti Temperatuuri riigietaloni laborini (AS Metrosert) ja suhtelise niiskuse mõõtmised on jälgitavad Soome õhuniiskuse riigietaloni laborini (VTT MIKES Metrologia).

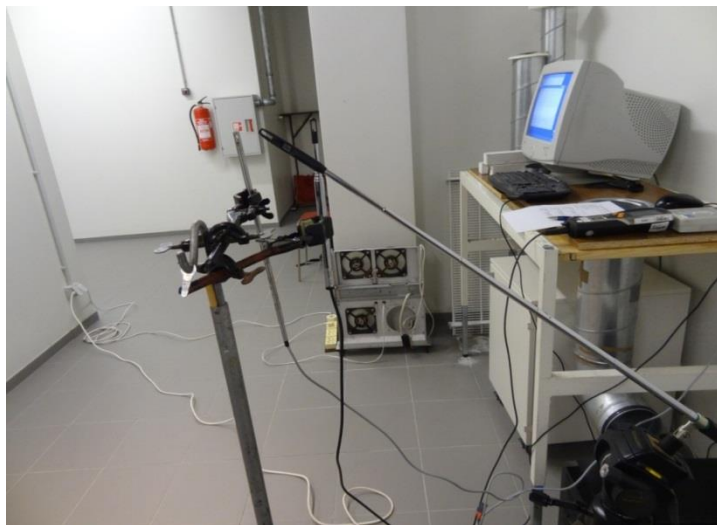
Kolmanda ülesandena oli osalejatel võimalik mõõta õhu liikumise kiirust kõrgusel 110 cm põranda pinnast. Õhu liikumise kiirus jäi enamikul juhtudel vahemikku (0,1..0,3) m/s tänu mõõtekohast 2 m kaugusel paiknevatele ventilaatoritele. Õhu liikumise kiiruse võrdlusmõõtmist iseloomustab Joonis 5.

Referentsväärtuste mõõtmiseks kasutati reeglina firma Ahlborn poolt toodetud termoanemomeetrit (tüüp – FV A645-TH3, nr. 030352) ja termoanemomeetrit Testo (tüüp - 0635 1025, nr. 10334303). Mõlemad mõõtevahendid on kalibreeritud TÜ katsekojas Eesti õhu liikumise kiiruse tugietaloni abil.

Sisekliima parameetrite referentsväärtuste hindamiseks salvestati nii referentshügroomeetrite kui ka Ahlborni termoanemomeetri näidud jooksvalt arvutisse iga 5 või kümne sekundi tagant 1 kuni 10 minuti jooksul (sõltuvalt osaleja soovist). Saadud tekstifailid salvestati hiljem Exceli failideks, milles teostati ka andmetöötlust. Testo termoanemomeetri lugemid loeti mõõtevahendi mälli ja sisestati hiljem käsitsi Exceli faili.



Joonis 4 Õhu temperatuuri ja suhtelise niiskuse võrdlusmõõtmine kõrgusel 10 cm põrandast. Rõngale on kinnitatud kolm referentshügroomeetrit ja nende vahele on mõõtja asetanud oma mõõtevahendi mõõtepea



Joonis 5 Õhu liikumise kiiruse võrdlusmõõtmine. Kaks referentsanemomeetrit on kinnitatud vertikaalselt käppade vahele. Võrdlusmõõtmises osaleja termoanemomeetri tundlik osa paikneb referentsmõõtevahendite vahel. Joonise keskosas on näha põrandal seisev ventilaatorite süsteem.

TARTU ÜLIKOOLI KATSEKODA	ARUANNE 30.06.2017	Lehekülj 9(38)
-------------------------------------	-------------------------------	----------------

Ventilatsiooni ja sisekliima parameetrite võrdlusemõõtmised

2. VÕRDLUSEMÕÕTMISTES OSALENUD MÕÕTJAD

Tabel 1 Võrdlusemõõtmises osalejad tähestiku järjekorras

Akr. tunnistuse nr.	Asutus/ettevõte (kokku 24 nimetust)	Mõõtja (kokku 31 mõõtjat)	Sisekliima	Ventilatsioon
K001	AS Metrosert	Friderika Noorma	+	-
L088	AS Qualitas Arstikeskus	Kai Martin	+	-
		Alar Seiler	+	-
L091	AS Ökosil Keskkonnalabor	Mikhail Ishkov,	-	+
		Anastassia Salikova	+	-
L181	FIE Andrei Zagamula	Andrei Zagamula	+	+
K022	OÜ A.V.R. Elekter	Ljudmila Demidova	+	+
L273	OÜ Aero Grupp	Martin Olt	-	+
	OÜ Aerox	Taavet Schotter	-	+
L041	OÜ Amecon	Tauno Heinastu	+	+
L008	OÜ Eesti Keskkonnauringute keskus	Andrei Vorobjov	-	+
		Ljudmilla Livina	+	-
L200	OÜ LAMI Projekt	Miko Sorge	-	+
L242	OÜ Majatehnik	Elvis Uusmaa	-	+
L270	OÜ Mõõdistaja	Siim Sass	-	+
L271	OÜ Ohutu Töö Garant	Peep Pobbul	+	-
	OÜ Termopilt Tartu	Tõnu Jõesaar	+	-
L047	OÜ Töökeskkonna Uuringud	Allar Seifing Enn Saretok	+	+
L113	OÜ Variax	Alvar Timmermann	+	+
		Rain Rätsep	+	+
	OÜ Ventkonsult	Karl Valdes	-	+
	OÜ VKM Mõõdistus	Keit Leemet	-	+
L151	Tartu Ülikooli Töökeskkonnalabor	Margit Oja	+	-
		Aksel Mõttus	+	-
		Siim Kinnas	-	+
L128	Terviseameti Kesklabori füüsikalabor	Jaan Mell	+	-
L075	Terviseameti Kohtla-Järve labor	Tiina Uustal	+	+
L019	Terviseameti Tartu labor	Peeter Saarelaid, Kairit Laksberg	+	+
	TTÜ Ergonoomialabor	Sigrid Kalle	+	-
		Karin Reinhold	+	-
	TTÜ Liginullenergia Hoonete uurimisrühm	Hendrik Voll Alo Mikola	+	+

Osalejate konfidentsiaalsuse tagamiseks on edaspidi nende tulemused tähistatud mõõtja ID numbriga, mis ei vasta osaleja asukohale tabelis ning on teada vaid laborile endale.

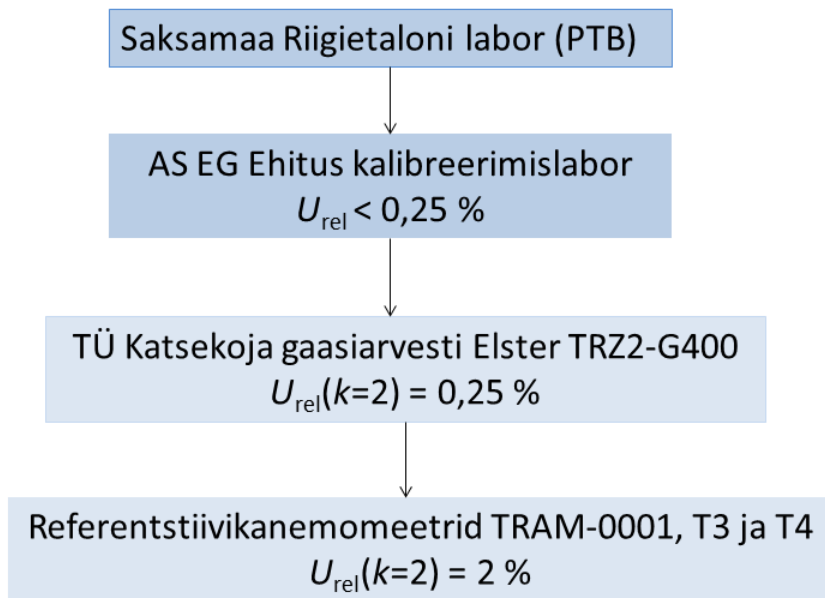
TARTU ÜLIKOOLI KATSEKODA	ARUANNE 30.06.2017	Lehekülg 10(38)
-------------------------------------	-------------------------------	-----------------

Ventilatsiooni ja sisekliima parameetrite võrdlusmõõtmised

3. VENTILATSIOONI PARAMEETRITE REFERENTSVÄÄRTUSTE ARVUTAMINE JA MÄÄRAMATUSE HINDAMINE

3.1 Õhuvoo referentsväärtus ja selle määramatus

Õhuvoogude referentsväärtuseid Q_{ref} mõõdetakse ülesannetes 1-3 ventilatsioonistendi monteeritud OÜ Tauria poolt valmistatud tiivikanemomeetrite TRAM-0001 ja T3 abil. Väljatõmbe poolel on referentsväärtuseks tiivikanemomeetri TRAM-0001 näit ja sissepuhke poolel on referentsväärtuseks tiivikanemomeetri T3 näit. Neljandas ülesandes mõõdetakse õhuvoogude referentsväärtuseid OÜ Tauria poolt valmistatud väikese ventilatsioonistendi sisse monteeritud tiivikanemomeetri T4 abil. Kõik kolm tiivikanemomeetrit on kalibreeritud gaasiarvesti Elster TRZ2-G400 kaudu vastavalt jälgitavuse skeemile Joonisel 6.



Joonis 6 Referentstiivikanemomeetritega mõõdetud õhuvoogude jälgitavusskeem

Õhuvoo referentsväärtuse laiendmääramatus $U(Q_{ref})$ usaldusnivool $P=95\%$ ($k=2$) arvutatakse allolevate valemite (2a) või (2b) põhjal:

$$U(Q_{ref}) = 2 \cdot \sqrt{u_{kal}^2 + s(Q_{ref})^2 + \frac{\Delta Q_{ref}^2}{12} + \delta Q_{ref}} \quad (2a),$$

TARTU ÜLIKOOLI KATSEKODA	ARUANNE 30.06.2017	Lehekülg 11(38)
-------------------------------------	-------------------------------	-----------------

Ventilatsiooni ja sisekliima parameetrite võrdlusmõõtmised

$$U(Q_{ref}) = 2 \cdot \sqrt{u_{kal}^2 + s(Q_{ref})^2 + \frac{\Delta Q_{ref}^2}{12}} + \delta Q_{ref} \quad (2b).$$

Nendes valemites u_{kal} tähistab referentstiivikanemomeetri kalibreerimise määramatust, võttes arvesse ka ajalise mittestabiilsuse määramatust, $s(Q_{ref})$ tähistab referentstiivikanemomeetri näitude standardhälvet, ΔQ_{ref} on tiivikanemomeetrite TRAM-0001 ja T3 näitude erinevus ja δQ_{ref} on suhteline hälve, mis iseloomustab võrdlusmõõtmise korraldaja poolt tiivikanemomeetriga ning Pitot toruga ja/või termoanemomeetriga mõõdetud õhuvoogude erinevust. Juhul kui mainitud suhteline hälve on väiksem kui 5 %, kasutatakse valemit (2a), vastasel juhul aga valemit (2b).

Kuna tiivikanemomeeter TRAM-0001 paikneb süsteemi väljatõmbe poolel ja tiivikanemomeeter T3 sissepuhke poolel, siis nimetatud näitude erinevus on põhjustatud võimalikest leketest ja erinevatest rõhu ja temperatuuri näitudest kahe tiivikanemomeetri juures. Juhul, kui ventilatsioonisüsteemi otstesse ei asetatud lõppelemente, oli referentstiivikanemomeetrite näitude suhteline erinevus 1 % või alla selle. Lõppelementide asetamisel ventilatsioonisüsteemi otstesse muutus tiivikanemomeetrite näitude erinevus suuremaks. Selle põhjuseks võib pidada voolutakistuse suurenemist, mis kutsub esile suuremad lekkes läbi ventilatsioonikanali liitmike. Suurim erinevus tiivikanemomeetrite näitude vahel ilmnis siis, kui sissepuhke toru otsa asetati lõppelement STQA-100. Tiivikanemomeetrite kalibreerimise suhteliseks standardmääramatuseks (võttes arvesse tiivikanemomeetrite triivi võrdlusmõõtmise vältel) on enamasti hinnatud 1,5 % ja tiivikanemomeetri näitude suhteline standardhälve oli enamasti väiksem kui 0,5 %.

3.2 k-faktor ja selle määramatus

Teises ülesandes oli lisaks õhuvoogude referentsväärtuste mõõtmisele läbi lõppelementide vajalik tundmatu plafooni jaoks määrata k-faktor ja hinnata selle määramatust. Lõppelemendi k-faktor leitakse valemist:

$$k_{ref} = \frac{Q_{ref}}{\sqrt{\Delta p}} \quad (3),$$

milles Q_{ref} tähistab lõppelementi läbivat õhuvoogu, mida mõõdeti sissepuhke poolele monteeritud referentstiivikanemomeetriga T3, ja Δp tähistab plafoonil tekkivat rõhulangu, mida mõõdeti etalonmanomeetriga Schiltknecht ManoAir 500.

Lõppelemendi k-faktori laiendmääramatus $U(k_{ref})$ usaldusnivool $P=95$ % ($k=2$) on arvutatav järgmise suhtelise mõõtemääramatuse valemi põhjal:

TARTU ÜLIKOOLI KATSEKODA	ARUANNE 30.06.2017	Lehekülg 12(38)
-------------------------------------	-------------------------------	-----------------

Ventilatsiooni ja sisekliima parameetrite võrdlusmõõtmised

$$U(k_{ref}) = 2 \cdot k_{ref} \cdot \sqrt{\left[\frac{u(Q_{ref})}{Q_{ref}} \right]^2 + 0,5 \cdot 0,5 \cdot \left[\frac{u(\Delta p)}{\Delta p} \right]^2} \quad (4),$$

milles $u(Q_{ref})$ tähistab õhuvoo referentsväärtuse määramatust, mis arvutakse sarnaselt eelmises punktis esitatule (jättes ära katteteguri $k=2$), ja $u(\Delta p)$ on lõppelemendil tekkiva rõhulangu standardmääramatus. Rõhulangu standardmääramatuse väärtuseks on hinnatud 3 Pa ja see võtab arvesse etalonmanomeetri kalibreerimise määramatust ning rõhulangu mõõtmise standardhälvet, mis tuleneb rõhukonksu asetamisest nelja erinevasse punkti läbi plafooni avatud serva. Samuti võetakse arvesse, et rõhukonksu asetamisel plafooni vaiksesse tsooni võib esineda rõhulangu mõõtmise süstemaatiline viga.

TARTU ÜLIKOOLI KATSEKODA	ARUANNE 30.06.2017	Lehekülg 13(38)
-------------------------------------	-------------------------------	-----------------

Ventilatsiooni ja sisekliima parameetrite võrdlusmõõtmised

4. SISEKLIIMA PARAMEETRITE REFERENTSVÄÄRTUSTE ARVUTAMINE JA MÄÄRAMATUSE HINDAMINE

Esimese kahe ülesande, õhu temperatuuri ja suhtelise niiskuse mõõtmise referentsväärtused arvutatakse vastavalt valemile:

$$X_{ref} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + q(X_1) + q(X_2) + q(X_3)}{3} \quad (5),$$

milles X_1 , X_2 ja X_3 tähistavad kolme rõngale kinnitatud termohügroomeetriga mõõdetud õhu temperatuuride ja suhteliste niiskuste väärtuseid, mis on arvutatud mõõdiste aritmeetilise keskmisena, ning $q(X_1)$, $q(X_2)$ ja $q(X_3)$ tähistavad vastavaid õhu temperatuuri ja suhtelise niiskuse parandeid.

Kolmanda ülesande, õhu liikumise kiiruse referentsväärtused arvutatakse järgmise valemi põhjal:

$$v_{ref} = \frac{v_1 + v_2 + q(v_1) + q(v_2)}{2} \quad (6),$$

milles v_1 ja v_2 on referentsanemomeetrite näidud, mis on arvutatud mõõdiste aritmeetilise keskmisena, ning $q(v_1)$ ja $q(v_2)$ on vastavad parandid.

Kõigi kolme sisekliima parameetri laiendmääramatuse $U(X)$ hindamiseks usaldusnivool $P=95\%$ ($k=2$) kasutatakse valemit:

$$U(X) = \sqrt{u_{kal}^2 + u_{hom}^2 + u_{stab}^2 + u_{muu}^2} \quad (7),$$

milles u_{kal} on vastava mõõtevahendi kalibreerimise standardmääramatus, u_{hom} iseloomustab mõõdetud parameetrite varieeruvust erinevates ruumipunktides, u_{stab} iseloomustab mõõdiste mittestabiilsust ajas ja u_{muu} võtab arvesse muid mõjureid (näiteks termohügroomeetritele mõjuvad kiirguslikud efektid ja anemomeetrite teineteise näitude mõjutamine).

Määramatuse komponendi u_{hom} hindamiseks võrreldakse erinevatesse ruumipunktidesse asetatud referentsmõõtevahendite parandatud näitude omavahelisi erinevusi.

Määramatuse komponent u_{stab} arvutatakse mõõdiste aritmeetilise keskmise standardhälvete kaudu. Referentsväärtuste mõõtemääramatuse komponentide ning vastavate liitstandardmääramatuste ja laiendmääramatuste tüüpilised hinnangud on koondatud Tabelisse 2.

TARTU ÜLIKOOLI KATSEKODA	ARUANNE 30.06.2017	Lehekülg 14(38)
-------------------------------------	-------------------------------	-----------------

Ventilatsiooni ja sisekliima parameetrite võrdlusmõõtmised

Tabel 2 Sisekliima parameetrite mõõtemääramatuse komponendid ja tüüpilised hinnangud

Mõõtemääramatuse komponent	Õhu temperatuur	Õhu suhteline niiskus	Õhu liikumise kiirus
	°C	%	m/s
u_{kal}	0,1	0,5	0,03
u_{hom}	0,06	0,3	0,04
u_{stab}	0,02	0,1	0,03
u_{muu}	0,05	0,3	0,03
$U(X) (k=2)$	0,26	1,3	0,13

TARTU ÜLIKOOLI KATSEKODA	ARUANNE 30.06.2017	Lehekülg 15(38)
-------------------------------------	-------------------------------	-----------------

Ventilatsiooni ja sisekliima parameetrite võrdlusmõõtmised

5. VENTILATSIOONI VÕRDLUSMÕÕTMISE TULEMUSTE ANALÜÜS

Ülesanne nr 1

Õhuvooge ventilatsioonikanalis mõõtsid kokku 18 osalejat (vt Tabel 3). Saadud 143-st tulemusest 26 ei langenud kokku vastavate referentsväärtustega, kuna nende puhul $|E_n| > 1$. 143-st tulemusest 107-l juhul oli E_n väärtus positiivne ja 36-l juhul negatiivne, mis näitab, et mõõtjad mõõtsid kanalis enamasti kõrgemaid õhuvoo väärtusi võrreldes referentsväärtustega. Sarnane olukord on esile kerkinud ka varasematel ventilatsiooni võrdlusmõõtmistel.¹ Joonistel 7 ja 8 on näidatud mõõtjate E_n väärtused, mis vastavad erinevatele mõõtekohtadele ventilatsioonistendis. Joonisel 7 on mõõtetulemused grupeeritud mõõtekohtade järgi ja joonisel 8 mõõtjate järgi. Jooniselt 7 on näha, et probleemseid mõõtekohti on kokku kolm: VT3, SP1 ja SP2. Mõõtekohas VT3 on mõõtjate väärtuste aritmeetiline keskmine 15,3 % võrra kõrgem, mõõtekohas SP1 16,1 % võrra kõrgem ja mõõtekohas SP2 9,2 % võrra kõrgem vastavate referentsväärtuste aritmeetilise keskmise väärtustest. Ülejäänud viies mõõtekohas jäävad suhtelised erinevused vahemikku (0,4...4,8) %.

Vastavate õhuvoogude väärtuste võrdlus ventilatsioonistendi erinevate mõõtekohtade baasil on esitatud Tabelis 4. Tabeli viimases reas on referentsväärtuste põhjal arvutatud õhu keskmised joonkiirused.

Kuna enamik kasutatud anemomeetreid on kalibreeritud TÜ Katsekojas, siis kandilises kanalis (VT3) mõõtmise korral on mõõtevahendi kalibreerimisest tingitud laiendmääramatus orienteeruvalt 7 %, arvestades seda, et õhu liikumise kiirus selles ristlõikes oli orienteeruvalt 1,2 m/s. Eeldusel, et keskmine osaleja valis kandilise kanali (VT3) ristlõikes 15 mõõtepunkti ja vooluprofiili ebakorrapärasus oli 20 %, siis standardi EVS-EN 12599:2012 tabeli E.4 põhjal on mõõtepunktide valiku laiendmääramatuseks hinnatud orienteeruvalt 9 %. Kolmanda ülesande andmete põhjal oli mõõtjast tingitud suhteline standardmääramatus 2 % või rohkem. Seega kandilises kanalis antud õhuvoo korral peaks olema suhteline laiendmääramatus mitte väiksem kui

$$U_{rel}(Q) = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{7\%}{2}\right)^2 + \left(\frac{9\%}{2}\right)^2 + (2\%)^2} \approx 12\% .$$

Kokku mõõtis kandilises kanalis õhuvooge 17 mõõtjat, kellest 12 hindasid õhuvoogude suhtelist laiendmääramatust antud õhuvoo korral väiksemaks kui 12 %.

Võrdlusmõõtmise korraldaja mõõtis kahes stendi ristlõikes (VT1 ja SP2) õhuvooge Pitot toruga ja termoanemomeetriga ning võrdles, kui hästi langevad tulemused kokku

¹ Vt näiteks 2011 aasta võrdlusmõõtmise tulemusi aadressil <http://www.katsekoda.ut.ee/laborivatevahelised-v%C3%B5rdlusm%C3%B5%C3%B5tmised/t%C3%B6%C3%B6keskkond>

TARTU ÜLIKOOLI KATSEKODA	ARUANNE 30.06.2017	Lehekülg 16(38)
-------------------------------------	-------------------------------	-----------------

Ventilatsiooni ja sisekliima parameetrite võrdlusmõõtmised

referentstiivikanemomeetrite näitudega. Korraldaja valis mõõtepunkte kanali ristlõikes vastavalt standardi „EVS-EN 12599:2012 nõuetele (kontsentriliste võrdse pindalaga rõngaste meetod), paigutades mõõtevahendi otsa kokku 8-sse punkti kanali ristlõikes. Antud katses fikseeris korraldaja mõõtevahendid statiivi ja käpa abil ning sulges ava ventilatsioonikanali seinas kummitükiga. Sellest hoolimata mõõtis ka korraldaja kalibreeritud Pitot toruga ja termooanemomeetriga kõrgemaid õhuvoo väärtuseid võrreldes referentstiivikanemomeetritega. Pitot toruga mõõdetud õhuvoo väärtused olid mõõtekohas VT1 1 % võrra kõrgemad ja mõõtekohas SP2 8 % võrra kõrgemad võrreldes tiivikanemomeetrite näitudega. Termooanemomeetriga mõõdetud õhuvoo väärtused olid vastavalt 7 % ja 13 % võrra kõrgemad. Termooanemomeetriga ja Pitot toruga õhuvoogude mõõtmise suhteliseks laiendmääramatuseks on võrdlusmõõtmise korraldaja hinnanud 10 %, võttes arvesse punktide valiku määramatust kahes nimetatud kanali ristlõikes ning termooanemomeetri ja Pitot toru kalibreerimise määramatust. Tiivikanemomeetriga õhuvoogude mõõtmise suhteliseks laiendmääramatuseks on hinnatud 3%. Seega Pitot toruga ja tiivikanemomeetriga mõõdetud tulemused langevad mõlemal juhul kokku, kuna vastavad E_n väärtused on 0,10 ja 0,77. Termooanemomeetri abil mõõdetud õhuvoog langeb kokku tiivikanemomeetriga mõõdetud õhuvooga mõõtekohas VT1 (vastav E_n väärtus on 0,67). Mõõtekohas SP2 ei lange termooanemomeetri abil mõõdetud õhuvoog kokku referentstiivikanemomeetriga mõõdetud õhuvooga, kuna vastav E_n väärtus on 1,25.

Sel põhjusel on õhuvoogude referentsväärtuste hindamisel võetud arvesse ka õhuvoogude suhtelist hälvet δQ_{ref} , mis on hinnatud mainitud spetsiaalkatsete andmete põhjal.

Mõõtekohtade VT1, VT2, VT4, VT5 ja SP3 korral on referentsväärtuste laiendmääramatud hinnatud valemi 2(a) põhjal, kusjuures õhuvoo suhtelise hälbe δQ_{ref} väärtuseks on hinnatud 2 %.

Probleemsete mõõtekohtade VT3, SP1 ja SP2 korral on referentsväärtuste laiendmääramatud hinnatud valemi (2b) põhjal, kusjuures õhuvoo suhtelise hälbe δQ_{ref} väärtuseks on hinnatud 10,5 %.

Võrdlusmõõtmise korraldaja oskab välja tuua neli võimalikku põhjust, miks kolmes probleemses mõõtekohas osalejate väärtuste keskmised ja vastavad keskmised referentsväärtused süstemaatiliselt erinevad, mida ka allpool analüüsitakse:

- süsteemis esineb olulisi lekkeid või oluliselt erinevaid temperatuuri ja rõhu väärtuseid;
- referentsemõõtevahendid või osalejate mõõtevahendid pole õigesti kalibreeritud;
- mõõtjate valitud punktid kanali ristlõikes annavad keskmisest väärtusest kõrgema tulemuse;
- stabiilsetes tingimustes kalibreerimisel saadud parandid ei kehti piisavalt täpselt reaalses süsteemides mõõtmise korral, kus turbulentside osakaal on suur.

TARTU ÜLIKOOLI KATSEKODA	ARUANNE 30.06.2017	Lehekülg 17(38)
-------------------------------------	-------------------------------	-----------------

Ventilatsiooni ja sisekliima parameetrite võrdlusmõõtmised

Enamikul juhtudel oli kooskõla stendi sissepuhke ja väljatõmbe pooltele paigutatud referentstiivikanemomeetrite näitude vahel hea, jäädes alla 1 %. Seega ei kahtlusta korraldaja märkimisväärseid lekkeid ega ka märkimisväärselt erinevaid rõhu ja temperatuuri väärtuseid stendi erinevates osades.

Pitot toru on kalibreeritud Leedu Energeetika Instituudi poolt ning termoanemomeeter ja ka enamasti osalejate termoanemomeetrid on kalibreeritud sama Pitot toru abil kasutades tuuletunnelit. Kuna Pitot toru kalibreerimisel määratud koefitsient on ligikaudu 1 ja gaasiarvesti suurim parand (0,33%) on väiksem tootja poolt lubatud veast (± 1 %) siis võrdlusmõõtmise korraldaja ei sea kahtluse alla referentsmõõtevahendite kalibreeringut.

Juhul kui kanali ristlõike keskosas valida suhteliselt rohkem mõõtepunkte võrreldes kanali ristlõike äärealadega võib mõõtetulemuseks saada keskmisest õhuvoost suurema väärtuse, kuna kanali telje lähedal on õhu kiirus suurem võrreldes ristlõike äärealadega. Punktide valik võib olla üks süstemaatilise hälbe põhjusi. Samas, lisaks mõõtjatele ka võrdlusmõõtmise korraldaja, kes paigutas Pitot toru ja termoanemomeetri otsad kanali ristlõikesse standardi EVS-EN 12599:2012 soovitude järgi, sai kõrgemad tulemused võrreldes referentstiivikanemomeetrite näitudega. Seega, mõõtepunktide valik võib küll olla üheks süstemaatilise nihke põhjuseks, aga ilmselt mitte ainukeseks põhjuseks.

Korraldaja hinnangul on tõenäoline ka neljandana mainitud põhjus. Tugevasti pööriseselises õhuvoos võib termoanemomeetri kuum traat tõepoolest jahtuda rohkem võrreldes stabiilse õhuvooga, mille juures viiakse läbi mõõtevahendite kalibreerimised. Selle põhjuse tõenäolisust kinnitab ka see, et probleemid esinesid mitte kõigis, vaid ainult kolmes mõõtekohas, kus on alust kahtlustada õhuvoolu kõrgemat turbulentsust. Ka Pitot toruga mõõdetud õhuvood on pööriseselistes tingimustes kõrgemad võrreldes stabiilsete õhuvoogudega, kuid erinevused ei ole nii suured kui termoanemomeetriga mõõtes. Võtmaks võimalikku turbulentsust võrdlusmõõtmise tulemuste hindamisel arvesse on referentsväärtuste mõõtemääramatuste hinnangutele lisatud lisaliige, nagu seletatud alajaotuses 3.1.

Osalenud mõõtjate mõõtemääramatuse hinnangul varieeruvad oluliselt. Mõõtjad 5, 8 ja 17 on saanud suhteliselt hästi kokkulangevaid tulemusi, hinnates suhtelist laiendmääramatust väiksemaks kui 10 %. Mõõtjad 3 ja 11 on hinnanud suhteliseks laiendmääramatuseks 20 % ja saavutanud vastavate referentsväärtustega kokkulangevaid tulemusi. Mõõtja 10 on suhteliseks laiendmääramatuseks hinnanud mõningatel juhtudel (1...2) %, mis ei ole realistlik. Sama õhuvoo korduvustingimustel mõõtmise katse näitas, et juba mõõtjast tingitud standardmääramatuse komponent on reeglina 2 % või üle selle, kuid lisanduvad veel meetodiline määramatus (mõõtepunktide valik kanali ristlõikes) ja mõõtevahendist tingitud määramatus. Võrdlusmõõtmise korraldaja hinnangul on realistlik suhteline laiendmääramatus kanalis termoanemomeetriga õhuvooge mõõtes orienteeruvalt 10 % või suurem.

TARTU ÜLIKOOLI KATSEKODA	ARUANNE 30.06.2017	Lehekülg 18(38)
-------------------------------------	-------------------------------	-----------------

Ventilatsiooni ja sisekliima parameetrite võrdlusmõõtmised

Tabel 3. Ventilatsioonisüsteemi kanalites õhuvoogude võrdlusmõõtmise tulemuste koondtabel

		VT1 Ø160	VT2 Ø160	VT3 300x400	VT4 Ø100	VT5 Ø125	SP1 Ø250	SP2 Ø200	SP3 Ø160
LAB 1	LAB, L/s	71	69	170	91	128	148	121	121
	U(LAB), L/s	9	9	15	15	19	18	15	18
	REF, L/s	68,9	69,3	144	87,2	117,8	123	103	112,7
	U(REF), L/s	3,5	3,5	22	4,5	5,9	17	14	5,6
	E _n	0,22	-0,03	0,98	0,25	0,51	1,01	0,89	0,44
LAB 2	LAB, L/s	77	75,9	180	89	119	145	115	119,2
	U(LAB), L/s	11	8,4	120	11	21	22	13	9,6
	REF, L/s	70,4	70,9	145	90,2	117,0	120	99	113,9
	U(REF), L/s	3,5	3,5	22	4,5	5,8	16	13	5,7
	E _n	0,56	0,55	0,28	-0,08	0,11	0,90	0,85	0,47
LAB3	LAB, L/s	62	67	148	71	104	131	111	109
	U(LAB), L/s	12	14	30	14	21	27	22	22
	REF, L/s	66,5	66,3	143	85,7	116,0	120	99	113,4
	U(REF), L/s	3,4	3,3	22	4,4	5,9	16	13	5,7
	E _n	-0,39	0,06	0,13	-0,95	-0,58	0,37	0,46	-0,20
LAB4	LAB, L/s	132	132	-	85	121	161	147	104
	U(LAB), L/s	13	13	-	9	12	16	15	10
	REF, L/s	135,2	134,8	-	86,7	116,4	142	129	128,9
	U(REF), L/s	6,8	6,8	-	4,6	5,9	19	18	6,5
	E _n	-0,22	-0,19	-	-0,17	0,35	0,78	0,79	-2,09

TARTU ÜLIKOOLI KATSEKODA	ARUANNE 30.06.2017	Lehekülg 19(38)
-------------------------------------	-------------------------------	-----------------

Ventilatsiooni ja sisekliima parameetrite võrdlusmõõtmised

Tabel 3. (järg)

		VT1 Ø160	VT2 Ø160	VT3 300x400	VT4 Ø100	VT5 Ø125	SP1 Ø250	SP2 Ø200	SP3 Ø160
LAB5	LAB, L/s	66,1	66,3	146,1	87,2	115,6	129,9	101,8	108,0
	U(LAB), L/s	2,4	2,4	6,1	3,4	4,4	4,7	3,7	4,0
	REF, L/s	68,5	69,3	141	88,0	114,5	120	100	111,6
	U(REF), L/s	3,4	3,5	22	4,5	5,8	16	14	5,6
	E _n	-0,57	-0,71	0,22	-0,14	0,15	0,59	0,16	-0,52
LAB6	LAB, L/s	76	74	161	97	128	150	113	122
	U(LAB), L/s	11	11	19	14	18	22	17	18
	REF, L/s	66,4	67,1	141	86,8	112,8	121	99	111,4
	U(REF), L/s	3,3	3,4	22	2,8	5,9	16	14	5,6
	E _n	0,85	0,60	0,69	0,71	0,79	1,06	0,67	0,58
LAB8	LAB, L/s	74,0	74,0	144,2	94,0	126,0	125,0	104,6	114,0
	U(LAB), L/s	3,6	3,7	7,0	4,5	6,0	6,0	5,0	5,4
	REF, L/s	70,4	70,6	145	90,0	117,9	123	104	112,4
	U(REF), L/s	3,5	3,5	22	4,6	5,9	17	14	3,7
	E _n	0,72	0,66	-0,02	0,62	0,96	0,12	0,04	0,24
LAB9	LAB, L/s	66	65	146	83	107	125	99	102
	U(LAB), L/s	4	4	12	3	4	5	5	6
	REF, L/s	69,3	69,6	142,4	89,6	117,4	122,6	101,8	115,5
	U(REF), L/s	3,5	3,5	22,4	4,6	5,9	16,6	13,8	5,8
	E _n	-0,62	-0,87	0,14	-1,22	-1,46	0,14	-0,19	-1,63

TARTU ÜLIKOOLI KATSEKODA	ARUANNE 30.06.2017	Lehekülg 20(38)
-------------------------------------	-------------------------------	-----------------

Ventilatsiooni ja sisekliima parameetrite võrdlusmõõtmised

Tabel 3. (järg)

		VT1 Ø160	VT2 Ø160	VT3 300x400	VT4 Ø100	VT5 Ø125	SP1 Ø250	SP2 Ø200	SP3 Ø160
LAB10	LAB, L/s	58,2	72,2	178,8	84	139,5	180,9	88,3	128,8
	U(LAB), L/s	0,6	0,6	4,7	13	9,0	2,0	2,0	0,9
	REF, L/s	66,4	67,4	145	87,9	115,0	120	100	114,2
	U(REF), L/s	3,4	3,4	22	4,7	5,8	16	14	5,7
	E _n	-2,40	1,41	1,49	-0,31	2,29	3,72	-0,85	2,52
LAB11	LAB, L/s	70	72	180	89	125	128	113	113
	U(LAB), L/s	14	14	36	18	25	26	23	23
	REF, L/s	68,5	68,5	144	86,4	114,6	117	100	110,6
	U(REF), L/s	3,4	3,4	22	4,4	5,8	16	14	5,5
	E _n	0,11	0,24	0,86	0,14	0,41	0,38	0,50	0,10
LAB12	LAB, L/s	77	76	165	92	125	144	118	116
	U(LAB), L/s	15	15	16	22	27	24	21	23
	REF, L/s	70,5	70,8	144	87,0	115,6	121	102	112,4
	U(REF), L/s	3,5	3,6	20	4,4	5,8	16	14	5,6
	E _n	0,42	0,35	0,82	0,22	0,33	0,80	0,64	0,15
LAB13	LAB, L/s	73,3	75,6	191,4	95,4	122,6	126,3	120,2	113,6
	U(LAB), L/s	3,7	3,8	9,6	4,8	7,4	6,3	4,8	4,5
	REF, L/s	69,3	70,0	145	91,1	116,9	113	106	114,6
	U(REF), L/s	3,5	3,5	22	4,6	5,9	15	14	5,7
	E _n	0,79	1,09	1,92	0,64	0,60	0,83	0,95	-0,13

TARTU ÜLIKOOLI KATSEKODA	ARUANNE 30.06.2017	Lehekülg 21(38)
-------------------------------------	-------------------------------	-----------------

Ventilatsiooni ja sisekliima parameetrite võrdlusmõõtmised

Tabel 3. (järg)

		VT1 Ø160	VT2 Ø160	VT3 300x400	VT4 Ø100	VT5 Ø125	SP1 Ø250	SP2 Ø200	SP3 Ø160
LAB14	LAB, L/s	70,2	72,1	172,8	91,4	118,6	153,2	112,4	110,6
	U(LAB), L/s	2,8	2,9	8,6	5,5	8,3	7,7	5,6	5,5
	REF, L/s	69,7	69,1	145	91,1	116,6	122	106	114,7
	U(REF), L/s	3,5	3,5	23	4,7	5,9	17	14	5,7
	E _n	0,12	0,66	1,16	0,04	0,20	1,73	0,41	-0,52
LAB15	LAB, L/s	73,0	74,1	177	97,3	127,4	150	122,8	129,0
	U(LAB), L/s	5,3	5,4	10	7,1	9,3	11	9,0	9,4
	REF, L/s	67,7	68,8	142	88,7	115,4	123	107	116,9
	U(REF), L/s	3,4	3,4	23	4,6	5,8	17	14	5,8
	E _n	0,85	0,82	1,41	1,02	1,10	1,35	0,95	1,09
LAB16	LAB, L/s	72	71	173	92	121	144	117	125
	U(LAB), L/s	7	7	21	11	12	14	12	12
	REF, L/s	68,9	69,1	144	87,1	113,3	122	104	115,6
	U(REF), L/s	3,5	3,5	22	4,4	5,7	17	14	5,8
	E _n	0,39	0,24	0,95	0,42	0,58	1,02	0,71	0,71
LAB17	LAB, L/s	64,1	64,6	167,4	86,9	110,0	121,9	99,1	108,2
	U(LAB), L/s	3,2	3,3	8,4	4,3	5,5	6,0	5,3	5,7
	REF, L/s	67,3	67,9	144	87,6	113,0	120	99	114,4
	U(REF), L/s	3,4	3,4	20	4,5	5,7	16	14	5,7
	E _n	-0,70	-0,70	1,09	-0,12	-0,37	0,09	-0,02	-0,77

TARTU ÜLIKOOLI KATSEKODA	ARUANNE 30.06.2017	Lehekülg 22(38)
-------------------------------------	-------------------------------	-----------------

Ventilatsiooni ja sisekliima parameetrite võrdlusmõõtmised

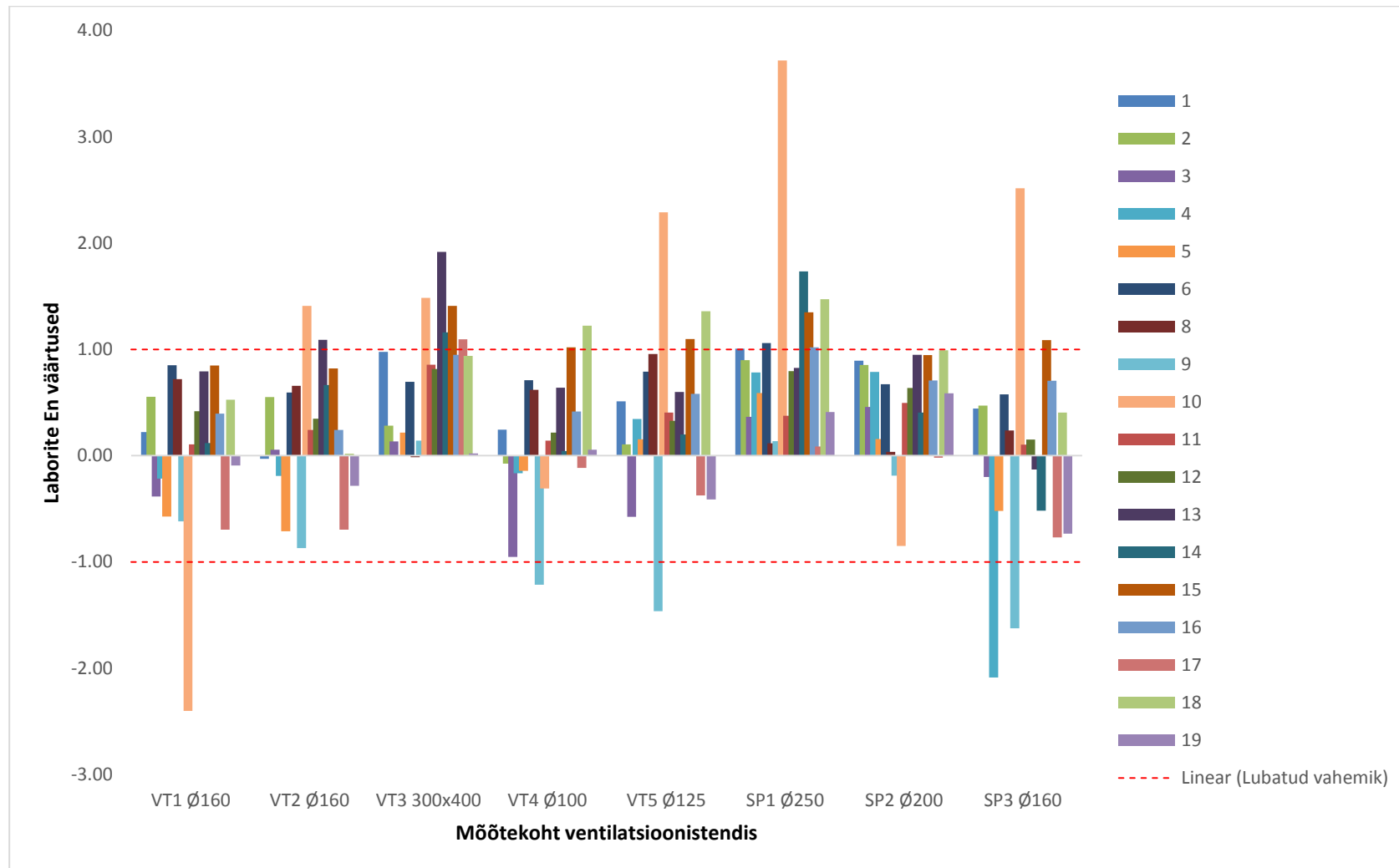
Tabel 3. (järg)

		VT1 Ø160	VT2 Ø160	VT3 300x400	VT4 Ø100	VT5 Ø125	SP1 Ø250	SP2 Ø200	SP3 Ø160
LAB18	LAB, L/s	71,7	68,9	166	99,5	129	151	116,2	121,2
	U(LAB), L/s	5,8	5,6	13	8,1	11	12	9,4	9,8
	REF, L/s	68,2	68,8	141	88,1	112,8	121	100	116,6
	U(REF), L/s	3,4	3,4	22	4,6	5,7	16	14	5,8
	E _n	0,53	0,02	0,94	1,22	1,36	1,47	0,99	0,41
LAB19	LAB, L/s	67,3	66,9	143	88,0	112,0	129,1	109,0	107,8
	U(LAB), L/s	3,6	3,0	12	5,8	5,8	6,0	4,7	5,9
	REF, L/s	67,8	68,2	142	87,6	115,4	122	101	113,8
	U(REF), L/s	3,4	3,4	22	4,4	5,8	17	14	5,7
	E _n	-0,09	-0,28	0,02	0,06	-0,41	0,41	0,59	-0,73

Tabel 4. Osalejate mõõdetud õhuvoogude aritmeetiliste keskmiste ja vastavate referentsväärtuste võrdlus mõõtekohtade baasil

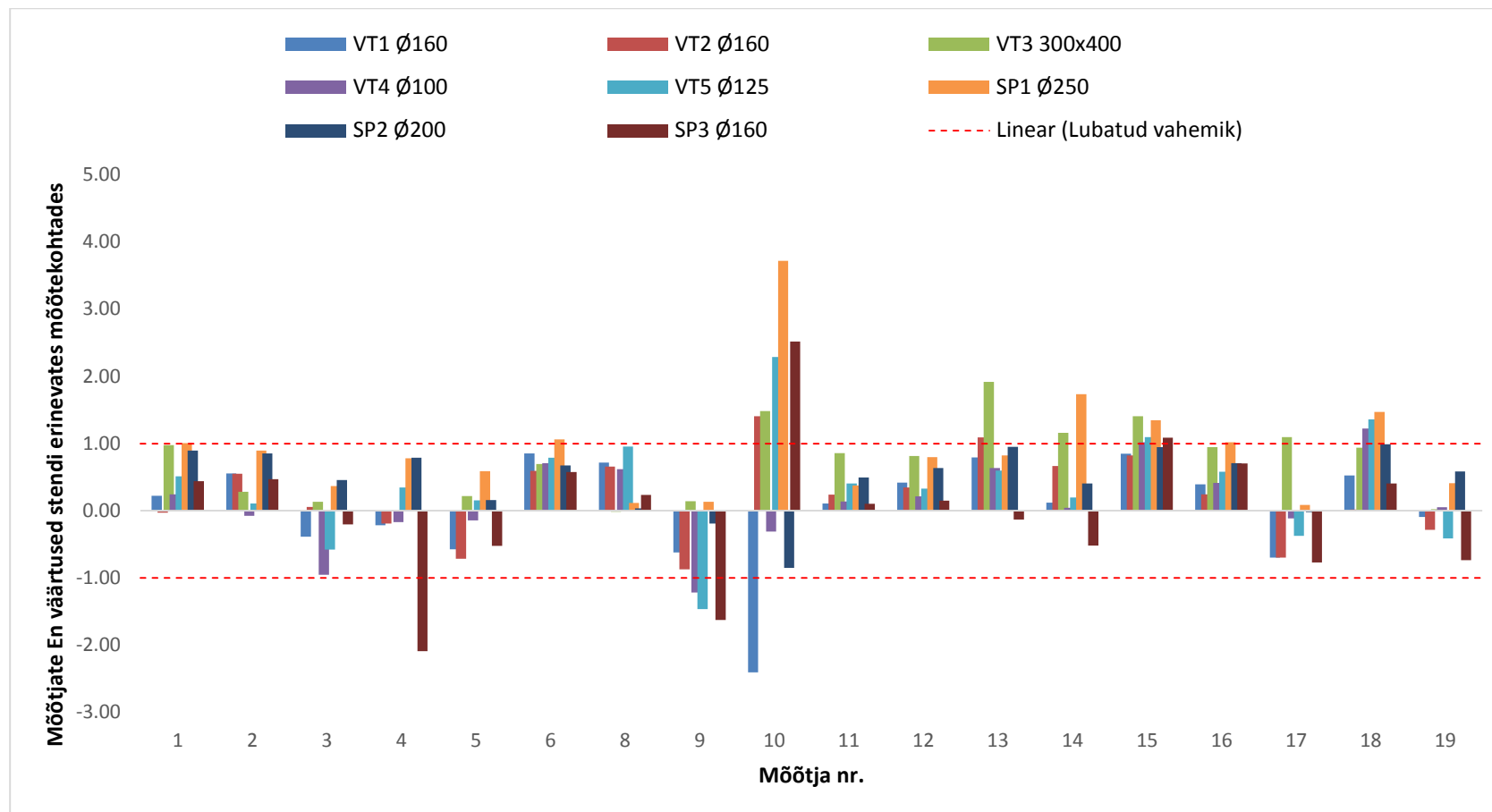
	VT1 Ø160	VT2 Ø160	VT3 300x400	VT4 Ø100	VT5 Ø125	SP1 Ø250	SP2 Ø200	SP3 Ø160
Q _{LAB} , L/s	73,4	74,3	165,2	89,6	121,0	141,3	112,7	115,1
Q _{REF} , L/s	72,2	72,6	143,2	88,2	115,5	121,7	103,2	114,6
(Q _{LAB} -Q _{REF})/Q _{REF}	1,6%	2,3%	15,3%	1,6%	4,8%	16,1%	9,2%	0,4%
v _{REF} , m/s	3,59	3,61	1,19	11,22	9,41	2,48	3,28	5,70

Ventilatsiooni ja sisekliima parameetrite võrdlusmõõtmised



Joonis 7. Mõõtjate E_n väärtuste jaotus ventilatsioonistendi erinevates mõõtekohtades

Ventilatsiooni ja sisekliima parameetrite võrdlusmõõtmised



Joonis 8 Mõõtjate E_n väärtused stendi erinevates mõõtekohtades

TARTU ÜLIKOOLI KATSEKODA	ARUANNE 30.06.2017	Lehekülg 25(38)
-------------------------------------	-------------------------------	-----------------

Ventilatsiooni ja sisekliima parameetrite võrdlusmõõtmised

Ülesanne nr 2

Õhuvooge läbi lõppelementide mõõtis kokku 15 mõõtjat (vt Tabel 5). Saadud 75-st tulemusest 15 ei langenud kokku referentsväärtustega. Mõnel juhul ei kasutanud mõõtjad kõigil juhtudel (ID 1 ja 15) lõppelementidele määratud õigeid k-faktoreid ning mõned mõõtjad (ID 8, 9 ja 19) hindasid ehk mõõtemääramatust liiga väikeseks. Mõõtjate nr. 5, 13 ja 14 tulemused on väga hästi kokkulangevad referentsväärtustega.

Võrdlusmõõtmise korraldaja mõõtis samuti kasutatud lõppelementidele k-faktorid. Lõppelementide Opal OTV-160 ja Onnline STQA-100 korral langesid tootja poolt määratud k-faktorid kokku korraldaja poolt mõõdetud k-faktoritega. Plafoonide Opal OPV-125 ja OPV-160 puhul mõõtis korraldaja vastavateks k-faktoriteks vastavalt 2,9 ja 4,8, samas kui tootja andmetel olid need k-faktorid vastavalt 3,3 ja 5,3. Vastavate tulemuste korrigeerimiseks korrutas korraldaja referentstiivikanemomeetritega mõõdetud õhuvooge vastavalt teguritega 3,3/2,9 ja 5,3/4,8. Enamikul juhtudel muutis selline teisendus kooskõla mõõtjate tulemuste ja referentsväärtuste vahel oluliselt paremaks.

Ülesanne nr 4

Õhuvooge lehrimeetodil mõõtis kokku 4 mõõtjat (vt Tabel 6). Saadud 16-st tulemusest 5 ei langenud kokku referentsväärtustega. Mõõtja nr. 2 väärtused langesid paremini kokku võrreldes mõõtjaga nr. 11. Kuna aga mõõtja nr. 2 hindas mõõtemääramatust väga väikeseks ja mõõtja nr. 11 hindas suhteliseks laiendmääramatuseks 20 %, siis langesid mõõtja nr. 11 tulemused (väärtus koos laiendmääramatusega) referentsväärtustega paremini kokku. Kõige paremaks võib pidada mõõtja nr. 16 tulemusi, kes hindas mõõtemääramatust realistlikult ja saavutas väga hea kooskõla referentsväärtuste suhtes.

TARTU ÜLIKOOLI KATSEKODA	ARUANNE 30.06.2017	Lehekülg 26(38)
-------------------------------------	-------------------------------	-----------------

Ventilatsiooni ja sisekliima parameetrite võrdlusemõõtmised

Tabel 5. Ventilatsioonisüsteemi lõppelementidel võrdlusemõõtmise tulemuste koondtabel

Mõõtja Nr.		OPV-125	OPV-160	OTV-160	STQA-100	Tundmatu plafooni k- faktor
		L/S	L/s	L/s	L/s	$L s^{-1} Pa^{-0.5}$
1	LAB	30,0	66	52,0	27,0	5,6
	U(LAB)	3,6	8	6,2	3,3	0,3
	REF	37,9	51,6	54,4	27,7	7,56
	U(REF)	2,2	1,7	1,7	2,0	0,64
	E _n	-1,88	1,76	-0,37	-0,19	-2,84
2	LAB	42,8	54,1	56,2	27,2	8,8
	U(LAB)	2,0	2,8	2,7	1,3	0,4
	REF	43,2	55,7	59,4	28,0	7,56
	U(REF)	1,8	1,6	1,5	1,9	0,64
	E _n	-0,14	-0,49	-1,02	-0,33	1,64
5	LAB	46,5	55,8	57,9	28,7	7,8
	U(LAB)	4,5	5,4	5,5	2,8	1,8
	REF	46,3	56,1	58,0	28,9	7,56
	U(REF)	1,7	1,7	1,9	2,1	0,64
	E _n	0,06	-0,06	-0,03	-0,04	0,10
6	LAB	44,5	54,3	45,3	26,1	8,6
	U(LAB)	5,4	6,5	5,5	3,1	1,3
	REF	44,4	54,6	51,9	27,0	7,56
	U(REF)	1,6	1,8	1,7	2,0	0,64
	E _n	0,02	-0,05	-1,16	-0,25	0,72
8	LAB	38	49	62	30	7,30
	U(LAB)	1	2	2	1	0,66
	REF	41,0	54,1	61,8	30,2	7,56
	U(REF)	1,7	1,8	2,1	2,3	0,64
	E _n	-1,50	-1,87	0,08	-0,08	-0,28
9	LAB	46,6	64,1	58,7	30,7	7,30
	U(LAB)	2,0	2,0	1,0	3,0	0,11
	REF	47,3	56,9	60,3	29,7	7,56
	U(REF)	1,5	1,7	2,0	2,4	0,64
	E _n	-0,27	2,78	-0,72	0,26	-0,40

Tabel 5. (järg)

Mõõtja nr.		OPV-125	OPV-160	OTV-160	STQA-100	Tundmatu plafooni k- faktor
		L/S	L/s	L/s	L/s	$L s^{-1} Pa^{-0.5}$
11	LAB	56	71	45	30	7,8
	U(LAB)	11	14	9	6	1,6
	REF	45,1	56,2	52,8	33,1	7,56
	U(REF)	1,5	1,7	1,7	2,6	0,64
	E _n	0,98	1,05	-0,85	-0,48	0,14
12	LAB	45,4	66,3	56,2	27,9	8,5
	U(LAB)	3,2	8,8	8,5	3,3	2,0
	REF	46,0	56,4	57,4	29,0	7,56
	U(REF)	1,6	1,7	1,9	2,0	0,64
	E _n	-0,17	1,10	-0,14	-0,27	0,46
13	LAB	46,4	59	58,8	28,3	7,7
	U(LAB)	4,6	5,9	5,9	2,8	0,9
	REF	46,0	58,9	58,5	29,2	7,56
	U(REF)	1,5	1,7	2,0	2,2	0,64
	E _n	0,08	0,02	0,05	-0,26	0,13
14	LAB	46,3	59,3	58	28,4	7,8
	U(LAB)	4,6	5,9	5,8	2,8	0,9
	REF	45,9	59,3	58,3	29,2	7,56
	U(REF)	1,5	1,7	2,0	2,2	0,64
	E _n	0,09	0,00	-0,05	-0,22	0,22
15	LAB	47,1	56,6	57,6	21,2	7,90
	U(LAB)	2,0	2,4	2,4	1,0	0,36
	REF	46,3	56,5	57,6	29,0	7,56
	U(REF)	1,6	1,7	1,9	2,3	0,64
	E _n	0,31	0,05	0,01	-3,13	0,46
16	LAB	47,0	58,0	63,0	30	8,3
	U(LAB)	4,7	5,8	6,3	2	1,0
	REF	46,0	58,1	61,5	30,5	7,56
	U(REF)	1,6	1,7	2,1	2,3	0,64
	E _n	0,20	-0,02	0,23	-0,16	0,62

Tabel 5. (järg)

Mõõtja nr.		OPV-125	OPV-160	OTV-160	STQA-100	Tundmatu plafooni k- faktor
		L/S	L/s	L/s	L/s	$L s^{-1} Pa^{-0.5}$
17	LAB	44,9	54,0	57,9	28,0	8,10
	U(LAB)	1,8	2,2	2,3	1,1	0,32
	REF	44,9	54,8	57,5	28,5	7,56
	U(REF)	1,4	1,5	1,9	1,9	0,64
	E _n	0,00	-0,30	0,14	-0,24	0,75
18	LAB	47,2	57,8	60,0	29,4	8,48
	U(LAB)	3,6	4,6	4,8	2,4	0,68
	REF	47,1	58,0	59,9	29,5	7,56
	U(REF)	1,6	1,7	2,1	2,3	0,64
	E _n	0,04	-0,03	0,02	-0,03	0,99
19	LAB	45,6	60,4	52,5	28	8,38
	U(LAB)	1,8	2,4	2,1	1,1	0,32
	REF	45,2	57,3	57,0	29,0	7,56
	U(REF)	1,4	1,6	1,9	2,3	0,64
	E _n	0,19	1,06	-1,59	-0,37	1,15

Tabel 6. Lehtrimeetodi võrdlusmõõtmise tulemuste koondtabel

Mõõtja nr.		Sissepuhe 1	Sissepuhe 2	Väljatõmme 1	Väljatõmme 2
		L/S	L/s	L/s	L/s
2	LAB	51,8	30,1	57,9	31,3
	U(LAB)	0,9	0,5	0,9	0,8
	REF	58,8	30,5	51,0	30,1
	U(REF)	2,1	1,1	1,9	1,1
	E _n	-3,03	-0,32	3,33	0,85
7	LAB	70,2	35,8	52,4	34,3
	U(LAB)	2,8	1,4	2,1	1,4
	REF	60,0	30,7	50,1	31,9
	U(REF)	2,3	1,2	1,9	1,3
	E _n	2,82	2,77	0,82	1,22
11	LAB	82	39	52	31
	U(LAB)	21	10	13	8
	REF	64,2	30,3	41,4	25,2
	U(REF)	2,3	1,1	1,5	0,9
	E _n	0,84	0,86	0,81	0,72
16	LAB	54	24	65	33
	U(LAB)	4	2	4	2
	REF	54,6	23,9	64,9	34,5
	U(REF)	2,0	0,9	2,6	1,9
	E _n	-0,13	0,03	0,01	-0,56

6. SISEKLIIMA VÕRDLUSMÕÕTMISE TULEMUSTE ANALÜÜS

Sisekliima võrdlusmõõtmise tulemused on esitatud tabelites 7-11 ja joonistel 9-13. Õhu suhtelise niiskuse ja õhu liikumise kiiruse alal langesid kõigi mõõtjate tulemused määramatusi arvestades kokku vastavate referentsväärtustega. Õhu liikumise kiiruse alal on mõõtjate nr. 6 ja 8 laiendmääramatuse hinnangud liiga madalad (vastavalt 0,01 m/s ja 0,02 m/s). Samuti õhu suhtelise niiskuse alal on mõõtja nr. 6 mõõtemääramatuse hinnang liiga madal (0,5 %). Need tulemused langevad referentsväärtustega kokku eelkõige seetõttu, et referentsväärtuste laiendmääramatused on oluliselt suuremad.

Õhu temperatuuri alal ei langenud 9 tulemust 42-st kokku vastavate referentsväärtustega. Võrdlusmõõtmise korraldaja pani tähele, et mitte kõik mõõtjad ei lasknud termomeetritel piisavalt kaua stabiliseeruda. Termomeetri tõstmisel kõrguselt 160 cm põranda pinnast kõrgusele 10 cm põranda pinnast on õige oodata, kuni termomeetri näit uuesti stabiliseerub. Mõõtja nr. 19 lasi termomeetritel piisavalt kaua stabiliseeruda ja antud juhul $|E_n| < 0,1$, mis tähendab ideaalset kooskõla vastavate referentsväärtustega. Õhu temperatuuri alal hindasid kõik mõõtjad mõõtemääramatust realistlikult.

Tabel 7. Õhu liikumise kiiruse mõõtmise tulemused kõrgusel 110 cm põranda pinnast

Mõõtja nr.	v_{ref}	$U(v_{ref})$	v_{lab}	$U(v_{lab})$	E_n
	m/s	m/s	m/s	m/s	
2	0,17	0,09	0,17	0,05	0,00
3	0,17	0,10	0,28	0,06	0,94
4	0,39	0,15	0,44	0,11	0,27
5	0,16	0,09	0,19	0,1	0,22
6	0,19	0,11	0,13	0,01	-0,54
7	0,17	0,12	0,20	0,06	0,22
8	0,14	0,09	0,09	0,02	-0,54
9	0,16	0,10	0,19	0,05	0,27
10	0,19	0,10	0,28	0,10	0,64
11	0,19	0,10	0,28	0,10	0,64
12	0,12	0,09	0,15	0,05	0,29
13	0,16	0,11	0,25	0,05	0,74
14	0,12	0,08	0,12	0,06	0,00
15	0,13	0,11	0,13	0,11	0,00
19	0,11	0,08	0,14	0,2	0,14
20	0,32	0,11	0,20	0,09	-0,84

Tabel 8. Õhu temperatuuri mõõtmise tulemused kõrgusel 10 cm põranda pinnast

Mõõtja nr.	T_{ref} °C	$U(T_{ref})$ °C	T_{lab} °C	$U(T_{lab})$ °C	E_n
1	22,21	0,38	22,7	0,3	1,01
2	22,16	0,29	21,5	0,5	-1,14
3	22,81	0,56	22,50	0,65	-0,36
4	22,61	0,37	22,5	0,6	-0,16
5	22,14	0,29	22,1	0,6	-0,06
6	22,41	0,26	22,6	0,5	0,37
7	22,29	0,41	22,4	0,7	0,14
8	22,17	0,25	22,5	0,3	0,82
9	21,63	0,24	21,8	0,7	0,23
10	22,07	0,23	22,00	0,35	-0,17
11	22,07	0,23	21,90	0,35	-0,41
12	21,77	0,25	21,5	0,8	-0,32
13	21,79	0,27	21,3	0,5	-0,86
14	21,44	0,24	22,4	0,4	2,06
15	21,48	0,24	22,3	0,4	1,76
16	21,74	0,34	22,8	0,5	1,75
17	21,74	0,34	21,9	0,3	0,35
18	21,41	0,23	21,5	0,5	0,16
19	21,51	0,24	21,5	0,8	-0,01
20	22,05	0,30	22,4	0,5	0,60
21	21,55	0,26	22,2	0,6	1,01

Tabel 9. Õhu temperatuuri mõõtmise tulemused kõrgusel 160 cm põranda pinnast

Mõõtja nr.	T_{ref} °C	$U(T_{ref})$ °C	T_{lab} °C	$U(T_{lab})$ °C	E_n
1	22,66	0,24	22,9	0,3	0,62
2	22,92	0,29	22,5	0,5	-0,73
3	23,08	0,28	23,2	0,6	0,18
4	22,91	0,23	23,2	0,6	0,45
5	22,64	0,23	22,5	0,6	-0,22
6	23,06	0,35	23,0	0,5	-0,10
7	22,67	0,35	22,5	0,7	-0,22
8	22,45	0,23	23,4	0,3	2,62
9	22,25	0,23	22,5	0,7	0,34
10	22,48	0,24	23,00	0,35	1,23
11	22,48	0,24	22,90	0,35	0,99
12	22,34	0,23	22,5	0,8	0,19
13	22,37	0,24	22,1	0,5	-0,49
14	22,18	0,24	22,2	0,4	0,04
15	22,23	0,25	22,7	0,4	1,00
16	22,24	0,22	22,9	0,5	1,21
17	22,24	0,22	22,0	0,4	-0,53
18	22,31	0,23	22,4	0,5	0,16
19	22,18	0,23	22,2	0,8	0,02
20	22,57	0,29	22,2	0,5	-0,64
21	22,09	0,25	22,4	0,6	0,48

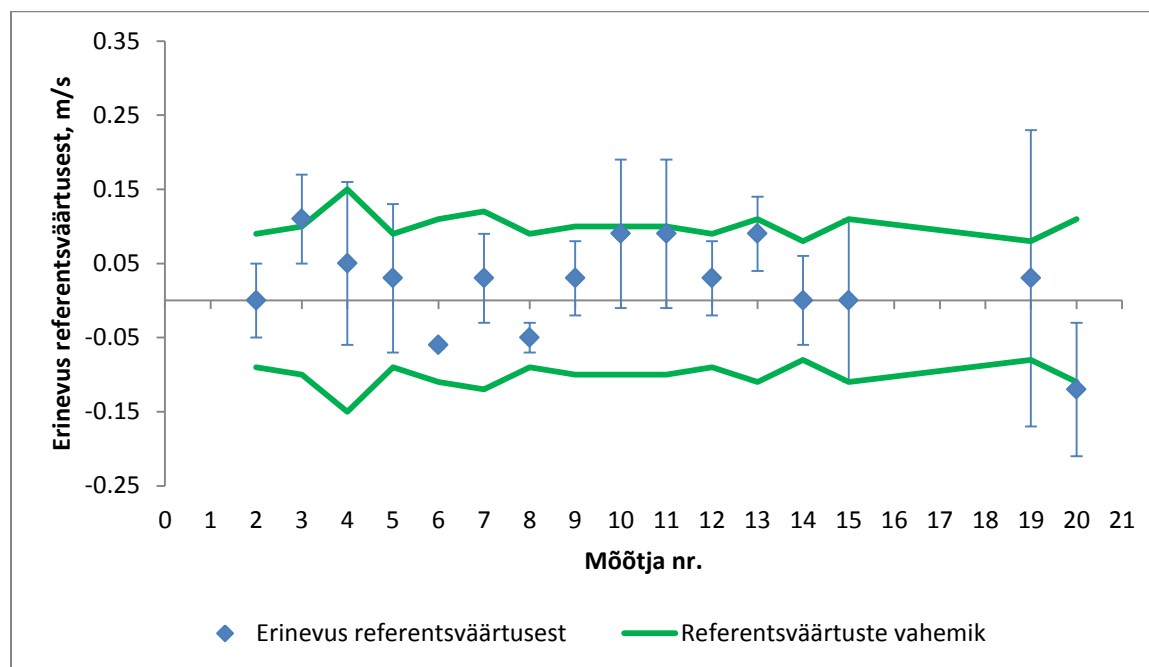
Tabel 10. Õhu suhtelise niiskuse mõõtmise tulemused kõrgusel 10 cm põranda pinnast

Mõõtja nr.	h_{ref}	$U(h_{ref})$	h_{lab}	$U(h_{lab})$	E_n
	%	%	%	%	
1	21,2	1,2	23	2	0,77
2	24,2	1,2	22,1	1,8	-0,97
3	26,9	1,4	26,7	4,5	-0,04
4	18,1	1,3	18,4	2,0	0,13
5	16,2	1,2	17,1	2,3	0,35
6	15,9	1,2	16,3	0,5	0,31
7	21,3	1,2	23,1	2,2	0,72
8	28,5	1,4	28,1	2,5	-0,14
9	21,8	1,2	22,1	3,7	0,08
10	27,4	1,2	31,0	3,5	0,97
12	14,4	1,2	15	6	0,10
13	25,2	1,3	23,5	1,9	-0,74
14	15,6	1,2	16,6	2,2	0,40
15	16,4	1,3	16,2	2,2	-0,08
16	22,5	1,2	20,8	3,2	-0,50
17	22,5	1,2	22,0	1,5	-0,26
18	15,7	1,2	15,5	2,6	-0,07
19	21,5	1,3	21,8	4,0	0,07
20	27,6	1,2	28,5	3,2	0,26
21	17,6	1,2	16,9	3,5	-0,19

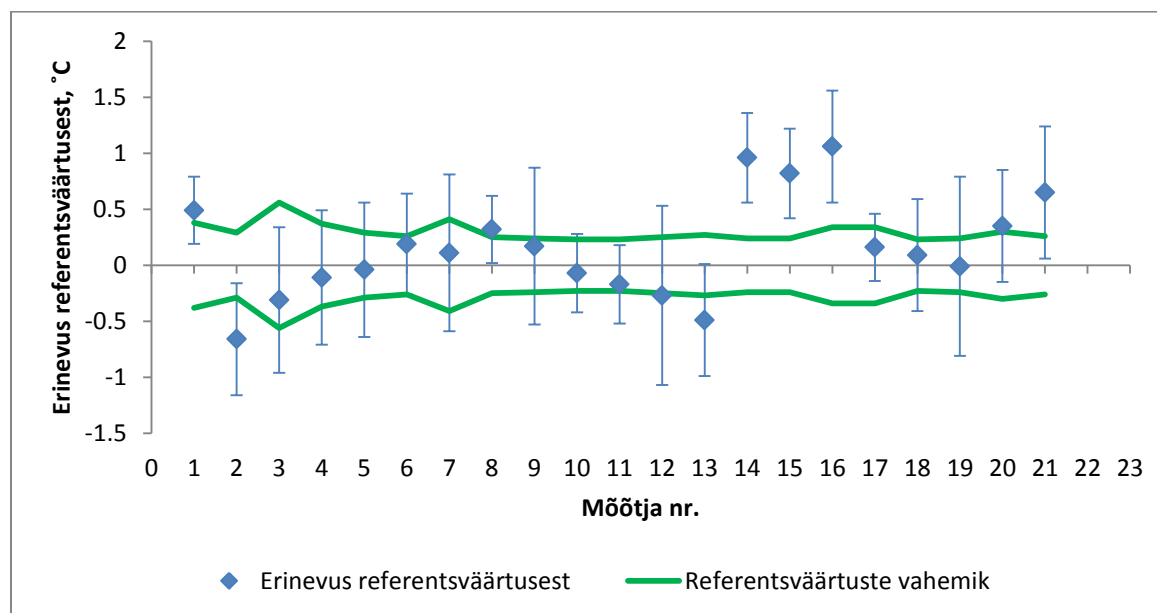
Tabel 11. Õhu suhtelise niiskuse mõõtmise tulemused kõrgusel 160 cm põranda pinnast

Mõõtja nr.	h_{ref}	$U(h_{ref})$	h_{lab}	$U(h_{lab})$	E_n
	%	%	%	%	
1	21,1	1,2	23	2	0,81
2	23,8	1,3	23,2	2,6	-0,21
3	26,9	1,4	26,8	4,5	-0,02
4	18,1	1,3	18,6	2,0	0,21
5	15,4	1,3	17,3	2,3	0,72
6	16,1	1,4	16,7	0,5	0,40
7	21,3	1,2	22,7	2,2	0,56
8	28,5	1,4	29,4	2,5	0,31
9	22,1	1,3	22,0	3,7	-0,03
10	26,9	1,2	29,7	3,5	0,76
12	14,8	1,2	15	6	0,07
13	24,7	1,3	22,7	1,8	-0,90
14	15,6	1,3	16,1	2,2	0,20
15	16,5	1,3	16,8	2,2	0,12
16	22,0	1,2	21,0	3,2	-0,29
17	22,0	1,2	22,6	1,8	0,28
18	15,9	1,3	15,6	2,6	-0,10
19	21,5	1,5	21,9	4,3	0,09
20	27,4	1,4	29,4	3,2	0,57
21	18,1	1,4	17,9	3,6	-0,05

Ventilatsiooni ja sisekliima parameetrite võrdlusmõõtmised

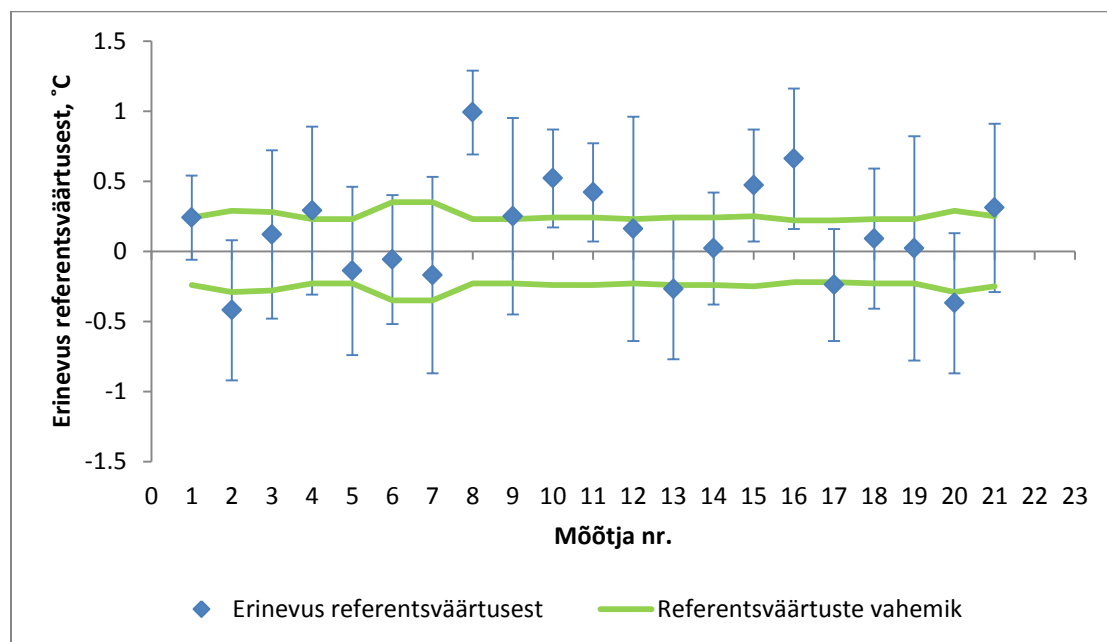


Joonis 9 Õhu liikumise kiiruse mõõtmise tulemused kõrgusel 110 cm põranda pinnast. Referentsväärtuste vahemik sisaldab tõelist väärtust tõenäosusega $P=95\%$.

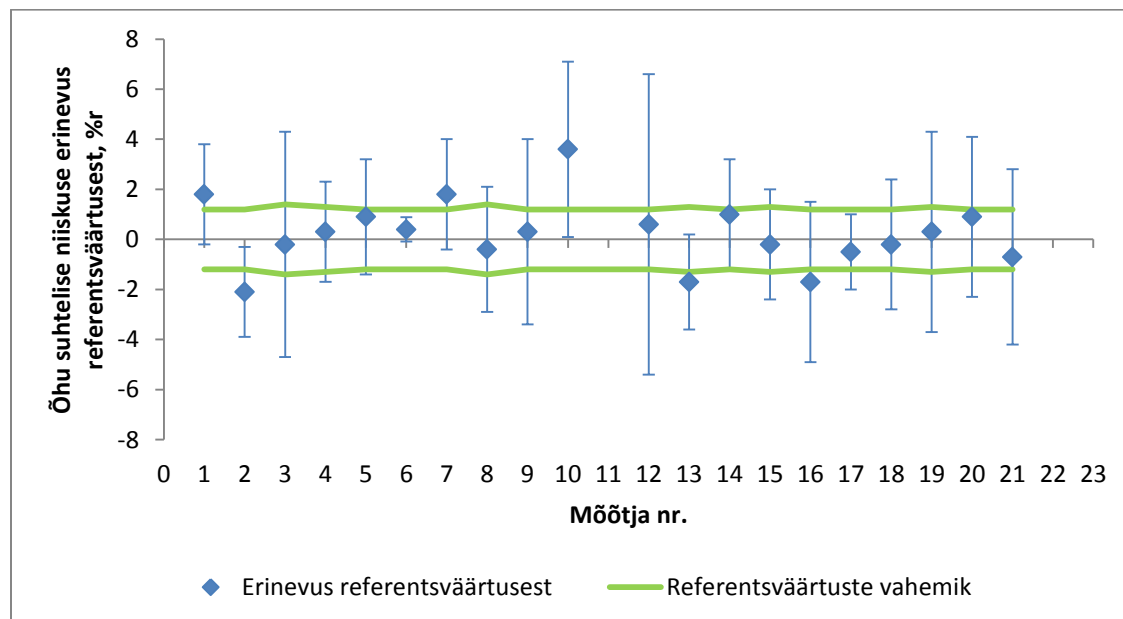


Joonis 10 Õhu temperatuuri mõõtmise tulemused kõrgusel 10 cm põranda pinnast. Referentsväärtuste vahemik sisaldab tõelist väärtust tõenäosusega $P=95\%$.

Ventilatsiooni ja sisekliima parameetrite võrdlusemõõtmised

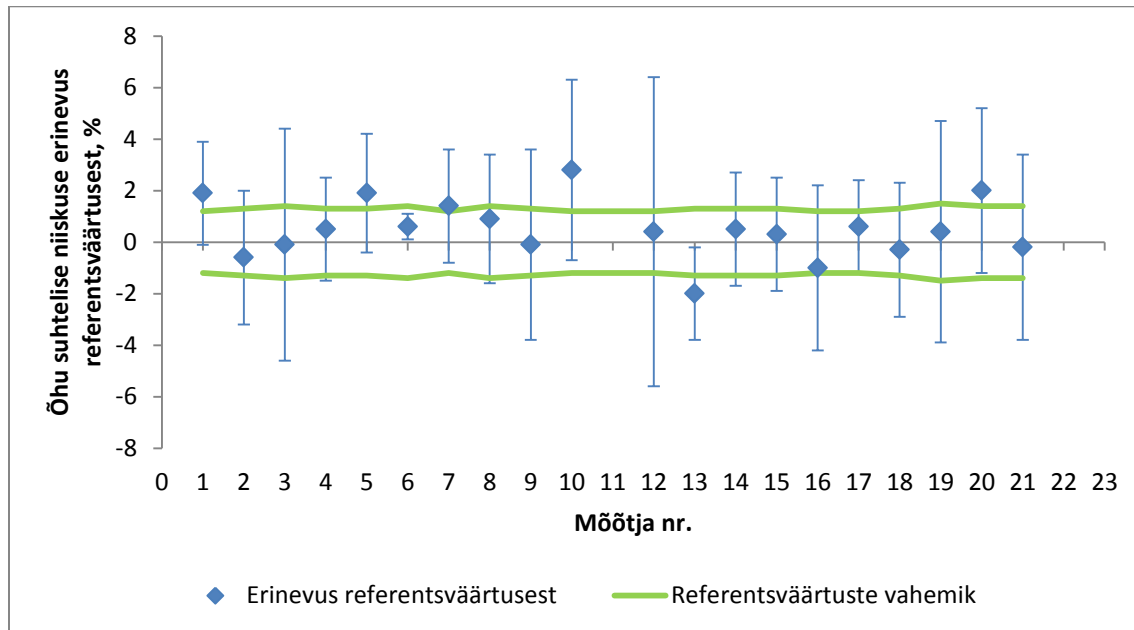


Joonis 11 Õhu temperatuuri mõõtmise tulemused kõrgusel 160 cm põranda pinnast. Referentsväärtuste vahemik sisaldab tõelist väärtust tõenäosusega $P=95\%$.



Joonis 12 Õhu suhtelise niiskuse mõõtmise tulemused kõrgusel 10 cm põranda pinnast. Referentsväärtuste vahemik sisaldab tõelist väärtust tõenäosusega $P=95\%$.

Ventilatsiooni ja sisekliima parameetrite võrdlusmõõtmised



Joonis 13 Õhu suhtelise niiskuse mõõtmise tulemused kõrgusel 160 cm põranda pinnast. Referentsväärtuste vahemik sisaldab tõelist väärtust tõenäosusega $P=95\%$.

LISA 1 Ventilatsioonistendi skeem

