



1918

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
TARTU KOLLEDŽ

Säästva tehnoloogia õppetool

**HOONE SISEKLIIMA JA VÄLISSEINTE
SOOJUSTEHNILISED NÄITAJAD
KÜBERFÜÜSIKALISE SÜSTEEMITEHNIKA
SISENDANDMETEGA PUIESTEE 80A ÕPPEHOONE
NÄITEL**

INTERNAL CLIMATE AND EXTERNAL WALL HEAT TRANSFER FOR
CYBER-PHYSICAL SYSTEMS ENGINEERING: EXAMPLE FOR BUILDING
LOCATED AT PUIESTEE 80A, TARTU

NTS 01 12

Magistritöö
materjalide taaskasutuse erialal

Üliõpilane: **Henry Seinberg**

Juhendaja: **Aime Ruus**

Kaasjuhendaja: **Ago Rootsi**

Tartu, 2016

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

..... (töö autori allkiri ja kuupäev)

Üliõpilase kood: 105313EAKI

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

..... (juhendaja allkiri ja kuupäev)

Kaitsmisele lubatud: (kuupäev)

Kaitsmiskomisjoni esimees: (allkiri)

ABSTRACT

Seinberg, H. Internal climate and external wall heat transfer for cyber-physical systems engineering: example for building located at Puiestee 80a, Tartu. Master's thesis, one volume, Tartu, 2016, 85 pages, 56 illustrations, 26 tables, 4 graphs on A3 paper, in Estonian.

The aim of this thesis is to study the internal climate and external wall heat transfer of the building at Tallinn University of Technology Tartu College. For the academic programme of cyber-physical systems engineering, the building heating and ventilation management system will be upgraded. To understand the effect of the upgrade, it is necessary to know the current behaviour of the internal climate. Between April 28 and June 4, 2016 the temperature, relative humidity and CO₂ content were measured in four rooms in the building. The results were compared to the internal climatic parameters pertaining to EVS ISO 52251:2008. The heat transfer coefficient was calculated from heat flux measurements.

The temperature was outside the recommended range 3.2% of the time. Relative humidity was outside the recommended range 0.5% of the time. CO₂ content exceeded the upper limit 1% of the time. The calculated mean heat transfer coefficient was 0.88 W/(m²K). Because external climate conditions were not steady enough to measure the heat flux, the coefficient may not be reliable. Additional heat flux measurements are needed to calculate a reliable heat transfer coefficient.

Keywords: internal climate, heat transfer, cyber-physical systems, U-value, predicted mean vote, predicted percentage of dissatisfied.

SISUKORD

SISSEJUHATUS	4
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE	5
1.1. Hoonete sisekliima.....	5
1.2. Õhutemperatuur, pindade temperatuur, operatiivtemperatuur.....	7
1.3. Õhuniiskus	10
1.4. Õhu liikumiskiirus ja ventilatsiooni vooluhulk	14
1.5. Soojuslik mugavus – PMV ja PPD	18
1.6. Kahjulike gaaside sisaldus õhus	20
1.7. Piirete soojustehnilised omadused	23
2. TÖÖ EESMÄRK JA ÜLESANDED	24
3. MATERJAL JA METOODIKA	25
3.1. Hoone kirjeldus.....	25
3.2. Sisekliima parameetrite üldine monitooring.....	27
3.3. Küttesüsteemi ja päikese mõju õhutemperatuurile auditooriumis.....	30
3.4. Sisekliima parameetrite dünaamika sõltuvalt ruumi asustusest.....	33
3.5. Piirete soojustehnilised näitajad.....	34
4. TULEMUSED	39
4.1. Hoone sisekliima uuring	39
4.2. Küttesüsteemi ja päikese mõju	50
4.3. Sisekliima parameetrite dünaamika sõltuvalt ruumi asustusest.....	63
4.4. Piirete soojustehnilised näitajad.....	69
5. JÄRELDUSED	74
KOKKUVÕTE	76
KIRJANDUSE LOETELU	77
LISAD	80

SISSEJUHATUS

Magistritöö „Hoone sisekliima ja välisseinte soojustehnilised näitajad küberfüüsikalise süsteemitehnika sisendandmetega Puiestee 80a õppehoone näitel“ eesmärgiks on uurida Tallinna Tehnikaülikooli Tartu Kolledži kompleksi kuuluva õppehoone sisekliimat ja välisseina soojusjuhtivust. Praktiliste kogemuste võimaldamiseks küberfüüsikalise süsteemitehnika tudengitele luuakse uuritavast õppehoonest järk-järgult eluslaborit. Selle raames paigaldatakse uuritavasse hoonesse erinevaid arukaid süsteeme, mis suudavad hoone tehnosüsteeme juhtida võttes arvesse erinevaid pidevalt muutuvaid tegureid.

Õppehoone sisekliima praegune käitumine on uurimata ning puudub ülevaade selle käitumisest ning seda mõjutavate tegurite osatähtsusest. Samuti pole uuritud õppehoone välisseina soojusjuhtivust. Õppehoone kütte- ja ventilatsioonisüsteemi hakatakse eluslabori projekti raames tulevikus juhtima erinevate arukate süsteemide abil. Selleks, et oleks võimalik võrrelda praegust kütte- ja ventilatsioonisüsteemi juhtimislahenduse mõju tulevikus uue süsteemiga, on vaja teada sisekliima käitumist enne täiendatud süsteemile üleminekut. Esmane katsesükkel loob üldülevaate, mille põhjal saab märgata sisekliima probleemkohti ja huvitavaid efekte, mis vajaksid täiendavat uurimist.

Magistritöö esimeses osas antakse ülevaade hoonete sisekliimale rakenduvatest nõuetest ja standardites ning seadustes soovitatud piirväärtustest.

Töö teises osas tutvustatakse magistritöö eesmäärke ja püstitatud ülesandeid.

Töö kolmandas osas tutvustatakse uuritavat hoonet ja antakse ülevaade sisekliima ja hoone välisseina uurimismeetoditest.

Töö neljandas osas antakse ülevaade hoone sisekliima parameetrite vastavusest standardites antud soovituslikele vahemikele ja piirväärtustele. Tutvustatakse hoone sisekliima ja välisseina soojusjuhtivuse mõõtmise tulemusi.

Töö viiendas osas analüüsitakse töö tulemusi ja antakse soovitusi eluslabori arendamiseks ja kohtadele, millele peaks enim tähelepanu pöörama.

1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

1.1. Hoonete sisekliima

Arenenud ühiskondades veedavad inimesed siseruumides enamjaolt 80-90% oma ajast. Seda kas kodus, tööl või mõnes muus hoones viibides. Hoone sisekliima mõjutab hoones olevate inimeste enesetunnet ja rahulolu. Inimeste jaoks sobilik sisekliima võib suurendada nende tööviljakust, kuid inimeste jaoks mittesobilik sisekliima muudab nad haigustele vastuvõtlikumaks. Eriti tundlikud sisekliima suhtes on allergikud, kelle tervisele avaldavad madal õhuniiskus ja õhu orgaanilised ning gaasilised ühendid tavapärasest suuremat mõju. Kuna allergikute osakaal on umbes kolmandik elanikkonnast ja nende hulk kasvab pidevalt, siis tuleks ruumides tagada selline sisekliima, mis oleks sobilik ka nendele. Halb sisekliima põhjustab nn haige hoone sündroomi. Ülemaailmne Tervishoiuorganisatsioon WHO on määranud järgmised sellesse rühma kuuluvad haigussümptomid [1, 2, 3]:

- 1) nina, kurgu ja silmade ärritus;
- 2) kuivad limaskestad;
- 3) naha punetus;
- 4) väsimus ja peavalu;
- 5) hingamisteede põletik ja köha;
- 6) kähe hääl;
- 7) iiveldus ja uimasus.

Hoone sisekliima on hoones viibivaid inimesi füsioloogiliselt mõjutavate erinevate parameetrite kogum. Inimeste hea enesetunde jaoks on vaja kindlustada hoones antud tegevuse jaoks sobivaim sisekliima – erinevate kliimaparameetrite muutmise või nende hoidmisega nõutud piirides. Parameetrid, mis määravad sisekliimat ja inimese hinnangut sellele, on järgmised [4, 5]:

- 1) õhutemperatuur,
- 2) suhteline õhuniiskus,
- 3) õhu liikumise kiirus,
- 4) õhu puhtus,
- 5) kiirguspindade temperatuur,
- 6) müratase,
- 7) valgustatus,

- 8) positiivsete ja negatiivsete ionide sisaldus õhus,
- 9) elektromagnetvälja tugevus.

Parameetrid sobivale sisekliimale sõltuvad hoones või ruumis toimuvatest tegevustest. Näiteks spordisaali temperatuur peab olema madalam kontoriruumi temperatuurist, sest spordisaali kasutavad inimesed eraldavad ruumi rohkem soojust kui kontoritööd tegevad inimesed. Lisaks oleneb sobilik sisekliima ka inimese vanusest ja tema toitumisharjumustest ning riietusest. Vastavalt töötervishoiu ja tööohutuse seadusele peab hoone sisekliima olema sobiv vastava tööülesande täitmiseks. Lisaks antud hoones või ruumis toimuvale tegevusele peab sobiva sisekliima määramisel arvestama ka töötajate arvu, tööruumi suurust, kasutatavate töövahendite spetsiifikat ja tehnoloogilise protsessi laadi. Lisaks määrab töötervishoiu ja tööohutuse seadus, et töökeskkonna müra poolt töötajale tekitatav kahjulik toime oleks viidud võimalikult madalale või välditud. „Kontsentreerumist, mõtlemist, otsustamist ja suhtlemist vajava töö puhul ei tohi müra segada tööülesande täitmist“[3]. [4, 5]

Vastavalt Eesti standardile EVS-EN 15251:2007 jaotatakse hooned nelja soojusliku mugavuse klassi. Lähtudes hoone soojusliku mugavuse klassist sätestab standard igale sisekliima parameetrile väärtused. Hooned jaotatakse soojusliku mugavuse klassidesse vastavalt nende kasutusotstarbele ja vanusele. Esimesse klassi kuuluvatele hoonetele (haiglad, vanadekodud, lasteaiad) on kõrgemad nõudmised sisekliimale kui madalamatesse klassidesse kuuluvatel hoonetel (õppeasutused, bürood). Kõrgemad nõudmised sisekliima parameetritele väljenduvad väiksemates lubatud kõikumisvahemikes ja rangemates ülem- või alampiirides. Näiteks sisetemperatuuri lubatud kõikumine kolmandasse soojusliku mugavuse klassi kuuluvates auditoriumites on kütteperioodil kuus kraadi (19...25°C), esimesse klassi kuuluvates auditoriumites aga kaks kraadi (21...23°C). Mugavusklassid ja nende kirjeldus on toodud tabelis 1.1. [6]

Inimestel on võime taluda halba sisekliimat, kuid sellisel juhul peab midagi neid motiveerima seda tegema. Näiteks kodus võib ebamugavalt jahedat keskkonda motiveerida taluma rahaline kokkuhoid küttekuludelt. Tööl olles võib halba sisekliimat motiveerida taluma näiteks hea palk või töökohal valitsev üksmeel. Halba sisekliimat ei saa sellele vaatamata pidada vastuvõetavaks, sest see võib põhjustada riski tervisele ja tekitada varjatud töökoormust. [7]

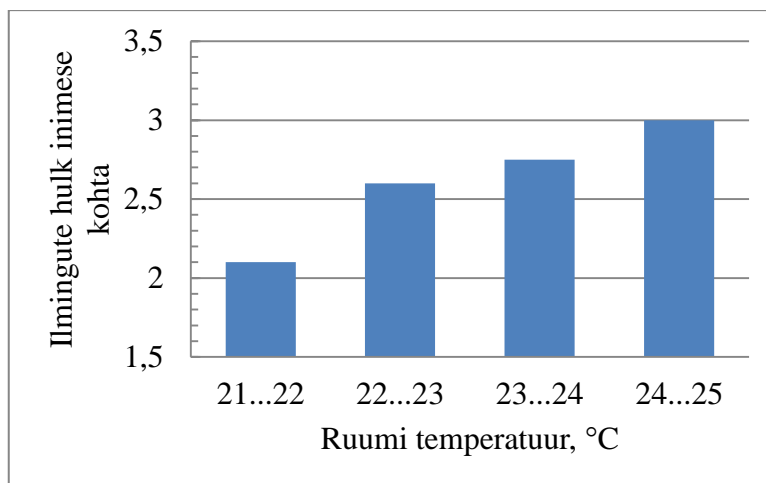
Tabel 1.1. Sisekliima klasside kirjeldus [6]

Sisekliima klass	Selgitus
I	Kõrged nõudmised sisekliima kvaliteedile. Soovitav ruumides, kus viibivad väga tundlikud, nõrga tervise ja erinõuetega inimesed, näiteks puuetega inimesed, haiged, väga väikesed lapsed ning eakad inimesed
II	Tavapärased nõudmised sisekliima kvaliteedile. Tuleks rakendada uutes ja renoveeritavates hoonetes
III	Mõõdukad nõudmised sisekliima kvaliteedile. Võib rakendada olemasolevates hoonetes
IV	Sisekliima kvaliteedi väärtused, mis jäävad väljapoole eelmainitud klasse. Antud klass võib olla vastuvõetav ainult piiratud ajal aastast

Vastavalt sisekliima klasside klassifikatsioonidele kuuluvad enamused hooneid teise ja kolmandasse klassi. Uute hoonete projekteerimisel peaks jälgima teise sisekliima klassi nõudeid. Samuti peaks teise klassi nõudeid jälgima olemasolevate hoonete renoveerimisprojektide koostamisel. Sisekliima klasside puhul kasutatakse ka tähistusi A, B ja C, mis on vastavalt I, II ja III klass. Hoone sisekliima parameetrid ei tohi rohkem kui 3% kasutusajast ületada vastava sisekliima klassile ettenähtud parameetreid. 3% nõue kehtib nii päevase, nädalase, kuise ja aastase arvestuse puhul. Näiteks juhul kui hoonet või ruumi kasutatakse 8 tundi päevas, siis võivad sisekliima parameetrid ületada etteantud vahemikku päeva jooksul kokku 15 minutit. Kuu jooksul võivad sisekliima parameetrid ületada etteantud vahemikke või piirväärtusi 5 tundi nädalas ja aasta jooksul 61 tundi arvestusega, et hoonet kasutatakse 8 tundi päevas 5 päeva nädalas. [8, 9]

1.2. Õhutemperatuur, pindade temperatuur, operatiivtemperatuur

Ruumi temperatuur on tähtsaim komponent sisekliima kujundamisel. Kuna inimese temperatuuritundlikkus on kõrgelt arenenud, kujuneb hinnang sisekeskkonnale suuresti just temperatuurist. Keskkonna temperatuuril, kus inimene viibib, on suur mõju tema tervisele. Liiga kõrge temperatuur tekitab siseelundite temperatuuri tõusu. See tekitab omakorda kuumarabandust, vedelikupuudusest tulenevat kuumaväsimust ja ekstreemjuhtudel, nagu kuumalained, ka südameatakke. Liiga madalad temperatuurid tekitavad inimestel ebameeldivat külmatunnet. Haiged ja vanurid on madalale temperatuurile tundlikumad. Mida kõrgem on temperatuur seda rohkem esineb haige hoone ilmingute hulk. Seos sisetemperatuuri ja haige hoone ilmingute vahel on näha joonisel 1.1. [7]



Joonis 1.1. Seos ruumi temperatuuri ja haige hoone ilmingute vahel [7]

Ruumi temperatuuril on mõju inimese vaimsele ja füüsilisele teovõimele. Kusjuures füüsiline teovõime langeb temperatuuri tõustes kiiremalt kui vaimne. Rohkem füüsilist tööd tegevad inimese vajavad pigem jahedamat temperatuuri ja vaimset tööd tegevad pigem kõrgemat ruumitemperatuuri. Liiga madal temperatuur pärsib inimese näpuosavust. Nõuded ruumi õhutemperatuurile on toodud tabelis 1.2. Inimese mugavustunde tagamisel on tähtis ka õhutemperatuuri vertikaalse erinevus. Tabelis 1.3 on toodud nõuded maksimaalsele õhutemperatuuride erinevusele mõõdetuna 0,1 ja 1,1 m kõrguselt põrandast. [7, 8]

Tabel 1.2. Soovituslikud ruumitemperatuurid hoone kütte- ja jahutusperioodil [9]

Hoone või ruumi tüüp	Sisekliima klass	Temperatuurivahemik kütmisperioodil, °C	Temperatuurivahemik jahutusperioodil, °C
Auditooriumid, kontori-, konverentsi ja klassiruumid	I	21,0...23,0	23,5...25,5
	II	20,0...24,0	23,0...26,0
	III	19,0...25,0	22,0...27,0

Tabel 1.3. Maksimaalne lubatud vertikaalse õhutemperatuuri erinevus [8]

Sisekliima klass	Vertikaalne õhutemperatuuri erinevus, °C
I	< 2
II	< 3
III	< 4

Inimese kehalt eraldub soe lisaks konvektsioonile ka kiirguse teel. Seetõttu mõjutab õhutemperatuuri kõrval inimese soojuslikku tunnetust ka teda ümbritsevate pindade temperatuur ehk kiirgustemperatuur. Inimesed on tundlikud just erinevate pindade kiirgustemperatuuri asümmeetriale. Enim tekitab ebamugavustunnet õhutemperatuurist soojem lagi või külm sein. Standard EVS-EN ISO 7730:2006 sätestab maksimaalsed lubatud kiirgustemperatuuri asümmeetriad erinevatele pindadele, need on toodud tabelis 1.4. Lisaks on samas standardis antud temperatuurivahemik põrandapinnale, need on toodud tabelis 1.5. [7, 8]

Tabel 1.4. Kiirgustemperatuuride maksimaalne lubatud asümmeetria [8]

Sisekliima klass	Kiirgustemperatuuri asümmeetria, °C			
	Soe lagi	Külm sein	Külm lagi	Soe sein
I	< 5	< 10	< 14	< 23
II	< 5	< 10	< 14	< 23
III	< 7	< 13	< 18	< 35

Tabel 1.5. Põrandapinna lubatud temperatuurivahemik [8]

Sisekliima klass	Põranda pinnatemperatuur, °C
I	19...29
II	19...29
III	17...31

Kuna inimese soojustunnet mõjutab nii konvektsioon kui soojuskiirgus, siis on tähtis sobiva ruumitemperatuuri hindamisel arvestada neid mõlemaid. Näiteks soojust kiirgava seinaga ruumis on mugavustunde saavutamiseks vaja madalamat õhutemperatuuri kui ruumis, kus soojust kiirgav sein puudub. Temperatuuri, mis võtab arvesse kiirguse ja õhutemperatuuri koosmõju, nimetatakse operatiivtemperatuuriks. See on temperatuur, mida inimene tegelikult tunnetab. Standardis EVS-EN ISO 7730:2006 on toodud nõuded operatiivtemperatuuridele kütte- ja jahutusperioodil (tabel 1.6). [7, 8]

Tabel 1.6. Operatiivtemperatuur erinevatele sisekliima klassidele [8]

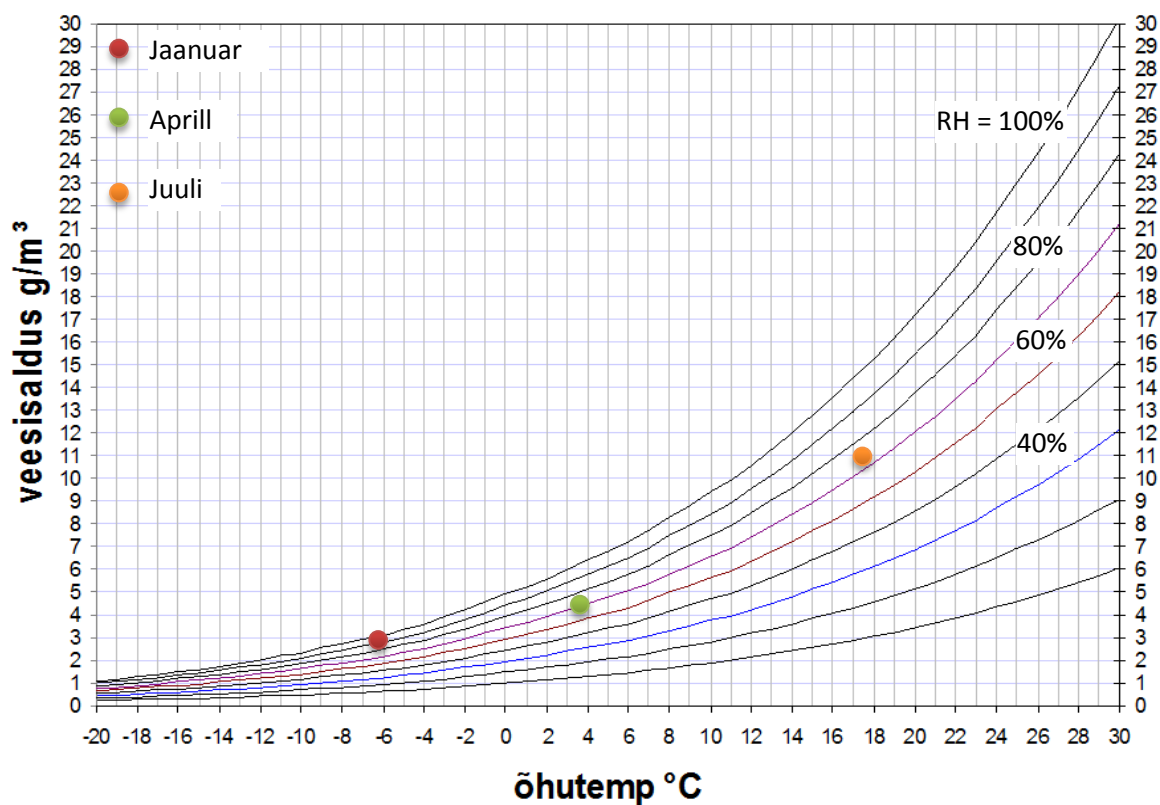
Hoone või ruumi tüüp	Sisekliima klass	Operatiivtemperatuur, °C	
		Suvel (jahutusperiood)	Talvel (kütmissperiood)
Kontoriruumid, konverentsiruumid, auditooriumid, klassiruumid	I	24,5 ± 1,0	22,0 ± 1,0
	II	24,5 ± 1,5	22,0 ± 2,0
	III	24,5 ± 2,5	22,0 ± 3,0

1.3. Õhuniiskus

Võimalusi väljendamaks õhuniiskust ehk veeauru hulka õhus on mitmeid. Kasutatakse veeauru absoluutset hulka õhus (ühikuks g/m^3), veeauru osarõhku õhus (ühikuks Pa) ja suhtelist õhuniiskust (tähis RH). Viimane väljendab protsentides õhuniiskust maksimaalsest võimalikust õhuniiskusest antud temperatuuril. Õhu veeauru mahutavus sõltub temperatuurist ja on seda suurem, mida kõrgem on õhu temperatuur. [5]

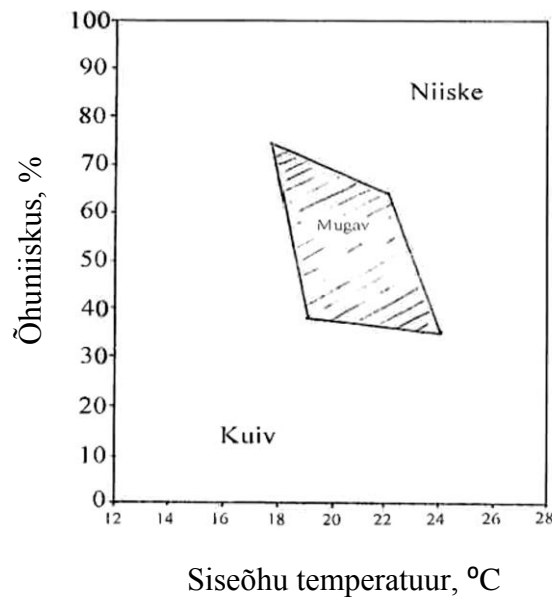
Kuigi inimesel küll puudub otsene meel õhuniiskuse tunnetamiseks, tajub ta seda siiski ja see mõjutab tema mugavustunnet ja hinnangut ruumi sisekliimale. Tähtis on märkida, et tajutakse mitte absoluutset, vaid suhtelist õhuniiskust. Näiteks viibides välistingimustest 2-kraadise õhutemperatuuri ja 100% õhuniiskuse juures tundub see inimestele ebameeldivalt niiskena, kuigi veeauru sisaldus on sellistel tingimustel vähem kui $6 g/m^3$. Olles aga ruumis, kus on õhuniiskus 40% ja õhutemperatuur 20 kraadi, tunnetavad enamik inimesi sisekliimat liiga kuivana, kuigi veeauru hulk õhus on sellises ruumis $7 g/m^3$. [5, 10]

Ruumi õhuniiskust mõjutavad mitmed tegurid nagu ventilatsiooni toimimine, inimeste kohalolek ruumis ja nende ainevahetusliku aktiivsuse tase ning niiskustootlus ruumis. Kuivõrd õhu veemahutavus sõltub õhutemperatuurist, on siseõhu niiskus ka sõltuv välisõhu temperatuurist. Seos õhu veesisalduse, õhutemperatuuri ja suhtelise niiskuse vahel on toodud joonisel 1.2. Joonisele on märgitud jaanuari, aprilli ja juuli keskmised õhute õhutemperatuurid ja -niiskused Tartus Eesti kliimateatmiku põhjal. Niiskustootlust ruumis mõjutavad inimeste elutegevus, toidu valmistamine, pesemisharjumused, taimede



Joonis 1.2. Veesisaldus õhus sõltuvalt temperatuurist ja suhtelisest niiskusest

kastmine jne. Õhuniiskus mõjutab inimese hinnangut sisekliimale peamiselt läbi suhtelise õhuniiskuse tunnetuse. Samas on suhtelise õhuniiskuse mõju ümbritseva õhu temperatuuri tunnetusele suhteliselt väike. Enamikule inimestele on 10% suhtelise õhuniiskuse tõus tuntav 0,3 °C õhutemperatuuri tõusuna. Inimesed peavad niisket õhku meeldivamaks. Samas peetakse niisket ja sooja õhku kvaliteetsemaks kui kuiva ja jahedat. Soovituslikud õhuniiskuse suurused olenevalt sisetemperatuurist on antud joonisel 1.3. [8, 11, 12, 13]

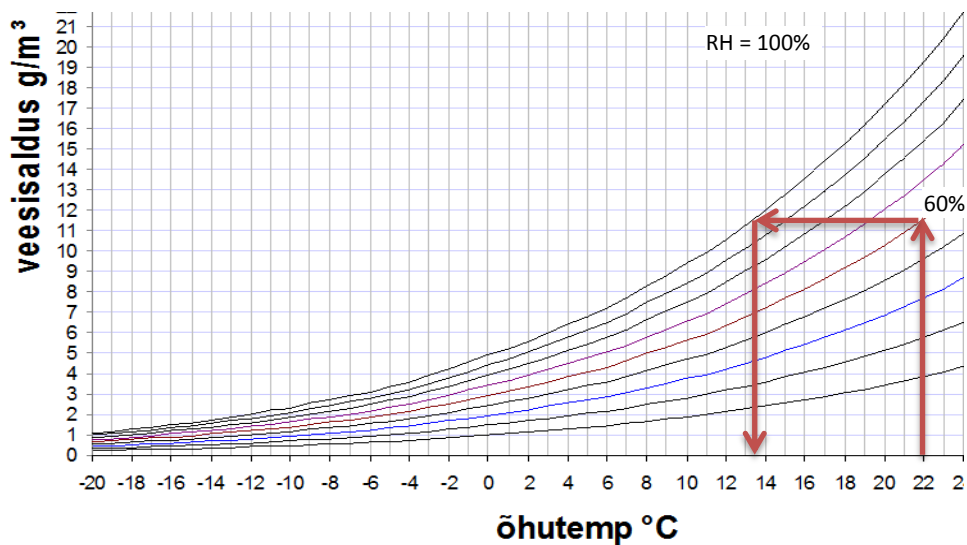


Joonis 1.3. Suhtelise niiskuse soovitatavad väärtused olenevalt sisetemperatuurist [5]

Eesti oludes on välisõhu suhteline niiskus enamasti kõrge. Suveperioodil on suhteline õhuniiskus kõrge ka ruumides, kuid talvel on RH ruumides madal. Kuu keskmine suhteline õhuniiskus Eestis on 70...80%. Esineb pikki perioode, kus välisõhus RH=100% lähedal. Liiga kuivaks peetakse olukorda, kus RH < 20% ja liiga kõrgeks rohkem 70% õhuniiskust. Talvel vähendab ruumide suhtelist õhuniiskust ka kütmine. Liiga madal ja liiga kõrge suhteline õhuniiskus mõjutab otseselt või kaudselt inimese tervist tekitades mitmeid haige hoone sündroomiga soendatavaid terviseprobleeme. Liiga madal suhteline õhuniiskus tekitab naha, hingamisteede ja limaskestade kuivust ning silmade ärritust. Madal õhuniiskus kahjustab ka hingamisteid. Nimelt on tolmu eralduvus pöördvõrdelises seoses õhu niiskusprotsendiga. Madala suhtelise õhuniiskuse korral on õhus rohkem tolmu, seega satub rohkem lenduvaid orgaanilisi osakesi kopsudesse. Lisaks esineb ka hingamisteede infektsioone sagedamini madalama suhtelise õhuniiskuse korral. Madal suhteline niiskus suurendab staatilise elektriga seotud probleeme. [9, 5, 11, 12]

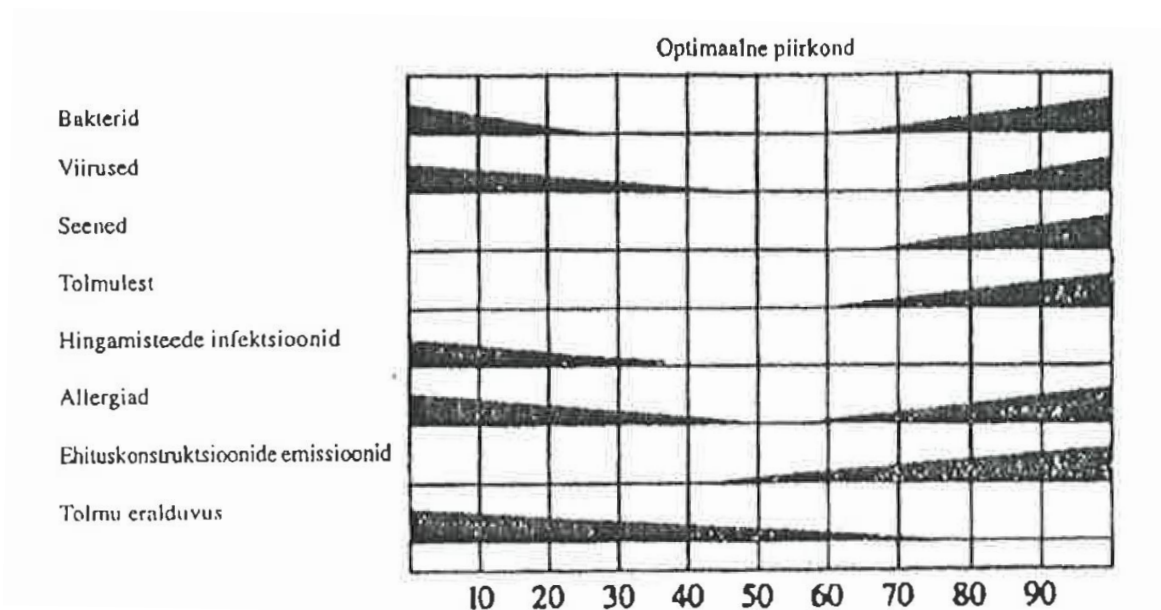
Liiga kõrge suhteline õhuniiskus kahjustab lisaks inimeste tervisele ka hoone konstruktsioone. Kõrge suhteline õhuniiskus soodustab mikroorganismide paljunemist ja levikut. Niiskuskahjustustega ruumides viibivatel inimestel esineb sagedamini ülemiste hingamisteede limaskestade tundlikkust. Lisaks soodustab kõrge suhteline niiskusprotsent allergiliste haiguste teket. Sõltuvus erinevate kahjulike emissioonide ja suhtelise õhuniiskuse vahel on toodud joonisel 1.5. Kõrge suhtelise õhuniiskuse korral suureneb

ehitusmaterjalidest ja sisustusest õhku paiskuvate saasteainete hulk. Hoonele on kõrge niiskus kahjulik seente tekkimise ja kondenseerumisohtu tõttu. Kondenseerumisohtu on võimalik määrata vastavate graafikute abil. Näiteks juhul kui ruumi temperatuur on 22 °C ja suhteline õhuniiskus 60%, siis toimub kondenseerumine pinnale, mille temperatuur on madalam kui 13,5 °C (joonis 1.4). [7, 12, 14]



Joonis 1.4. Veesisaldus õhus sõltuvalt temperatuurist ja suhtelisest niiskusest

Isegi kui nähtavat kondenseerumist ei esine, on olemas oht hallituse levikule. Tüüpilised hallituse tekkimise kohtadeks on külmasillad ja märjad ruumid. Eriti on vaja ruumi kuivatamisele tähelepanu pöörata saunas ja vannitoas. Jooniselt 1.5 on näha, et bakterite ja viiruste levik ning allergiate esinemine suureneb nii väga kõrge kui ka väga madala õhuniiskuse korral. Nende leviku vähendamiseks on vaja valida optimaalne õhuniiskuse tase. Hallituseente ja bakterite leviku aktiivsus vastavalt õhuniiskusele on konkreetsest liigist. Liiga kõrget ruumi õhuniiskust on enamasti võimalik vältida piisava õhuvahetusega. [7, 12, 14]



Joonis 1.5. Suhtelise niiskuse soovitatavad väärtused olenevalt sisetemperatuurist [3]

Tabel 1.7 Soovituslikud suhtelise õhuniiskuse väärtused inimestega hõivatud ruumides [9]

Sisekliima klass	Soovituslik maksimaalne suhteline õhuniiskuse, %	Soovituslik minimaalne suhteline õhuniiskuse, %
I	50	30
II	60	25
III	70	20
IV	> 70	< 20

Tabelis 1.7 on antud erinevatele sisekliima klassidele vastavad soovitatavad õhuniiskuse piirid. Tabel on mõeldud hoonetele või ruumidele, kus sisekliima kriteeriumid pannakse paika vastavalt inimeste mugavustundele. Erijuhtudele, nagu näiteks kirikud ja muuseumid, antud tabel ei kehti. [9]

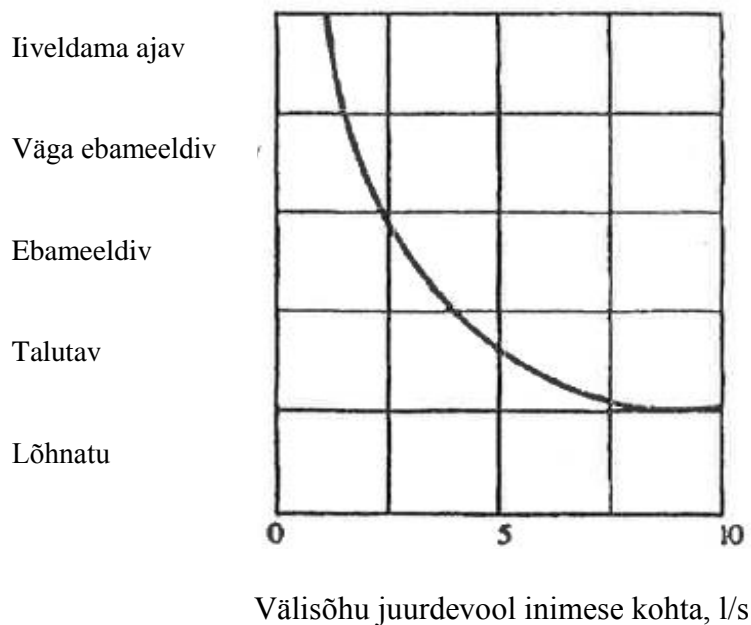
1.4. Õhu liikumiskiirus ja ventilatsiooni vooluhulk

Õhk ruumis liigub – esmalt loomuliku konvektsiooni ja „korstnaefekti“ tõttu. Seda mõjutab pindade, eriti küttekehade, temperatuur, külma õhu sisstungimine jne. Ka mehaaniliselt ruumi puhutav ja/või väljatõmmatav õhk mõjutab ruumiõhu voogusid. Ventilatsiooni mõju ruumile oleneb sissepuhke õhuvooluhulgast ja kiirusest. Õhu liikumist mõjutavad ka soojad ja jahedad pinnad, mis vastavalt tõstavad või langetavad lähedaloleva õhu temperatuuri. Selline temperatuurimuutus paneb õhu ruumis liikuma. Suuresti mõjutab

õhu liikumist ruumis seal toimuv tegevus. Näiteks hõivatud ruumis seguneb õhk paremini kui tühjas ruumis ja seda just inimeste liikumise tõttu. Juhul kui ruumi siseneb õhk lae lähedalt võib juhtuda, et õhk ei segune korralikult allpool asuvate õhukihtidega. Kui ka väljatõmbeava asub lae lähedal, siis on oht, et osa sissepuhutavat õhku ei jõuagi alumistesse ruumiõhu kihtidesse. Sellise olukorra tekkimise oht on suurem eluhoonetes. Ühiskondlikes hoonetes on üldjuhul vaja liigsoojust ruumidest eemaldada ja seetõttu on seal sissepuhutava õhu temperatuur ruumiõhu temperatuurist madalam ning sellisel juhul ruumiõhu kihistumise ohtu üldjuhul ei ole. [15]

Kuigi ventilatsiooni kasutatakse ka ruumi temperatuuri ja niiskuse mõjutamiseks on selle põhiülesanne ruumi kogunenud saasteainete eemaldamine. Seetõttu on tähtis, et ruumi sissepuhutav õhk seguneks ruumiõhuga ega tekiks õhu kihistumist. Üldjuhul on saastuse tase ruumis ühtlane, kuid erandkorras, näiteks mõne saasteallika läheduses, võib saaste kontsentratsioon olla selle ümbruses kõrgem. Juhul kui tegemist on kõrge ruumiga ja jahe õhk siseneb ruumi põranda ligidalt, siis on oht ruumiõhu kihistumisele. Sellisel juhul kihistub ka ruumiõhus olev saaste. Termilise kihistumise eelduseks on ruumi kõrgus üle kolme meetri. Kuna ruumide kõrgus on harva üle kolme meetri, siis on termilise kihistumise oht väike. Juhul kui toimub hea ruumiõhu segunemine, on saasteainete kontsentratsioon väljatõmbeõhus lähedane saasteainete keskmisele kontsentratsioonile ruumiõhus. [3, 15]

Pikalt hõivatud ruumis püsib saasteainete kontsentratsioon enam-vähem samal tasemel. Ruumi hõivamise alguses hakkab saasteainete kontsentratsioon ruumiõhus tõusma kuni jõuab tasakaaluni. Tasakaal ventilatsiooniga eemaldatud saasteainete ja nende tekkimise vahel saavutatakse seda kiiremini mida suurem on ventilatsiooni õhuvooluhulk. Viimane mõjutab ka saasteainete kontsentratsiooni ruumiõhus. Mida suurem õhuvooluhulk, seda väiksem on saasteainete kontsentratsioon õhus kui on saavutatud tasakaal. Inimesed tunnetavad liiga väikest õhu juurdevooluhulka läbi selle, et ruum muutub nende jaoks umbseks. Ruumi umbsust tunnevad eriti just ruumi sisenevad inimesed. Seos värske õhu juurdevoolu ja inimeste hinnangu vahel on toodud joonisel 1.6. Jooniselt on näha, et minimaalne õhuvooluhulk, mille puhul on inimeste hinnang ruumiõhu kvaliteedile rahuldav, on kuskil 4,5 l/s inimese kohta. [16]



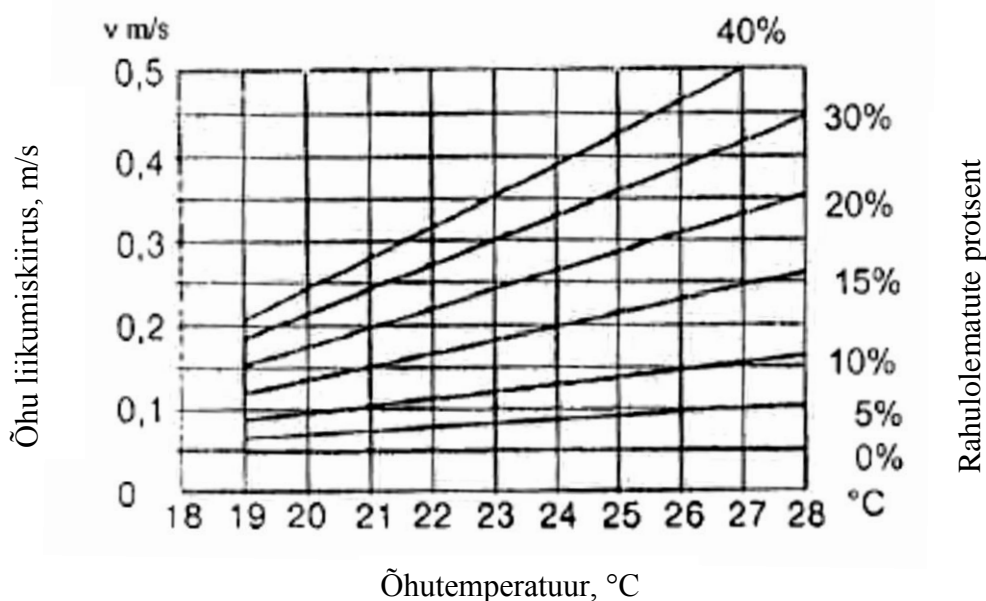
Joonis 1.6. Inimese hinnanguid värsket õhu juurdevoolu tasemele [3]

Üldjuhul määravad ventilatsiooni õhuvooluhulga suurused nõuded õhu kvaliteedile ja saasteainete eraldamise vajadus. Ventilatsiooni õhuvooluhulkade arvutamiseks on mitmeid meetodeid. Eesti standard EVS-EN 15251:2007 annab üheks võimaluseks kasutada samas standardis etteantud väärtuseid ventilatsiooni õhuvooluhulkadele inimese kohta ruumis vastavalt sisekliima klassidele. Õhuvooluhulgad on toodud tabelis 1.8. Antud tabel kehtib ainult mitteeluhoonete puhul. Tabelist on näha, et teise sisekliima klassi puhul on soovitatav õhuvooluhulk inimese kohta 7 l/s, mille puhul on arvestuslikult 20% inimesi, kes tunnevad ebamugavustunnet. Jooniselt 1.6 on näha, et isegi kui õhuvooluhulk on 7 l/s inimese kohta, siis on inimeste hinnang ruumiõhu puhtusele pigem vaid talutav. Alates 9 l/s inimese kohta on piir, kust alates hakatakse ruumiõhu puhtust hindama lõhnatuks. Tabelist 1.8 on näha, et esimese sisekliima klassi puhul on soovitatav õhu vooluhulk inimese kohta 10 l/s. Nii suure õhuvooluhulga juures võivad aga hakata tekkima probleemid tõmbusega. See on üks põhjus miks isegi nii suure õhuvooluhulga juures on ebamugavust tundvate inimeste arvestuslik protsent 15. [9]

Tabel 1.8. Soovituslikud ventilatsiooni õhuvooluhulgad mitteeluhoonetele [9]

Sisekliima klass	Eeldatav ebamugavust tundvate inimeste protsent	Õhu vooluhulk inimese kohta, l/s/inim
I	15	10
II	20	7
III	30	4
IV	> 20	< 4

Lisaks õhuvooluhulgale on ventilatsiooni puhul tähtis näitaja ka õhu liikumiskiirus. Seda eelkõige tõmbuse tekkimise tõttu. Inimesed tunnetavad tõmbust ja seetõttu on sellel suur mõju nende sisekliima tunnetusele. Tõmbustunne tekib nahal kui esineb keskmisest tugevam soojusülekanne. Lisaks õhuliikumisele avaldab inimese soojusülekandele mõju ka soojuskiirgus, kuid selle mõju on õhu liikumisest väiksem. Mida suurem on kiirguskadu seda suurem on soojuse ülekandumine ja see suurendab tõmbusetunnet. Näiteks külma akna lähedal istumine tekitab suuremat soojusülekannet ja seeläbi tõmbusetunnet. Tõmbusetunnet suurendab ka ruumiõhu liikumise muutumine. Suurem muutus õhu liikumissuunas tekitab suuremat tõmbusetunnet. Seos õhu liikumiskiiruse ja rahulolematute protsendi vahel on näha joonisel 1.7. [7]



Joonis 1.7. Õhu liikumiskiiruse mõju inimese rahulolule [7]

Joonisel 1.7 on näha, et rahuolematute arvu mõjutab ka temperatuur. Inimesed tajuvad soojemas ruumis õhu liikumist meeldivamana. Näiteks olukorras, kus ruumi õhutemperatuur on 19 °C ja õhu liikumiskiirus 0,15 m/s on rahulolematuid 20%. Sama õhu liikumiskiiruse juures, kuid õhutemperatuuril 21 °C on rahulolematuid 15%. Tõmbusele kõige tundlikum inimkeha osa on kael. Kui õhujuga tuleb inimesele näkku või jalgadele on see talutavam kui kaelale suunatud õhujuga. Joonisel 1.7 olevad rahulolematute protsendid on antud kaelale mõjuva tõmbuse puhul. Juhul kui tõmbus mõjub mõnele muule keha piirkonnale on rahuolematuid vähem. [7]

Tabel 1.9. Erinevat tüüpi ja erineva soojusliku mugavuse klassiga ruumides soovituslikud õhu liikumise piirkiirused [6]

Hoone või ruumi tüüp	Soojusliku mugavuse klass	Õhu soovituslikud piirkiirused ruumides, m/s	
		Suvel	Talvel
Elamud, bürood, auditooriumid, konverentsiruumid, kohvikud, restoranid	I	0,18	0,15
	II	0,22	0,15
	III	0,25	0,21
	IV	-	-

Eesti standard EVS 916:2012 annab erineva soojusliku mugavuse klassiga ruumidele soovituslikud õhu liikumise piirkiirused (tabel 1.9). Antud piirkiirused olenevad hoone või ruumi kasutusotstarbest ja aastaajast. Standardis on märkusena öeldud, et tegelikud õhu piirkiirused olenevad oluliselt õhujugade ja ruumitemperatuuri suhtest, mitte aastaegadest. [6]

1.5. Soojuslik mugavus – PMV ja PPD

Iga inimene on erinev ja seetõttu on sisekliima parameetrid, mis iga inimese jaoks kõige sobilikumad, individuaalsed. Leidmaks sisekliima parameetrite väärtusi, mis tekitaksid võimalikult suurele osale ruumis viibivatele inimestele soojusliku mugavustunde, on kasutusele võetud PMV indeks. PMV (inglise k. *predicted mean vote*) ehk oodatav soojusliku mugavustunde indeks on enimkasutatav indeks, mis hindab hoone sisekliimat.

Inimene tunneb ennast ruumis soojuslikult hästi, kui tema kehas on soojuslik tasakaal. See tähendab, et inimese keha toodab sama palju soojust kui see eraldab ruumi. Inimeselt kandub soojus teda ümbritsevasse keskkonda kiirgusega, konvektsiooni teel (inimeselt jahedamasse õhku) ja aurumisega vee kaudu. Kui inimene eraldab ruumi rohkem soojust kui ta keha toodab on tal jahe või külm, s.t et ruumi temperatuuri peab tõstma. [5, 8, 17]

PMV indeks ennustab, kuidas ruumis olevad inimesed hindavad selle sisekliimat seitsmepunktilisel skaalal. Iga mugavustunde astmele on antud arvväärus ja PMV indeks ennustabki hinnangute keskmist arvulist tulemust. Soojusliku mugavustunde skaala ja seletused on toodud tabelis 1.10. Ideaalne hinnang ruumi sisekliimale, mille poole peab hoone projekteerimisel ja kasutamisel püüdlema, on neutraalne. Numbriline väärtus neutraalsele hinnangule on null, mis tähendab, et inimese keha on soojuslikult tasakaalus. [8]

Tabel 1.10 Soojusliku mugavustunde skaala [6]

+3	Kuum
+2	Soe
+1	Kergelt soe
0	Neutraalne
-1	Kergelt jahe
-2	Jahe
-3	Külm

PMV indeksi autor on Taani teadlane Povl Ole Fanger. Indeks põhineb eksperimendil, kus uuriti kliimakambriisse paigutatud inimeste mugavustunnet erinevatel sisekliima tingimustes. Antud eksperimendi tulemuste põhjal koostati valem, mis võtab arvesse õhutemperatuuri, keskmist kiirgustemperatuuri, õhu liikumiskiirust, suhtelist õhuniiskust, inimeste riietust ja ruumis toimuvat tegevust inimeste soojusliku mugavustunde ennustamiseks. [18]

Isegi juhul kui ruumi soojusliku mugavust hindavad enamus seal viibivad inimesed neutraalseks, leidub alati neid, kelle jaoks on see ruum kas liiga külm või liiga soe. Selliseid inimesi, kes hindavad ruumi soojuslikku mugavust mitterahuldavaks, on alati umbes 5%. See tähendab, et 20 inimesega ruumis on alati vähemalt üks inimene, kellel on

jahe või soe ja seda isegi siis kui ülejäänud inimesed on ruumi soojuslikku mugavust hinnanud neutraalseks. PMV indeks väljendab ruumis viibivate inimeste arvamust sisekliima kohta, kuid ei näita seda kui palju on inimesi, kes pole rahul ruumi sisekliimaga. Seetõttu pakkus Fanger välja PPD (inglise k. *predicted percentage of dissatisfied*) ehk soojusliku ebamugavuse tunnetuse protsendi. See väljendab protsentides inimeste osakaalu, kellel on ruumis jahe, külm, soe või palav. PMV ja PPD on omavahel seoses ja PPD-d on võimalik PMV-st tuletada. [3]

Tabel 1.11. Näited soovituslikest sisekliima klassidest mehaaniliselt köetud ja jahutatud hoonete projekteerimisel [9]

Sisekliima klass	Keha soojuslik seisund tervikuna	
	PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), %	Soojusliku mugavustunde indeks (Predicted Mean Vote)
I	< 6	-0,2 < PMV < +0,2
II	< 10	-0,5 < PMV < +0,5
III	< 15	-0,7 < PMV < +0,7
IV	> 15	PMV < -0,7; või +0,7 < PMV

Vastavalt PMV ja PPD väärtustele on võimalik hooneid jaotada sisekliima klassidesse. Erinevatele sisekliima klassidele vastavad PMV ja PPD väärtused on toodud tabelis 1.11. PMV väärtuse puhul on toodud vahemikud, mille sisse peab soojusliku mugavustunde indeks mahtuma, et hoone sisekliima vastaks teatud klassile. PPD puhul on toodud protsent, mida ei tohi sisekliimaga rahuolematute osakaal ületada. [9]

1.6. Kahjulike gaaside sisaldus õhus

Lisaks võib siseõhus leiduda teisi gaasilises olekus kahjulikke lisandeid. Neis gaasidest peetakse halva ruumiõhu kvaliteedi indikaatoriks just viimast – süsihappegaasi ehk süsinikdioksiidi. Formaldehüüde eritavad ruumiõhku seal olevad puitlastplaadi, liimid ja muud ehitus- ja sisustusmaterjalid. Saasteainete eraldumine nendelt on seda suurem, mida

suurem on ruumi niiskus. Formaldehüüdid tekitavad side- ja limaskestade ärritust, allergiaid. Loomkatsed on näidanud formaldehüüdide seost pahaloomuliste kasvajatega. Radioaktiivne radoongaas on suurem probleem Eesti põhjarannikul. Ruumiõhus olev radoongaas pärineb uraanisisaldusega maapinnast. Radoonituuma lagunemisel tekib alfakiirgus, mille läbistamisvõime on küll väike, kuid tema ioniseerimisvõime suur, mistõttu tekitab ta kopsudes DNA kahjustusi ja see omakorda võib saada põhjuseks pahaloomuliste kasvajate tekkele. [3, 16, 19, 20]

Ruumides tekitavad süsihappegaasi kontsentratsiooni tõusu seal viibivad inimesed. Kuna välisõhk sisaldab juba looduslikult alati süsihappegaasi, siis on ka ruumis sees alati teatud määral süsinikdioksiidi, seda ka juhul kui inimesi seal ei viibi. Süsinikdioksiidi kuhjumine viitab ebapiisavale ventilatsioonile ruumis. Kõrgest süsinikdioksiidi tasemest võib eeldada, et antud ruumis võib olla kõrges kontsentratsioonis ka teisi saasteaineid. [16, 19]

Inimesed eritavad süsihappegaasi nii läbi naha kui ka hingamise käigus. Iga inimene eraldab süsihappegaasi erinevas koguses ja päeva jooksul kõiguvad eralduvad süsihappegaasikogused väga suurel määral. Süsihappegaasi eraldamine oleneb inimese pikkusest, kaalust, ainevahetuslikust aktiivsusest. Suuresti mõjutab inimese süsihappegaasi eraldamist tema füüsiline aktiivsus. Inimese süsihappegaasi eritused olevalt füüsilisest aktiivsusest on näha tabelis 1.12. [11, 16]

Tabel 1.12. Inimese süsihappegaasi eritus [16]

Töö iseloom	CO ₂ eritus g/h	CO ₂ eritus l/h
Vaimne töö	45	23
Kerge füüsiline töö	60	30
Raske füüsiline töö	90	45
Liikuvad lapsed	24	12

Olenevalt allikast leidub inimese CO₂ erituse kohta erinevaid andmeid. Vaimset tööd tegeva inimese CO₂ erituseks võib leida ka 19 l/h ehk ligikaudu 10,4 mg/s (37 g/h). Juhul kui on teada süsihappegaasi sisaldus ja tootlus ruumiõhus, on võimalik tuletada ligikaudne ventilatsiooni õhuvooluhulk Q (m³/s) valemiga 1.1 [21]:

$$Q = \frac{G}{C_{in} - C_{out}}, \quad (1.1)$$

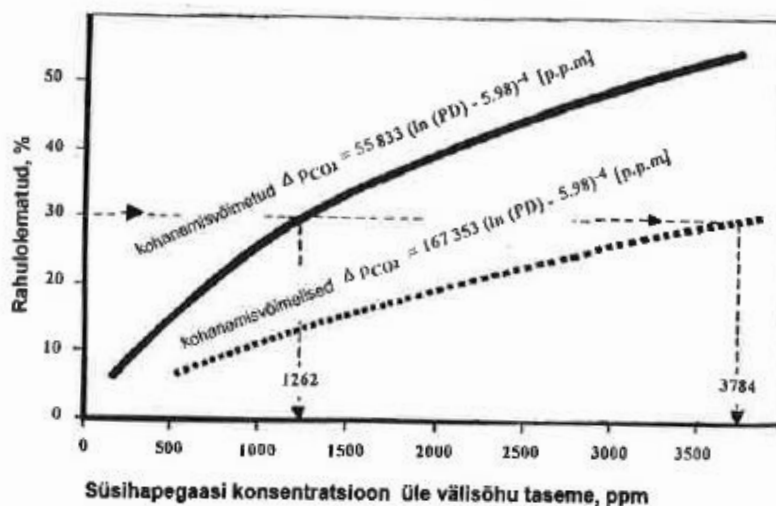
kus: G – süsihappegaasi toodang ruumi mg/s,

C_{in} – siseõhu CO₂ kontsentratsioon mg/m³,

C_{out} – välisõhu CO₂ kontsentratsioon mg/m³.

Tabel 1.13. Soovituslikud süsihappegaasi kontsentratsioonid ruumis esitatult üle välisõhu kontsentratsiooni [9]

Sisekliima klass	Vastav CO ₂ kontsentratsioon üle välisõhu taseme, väljendatuna ppm-des (miljondikosades)	CO ₂ kontsentratsioon välisõhu tasemel 400 ppm
I	350	750
II	500	900
III	800	1200
IV	> 800	> 1200



Joonis 1.8. Rahulolematute määr väikese kehalise aktiivsuse juures, avaldatud CO₂ kontsentratsiooni järgi üle välisõhu taseme [21]

Tabelis 1.13 on antud soovituslikud süsihappegaasi kontsentratsioonid erinevate sisekliima klassidele. Inimesed taluvad süsihappegaasi kontsentratsiooni tõusu erinevalt. Jooniselt 1.8 on näha seos ruumi õhuga rahulolematute inimeste hulga ja süsihappegaasi kontsentratsiooni vahel. Antud graafik peab paika ainult väikese kehalise aktiivsuse korral.

Kõrget süsihappegaasi kontsentratsiooni on seostatud peavalude, väsimuse, uimasuse, keskendumisraskustega. Samas on leitud seosed võrdlemisi nõrgad ja erinevate kaebuste põhjuseks on pigem teiste saasteainete kõrge kontsentratsioon, millest annab märku CO₂ kuhjumine. [22]

1.7. Piirete soojustehnilised omadused

Hoonete välispiirded peavad olema piisavalt soojustatud ja õhkupidavad, et siseruumides oleks mõistlike vahenditega võimalik tagada sobilik sisekliima. Piirde soojapidavust väljendatakse piirdetarindi soojusjuhtivusega ehk U-arvuga ($W/m^2 K$), mis näitab soojusvoolu vattides läbi ühe m² pinnaga tarindi juhul kui sise- ja välistemperatuuride vahe on üks K. [23]

Hoone välispiirete soojuslik inertts mõjutab ruumide temperatuuride tõusu ja langust ning piirab neid. Soojuslik inertts oleneb tarindi soojusmahtuvusest ja soojapidavusest. „Soojuslik inertts vähendab välise temperatuurikõikumise lainetuse kõrgust ja kiirust, see tähendab, et aeglustab hoone välispinna temperatuurikõikumise mõju hoone siseseinal ja selle toimumise aega“ [24]. Soojusliku inertsi mõjul jõuab suvepäeva kõrgeima välistemperatuuri mõju hoone sisse alles siis, kui välisõhu temperatuur on ületanud päeva maksimumi ja on hakanud langema. Sellega luuakse parem sisekliima. [24]

Materjali soojamahtuvuse all mõistetakse omadust, kus materjal salvestab endasse soojenemisel soojust, mis jahtumisel ümbritsevasse keskkonda tagasi antakse. Materjali soojamahtuvust väljendatakse soojaerimahtuvusega c (j/K), mis on vajalik soojuse hulk, mis on tarvilik, et soojendada üks kg antud materjali ühe K võrra. Mida suurem on materjali tihedus, seda suurem on selle soojaerimahtuvus. Materjali soojaerimahtuvus oleneb ka selle niiskusest. [25, 26]

2. TÖÖ EESMÄRK JA ÜLESANDED

Töö eesmärgiks on uurida hoone sisekliima parameetrite dünaamikat, leida parameetrite omavahelisi seoseid ja hoone konstruktsioonide mõju ning pakkuda välja sisendid küberfüüsikaliste süsteemide tarvis. Töö teiseks eesmärgiks on anda ülevaade sisekliimat puudutavatest regulatsioonidest ja standarditest.

Nende eesmärkide täitmiseks on vaja täita järgmised ülesanded:

- 1) hoone sisekliima parameetrite (õhutemperatuur, õhuniiskus, süsihappegaasi tase) monitooringuga valitud klassiruumides uurida erinevust ühe hoone ulatuses sõltuvalt ilmakaarest ja väliskliima parameetritest;
- 2) õhutemperatuuri ja -niiskuse monitooringu abil auditooriumi akna lähedal ja ruumis sees hinnata vastavat dünaamikat ruumi lõikes;
- 3) uurida parameetrite väärtusi sõltuvalt erinevatest mõjuritest: küttesüsteem, päike, ruumi asustus;
- 4) uurida piirde massiivsuse mõju: siseõhu- ja pinnatemperatuuri ning välisõhutemperatuuri omavaheline seos. Uurida piirde soojusjuhtivuse dünaamikat lähtuvalt väliskliima parameetritest.

3. MATERJAL JA METOODIKA

3.1. Hoone kirjeldus

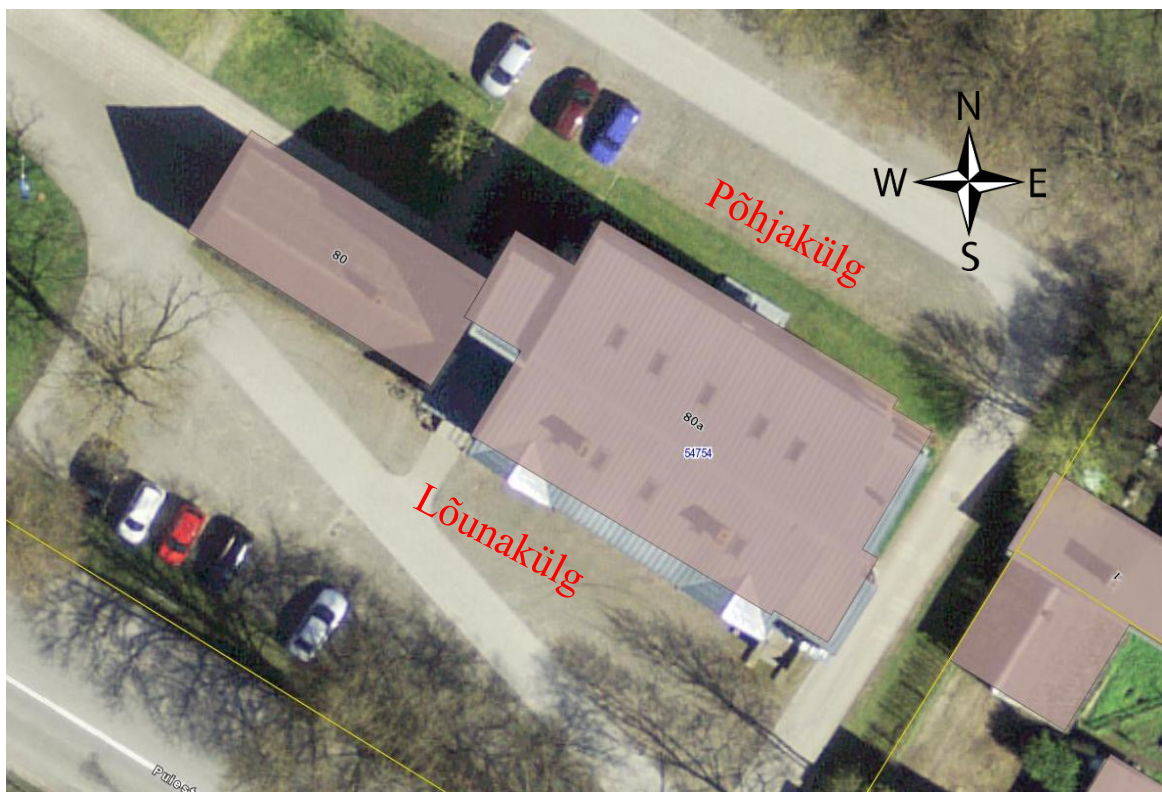
Uuritav hoone asub aadressil Puiestee 80a, Tartu. Antud hoone on Tallinna Tehnikaülikooli Tartu Kolledži kompleksi kuuluv õppehoone (joonis 3.1 ja 3.2). Tegemist on 1929. aastal ehitatud kahekorruselise telliskivihoonega. Osaliselt on hoone all kelder ja lisaks pööningul välja ehitatud auditoorium ja bürooruumid. Hoone renoveeriti põhjalikult 2003. aastal. Hoone suletud netopind on 1947 m². Hoone paiknemine ilmakaarte suhte on näha jooniselt 3.3. Antud töös on hoone pikemad küljed jagatud tinglikult lõuna- ja põhjapoolseteks külgedeks (joonis 3.3).



Joonis 3.1. Puiestee 80a lõunakülg



Joonis 3.2. Puistee 80a põhjakülg



Joonis 3.3. Puistee 80a paiknemine ilmakaarte suhtes [40]

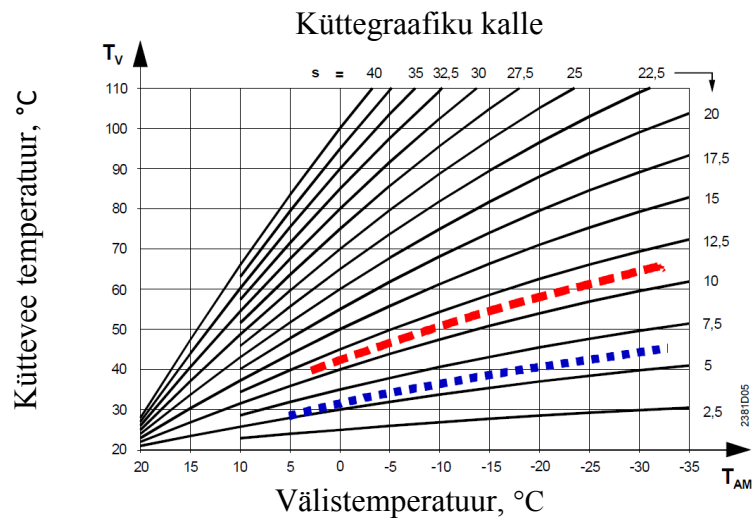
3.2. Sisekliima parameetrite üldine monitooring

Saamaks ülevaadet hoone sisekliimast ja uurimaks selle vastavust nõuetele viidi perioodil 28. aprill kuni 4. juuni 2015 läbi sisekliima mõõtmised. Mõõtmised viidi läbi neljas auditooriumis A102, A104, A203 ja A205. Auditooriumid A102 ja A203 asuvad hoone lõunapoolses küljes ja auditooriumid A104 ja A205 asuvad hoone põhjapoolses küljes. Auditooriumid A102 ja A104 asuvad hoone esimeel korrusel ja auditoorium A203 ja A205 asuvad hoone teisel korrusel. Auditooriumite A102, A104 ja A205 puhul on tegemist sarnase suurusega ruumidega. Auditoorium A203 on teistest uuritud ruumidest ligi kaks väiksem. Sisekliima nõuetele vastavuse arvutamisel on arvesse võetud hoone tavapärasel kasutusajal (tööpäevadel kella 8:00 kuni 18:00) teostatud mõõtmisi. Temperatuuri ja õhuniiskuse vastavuse uurimisel antud sisekliima klassi nõuetele on kasutatud auditooriumites tahvli ees mõõdetud andmeid. Välja on jäetud 1. mai, mis on riigipüha ja puhkepäev.

Perioodi jooksul mõõdeti igas ruumis õhutemperatuuri, õhuniiskust ja süsihappegaasi taset. Õhutemperatuuri ja õhuniiskust mõõdeti igas ruumis tahvli ees ja ühel aknalaual. Süsihappegaasi taset mõõdeti ainult tahvli ees. Andmete kogumise intervall oli 10 minutit. Väliskliima andmetena kasutati Tartu Ülikooli füüsikahoone katusel oleva ilmajaama andmeid. Mõõtmised viidi läbi hoone tavalises kasutusolukorras. Akende ja uste suletust ning aknakatete kasutust mõõtmiste käigus ei jälgitud. Inimeste arvu puhul on lähtutud tunniplaanist. Kütte normaalrežiimi ja ventilatsiooni töötamise kellaajad on toodud tabelis 3.1. Küttegaafiku kalde seadistusarvuks normaalrežiimil on 16 ja alandatud režiimil 15 (joonis 3.4). Öösiti ja pühapäeviti oli ventilatsioon väljalülitatud.

Tabel 3.1. Kütte normaalrežiimi ja ventilatsiooni töötamise kellaajad

Päev	Kütte normaalrežiimil töötamise kellaajad	Ventilatsiooni töötamise kellaajad
Esmaspäevast reedeni	7:00...18:00	9:00...17:00
Laupäev	9:00...17:00	9:00...14:00
Pühapäev	9:00...17:00	Ei tööta



Joonis 3.4. Küttegaafiku kalle [27]

Andmete kogumiseks kasutati kahte tüüpi mõõteseadmeid. Temperatuuri, õhuniiskuse ja süsihappegaasi mõõtmiseks ruumis kasutati Green Eye mudelit 7798 (joonis 3.5). Mõõteseadme peamised parameetrid on toodud tabelis 3.2. Aknalaua mõõtmise läbiviimiseks kasutati Hobo mudelit UX100-023 (joonis 3.6). Mõõteseadme peamised parameetrid on toodud tabelis 3.3.



Joonis 3.5. Green Eye 7798 [28]

Tabel 3.2. Mõõteseadme Green Eye 7798 peamised parameetrid [28]

Mõõteulatus	CO ₂ : 0...9999 ppm
	Õhutemperatuur: -10 °C...60 °C
	Õhuniiskus: 5,0%...95,0% RH
Tundlikkus	CO ₂ : 1 ppm
	Õhutemperatuur: 0,1 °C
	Õhuniiskus: 0,1% RH
Mõõtetäpsus	CO ₂ : 50 ppm ±5% lugemist
	Õhutemperatuur: ±0,6 °C
	Õhuniiskus: ±3% RH (25 °C juures õhuniiskusel 10...90%) ±5% RH (25 °C juures õhuniiskusel < 10% ja > 90%)

**Joonis 3.6.** Hobo UX100-023 [29]**Tabel 3.3.** Mõõteseadme Hobo UX100-023 peamised parameetrid [29]

Mõõteulatus	Õhutemperatuur: -20 °C...70 °C
	Õhuniiskus: 1%...100% RH
Tundlikkus	Õhutemperatuur: 0,024 °C temperatuuril 25 °C
	Õhuniiskus: 0,05% RH temperatuuril 25 °C
Mõõtetäpsus	Õhutemperatuur: ±0,21 °C vahemikus 0...50 °C
	Õhuniiskus: ±2,5% RH (õhuniiskusel 10...90%)

3.3. Küttesüsteemi ja päikese mõju õhutemperatuurile auditooriumis

Katse käigus uuriti küttesüsteemi ja päikese mõju sisetemperatuurile paralleelselt kahes auditooriumis. Katse eesmärk oli:

- 1) kontrollida küttesüsteemi automaatset reguleerimisvõimet vastavalt välistemperatuurile,
- 2) uurida päikesekiirguse võimet mõjutada sisetemperatuuri hoone lõuna- ja põhjapoolsetes külgedes asuvates auditooriumites.

Mõõtmised toimusid kahel järjestikkusel nädalavahetusel 23.–25. aprillini ja 30. aprillist kuni 2. maini. Mõlemad mõõteperioodid algasid südaööl ja lõppesid perioodi viimase päeva (esmaspäeva) hommikul kell 8:00 ehk enne õppetöö algust. Mõõtmisperioodide ajal olid auditooriumites ukсед ja aknad suletud ning inimesi ruumides ei viibinud. Mõõteseadmed pandi ülesse mõõteperioodidele eelnenud õhtul. Andmete kogumise intervall oli 10 minutit.

Mõõtmised toimusid auditooriumites A102 ja A105, millest esimene asub hoone lõunapoolses küljes ja teine põhjapoolses. Auditooriumid on kuju, põrandapinna, kõrguse, siseviimistluse ja sisustuse poolest sarnased. Mõlemas auditooriumis on võrdne arv aknaid (4 tk), radiaatoreid (4 tk) ja siseuksi (2 tk). Auditooriumis A102 on tume puitpõrand ja auditooriumis A105 on PVC kattega betoonpõrand. Erinev on ka siseuste materjal, mis auditooriumis A102 on puit ning auditooriumis A105 klaaspakett ja metall. Mõlemas auditooriumis on restaureeritud ühelaadsed puitaknad, mille õhutihedus võib olenevalt aknast varieeruda. Auditooriumi A105 akendele on paigaldatud tihendid, kuid auditooriumi A102 akendel tihendid puuduvad. Auditooriumites on kõikidel akendel samasugused aknakatted.

Uuritud hoonel on keskküte, mis on ühendatud kaugküttevõrku. Ruumide kütmine on lahendatud radiaatorite abil. Igal radiaatoril on küljes termostaatventiil. Hoone soojussõlme automaatika reguleerib kütteevee temperatuuri vastavalt välistemperatuurile, mida mõõdetakse hoone põhjapoolsele seinale paigutatud temperatuurianduritega. Küttesüsteem töötab kahel režiimil: normaalrežiimil ja alandatud režiimil. Normaalrežiimil töötamise kellaajad on toodud tabelis 3.4. Normaalrežiimivälistel kellaegadel töötab küttesüsteem

alandatud režiimil. Küttegaafiku kalde seadistusarvuks on normaalrežiimil on 16 ja alandatud režiimil 15 (joonis 3.4).

Tabel 3.4. Küttesüsteemi normaalrežiimil töötamise kellaajad nädalapäevade kaupa

Päev	Normaalrežiimil töötamise kellaeg
Esmaspäev	7:40...19:00
Teisipäev	7:40...21:00
Kolmapäev	7:40...19:00
Neljapäev	7:40...19:00
Reede	7:30...19:00
Laupäev	9:00...17:00
Pühapäev	9:00...17:00

Esimese mõõteperioodi jooksul uuriti küttesüsteemi toimimist ja selle mõju auditooriumite õhutemperatuurile. Mõõtmisperioodi ajal olid akendel eest aknakatted ja radiaatoritel termostaatventiilid keskmises asendis. Mõlemas auditooriumis mõõdeti õhutemperatuuri ruumi keskel 70 cm kõrgusel põrandast. Õhutemperatuuri mõõtmiseks auditooriumites kasutati mõõteriista Green Eye 7798 (joonis 3.5 ja tabel 3.2). Kummaski auditooriumis mõõdeti ühe radiaatori pinnatemperatuuri selle sissevoolutorult vahetult peale termostaatventiili. Pinnatemperatuuri mõõtmiseks kasutati termopaarandureid STS-BTA (joonis 3.7), mille peamised parameetrid on toodud tabelis 3.4. Pinnatemperatuuri andmete salvestamiseks kasutati Vernier LabQuest loggerit (joonis 3.8). Auditooriumis A105 asub keldris paiknevast soojussõlmest lähtuv kütte peatoru. Pinnatemperatuuri mõõdeti ka sellelt torult. Auditooriumis A102 mõõdeti pinnatemperatuuri ka enne termostaatventiili asetsevalt torult. Joonisel 3.9 on näha pinnatemperatuuriandurite asetust auditooriumis A102. Positsioon ühega on tähistatud anduri, mis mõõtis pinnatemperatuuri enne termostaatventiili, asukoht. Positsioon kahega on tähistatud anduri, mis mõõtis pinnatemperatuuri vahetult peale termostaatventiili, asukoht. Joonisel 3.10 on näha pinnatemperatuuriandurite asetust auditooriumis A105. Positsioon ühega on tähistatud anduri, mis mõõtis pinnatemperatuuri soojussõlmest lähtuvalt torult, asukoht. Positsioon kahega on tähistatud anduri, mis mõõtis pinnatemperatuuri vahetult peale radiaatori termostaatventiili, asukoht.



Joonis 3.7. Pinnatemperatuuriandur STS-BTA [30]

Tabel 3.4. Pinnatemperatuurianduri STS-BTA peamised parameetrid [30]

Mõõteulatus	-25 °C...125 °C
Tundlikkus	0,08 °C vahemikus -25... 0 °C 0,03 °C vahemikus (0...40 °C 0,10 °C vahemikus 40...100 °C 0,25 °C vahemikus 100...125 °C
Mõõtetäpsus	±0,2 °C temperatuuril 0 °C ±0,5 °C temperatuuril 100 °C



Joonis 3.8. Vernier LabQuest loendur [31]



Joonis 3.9. Temperatuuri pinnaandurite asukohad auditooriumis A102



Joonis 3.10. Temperatuuri pinnaandurite asukohad auditooriumis A105

Teise mõõteperioodi jooksul uuriti päikesekiirguse mõju auditooriumite õhutemperatuurile. Mõõtmisperioodi ajal polnud akendel katted ees ja radiaatorite termostaatventiilid olid suletud asendis. Õhutemperatuuriandurid paigutati sarnaselt eelmise perioodiga ruumi keskele ja need olid otsese päikesevalguse eest varjatud. Termostaatventiilide sulgumise kontrollimiseks mõõdeti ka seekord radiaatoritel pinnatemperatuuri vahetult peale termostaatventiili.

3.4. Sisekliima parameetrite dünaamika sõltuvalt ruumi asustusest

Katse käigus uuriti inimeste mõju hoone sisekliimale. Mõõdeti ruumiõhu temperatuuri, süsihappegaasi taset ja niiskust ruumi kahes piirkonnas. Üks mõõteseade oli paigutatud

ruumi etteossa umbes 1 m kaugusele seinast ja teine mõõteseade oli paigaldatud ruumi tagumisse ossa samuti umbes 1 m kaugusele seinast. Mõlemad mõõteseadmed olid paigaldatud 70 cm kõrgusele pörandast. Mõõtmisteks kasutati Green Eye mudelit 7798 (joonis 3.4 ja tabel 3.2). Andmete kogumise intervall oli 10 minutit.

Katse viidi läbi 27. aprillil 2016 auditooriumis A102. Antud päeval toimus auditooriumis kaks loengut. Esimene loeng algas tunniplaani järgi kell 10:05 ja teine loeng algas kell 14:15. Katse ajal olid akendel ees aknakatted, et minimaliseerida päikese mõju ruumitemperatuurile. Küte oli alates katsele eelnenud õhtust antud ruumis välja lülitatud. Katse käiku jälgis töö autor, kes märkis jooksvalt üles ruumis viibivate inimeste arvu ja kontrollis, et ukсед oleksid suletud ning aknakatted all. Uksed olid katse ajal lahti ainult inimeste ruumi sisenemise või väljumise ajal. Aknaid katse ajal ei avatud. Mõlema loengu keskel viidi läbi küsitlus, millega uuriti ruumis viibivate inimeste soojuslikku mugavustunnet. Küsitlusel kasutati soojusliku mugavustunde skaalat (tabel 1.10).

3.5. Piirete soojustehnilised näitajad

Lisaks eelpool toodud sisekliima uuringutest saadud informatsioonile on hoone toimimise seisukohast oluline info ka piirdekonstruktsioonide soojus- ja niiskustehnilised omadused. Uuringus käsitletud hoone puhul on tegemist homogeense tellisseinaga, mille soojusjuhtivus U ($W/m^2 K$) on vastavalt standardile EVS 908-1:2010 leitav valemiga [32]:

$$U = \frac{1}{R_t}, \quad (3.1)$$

kus R_t – piirdetarindi soojustakistus ($m^2 K$)/ W .

Piirdetarindi termiliselt homogeense kihi soojustakistus R ($W/m^2 K$) on leitav valemiga [32]:

$$R = \frac{d}{\lambda}, \quad (3.2)$$

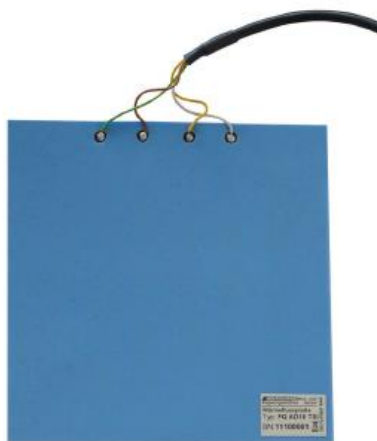
kus: d – seina paksus m ,

λ – materjali soojuserijuhtivus $W/(m K)$.

Piirdetarindi soojustakistuse arvutamisel tuleb arvestada ka sisepinna (R_{si}) ja välispinna (R_{se}) soojustakistusega, mis on horisontaalsel suunal vastavalt $0,13 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ ja $0,04 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Piirdetarindi soojustakistus R_t on piirde kõikide kihtide ja välins- ning sisepinna soojustakistuste summa. Keraamiliste telliste kohta võib leida erinevat informatsiooni. Vastavalt Tallinna Tehnikaülikoolis aastatel 1937...1938 läbi viidud uuringule on telliste, mille tihedus on $1800 \text{ kg}/\text{m}^3$, soojuseri juhtivus $\lambda 0,7 \text{ W}/(\text{m K})$ ehk $0,6 \text{ kcal}/(\text{m K})$. T. Masso raamatu „Väikemajad“ andmetel on 25 cm punastest tellistest seina soojustakistus $R 0,3 (\text{m}^2 \text{ K})/\text{W}$, millest võib tuletada materjali soojuseri juhtivuse väärtuse $\lambda=d/R=0,25/0,3=0,83 \text{ W}/(\text{m K})$. [32, 33, 34]

Uuritava hoone välisseina paksus on 0,64 m. Seega on võimalik arvutada piirdetarindi soojustakistus $R_t=R_{si}+d/\lambda+R_{se}=0,13+0,64/0,7+0,04=1,08$ ja $U=1/R_t=1/1,08=0,92 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Suurema soojuseri juhtivuse puhul $R_t=R_{si}+d/\lambda+R_{se}=0,13+0,64/0,83+0,04=0,94 (\text{m}^2 \text{ K})/\text{W}$ ja $U=1/0,94=1,06 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Vastavalt standardile EVS-EN ISO 10456:2008 on põletatud savi soojuseri mahtuvus $1000 \text{ kJ}/(\text{kg K})$. Arvestades ühest küljest seina massiivsusega ja teisest küljest sellega, et ruumigeomeetria tõttu ei ole kuigi palju pinda, mida saaks käsitleda muudmoodi kui ääreala, vajab piirde soojustehniline profiil tähelepanu. [35]

Katse käigus uuriti õppehoone välisseina soojusjuhtivust. Katse eesmärgiks oli hoone välisseina U -arvu väljaselgitamine. Katse toimus perioodil 4. märts kuni 21. märts 2016 auditooriumis A203. Välisseina soojusvoo mõõtmiseks kasutati Almemo soojusvooplaati (joonis 3.11). Sisetemperatuuri ja õhuniiskuse mõõtmiseks kasutati Almemo FHAD 46-2 andureid (joonis 3.12). Andurite peamised parameetrid on toodud tabelis 3.5. Andmete salvestamiseks kasutati Vernier LabQuest loggerit (joonis 3.8).



Joonis 3.11. Almemo soojusvooplaat [36]



Joonis 3.12. Almemo FHAD 46-2 andurid [37]

Tabel 3.5. Almemo FHAD 46-2 andurite peamised parameetrid [37]

Mõõteulatus	Õhutemperatuur: $-20\text{ °C} \dots 60\text{ °C}$
	Õhuniiskus: $5\% \dots 98\% \text{ RH}$
Mõõdetäpsus	Õhutemperatuur: $\pm 0,3\text{ °C}$ temperatuuril 25 °C $\pm 0,4\text{ °C}$ temperatuuril $10 \dots 40\text{ °C}$ $\pm 1,3\text{ °C}$ temperatuuril $-20 \dots 80\text{ °C}$
	Õhuniiskus: $\pm 1,8\% \text{ RH}$ (25 °C juures õhuniiskusel $10 \dots 90\%$)

Katse käigus mõõdeti soojusvoogu läbi hoone lõunakülje välisseina. Soojusvoo plaat oli paigaldatud seinale umbes 1,4 m kõrgusele põrandast. Temperatuuri ja niiskuse andur oli paigaldatud soojusvoo plaadi kohale. Välistemperatuuri andmetena kasutati Tartu Ülikooli füüsikahoone katusel oleva ilmajaama andmeid. Välisseina soojusjuhtivusarvu U ($\text{W}/(\text{m}^2\text{ °C})$) arvutamiseks kasutati valemit [38]:

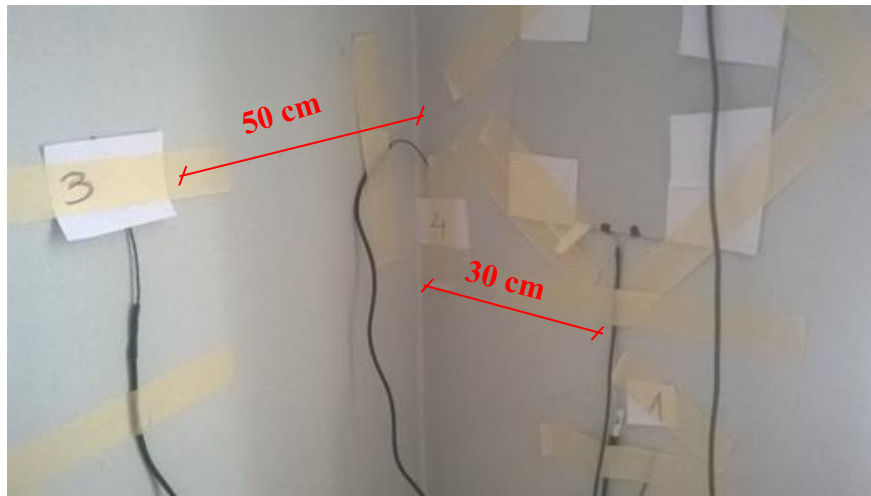
$$U = \frac{q}{T_{Li} - T_{La}}, \quad (3.3)$$

kus: q – soojusvoog W/m^2 ,

T_{Li} – sisetemperatuur $^{\circ}C$,

T_{La} – välistemperatuur $^{\circ}C$.

Antud valem on kasutatav ainult juhul kui välistemperatuur on stabiilne pika (vähemalt 2 päeva) mõõtmisperioodi jooksul.



Joonis 3.13. Mõõteseadmete paigutus auditooriumis A203



Joonis 3.14. Mõõteseadmete paigutus auditooriumis A203



Joonis 3.15. Mõõteseadmete paigutus auditooriumis A203

Kirjeldamaks piirde soojustehnilist profiili ja inertsit mõõdeti ka temperatuuri õhus ja erinevates kohtades ruumi A203 sisepindadel: andur nr. 1 oli sisepinnal soojusvoo plaadi lähedal, andur nr. 2 aknapõsel, nr. 3 siseseinal ja nr. 4 sise- ja välisseina liitumiskohas (joonised 3.13 kuni 3.15). Viimane on oluline koht vastava külmasilla kirjeldamiseks. Temperatuuride mõõtmiseks kasutati Almemo FHAD 46-2 andureid (joonis 3.12 ja tabel 3.5).

Külmasildade kriitilisuse määramiseks on kasutatud temperatuuriindeksi piirsuurust 0,65 (hallituse vältimise piir). Temperatuuriindeksit f_{Rsi} arvutatakse valemiga [39]:

$$f_{Rsi} = \frac{t_{sin} - t_{out}}{t_{in} - t_{out}}, \quad (3.4)$$

kus: t_{sin} – sisetemperatuur °C,

t_{out} – välistemperatuur °C,

t_{in} – sisetemperatuur °C.

4. TULEMUSED

4.1. Hoone sisekliima uuring

Tabelis 4.1 on auditooriumis A102 perioodil 28. aprill kuni 4. juuni mõõdetud sisekliima parameetrite jaotumine vastavalt standardites toodud soovituslikele väärtustele. Perioodi keskmine õhutemperatuur oli 21,6 °C. Maksimaalne õhutemperatuur oli 23,9 °C ja minimaalne 19,5 °C. Mõõtmisperioodi jooksul ruumi temperatuur 24 °C ei ületanud. 1% ajast oli ruumi temperatuur alla 20 °C. Auditooriumi keskmine suhteline õhuniiskus oli 37,5 %. Suuremat kui 60% niiskust auditooriumis ei mõõdetud, kuid 1,1% ajast oli niiskus madalam kui 20%. Minimaalne mõõdetud niiskus oli 17,7% ja maksimaalne 56,9%. Süsihappegaasi tase ületas lubatud piiri 0,1% juhtudel. Kõrgeim mõõdetud süsihappegaasi tase oli 1067 ppm.

Tabel 4.1. Temperatuuri, niiskuse ja süsihappegaasi mõõtmistulemuste jaotus auditooriumis A102

Parameetrid	Soovituslik väärtus või vahemik [9]	Mõõdetud keskmine väärtus	Parameetrite vahemikud	% kõigist mõõdetulemustest
Temperatuur, °C	20...24	21,6	> 24	0
			20...24	99
			< 20	1
Õhuniiskus, %	25...60	37,5	> 60	0
			25...60	98,9
			< 20	1,1
CO ₂ , ppm	900	440	> 900	0,1
			≤ 900	99,9

Tabelis 4.2 on auditooriumis A104 perioodil 28. aprill kuni 4. juuni mõõdetud sisekliima parameetrite jaotumine vastavalt standardites toodud soovituslikele väärtustele. Keskmine õhutemperatuur oli 21,5 °C. Maksimaalseks õhutemperatuuriks mõõdeti 24,1 °C ja minimaalseks 19,7 °C. Ruumi temperatuur ületas 24 °C 0,4% ajast ja 1,2% ajast see oli alla 20 °C. Keskmine suhteline õhuniiskus oli 38,4%. Suuremat kui 60% niiskust ei mõõdetud.

0,3% ajast oli suhteline õhuniiskus madalam kui 20%. Minimaalne niiskus ruumis oli 19,5% ja maksimaalne 59,2%. 1,4% juhtudel oli süsihappegaasi tase lubatust kõrgem. Maksimaalne mõõdetud süsihappegaasi tase oli 1662 ppm.

Tabel 4.2. Temperatuuri, niiskuse ja süsihappegaasi mõõtmistulemuste jaotus auditooriumis A104

Parameetrid	Soovituslik väärtus või vahemik [9]	Mõõdetud keskmine väärtus	Parameetrite vahemikud	% kõigist mõõtetulemustest
Temperatuur, °C	20...24	21,5	> 24	0,4
			20...24	98,4
			< 20	1,2
Õhuniiskus, %	25...60	38,4	> 60	0,0
			25...60	99,7
			< 20	0,3
CO ₂ , ppm	900	462	> 900	1,4
			≤ 900	98,6

Tabelis 4.3 on auditooriumis A203 perioodil 28. aprill kuni 4. juuni mõõdetud sisekliima parameetrite jaotumine. Keskmine siseõhu temperatuur oli 21,5 °C, maksimaalne 24,3 °C ja minimaalne 19,1 °C. Keskmine õhuniiskus oli 37,4%. Õhuniiskus püsis antud auditooriumis soovituslikus vahemikus 99,5% ajast olles 0,5% ajast vähem kui 20%. Minimaalne mõõdetud õhuniiskus oli 19,1% ja maksimaalne 54,8%. Süsihappegaasi tase ületas lubatud piiri 1,7% ajast. Kõrgeim mõõdetud süsihappegaasi tase oli 1246 ppm.

Auditooriumi A205 sisekliima mõõtmistulemuste jaotus on toodud tabelis 4.4. Keskmine temperatuur mõõtmisperioodi jooksul oli 21,7 °C. 1,8% ajast ületas temperatuur 24 °C ja 2,1% ajast oli madalam kui 20 °C. Maksimaalne õhutemperatuur oli 25,5 °C ja minimaalne 19,4 °C. Suhteline õhuniiskus püsis soovituslikus vahemikus 99,9% ajast olles vaid 0,1% ajast madalam kui 20%. Minimaalne mõõdetud õhuniiskus oli 19,8% ja maksimaalne 58,4%. Kõrgeim mõõdetud süsihappegaasi tase oli 1580 ppm ja 99,4% ajast oli süsihappegaasi tase ruumis lubatud piirides.

Tabel 4.3. Temperatuuri, niiskuse ja süsihappegaasi mõõtmistulemuste jaotus auditooriumis A203

Parameetrid	Soovituslik väärtus või vahemik [9]	Mõõdetud keskmine väärtus	Parameetrite vahemikud	% kõigist mõõdetulemustest
Temperatuur, °C	20...24	21,5	> 24	0,4
			20...24	93,7
			< 20	5,9
Õhuniiskus, %	25...60	37,4	> 60	0
			25...60	99,5
			< 20	0,5
CO ₂ , ppm	900	460	> 900	1,7
			≤ 900	98,3

Tabel 4.4. Temperatuuri, niiskuse ja süsihappegaasi mõõtmistulemuste jaotus auditooriumis A205

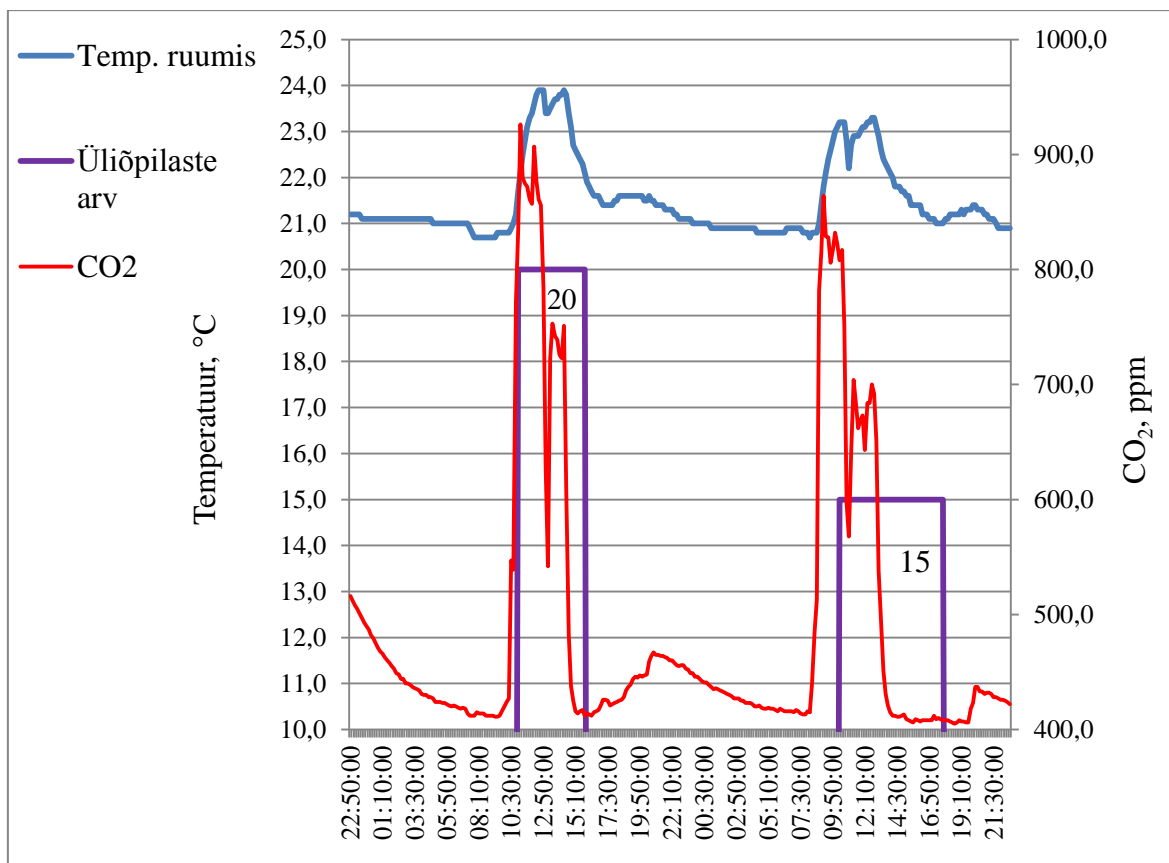
Parameetrid	Soovituslik väärtus või vahemik [9]	Mõõdetud keskmine väärtus	Parameetrite vahemikud	% kõigist mõõdetulemustest
Temperatuur, °C	20...24	21,7	> 24	1,8
			20...24	96,1
			< 20	2,1
Õhuniiskus, %	25...60	37,5	> 60	0
			25...60	99,9
			< 20	0,1
CO ₂ , ppm	900	453	> 900	0,6
			≤ 900	99,4

Mõõtmistulemustest selgub, et õppehoone vastab II sisekliima klassi nõuetele. Erandina oli enam kui 3% ajast soovituslikust vahemikust väljas auditooriumi A203 temperatuur, mis 6,4% ajast ei jäänud vahemikku 20...24 °C. Õhuniiskus ei olnud üheski auditooriumis soovituslikust vahemikust väljas rohkem ajast kui lubatud. Enim oli õhuniiskus soovituslikust vahemikust väljas auditooriumis A102, kus ületas soovituslikku vahemikku 1,1% ajast. Süsihappegaasi tase ületas lubatud piiri enim auditooriumis A203, kus 1,7%

ajast oli CO₂ tase kõrgem kui 900 ppm. Antud tulemuste juures peab arvestama, et arvutustes on arvesse võetud õppehoone kogu tavapärasest kasutusaega. Tegelikult pole kõik auditoriumid kogu päeva vältel kasutuses ja esineb ka päevi, kus mõnes auditoriumis õppetööd ei toimu. Seega tehakse samad arvutused, võttes arvesse ainult seda aega, kui ruumid on hõivatud, võivad tulemused tulla teistsugused. Võib arvata, et sellisel juhul tuleb soovituslikke väärtusi ületav aeg kõikide parameetrite puhul, kuid eriti temperatuuri ja süsihappegaasi sisalduse osas, suurem.

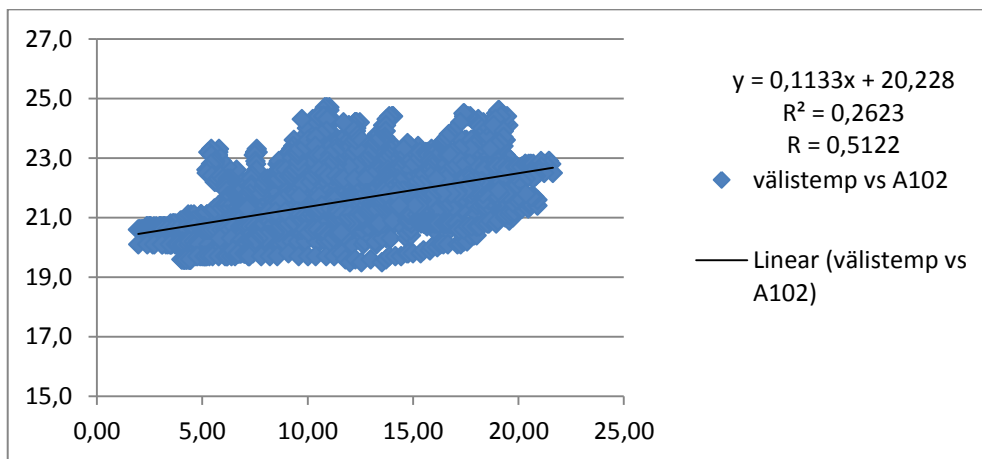
Läbi kogu mõõtmisperioodi (arvestades ka nädalavahetusi ja öid) jäid kõikide auditoriumite keskmised temperatuurid vahemikku 21,2...21,5 °C. Arvestades mõõteseadmete täpsust võib väita, et ruumide keskmised temperatuurid olid võrdsed. Võttes andmetest välja kindlad perioodid, siis on näha, et ruumide keskmised temperatuurid kõiguvad omavahel suuresti. Näiteks esimese kolme mõõtmispäeva keskmine õhutemperatuur auditoriumis A203 oli 20,9 °C ja auditoriumis A104 22,2 °C. Viimase kolme mõõtmispäeva keskmised õhutemperatuurid auditoriumis A203 oli 22,3 °C ja auditoriumis A104 20,4 °C. Seega ruum, mis teatud perioodil on kõige soojema keskmise õhutemperatuuriga ei pruugi seda olla mõnel teisel perioodil. Selle põhjuseks võib olla, et mõõtmisperioodi jooksul muudeti aknakatete ja/või radiaatorite termostaatventiilide asetust. Läbi kogu mõõtmisperioodi olid ruumide õhutemperatuuride liikumised omavahelises võrdluses väga erinevad ja ei kujunenud välja selgeid iseloomulikke jooni.

Õhutemperatuuri ruumis mõjutavad mitmed tegurid ja üldiste sisekliima mõõtmiste puhul ei saa eraldi välja tuua üksikute tegurite mõju. Küll on võimalik saadud tulemuste põhjal teha esialgseid oletusi erinevate tegurite mõju osas. Näiteks joonisel 4.1 on näha, et auditoriumi temperatuur tõuseb ja langeb vastavalt ruumi asustusele. Arvestades, et tegemist on hoone põhja pool asuva auditoriumiga, on vähetõenäoline, et ruumi temperatuuri tõstis nii suurel määral (2...3 °C) ainult päikesekiirgus. Seega on põhjust arvata, et ruumi temperatuurile avaldab arvestatavat mõju selle asustus.

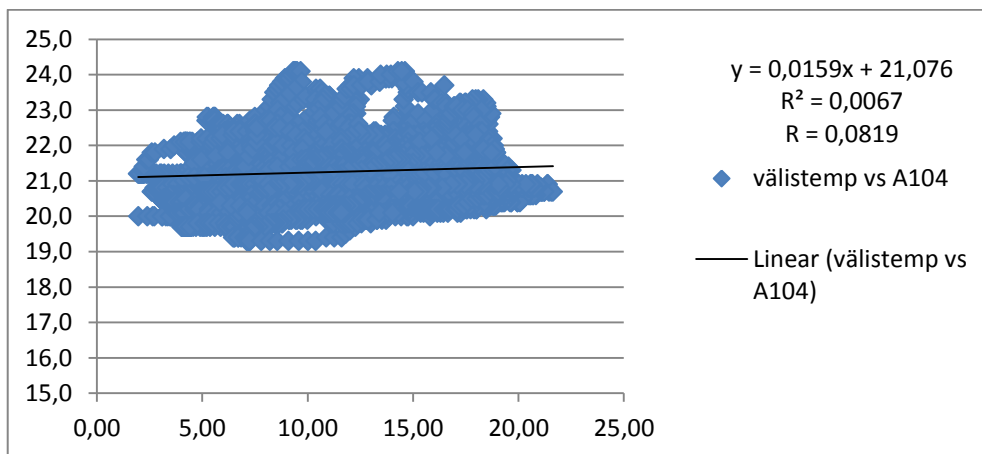


Joonis 4.1. Auditooriumi A205 temperatuur koos inimeste arvu ja süsihappegaasi tasemega

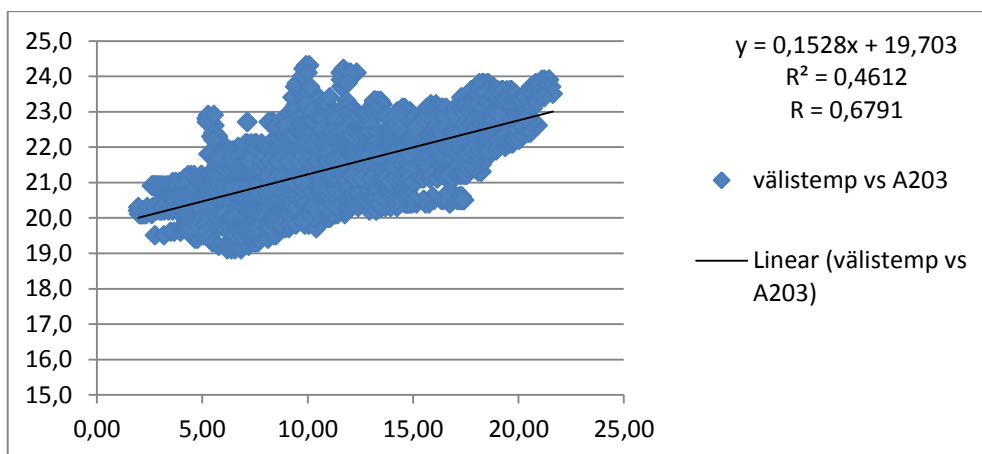
Auditooriumite sise- ja välistemperatuur ning kiirgusvoog on esitatud joonisel 4.6. Mõõtetulemustest on näha, et sise- ja välistemperatuuri liiguvad graafikutel sarnaselt. Joonistelt 4.2...4.5 on näha, et lõunapoolsetes auditooriumites on seos sise- ja välistemperatuuri vahel suurem kui põhjapoolsetes auditooriumites. Võib oletada, et tugevamat seost lõunapoolsetes auditooriumites (A102 ja A203) põhjustab päikesekiirgus. Jooniselt 4.6 on näha, et lõunapoolsete auditooriumite sisetemperatuuride maksimaalsed väärtused on välistemperatuuri maksimaalsete väärtustega ligilähedaselt samal ajal. Selle põhjal saab oletada, et lõunapoolsete ruumide õhutemperatuuri mõjutab suuresti sama tegur mis välistemperatuuri. Jooniselt 4.6 on näha, et päeva intensiivsema kiirgusvooperioodi ja maksimaalsete temperatuuride vahel on nihe. Selliseid nihkeid oli näha kogu mõõtmisperioodi jooksul ning nihete pikkus varieerus poolest tunnist kuni kolme tunnini.



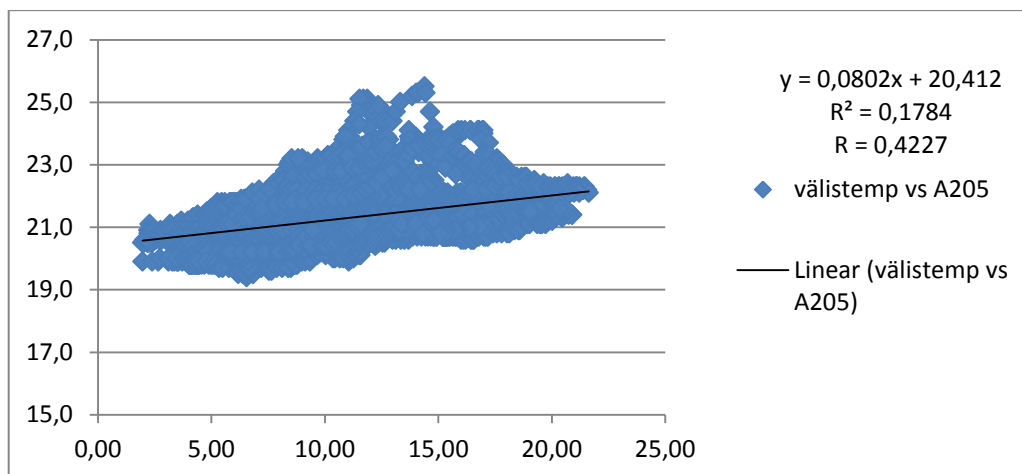
Joonis 4.2. Auditooriumi A102 temperatuuri seos välistemperatuuriga



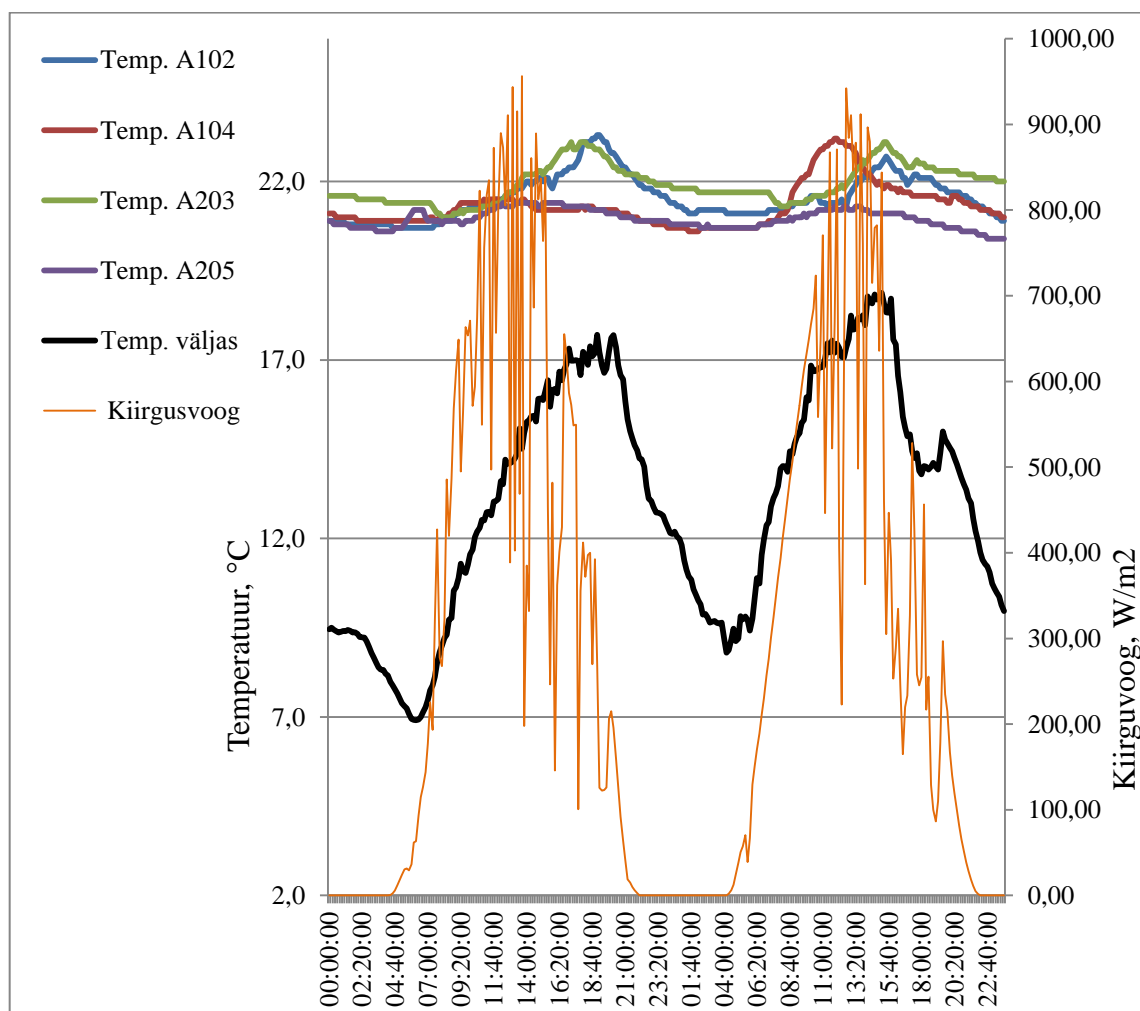
Joonis 4.3. Auditooriumi A104 temperatuuri seos välistemperatuuriga



Joonis 4.4. Auditooriumi A203 temperatuuri seos välistemperatuuriga



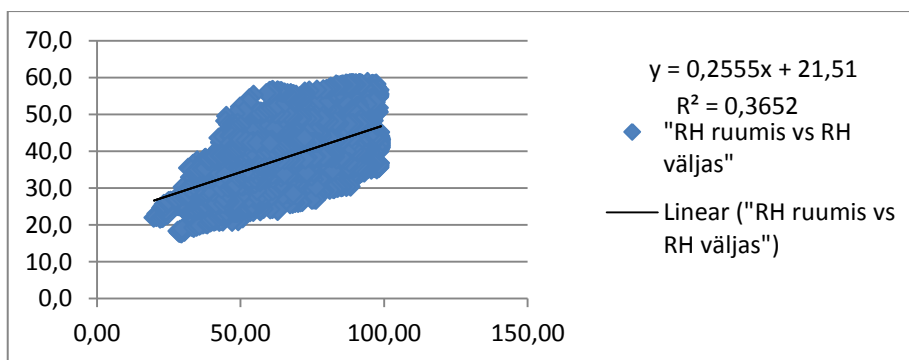
Joonis 4.5. Auditooriumi A205 temperatuuri seos välistemperatuuriga



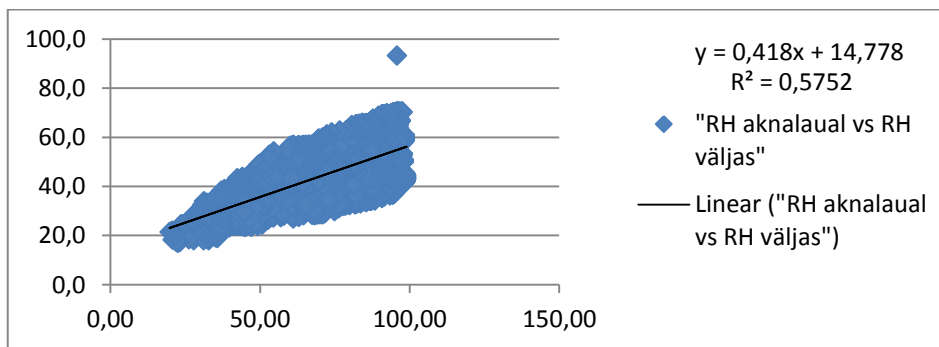
Joonis 4.6. Auditooriumite temperatuurid koos välistemperatuuri ja päikese kiirgusvooga

Andmete analüüsil selgus, et kõikides ruumides on akna lähedal mõõdetud õhuniiskuse korrelatsioon välisõhu suhtelise niiskusega suurem kui ruumides tahvli lähedal mõõdetud

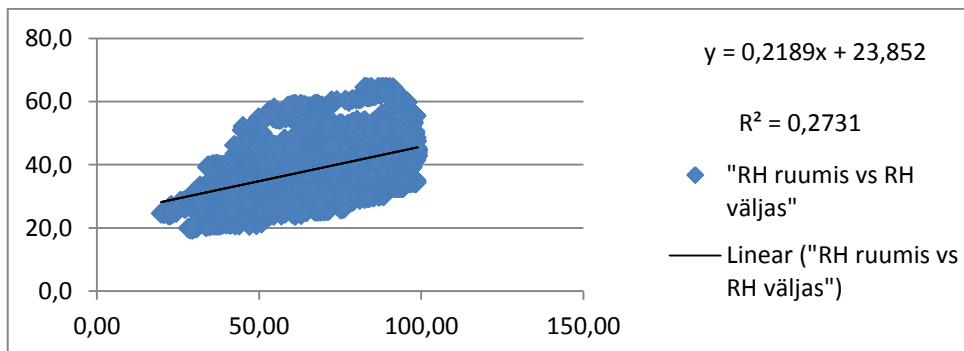
õhuniiskusega (joonis 4.7...4.14). Joonisel 4.15 on toodud iseloomulik periood, kus on näha seosed erinevates piirkondades ruumis mõõdetud RH ja välisõhu suhtelise õhuniiskuse vahel. Seos siseõhu RH ja välisõhu RH vahel on nõrgem, kuid kogu mõõtmisperioodi andmetes on see ikkagi pidevalt nähtav. Kõikide auditooriumite õhuniiskus on omavahel korrelatsioonis. Maksimaalne kahe auditooriumi õhuniiskuse vahe samal ajahetkel oli 18%. Kuna RH väärtused liikusid kõikides auditooriumite andmete puhul sarnaselt, siis saab väita, et hoones toimuva tegevuse mõju õhuniiskusele on suhteliselt väike.



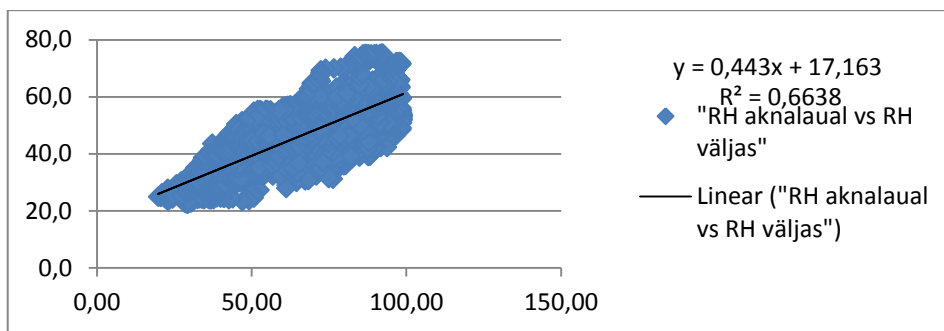
Joonis 4.7. Auditooriumi A102 RH seos välisõhu RH-ga



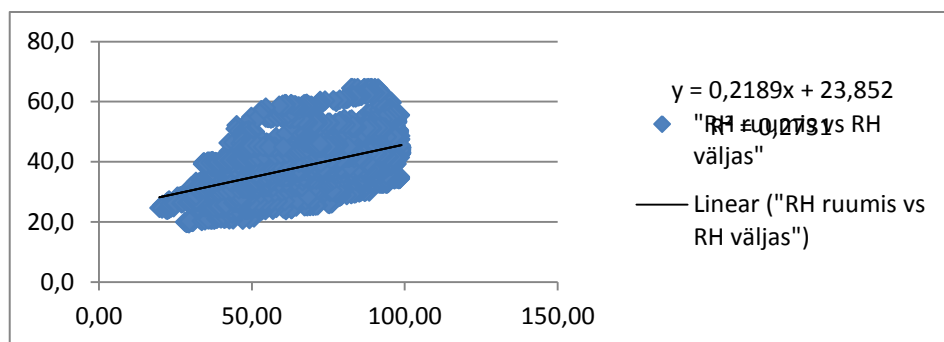
Joonis 4.8. Auditooriumi A102 aknalaual mõõdetud RH seos välisõhu RH-ga



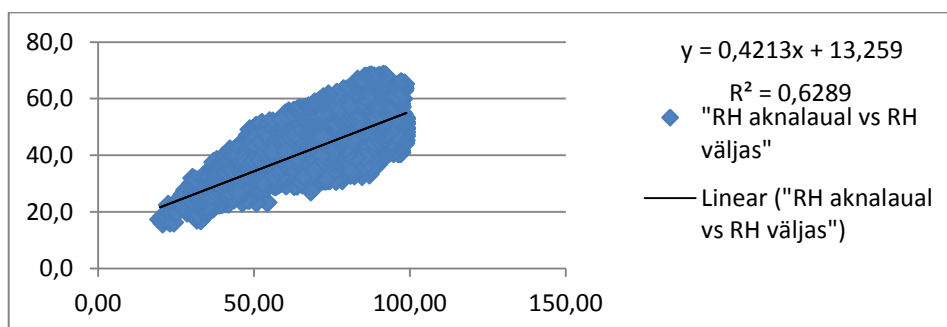
Joonis 4.9. Auditooriumi A104 RH seos välisõhu RH-ga



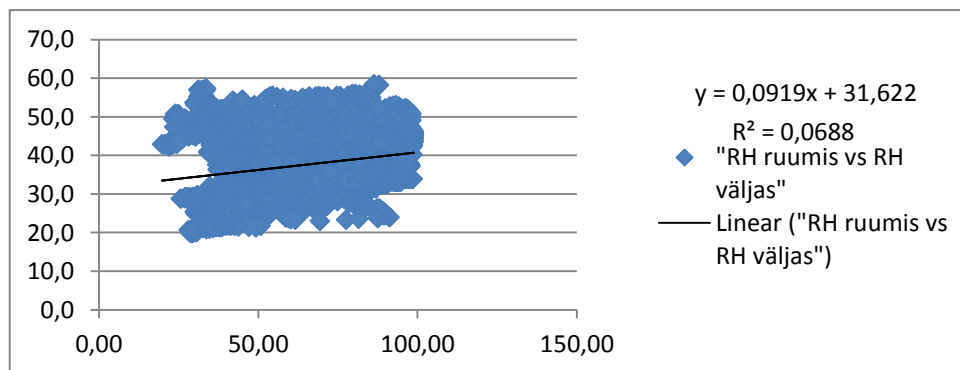
Joonis 4.10. Auditoriumi A104 aknalaul mõõdetud RH seos välisõhu RH-ga



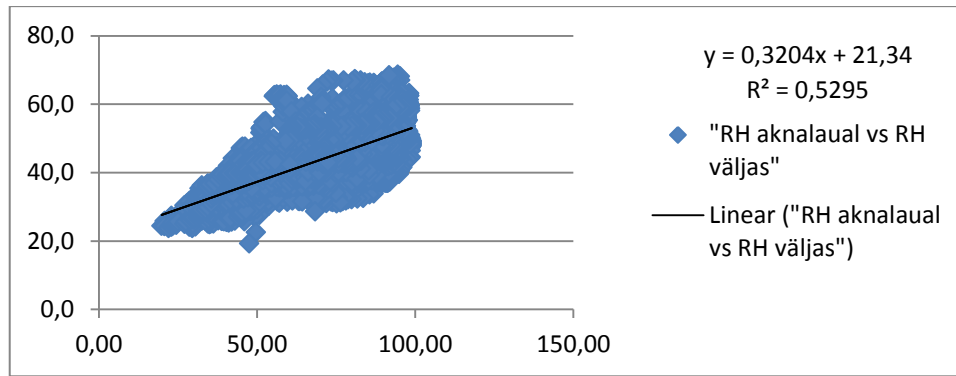
Joonis 4.11. Auditoriumi A203 RH seos välisõhu RH-ga



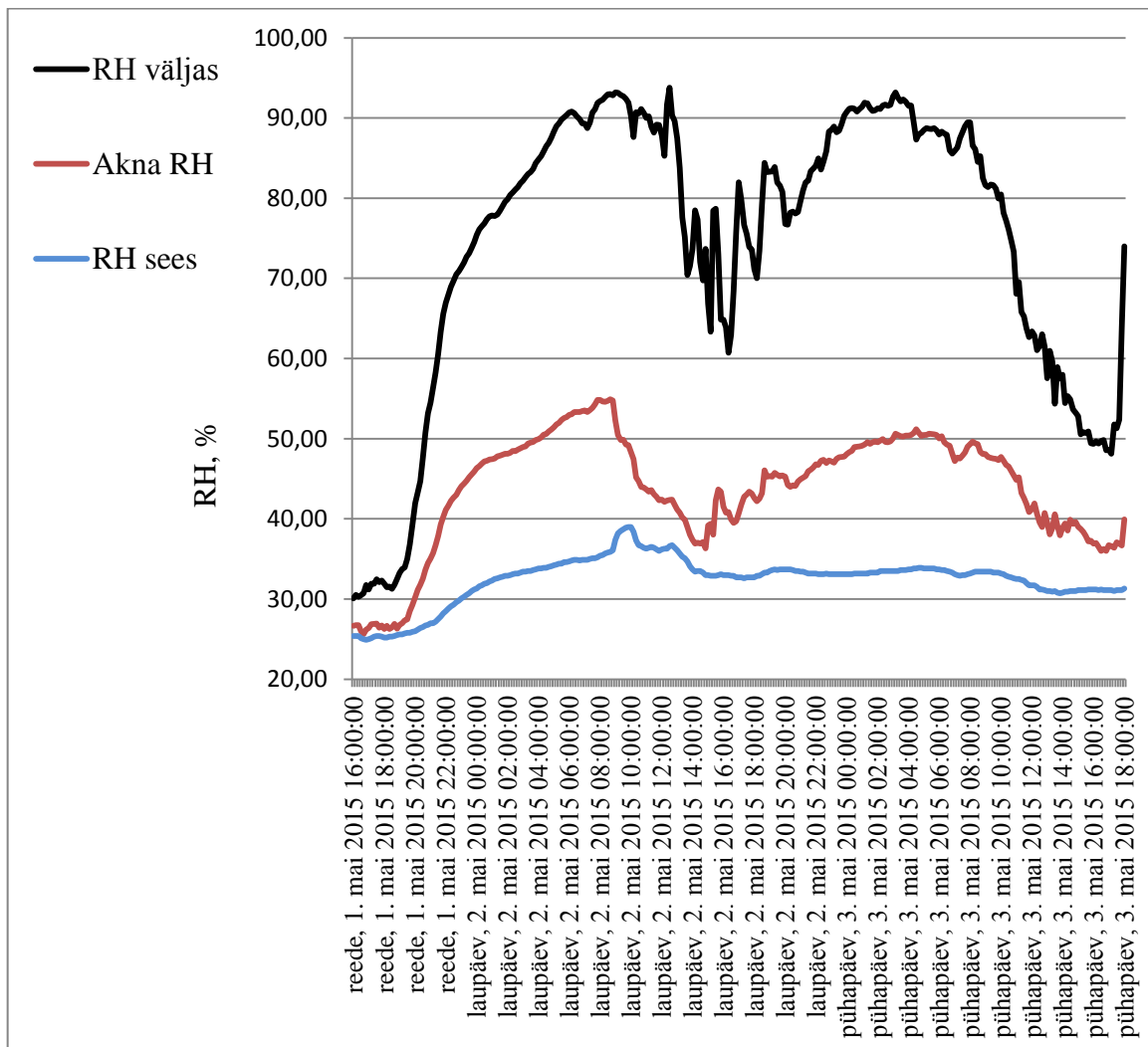
Joonis 4.12. Auditoriumi A203 aknalaul mõõdetud RH seos välisõhu RH-ga



Joonis 4.13. Auditoriumi A203 RH seos välisõhu RH-ga



Joonis 4.14. Auditooriumi A203 aknalaul mõõdetud RH seos välisõhu RH-ga

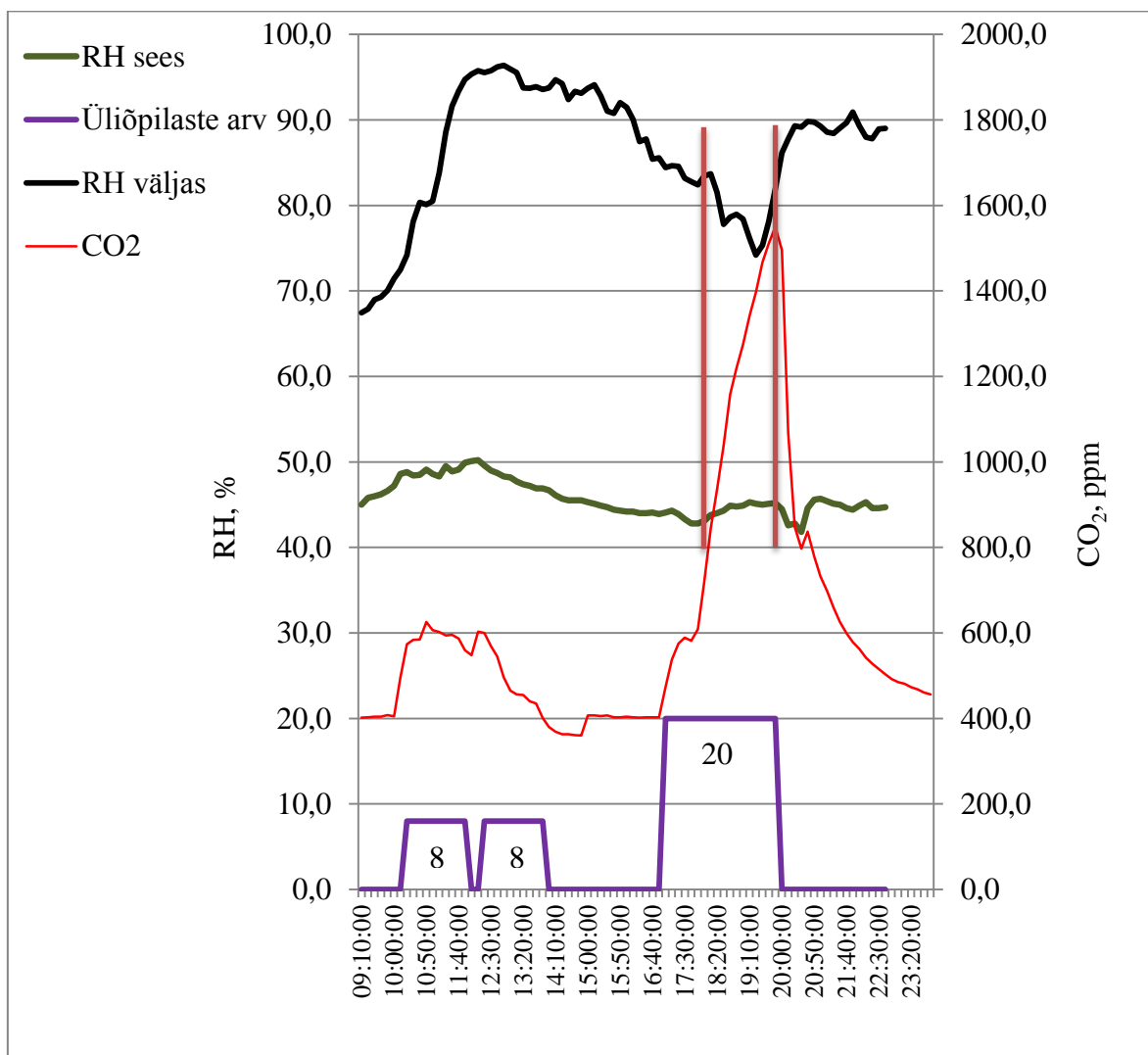


Joonis 4.15. Välisõhu RH, siseõhu RH ja aknalaul mõõdetud RH korrelatsioon auditooriumis

A104

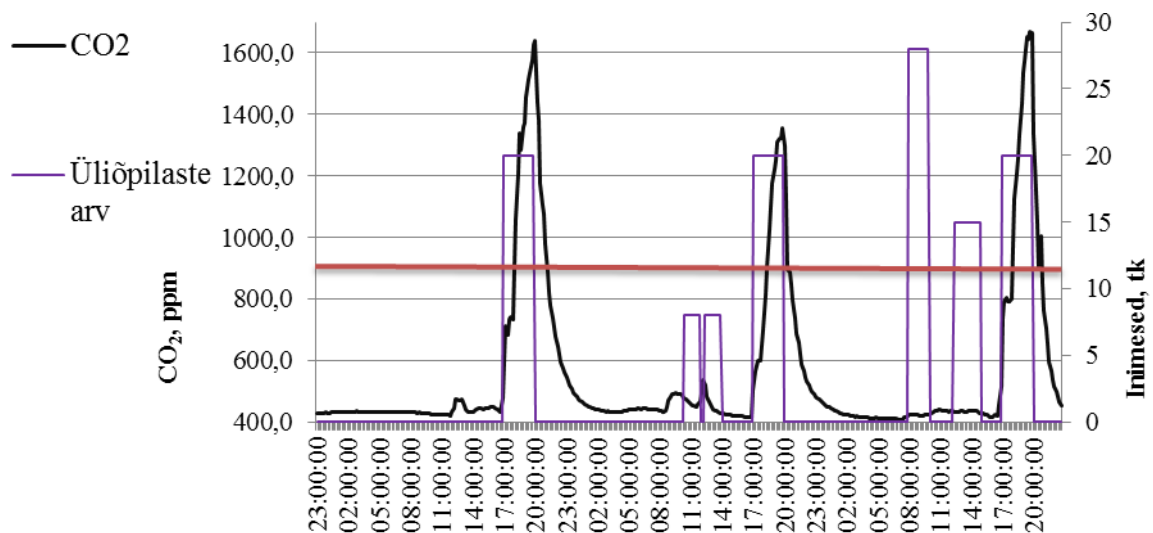
Joonisel 4.16 on näha välisõhu RH ja inimeste koosmõju siseõhu suhtelisele niiskusele. Joonisel esitatud tulemused on mõõdetud 28. aprillil 2015 auditooriumis A102.

Süsihappegaasi taseme järgi on võimalik hinnata inimeste kohalolu ruumis. Punaste vertikaalsete joontega on joonisel tähistatud inimeste kompenseeriva mõju periood ruumi RH muutusele. Hommikupoolikul (kell 10-11) on näha, kuidas RH tase tõuseb ligi 5% võrra, kui ruumi saabub oletatavalt kaheksa inimest ning samaaegselt tõuseb RH väljas. Kui välisõhu RH hakkab alanema (kella ühe paiku päeval), hakkab langema ka ruumiõhu RH. Alates kella 17-st viibivad ruumis jälle inimesed ning nende mõjul hakkab ruumiõhu siseõhu niiskus kergelt tõusma, kuid arvestades mõõteriista täpsust võib seda määratleda pigem stabiilsena. Mõõtmistulemuste põhjal võib väita, et ruumi RH on tugevalt seotud välisõhu suhtelise õhuniiskusega ja vähem seotud ruumis inimeste poolt tekitatud veeauru emissiooniga. Seetõttu võib tekkida olukord, kus ruumis on küll veeauru emissioon, kuid kompenseeriv efekt tekib väliskliima muutuste tõttu.



Joonis 4.16. Interaktsioon välisõhu RH, siseõhu RH ja inimeste arvu vahel

Joonisel 4.17 on näha ruumi süsihappegaasi taseme muutumist ja selle seost ruumis viibivate inimestega. Joonisel olev punane horisontaalne joon tähistab piiri (900 ppm), mida süsihappegaasi tase II sisekliima klassiga hoonetes ületada ei tohiks. Antud joonisel oleva perioodi jooksul ületas süsihappegaasi tase ruumis lubatud piiri kolmel korral. Kõikidel kordadel oli tegemist olukorraga, kus õppehoones viibisid peale tavapärase õppetöö lõppu eelõppe rühmad. Kuna ventilatsioon töötas nendel päevadel kuni kella 17:00 ja eelõpe algas samal kellaajal, siis see põhjustas süsihappegaasi taseme kiire tõusu. Kuna tegemist oli kevadise perioodiga, millal päevane välistemperatuur üle 5 °C ei tõusnud, siis võib oletada, et ruumi umbsuse leevendamiseks ei avatud ka aknaid. Avatud võisid küll aga olla auditooriumi ukseid koridori. Tuginedes joonisele 4.17 võib väita, et tunniplaani järgi ventilatsiooni ja küttesüsteemi reguleerida ei tohiks, kuna tunniplaani ei lähe reaalse olukorraga kokku ei nii üliõpilaste arvu kui ruumide kasutusaegade lõikes.

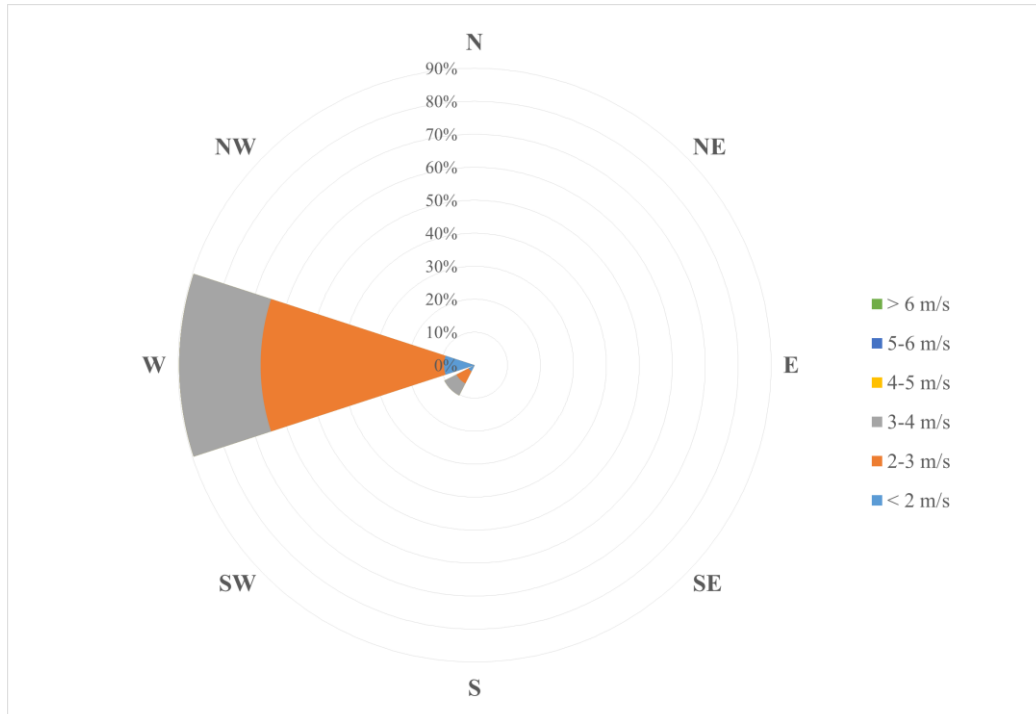


Joonis 4.17. Süsihappegaasi tase koos inimeste arvuga auditooriumis A102

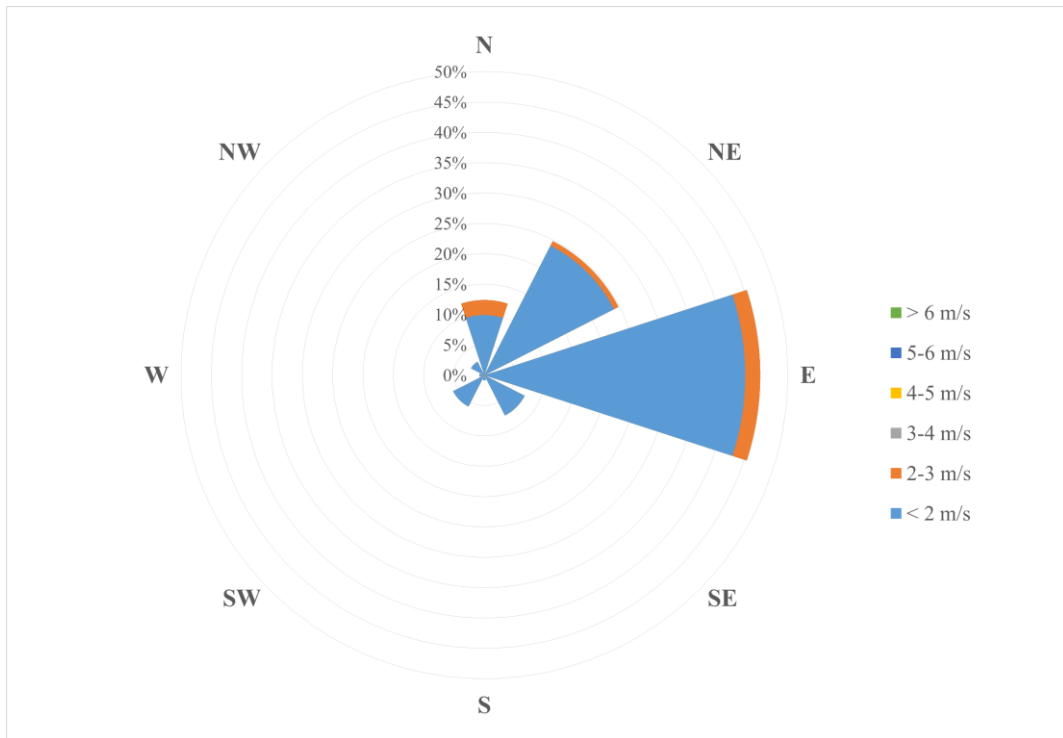
4.2. Küttesüsteemi ja päikese mõju

Esimese mõõtmisperioodi jooksul (küte sees ja aknakatted all) oli auditooriumi A102 keskmine õhutemperatuur 20,9 °C, maksimaalne õhutemperatuur 22,3 °C ja minimaalne 19,6 °C. Kütte normaalrežiimi keskmine ruumi õhutemperatuur oli 21,4 °C, maksimaalne õhutemperatuur 22,3 °C ja minimaalne 20,8 °C. Kütte normaalrežiimi keskmise, maksimaalse ja minimaalse temperatuuri arvutamisel on arvesse võetud mõõtmisi, mis on tehtud alates ühe tunni möödumisest kütte normaalrežiimi käivitumisest kuni kütte normaalrežiimi lõpuni.

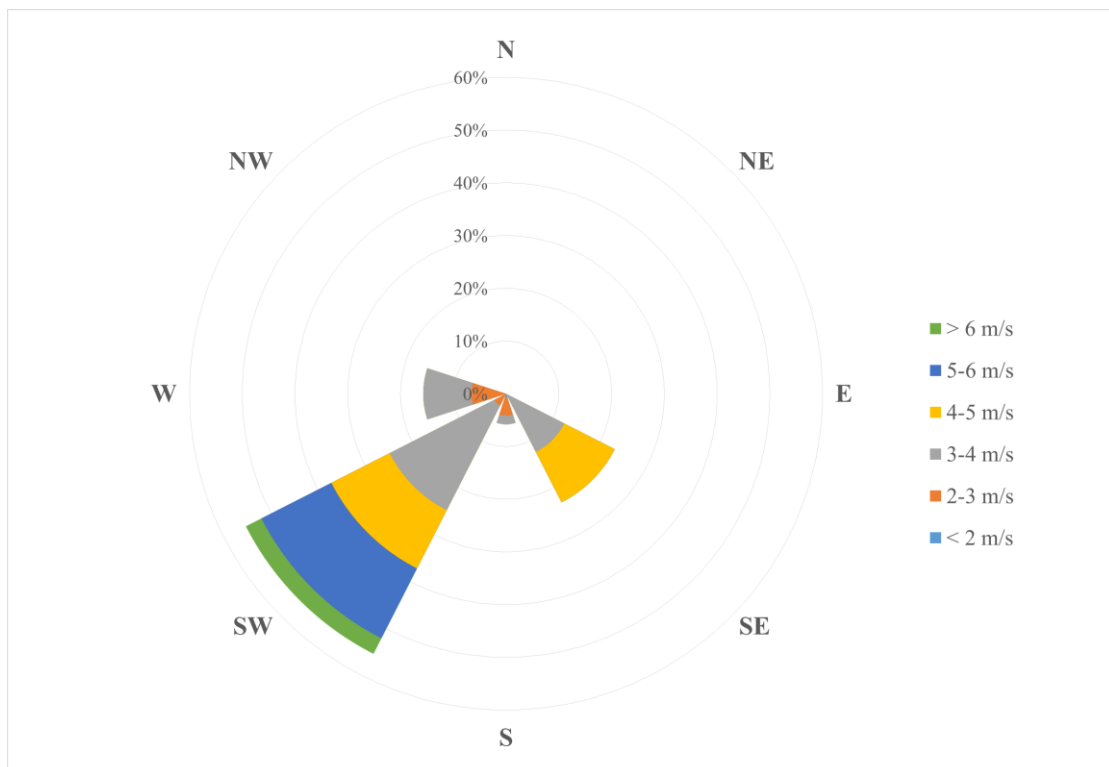
Auditooriumis A105 oli sama mõõtmisperioodi keskmine õhutemperatuur 21,2 °C, maksimaalne õhutemperatuur 21,9 °C ja minimaalne 21,2 °C. Kütte normaalrežiimi keskmine ruumi õhutemperatuur oli 21,4 °C, maksimaalne õhutemperatuur 21,9 °C ja minimaalne 20,9 °C. Jooniselt 4.21 on näha, et auditooriumis A105 on õhutemperatuur stabiilsem kui auditooriumis A102. Ruumi A102 temperatuuride standardhälve oli 0,64 ja ruumi A105 temperatuuride standardhälve oli 0,35. Auditooriumi A102 madalamale temperatuurile õsiti võib mõju avaldada akende erinev õhupidavus. Joonistel 4.18, 4.19 ja 4.20 on tuulesuund ja -tugevus öisel perioodil. Öiseks perioodiks on võetud vahemik kella 22:00...08:00. Mõõteperioodi esimese öö puhul (joonis 4.21) algab öine periood südaööst. Joonistelt on näha, et esimesel mõõteperioodi ööl puhusid valdavalt läänetuuled ja teisel ööl valdavalt idatuuled. Kolmandal ööl puhusid valdavalt edelatuuled ja ka tuuletugevus oli eelmise kahe ööga võrreldes suurem. Ligi 40% ajast olid tuulepuhangud viimasel ööl üle 4 m/s, kuid kahel esimesel ööl tuulepuhanguid üle 4 m/s ei esinenud. Kuna auditoorium A102 asub hoone lõunaküljel, siis mõjutavad seda enim just tuuled, mis puhuvad kagust, lõunast või edelast. Seega võib väita, et auditooriumi A102 viimase öö võrdlemisi madalamat temperatuuri põhjustas läbi akende puhuv tuul.



Joonis 4.18. Tuulesuund ja -tugevus ööl vastu 23. aprilli



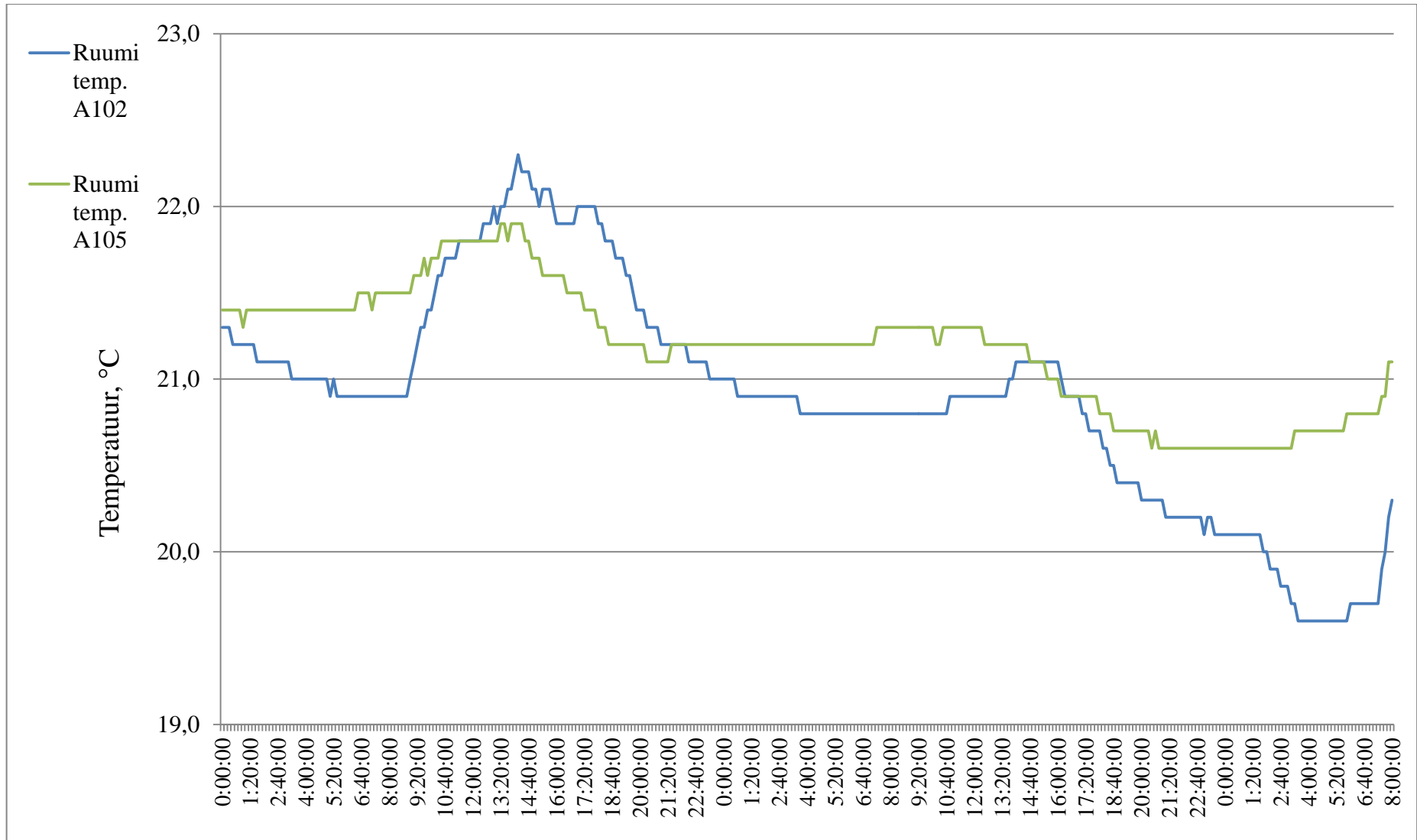
Joonis 4.19. Tuulesuund ja -tugevus ööl vastu 24. Aprilli



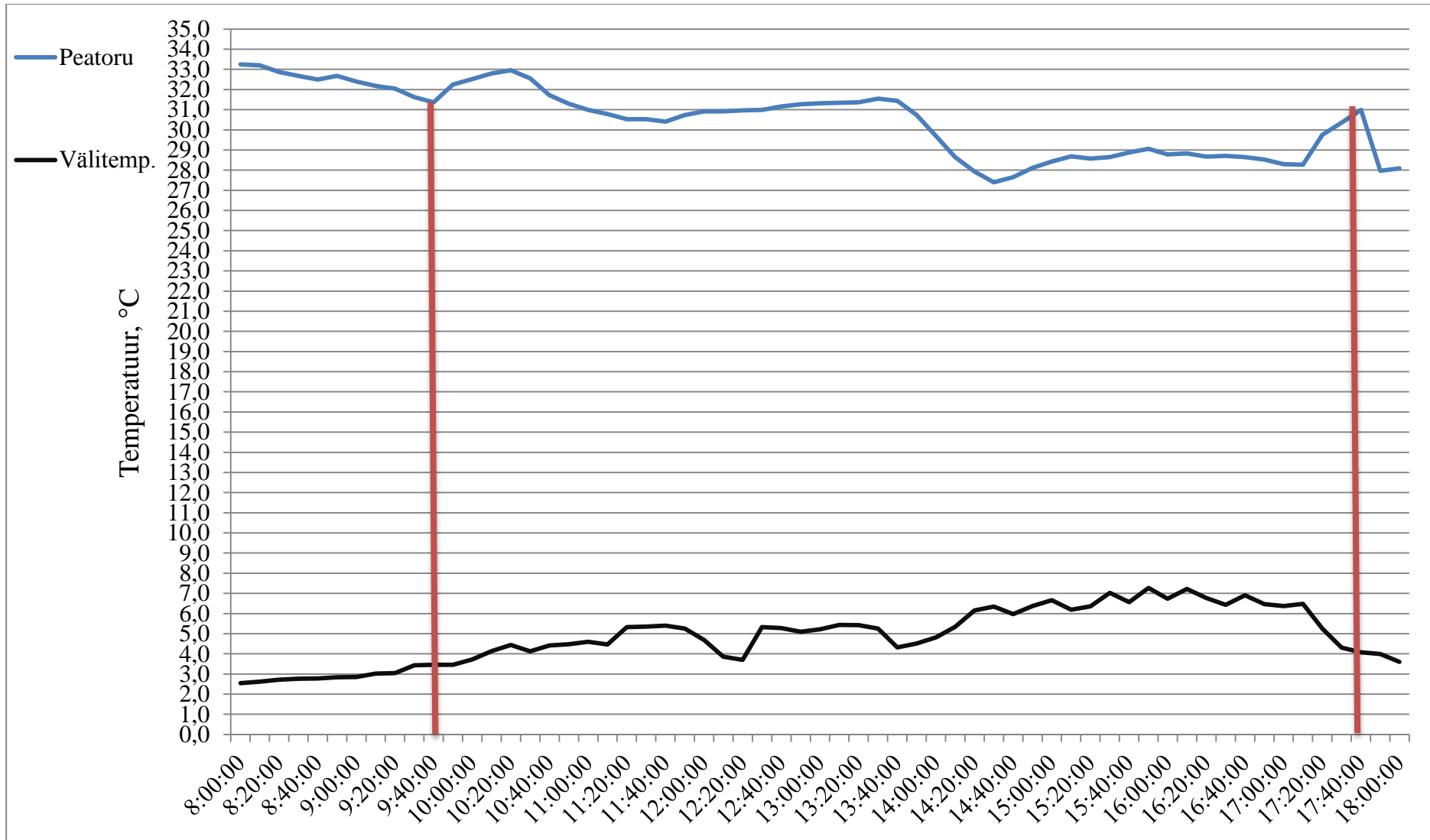
Joonis 4.20 Tuulesuund ja -tugevus ööl vastu 26. aprilli

Joonisel 4.10 on punase joonega märgitud, millal jõuab kütterežiimi muutuse mõju radiaatoriteni. Kütte normaalrežiim algus on seadistuste järgi kell 9:00. Jooniselt on näha,

et realselt jõuab mõju radiaatoriteni 30...40 minutit hiljem. Vasakpoolne punane joon tähistab kohta, millal hakkab küttesüsteemis oleva vee temperatuur tõusma. Kuna samal ajal tõuseb ka välistemperatuur, siis stabiilse kütterežiimi puhul oleks pidanud veetemperatuur süsteemis edasi langema nagu enne kütterežiimi muutust. Joonisel olev parempoolne punane joon näitab alandatud kütterežiimi algust. Seadistuste järgi algab alandatud küttesüsteem 17:00. Jooniselt on näha, et reaalne mõju jõuab radiaatoriteni samuti 30...40 minutit hiljem. Enne kütterežiimi vahetust alaneb välistemperatuur ja tõuseb küttesüsteemis oleva vee temperatuur. Peale kütterežiimi vahetust alaneb välistemperatuur edasi, kuid küttesüsteemis oleva vee temperatuur hakkab samuti alanema.



Joonis 4.21. Auditooriumite A102 ja A105 õhutemperatuurid esimese mõõteperioodi jooksul

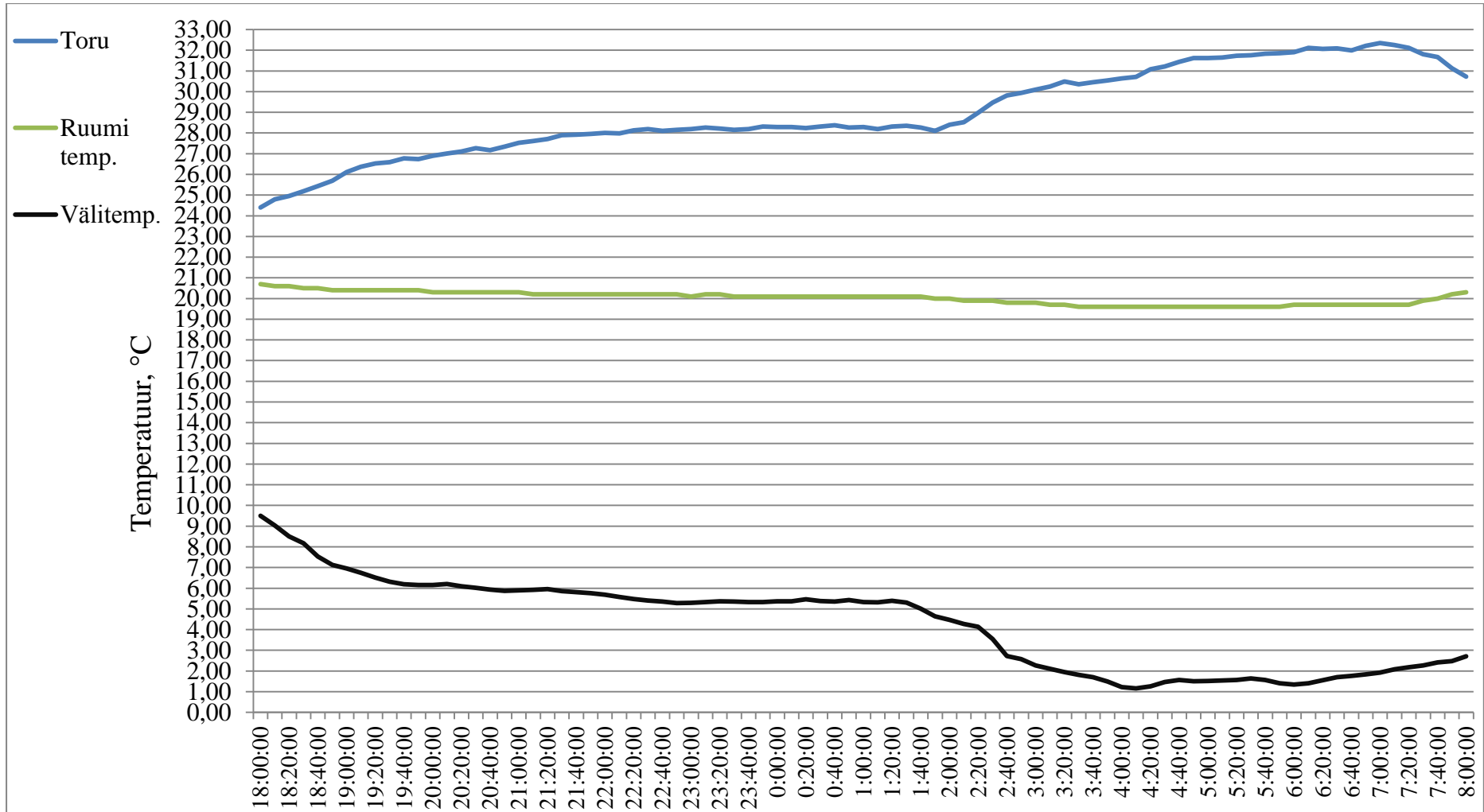


Joonis 4.22. Kütte normaalrežiim ja alandatud kütterežiim esimese mõõteperioodi laupäeval

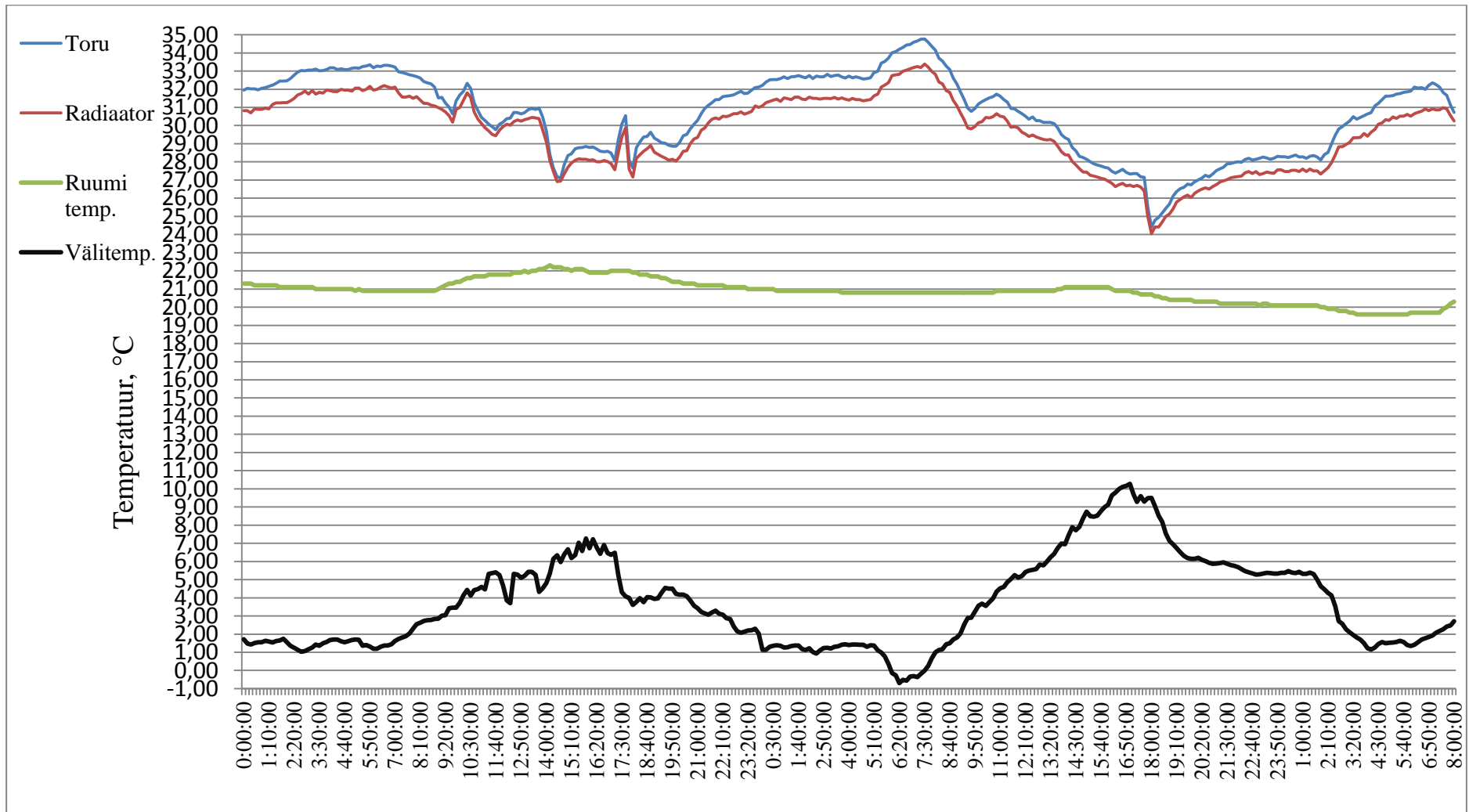
Küttesüsteemi automaatne reguleerimisvõime vastavalt välistemperatuurile on näha jooniselt 4.23. Antud joonisel on toodud periood esimese mõõteperioodi pühapäeva õhtust alates kella 18:00 kuni mõõteperioodi lõpuni auditooriumis A102. Kogu selle perioodi jooksul oli küttesüsteem alandatud režiimil. Kuigi esmaspäeval algab kütte normaalrežiim kella 7:40, siis jooniselt 4.22 põhjal saab väita, et selle mõju küttesüsteemis oleva vee temperatuurile polnud mõõteperioodi lõpuks veel kohale jõudnud.

Kell 1:30 esmaspäeva öösel hakkab välistemperatuur langema olles eelnevad kolm tundi olnud suhteliselt stabiilne. Küttesüsteem reageerib sellele ja kell 2:10 hakkab küttesüsteemis oleva vee temperatuur tõusma. Seega on küttesüsteemi inertts 40 minutit. Kuni välistemperatuuri languseni oli auditooriumi õhutemperatuur stabiilne. Kui välistemperatuur hakkab langema, siis hakkab küttesüsteemis oleva vee temperatuur tõusma. Sellega püüdis küttesüsteem hoida ruumi temperatuuri stabiilsena. Enne välisõhu temperatuuri langust oli auditooriumi õhutemperatuur viimased kaks tundi 20,1 °C. Välisõhu temperatuuri langus hakkas auditooriumi õhutemperatuuri alandama kuni see stabiliseerus 19,6 °C peal. Selline temperatuur püsis kuni kella 7:00 kuni hakkas tõusma. Viimase tõusu põhjuseks võib pidada välistemperatuuri tõusu.

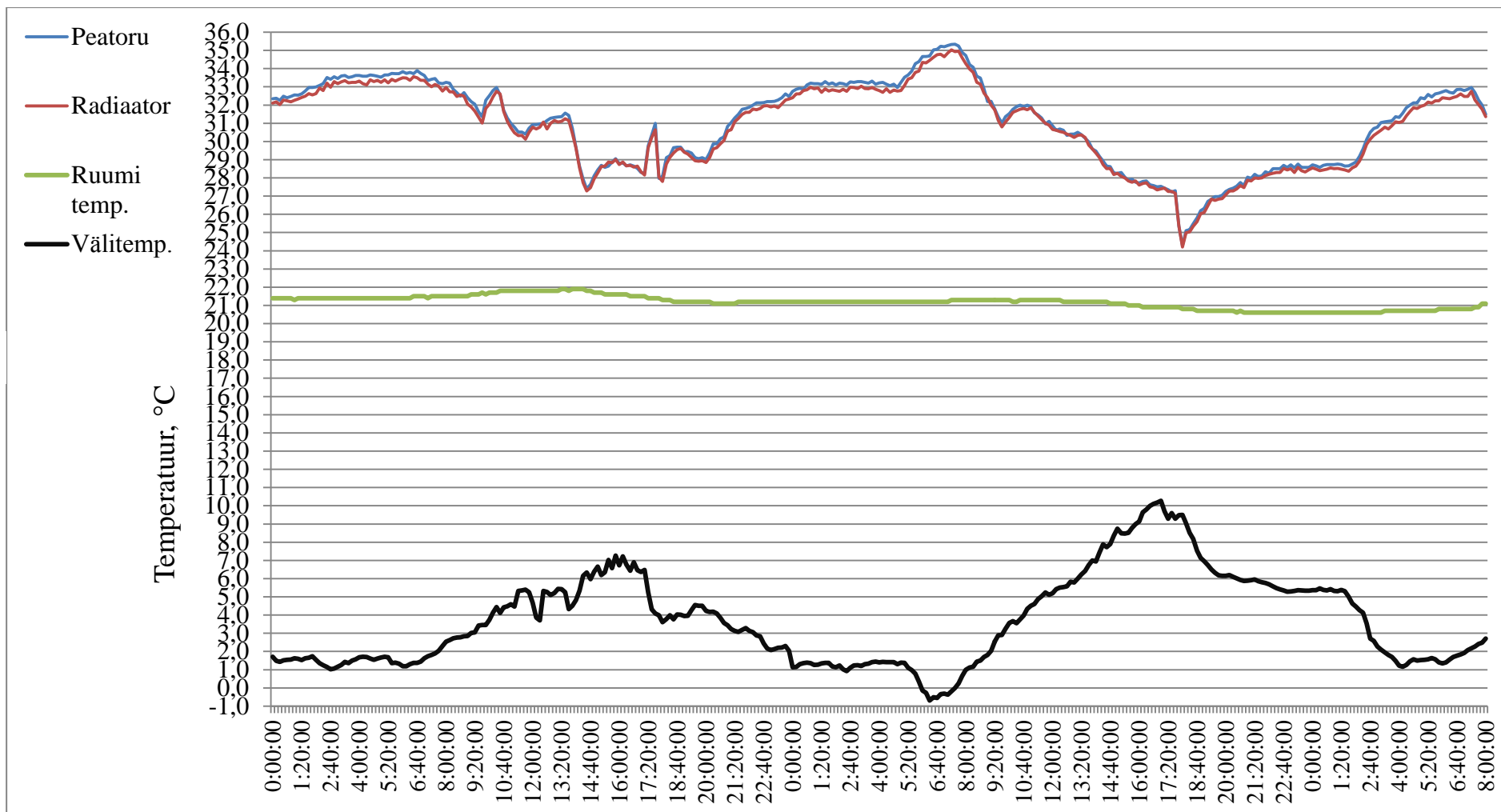
Joonise 4.23 põhjal saab väita, et hoones olev küttesüsteem reguleerib ennast välistemperatuuri järgi suhteliselt kiiresti. Stabiilse välistemperatuuri (kõikumine väiksem kui ± 1 °C tunnis) korral suudab küttesüsteem hoida auditooriumites ühtlast temperatuuri. Samas välistemperatuuri langemisel ei suuda küttesüsteem tuua ruumi temperatuuri tagasi esialgsele tasemel vaid stabiliseerib selle esialgsega võrreldes 0,5 °C võrra madalamale tasemele. Antud temperatuurimuutus ei ületa küll anduri mõõteviiga, kuid kuna võrreldud on kahte stabiilset perioodi, siis võib antud tulemust pidada usaldusväärseks. Joonistelt 4.24 ja 4.25 on näha ruumide temperatuuride muutused kogu esimese mõõteperioodi jooksul. Küttesüsteemi vee ja välistemperatuuri väärtused liikusid kogu mõõteperioodi jooksul suures plaanis vastupidises suunas. Kui välistemperatuur tõusis, siis hakkas küttesüsteemis oleva vee temperatuur alanema ja vastupidi. Stabiilsed sisetemperatuurid auditooriumis A102 ja 105 mõõteperioodi teisel ööl vaatamata välistemperatuuri kõikumisele annavad kinnitust, et küttesüsteem suudab olukordades, kus puuduvad teised sisetemperatuuri mõjutavad tegurid (päike, tuul, inimesed) hoida soovitud temperatuuri.



Joonis 4.23. Küttesüsteemis oleva vee temperatuuri muutumine auditooriumis A102 vastavalt välitemperatuurile esimese mõõteperioodi lõpus



Joonis 4.24. Temperatuurid auditooriumis A102 esimesel mõõteperioodil

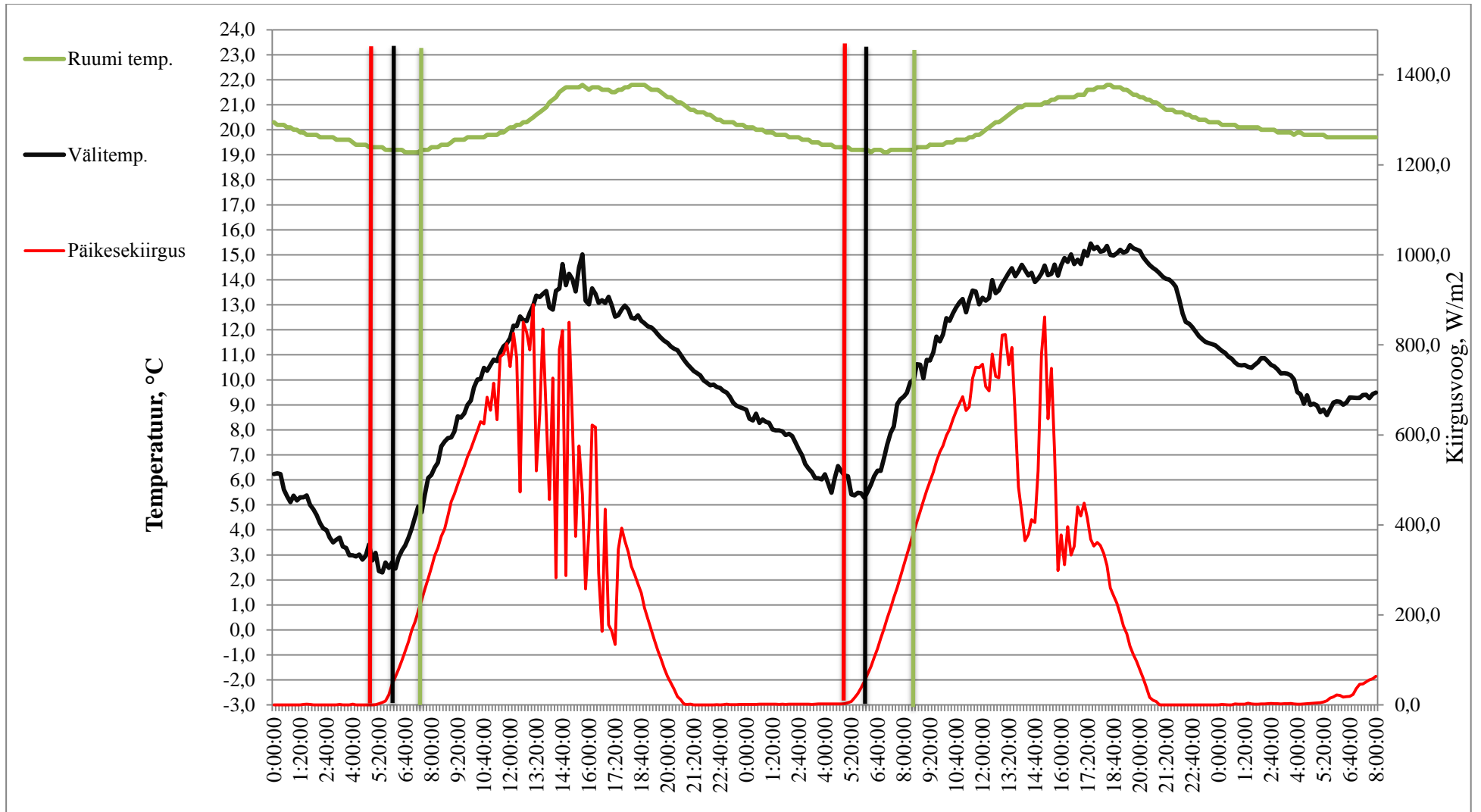


Joonis 4.25. Temperatuurid auditooriumis A105 esimesel mõõteperioodil

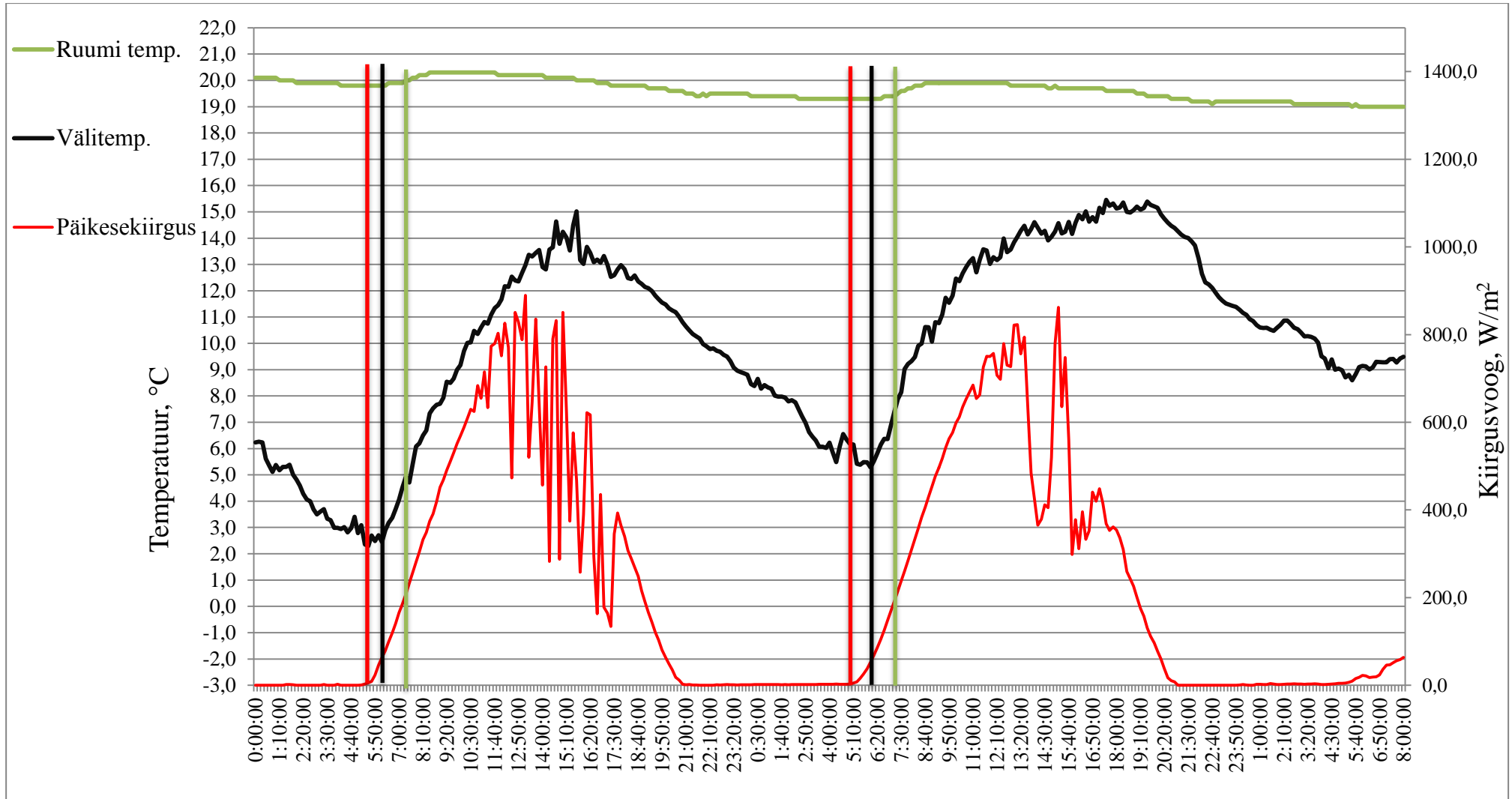
Joonistel 4.14 ja 4.15 on auditooriumite A102 ja A105 temperatuurikõikumised teisel mõõteperioodil, mille ajal oli ruumides kütte välja lülitatud ja aknakatted avatud asendis. Nagu võis eeldada on päikesekiirguse mõju auditooriumi A102 õhutemperatuurile tunduvalt suurem kui auditooriumis A105. Auditooriumis A102 tõusis esimesel mõõtmise ööpäeval öise madalama temperatuuriga (19,1 °C) võrreldes ruumi temperatuur päeval maksimaalselt 2,7 °C, mis tegi ruumi maksimaalseks ööpäevaseks õhutemperatuuriks 21,8 °C. Teisel ööpäeval oli öö madalaim temperatuur samuti 19,1 °C ja päeva maksimum tõusis ka sellel päeval 21,8 °C. Kui esimesel päeval jõudis ruumi õhutemperatuur maksimumini kell 15:40, siis teisel päeval oli maksimum ligi kolm tundi hiljem kell 18:20.

Auditooriumi A105 öised miinimumid olid esimesel ööl 19,8 °C ja teisel ööl 19,3 °C. Esimesel päeval oli maksimaalne temperatuur 20,3 °C ja teisel päeval 19,9 °C. Maksimaalne tõus oli 0,6 °C. Esimesel päeval jõudis toatemperatuur maksimumini 8:30 ja püsis sellel temperatuuril kuni kella 11:40. Teisel päeval jõudis toatemperatuur maksimumini 8:40 ja püsis sellel temperatuuril kuni kella 12:40.

Joonistele 4.14 ja 4.15 on vertikaalsete joontega märgitud kiirgusvoog, välistemperatuuri ja sisetemperatuuri tõusude algused. Esimesena hakkab kasvama päikesekiirgusvoog. Seejärel hakkab 40...60 minuti pärast tõusma välistemperatuur. 90...180 minutit hiljem hakkab tõusma sisetemperatuur.



Joonis 4.26. Auditoriumi A102 õhutemperatuur koos välistemperatuuri ja päikesekiirgusega teisel mõõteperioodil

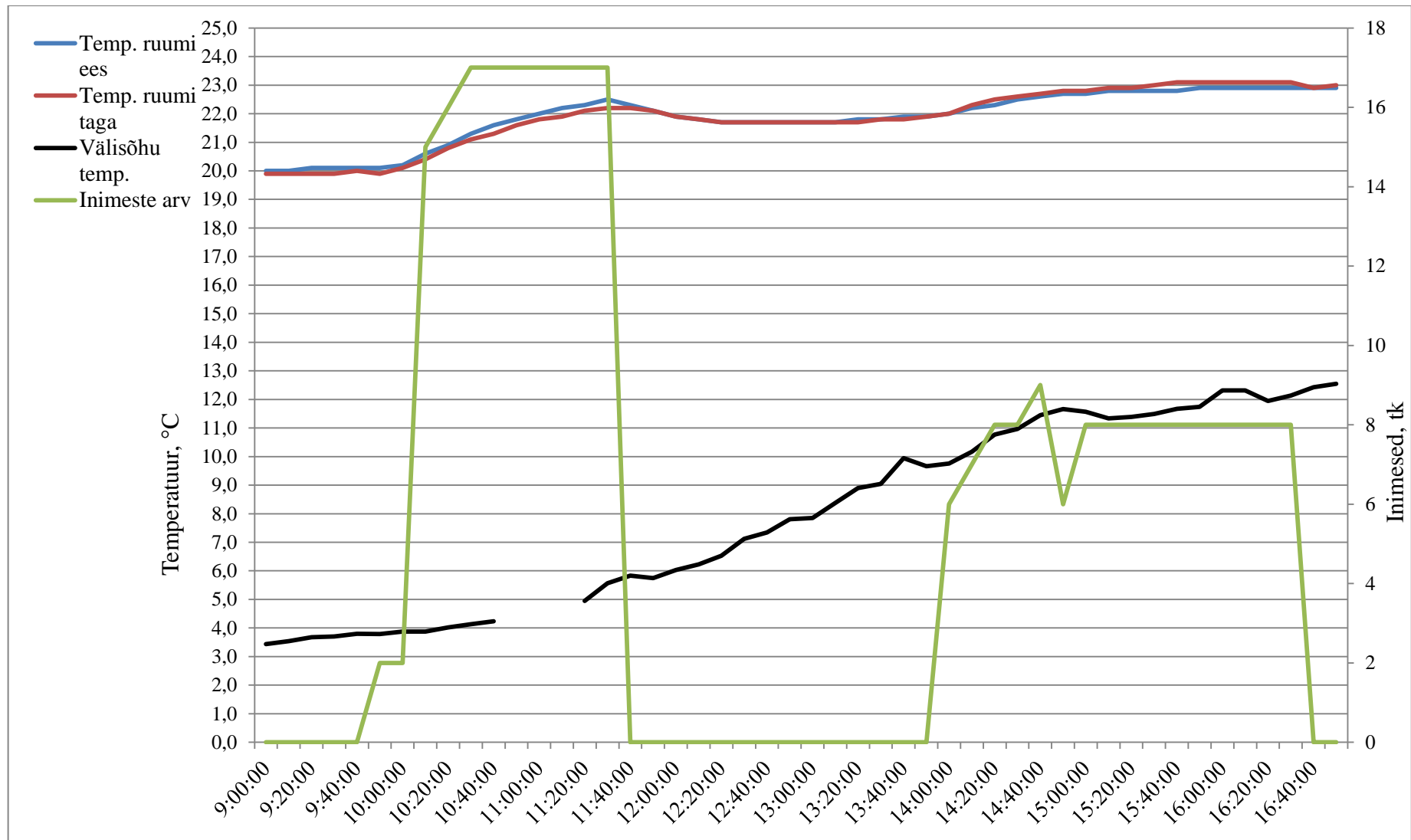


Joonis 4.27. Auditooriumi A105 õhutemperatuur koos välistemperatuuri ja päikesekiirgusega teisel mõõteperioodi

4.3. Sisekliima parameetrite dünaamika sõltuvalt ruumi asustusest

Joonisel 4.28 on näha auditooriumis A102 katse ajal toimunud temperatuuri ja asustuse muutused. Antud joonisele on lisatud ka välistemperatuur. Katkestus välistemperatuuri joones tähendab, et selle aja kohta andmed välistemperatuuri kohta puuduvad. Jooniselt on näha, et enne inimeste ruumi sisenemist on auditooriumi õhutemperatuur stabiilselt 20,0 °C. Esimesed kaks inimest sisenesid ruumi kell 9:50 ja koheselt hakkas auditooriumi temperatuur tõusma. Õhutemperatuuri tõus kiirenes vastavalt inimeste arvu suurenemisele ruumis. Ruumi asustus esimese loengu ajal saavutas maksimaalse taseme kell 10:30 (17 inimest) ja püsis nii kuni loengu lõpuni. Ruumi temperatuur tõusis ühtlasel kiiruse kuni kella 11:30 ehk kuni loengu lõpuni. Maksimaalne ruumiõhu temperatuur 22,5 °C mõõdetigi loengu lõpus. Võrreldes perioodiga enne loengu algust tõusis ruumiõhu temperatuur loengu ajal 2,5 °C. Peale loengu lõppu lahkusid kõik inimesed auditooriumist ja ruumi temperatuur hakkas langema kuni stabiliseerus kell 12:20 21,7 °C olles sama mõlemas mõõtekohas. Esimese loengu ajal põlesid ruumis 10 luminessentslampi ja töötasid kaks projektorit ning kaks arvutit, mis kõik tõstsid samuti ruumi temperatuuri.

Enne teist loengut sisenesid esimesed kuus inimest auditooriumisse kell 14:00. Ruumi temperatuur hakkas seejärel koheselt tõusma. Tõus oli võrreldes eelmise loenguga aeglasem. See oli oodatav, sest ruumi temperatuur enne teist loengut oli 1,7 °C kõrgem kui enne esimest loengut ja inimesi viibis ruumis võrreldes esimese loenguga 8 võrra vähem. Ruumi temperatuur tõusis kuni stabiliseerus kell 15:30 23 °C peale ja püsis kuni loengu lõpuni. Seega tõusis teise loengu ajal õhutemperatuur ruumis 1,3 °C. Teise loengu ajal toimus ka paus, mille käigus väljus osa üliõpilasi lühiajaliselt ruumist. Ruumitemperatuurile ruumi asustuse lühiajaline vähenemine mõju ei avaldanud. Teise loengu ajal töötasid ruumis neli arvutit ja üks projektor, mis kõik tõstsid vähesel määral ruumi temperatuuri.



Joonis 4.28. Auditooriumi A102 temperatuur koos inimeste arvuga ruumis ja välistemperatuuriga

Esimese loengu ajal läbi viidud soojusliku mugavustunde küsitluse tulemused on näha tabelis 4.5. PMV väärtuseks esimeses loengus oli $-0,25$ ja PPD väärtuseks $6,3\%$. Teise loengu ajal läbi viidud küsitluse tulemused on näha tabelis 4.6. PMV väärtuseks teises loengus oli $-0,33$ ja PPD väärtuseks 0% . Mõlema loengu ajal jäid nii PMV kui PPD väärtused lubatud piiridesse.

Tabel 4.5. Esimese loengu ajal läbi viidud soojusliku mugavustunde küsitluse tulemused

Hinnang soojuslikule mugavusele	Vastav arvväärts	Vastanute arv
Kuum	+3	0
Soe	+2	0
Kergelt soe	+1	4
Neutraalne	0	5
Kergelt jahe	-1	6
Jahe	-2	1
Külm	-3	0

Tabel 4.6. Teise loengu ajal läbi viidud soojusliku mugavustunde küsitluse tulemused

Hinnang soojuslikule mugavusele	Vastav arvväärts	Vastanute arv
Kuum	+3	0
Soe	+2	0
Kergelt soe	+1	2
Neutraalne	0	2
Kergelt jahe	-1	5
Jahe	-2	0
Külm	-3	0

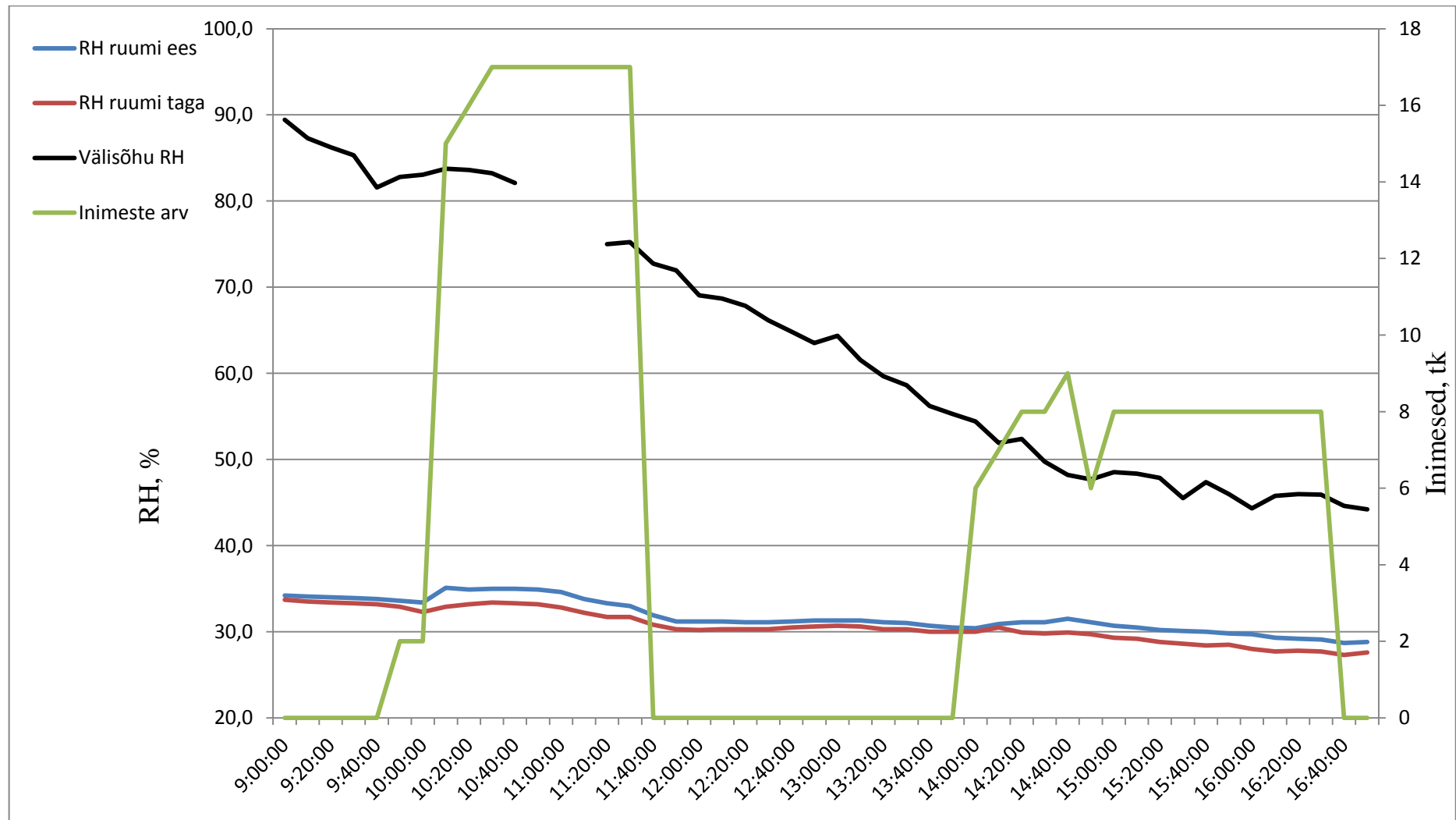
Joonisel 4.29 on näha ruumiõhu süsihappegaasi sisalduse muutus sõltuvalt ruumis olevate inimeste arvust. Enne esimese loengu algust oli ruumi süsihappegaasi sisaldus stabiilselt 430 ppm. Süsihappegaasi sisaldus hakkas kiiresti tõusma koheselt peale inimeste ruumi sisenemist kuni stabiliseerus kella $10:40$ ajal tasemele 680 ppm ruumi taga ja 750 ppm

ruumi ees. Erinev süsihappegaasi tase ruumi ees ja taga võis tuleneda sellest, et üliõpilased olid koondunud istuma auditooriumi esimestesse pingiridadesse. Samas ei ületa see vahe seadme mõõtmisviga ja võib tuleneda ka sellest. Peale loengu lõppu hakkas süsihappegaasi tase kiiresti langema ja poole tunni pärast oli ligikaudu samal tasemel kui enne loengut. Teise loengu ajal stabiliseerus süsihappegaasi tase 600 ppm peale olles sama nii ruumi ees kui ruumi tagumises osas. Jooniselt 4.29 on näha, et paus teise loengu ajal süsihappegaasi tasemele ruumis mõju ei avaldanud. Kui võtta esimese loengu ajal süsihappegaasi tasemeks ruumis 750 ppm ja välisõhus 400 ppm ning inimese süsihappegaasi erituseks 45 g/h, siis tuleb valemi 1.1 abil ventilatsiooni õhuvooluhulgaks 337 l/s. Teise loengu andmetega tuleb ventilatsiooni õhuvooluhulgaks 313 l/s. Kui võtta inimese süsihappegaasi eralduseks 37 g/h, siis tuleb esimese loengu andmetega ventilatsiooni õhuvooluhulgaks 281 l/s ja teise loengu ajal mõõdetud andmetega 260 l/s. Viimased ventilatsiooni õhuvooluhulga mõõtmised on teostatud aastal 2003 ja tollal saadi uuritavas auditooriumis tulemuseks 203 l/s. Erinevus tollaste mõõtmistulemuste ja antud magistritöö raames arvatud tulemuste vahel võib tuleneda seadmete mõõtmisveast, arvutusmetoodikast, ventilatsiooni filtrite ja torude mustumus ning suurt mõju avaldab arvatavasti ka akende ja uste hõredus.

Jooniselt 4.30 on näha auditooriumi õhuniiskuse muutus. Inimeste mõju ruumiõhu niiskusele antud mõõtmistega ei tuvastatud. Jooniselt on näha väiksed muutused (kuni 1,7%) õhuniiskuse tasemes loengute alguses ja vahetult peale loengute lõppu, kuid need muutused jäävad seadmete mõõtevea piiridesse.



Joonis 4.29. Auditoriumi A102 süsihappegaasi sisalduse sõltuvus inimeste arvust ruumis



Joonis 4.30. Auditooriumi A102 RH sõltuvus inimeste arvust ruumis ja välisõhu RH-st

4.4. Piirete soojustehnilised näitajad

Mõõtmisperioodi jooksul kõikusid nii ruumi temperatuur kui ka õhuniiskus. Seega kirjeldavad saadud mõõtmistulemused pigem seina U-arvu dünaamikat ja ei anna usaldusväärset U-arvu väärtust.

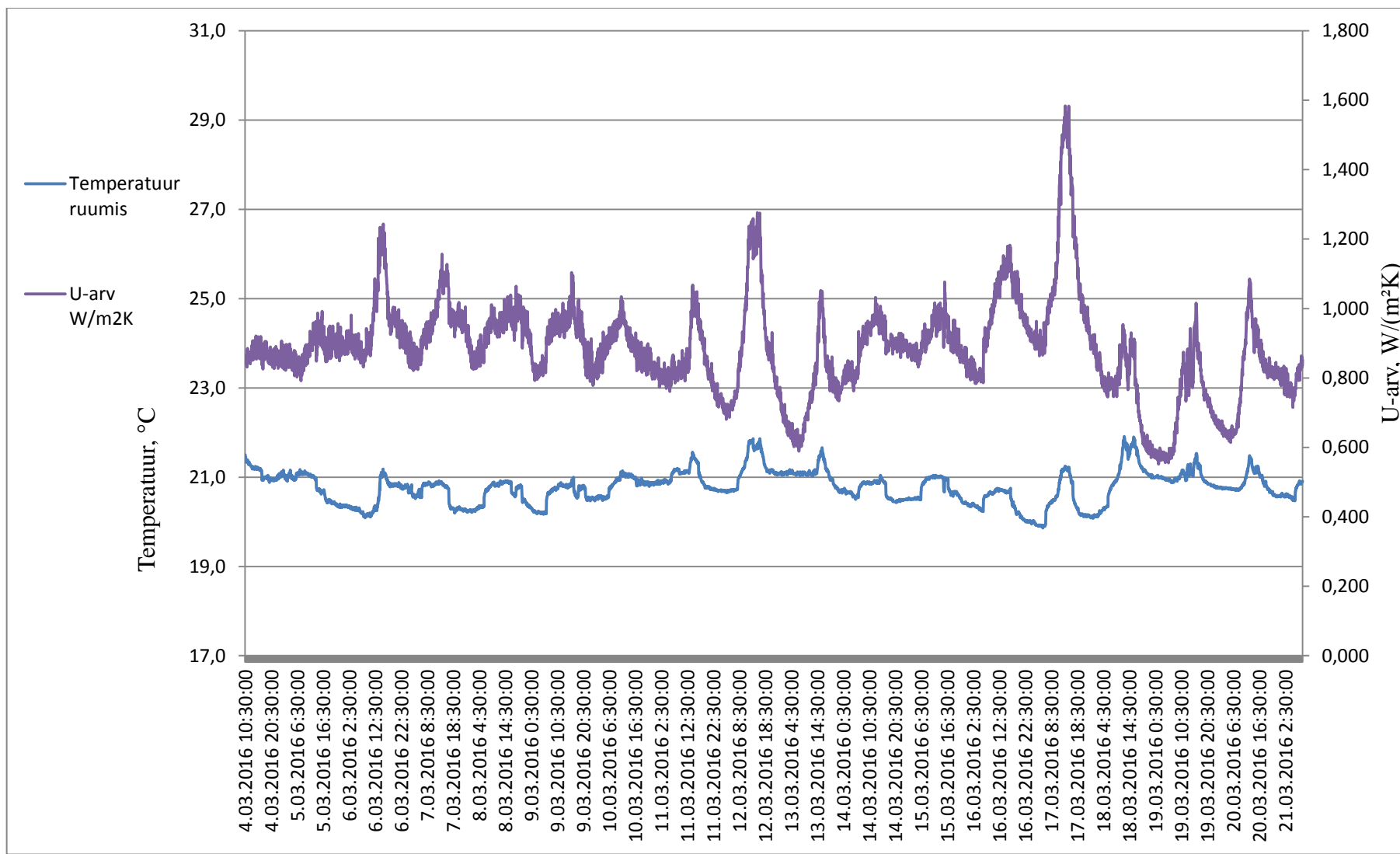
Maksimaalne temperatuur ruumis oli 21,9 °C, minimaalne 19,9 °C, keskmine temperatuur 20,8 °C ja õhutemperatuuri standardhälve oli 0,4. Maksimaalne suhteline õhuniiskus ruumis oli 30,9%, minimaalne 14,8%, keskmine 24,2% ja õhuniiskuse standardhälve oli 3. Maksimaalne arvutatud U-arv oli 1,58 W/(m² K), minimaalne 0,55 W/(m² K), keskmine soojuslähivus $U = 0,88 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Mõõteperioodi sisetemperatuuri ja U-arvu dünaamika on joonisel 4.31. Arvutuslik soojusjuhtivus on vastavalt valitud soojuserijuhtivuste väärtustele kas 0,92 või 1,06 W/(m² K). Seega on mõõdetud U-arv lähedane kirjanduses levinud väärtustele.

Tabelis 4.7 on mõõtmisperioodi keskmised, maksimaalsed, minimaalsed sise- ja välistemperatuurid ning suhtelised õhuniiskused mõõtekohtade kaupa. Kõige madalam on pinnatemperatuur seinte ristumispunktis olles keskmiselt 3,0 °C madalam kui siseseinal ja 2,0 °C madalam kui välisseinal. Selline temperatuuride erinevus näitab geomeetrilise külmasilla mõju.

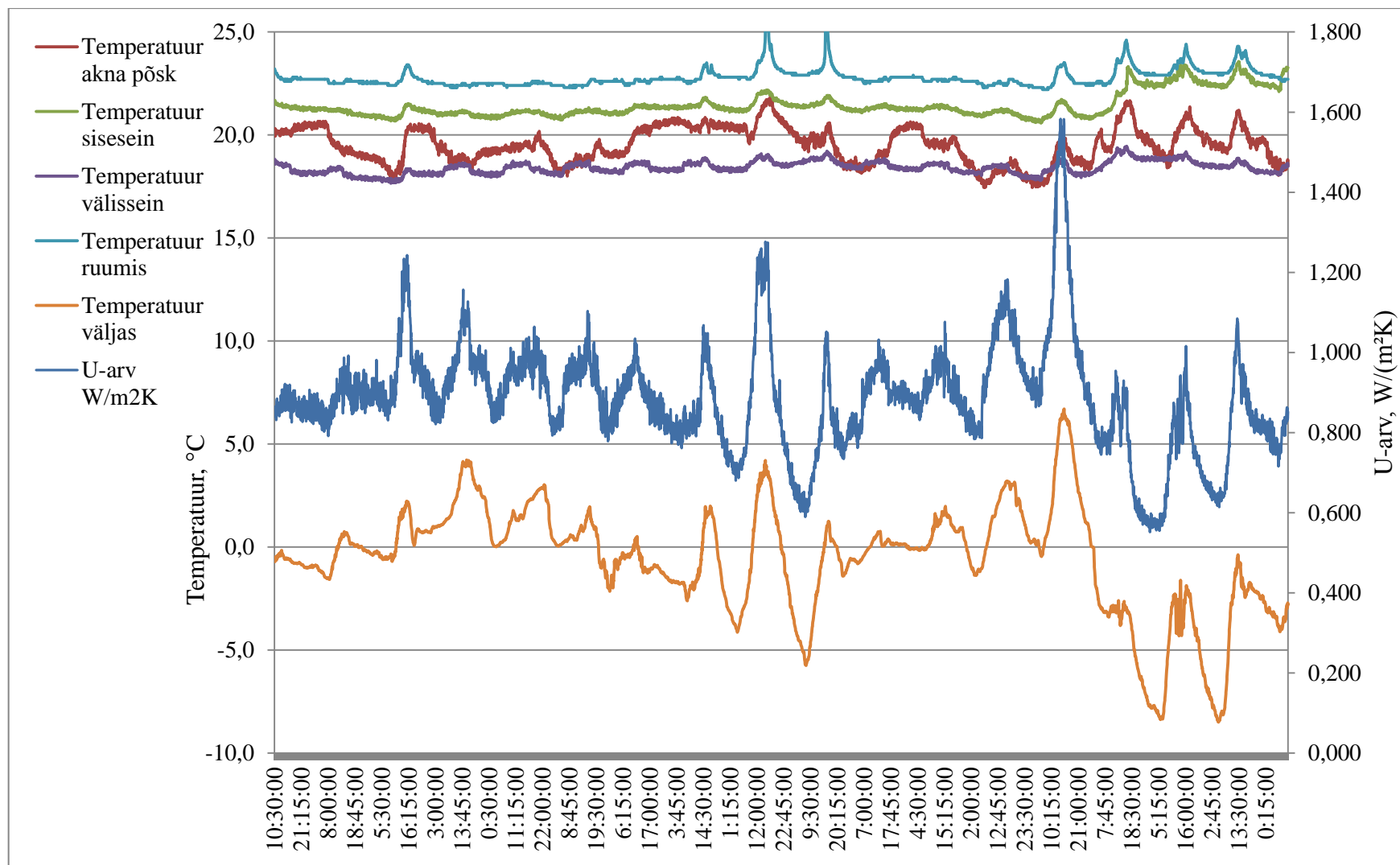
Vaadeldes korraga õhu- ja pinnatemperatuuride ning soojusjuhtivuse dünaamikat on näha, et soojusjuhtivus näib sõltuvat välistemperatuurist (joonis 4.32). Kui välisõhu temperatuur on langenud ligikaudu 15 °C (6...–9 °C) on U-arv muutud ligi 2,5 korda (1,5...0,6 W/(m²K)). See on seletatav piirde soojusliku inertsiga. Ruumi õhutemperatuuri puhul võib näha nii seda, et piirde soojusjuhtivus näib suurenevat õhutemperatuuri tõustes, kui ka seda, et hoopis langeb. Ruumiõhu temperatuur on stabiilne ja selle põhjal on raske järeldusi välja tuua. Edaspidi peaks uurima, kuidas muutuvad temperatuuri ja piirde soojusjuhtivuse väärtused siis, kui õhutemperatuur ruumis järsult ja märgatavalt alaneb.

Tabel 4.7. Keskmised, minimaalsed, maksimaalsed temperatuurid ja standardhälbed auditooriumis A203 perioodil 4. märts kuni 21. märts

	Temperatuur väljas, °C	RH väljas, %	Temperatuur välissein, °C	Temperatuur akna põsk, °C	Temperatuur sisesein, °C	Temperatuur välissein-siseseina nurk, °C	Temperatuur ruumis, °C	RH ruumis, %
Keskmine	-0,6	85,0	20,3	19,5	21,4	18,4	22,8	20,3
Minimaalne	-8,5	37,7	19,5	17,5	20,6	17,7	22,2	11,1
Maksimaalne	6,7	99,0	21,5	21,9	23,6	19,5	30,1	26,7
Standardhälve	2,6	13,3	0,3	0,9	0,6	0,3	0,5	3,1

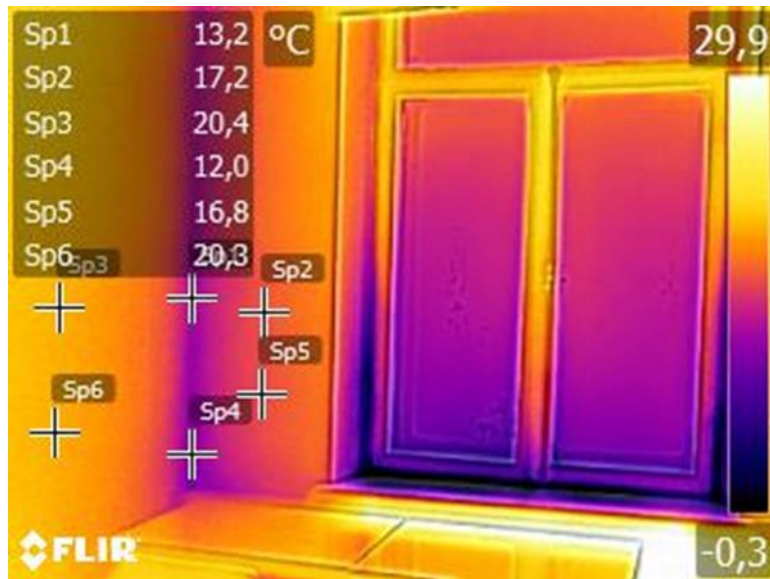


Joonis 4.31. Hoone lõunapoolse välisseina U-arv koos sisetemperatuuriga



Joonis 4.32. Hoone lõunapoolse välisseina U-arv koos välis- ja sisetemperatuuridega

Joonisel 4.33 on 8. jaanuaril 2015 termokaameraga tehtud pilt auditooriumi A203 välisseinast. Jooniselt on näha, et välisseina ja siseseina ristumiskohas punktis Sp4 on pinnatemperatuur 12,0 °C. Ilm.ee andmetel oli pildistamise hetkel välistemperatuur –28 °C. Sisetemperatuur pildistamise hetkel oli 22 °C. Arvutades nende andmetega punktis Sp4 temperatuuriindeksi saab väärtuseks 0,8. Seega antud külmasillas hallituse tekkimise ohtu pole.



Joonis 4.33. Auditooriumi A203 välissein

5. JÄRELDUSED

Tabelis 4.8 on näha protsendid ajast, millal temperatuur, suhtelise õhuniiskus ja süsihappegaasi tase oli kogu hoone lõikes väljaspool standardites toodud soovituslikest väärtustest mõõteperioodil 28. aprill kuni 4. juuni. RH ületas soovituslikke piirväärtusi 0,5% ajast ja süsihappegaasi tase oli 1% ajast liiga kõrge. Nende kahe parameetri puhul vastab hoone II sisekliima klassile. Hoone õhutemperatuur ületas soovituslikku vahemikku 3,2% ajast, mis tähendab, et hoone jääb antud parameetri puhul III sisekliima klassi. Kuna antud töös on sisekliima hindamisel kasutatud kõiki andmeid, mis on mõõdetud hoone tavalise kasutuskorra ajal (tööpäeviti 8:00...18:00), siis võttes arvesse ainult aegu, millal auditooriumid on realselt asustatud, võivad tulemused tulla teised.

Tabel 4.8. Sisekliima parameetrite vastavus soovituslikele väärtustele

Parameeter	% ajast, millal ületati soovituslikke piirarve
Temperatuur	3,2
RH	0,5
CO ₂	1

Sisekliima mõõtmistulemuste analüüsimisel tõdeti, et kasutatud mõõteseadmete täpsuse tõttu sobivad saadud tulemused sisekliima üldiseks hindamiseks ja selle dünaamika kirjeldamiseks, kuid sisekliimat mõjutavate tegurite ning erinevate efektide uurimiseks on vajalik edaspidi kasutada täpsemaid mõõteseadmeid. Järgmiste mõõtmiste puhul peaks andmeid koguma pikema perioodi jooksul (näiteks aasta). See annaks parema ülevaate hoone sisekliima käitumisest erinevate väliskliima tingimuste korral. Selleks, et uurida lähemalt erinevaid sisekliimat mõjutavaid tegureid, on vajalik järgnevate mõõtmistsüklite käigus koguda rohkem erinevaid andmeid. Eluslaboratooriumi edasiarendamisel ja sarnaste katsete läbiviimisel on soovitatav:

- 1) paigaldada statsionaarsed andurid soojussõlme ja ventilatsiooniagregaadi põhiparameetrite jälgimiseks;
- 2) paigaldada paralleelandurid neile anduritele, mille järgi soojussõlme ja ventilatsiooniagregaadi automaatikad reguleerivad või võimaluse korral tekitada paralleelväljundid samadelt anduritelt;

- 3) paigaldada andurid väliskliima parameetrite mõõtmiseks, sealhulgas seinatemperatuuri ja päikese kiirgusvõimsuse andurid hoone põhja- ja lõunaküljele;
- 4) luua võimekus ruumide kasutuskorra automaatseks jälgimiseks;
- 5) paigaldada andurid koridoriuste ja akende lahtioleku registreerimiseks;
- 6) luua võimekus kõigi eeltoodud andurite abil saadud andmete logimiseks ja nende kandmiseks ühisesse andmebaasi;
- 7) luua võimekus hoone tehnosüsteemide reguleerimisparameetrite logimiseks.

Hoone välisseina keskmiseks U-arvuks saadi 0,88 W/(m²K). Kuna usaldusväärsete mõõtmistulemuste jaoks polnud hoone välisõhu temperatuurid piisavalt stabiilsed, siis vajab hoone välisseina soojusläbivus edasist uurimist. Samuti peaks uurima piirde käitumist olukorras, kui ruumi õhu temperatuur mingil põhjusel märkimisväärselt alaneks.

KOKKUVÕTE

Käesolevas magistritöös uuriti Tallinna Tehnikaülikooli Tartu Kolledži kompleksi kuuluva õppehoone sisekliimat ja seda mõjutavaid tegureid. Tegemist on esimese sisekliimauuringuga antud hoones. Seetõttu on töö pigem ülevaatliku iseloomuga ning aluseks edasiste uurimuste tegemiseks. Selleks on välja toodud erinevad sisekliimat mõjutavad tegurid, mis vajavad põhjalikumat uurimist. Töös on antud soovitusi õppehoone kui eluslabori edasiseks arendamiseks.

Uuritud õppehoone vastab II sisekliima klassi soovituslike piirväärtustele süsihappegaasi taseme ja suhtelise õhuniiskuse puhul. Süsihappegaasi tase ületas soovituslikku ülempiiri 1% ajast ja suhteline õhuniiskus ületas soovituslikku vahemikku 0,5% ajast. Temperatuur ületas soovituslikku vahemikku 3,2% ajast ja see paigutab õppehoone astme võrra madalamasse III sisekliima klassi. Luues lahendused ruumide asustuse automaatseks jälgimiseks on võimalik jätta edaspidi teostatavatest mõõtmistest välja andmed, mis on mõõdetud ajal, millal ruumi realselt ei kasutata. See võimaldaks täpsemini hinnata hoone sisekliima vastavust standardites toodud ülem-ja alampiiridele ning soovituslikele vahemikele. Antud töö põhjal võib arvata, et sellisel juhul ületaksid nii temperatuur, õhuniiskus kui süsihappegaasi tase piirväärtusi tunduvalt suuremal määral ajast.

Uuritud õppehoones mõõdeti välisseina soojusvoogu ja saadud andmete põhjal arvutati välisseina U-arvu väärtuseks $0,88 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, mis on lähedane kirjanduses esinevatele massiivtelligisseina soojuslähivuse väärtustele. Samas pole võimalik saadud tulemust võtta usaldusväärseks, sest mõõtmisperioodi jooksul ei püsinud õhutemperatuurid väljas piisavalt stabiilsena, mis on usaldusväärse U-arvu leidmise eelduseks.

KIRJANDUSE LOETELU

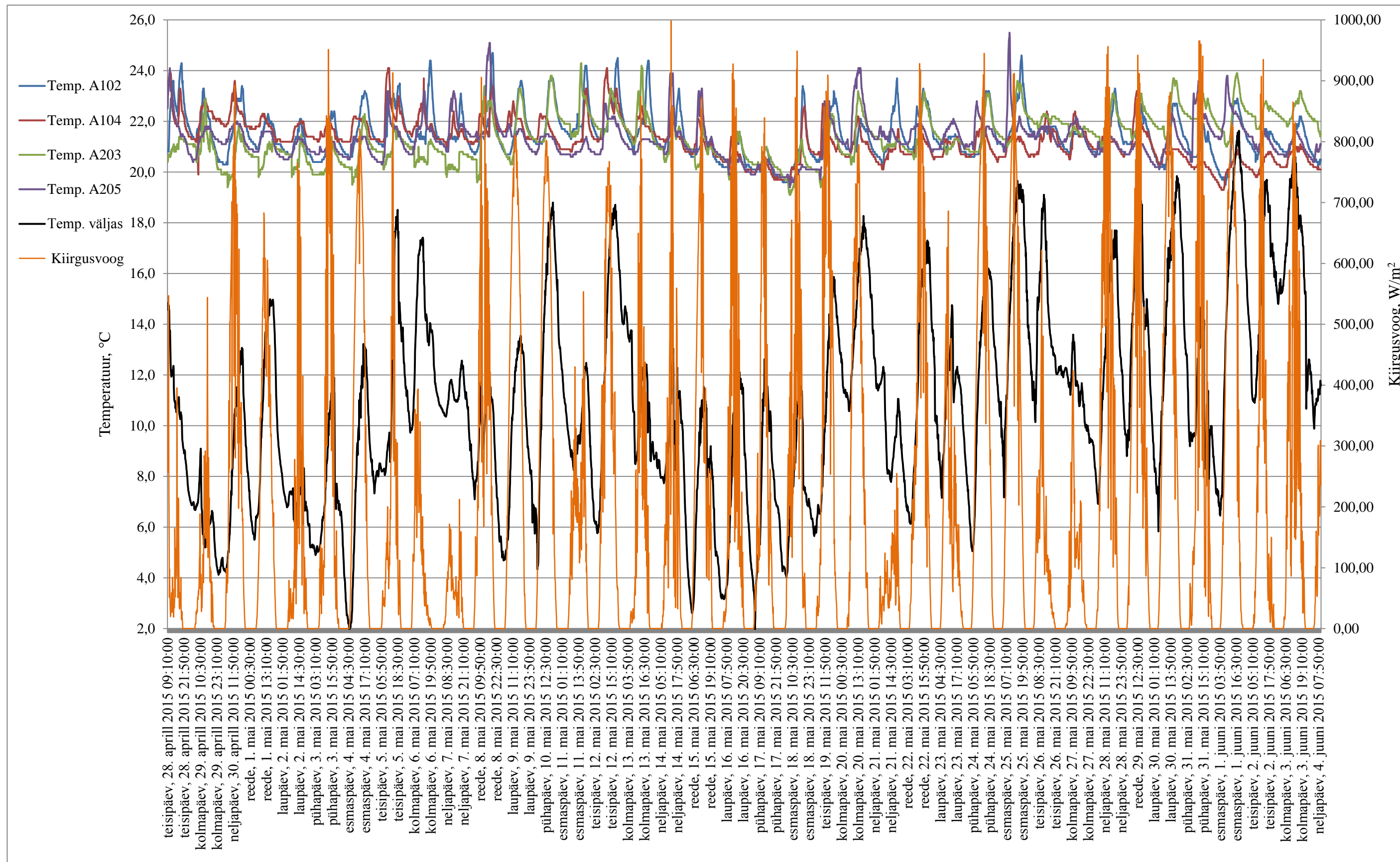
1. Jantunen, M., Jaakkola, J.J.K., Krzyzanowski, M. Assessment of exposure to indoor air pollutants. WHO Regional Publications European Series, No. 78, Kopenhaagen, 1997.
2. Carbon dioxide and its use in evaluating adequacy of ventilation in buildings. The Bureau of Environmental Health, 1996
3. Halminen, E., Kuvaja, O., Köttö, R. Ventilatsioonitööd. Viljandi, Print Best, 1998.
4. Töötervishoiu ja tööohutuse seadus. Riigi Teataja I, 10.11.2015, 13.
5. Kõiv, T. Õhu konditsioneerimine I. Õhutöötlemisprotsessid. Tallinn, Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2006.
6. Sisekeskkonna algandmed hoonete energiatõhususe projekteerimiseks ja hindamiseks, lähtudes siseõhu kvaliteedist, soojuslikust mugavusest, valgustusest ja akustikast. Eesti rahvuslik lisa standardile EVS-EN 15251:2007. Standard EVS 916:2012.
7. Seppänen, O., Seppänen, M. Hoone sisekliima kujundamine. Tallinn, Koolibri, 1998.
8. 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. Standard ISO 7730:2005.
9. Sisekeskkonna algandmed hoonete energiatõhususe projekteerimiseks ja hindamiseks, lähtudes siseõhu kvaliteedist, soojuslikust mugavusest, valgustusest ja akustikast. Standard EVS-EN 15251:2007.
10. Masso, T. Ehitusfüüsika ABC: soojus, niiskus, müra. Tallinn, EVG Print, 2012.
11. Kalamees, T., Arumägi, E., Just, A., Kallavus, U., Mikli, L., Thalfeldt, M., Klõšeiko, P., Agasild, T., Liho, E., Haug, P., Tuurmann, K., Liias, R., Õiger, K., Langeproon, P., Orro, O., Välja, L., Suits, M., Kodi, G., Ilomets, S., Alev, Ü., Kurik, L. Eesti eluasemefondi puitkorterelamute ehitustehniline seisukord ning prognoositav eluiga: uuring. Tallinn, Tallinna Tehnikaülikool, 2011.
12. Kõiv, T., Hamburg, A., Mikola, A., Kiil, M., Tükia A., Rohula, T., Silm, G., Palmiste, Ü. Rekonstrueeritud korterelamute sisekliima ja energiatarbe seire ja analüüs ning nende vastavus standarditele ja energiaaudititele. Lõpparuanne. Tallinn, 2014.

13. Jõgioja, E., Pahapill, L. Eesti kliima teatmik ehitajatele. Eesti Keskkonnaministeeriumi Ehitusosakond, 2000.
14. Rudblad, S., Andersson, K., Bodin, L., Stridh, G., Juto, E. J. Nasal mucosal histamine reactivity among young students and teachers, having no or prolonged exposure to a deteriorated indoor climate. *Allergy*, lk 1029...1035, 2002.
15. Abel, E., Voll, H. Hoonete energiatarve ja sisekliima. Tallinn, Presshouse, 2010.
16. Angelstok, F. Ventilatsiooni alused. Sisekaitseakadeemia, 2006.
17. Jones, J., Wellman, G., Kim, Y., Singh, H., Krafthefer, B. Performance Comparison for Thermal Comfort Sensors. *Ameerika Ühendriigid, Journal of Architectural Engineering*, Vol. 4, lk 99...106, 1998.
18. Personalized Thermal Comfort-Driven Control in HVAC-Operated Office Buildings. *Ameerika Ühendriigid, Computing in Civil Engineering*, lk 218...225, 2013.
19. Willers, S., Andersson, S., Andersson, R., Granten, J., Sverdrup, C., Rossel, L. Sick building syndrome symptoms among the staff in schools and kindergartens: are the levels of volatile organic compounds and carbon dioxide responsible? *Indoor Built Environment*, No.5, lk 232...235, 1996.
20. Esialgne eesti radooniriski levilate kaart. Eesti Geoloogiakeskus, 2004.
21. Jokl, M. V. Evaluation of indoor air quality using the decibel concept based on carbon dioxide and TVOC M.V. *Building and environment*, Vol. 35, lk 677...697, 2000.
22. Daisey, J. M., Angell, J. W., Apte, M. G. Indoor air quality, ventilation and health symptoms in schools: an analysis of existing information. *Indoor Air*, No. 13, lk 53...64, 2003.
23. U-arv. Termoplokk. Kättesaadav: <http://www.termoplokk.eu/miks-termoplokk-madalenergiamaja/u-arv/> (25.05.16)
24. Soojustatud valubetonivormidega ehitussüsteem. Climablock. Kättesaadav: http://climablock.ee/static/2016/03/doc-tecnica-CLIMABLOCK_ESTONIAN.pdf (25.05.16)
25. Ehituskonstruktori käsiraamat (2. osa). Jaanisoo, V., Masso, T., Otsmaa, V., Talvik, I. Tallinn, Ehitame, 2002.
26. Reinpuu, R. Ehitusfüüsika. Tallinn, 2006.

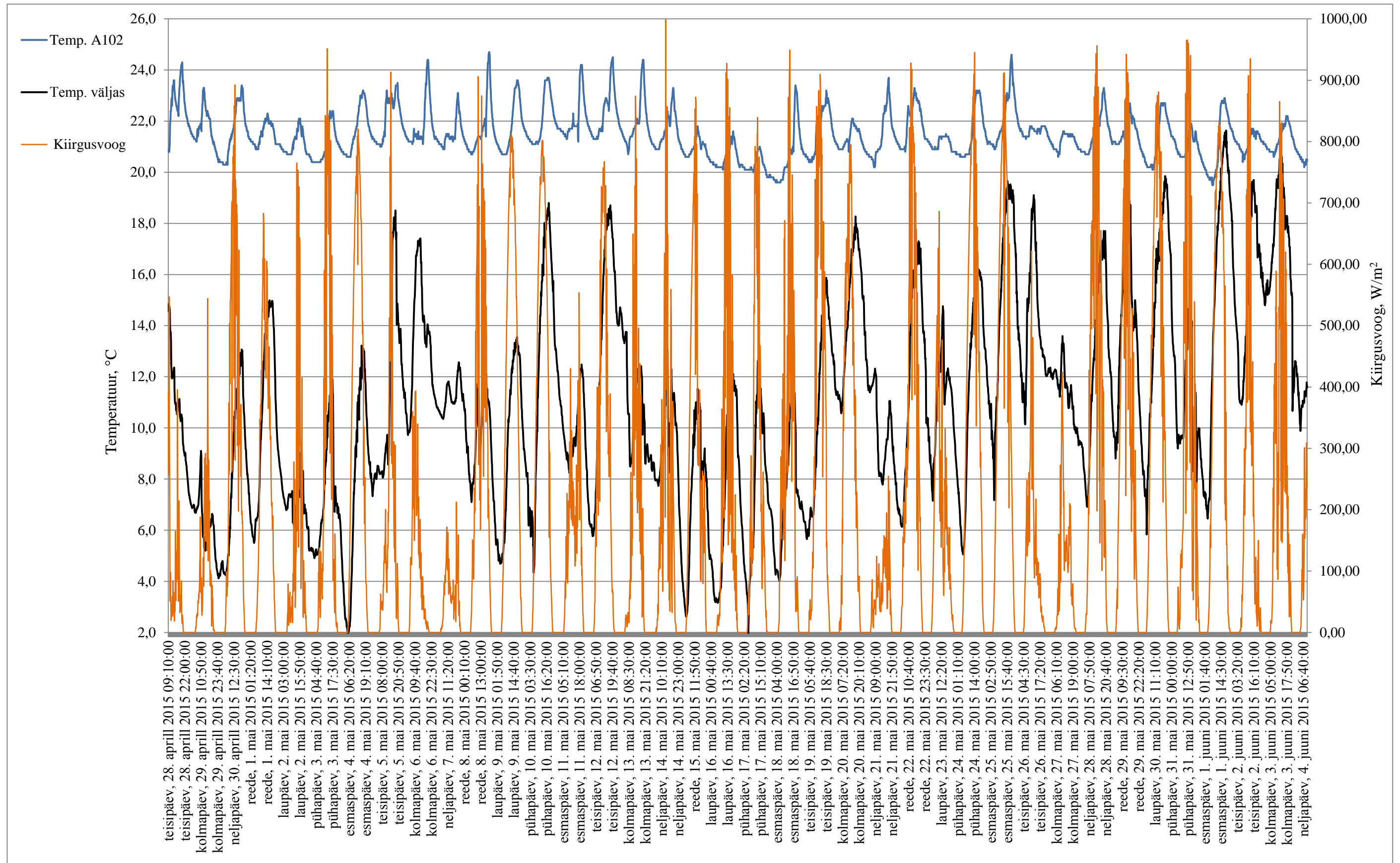
27. Siemens RVD110 paigaldusjuhend. Kättesaadav: http://www.siemens.ee/pool/estonia/infrastructure_and_cities/hooneautomaatika/juhendid/g2381est-rvd110-115-inst-juhend-juuli-2008.pdf (25.05.16)
28. Operational manual. Model 7798. 2011
29. Hobo UX100-023. Kättesaadav: <http://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/ux100-023> (25.05.16)
30. Surface Temperature Sensor. Vernier Kättesaadav: <http://www.vernier.com/products/sensors/temperature-sensors/sts-bta/> (25.05.16)
31. Vernier LABQ LabQuest. Kättesaadav: <https://www.schoolsavers.com/Vernier-LABQ-LabQuest-P506C98.aspx#> (25.05.16)
32. Hoone piirdetariendi soojusjuhtivuse arvutusjuhend. Osa 1: Välisõhuga kontaktis olev läbipaistmatu piire. Standard EVS 908-1:2010
33. Masso, T. Väikemajad. Tallinn, Valgus, 1990.
34. Veski, A. Otstarbekohasemalt elamu välisseintest. Ehitusmajandus, 1939.
35. Ehitusmaterjalid ja -tooted. Soojus- ja niiskustehnilised omadused. Tabuleeritud arvutusväärtused ja deklareeritavate ning arvutusväärtuste määramise meetodid. Standard EVS-EN ISO 10456:2008.
36. Heat Flow Plates FQAx. Kättesaadav: <http://www.ahlborn.com/media/425.waermeflusspl%20en> (25.05.16)
37. Almemo FHAD 46-2 digital temperature/humidity sensor. Kättesaadav: <http://www.inds.co.uk/product/almemo-fhad-46-2-digital-temperature-humidity-sensor/> (25.05.16)
38. Measuring heat flow. Almeno. Kättesaadav: <http://www.m-r-c.co.il/media/Uploads/FQA-OPR.pdf> (25.05.16)
39. Kalamees, T. Critical values for the temperature factor to assess thermal bridges: Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Tallinn, Tallinna Tehnikaülikool, 2006.
40. Maainfo kaardirakendus. Kättesaadav: <http://geoportaal.maaamet.ee/> (25.05.16)

LISAD

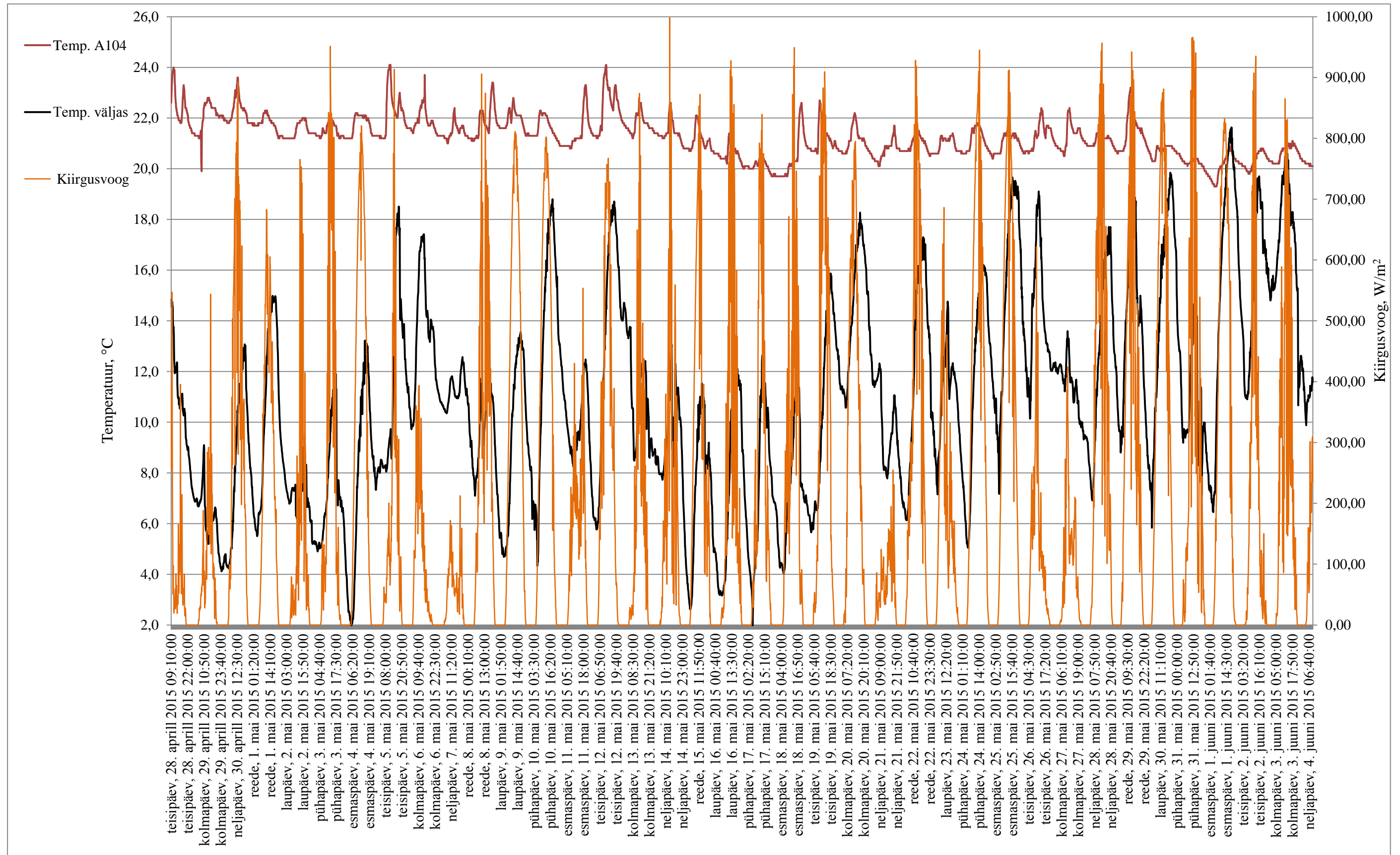
Lisa 1. Temperatuur ja kiirgusvoog auditooriumites perioodil 28. aprill kuni 4. juuni 2015



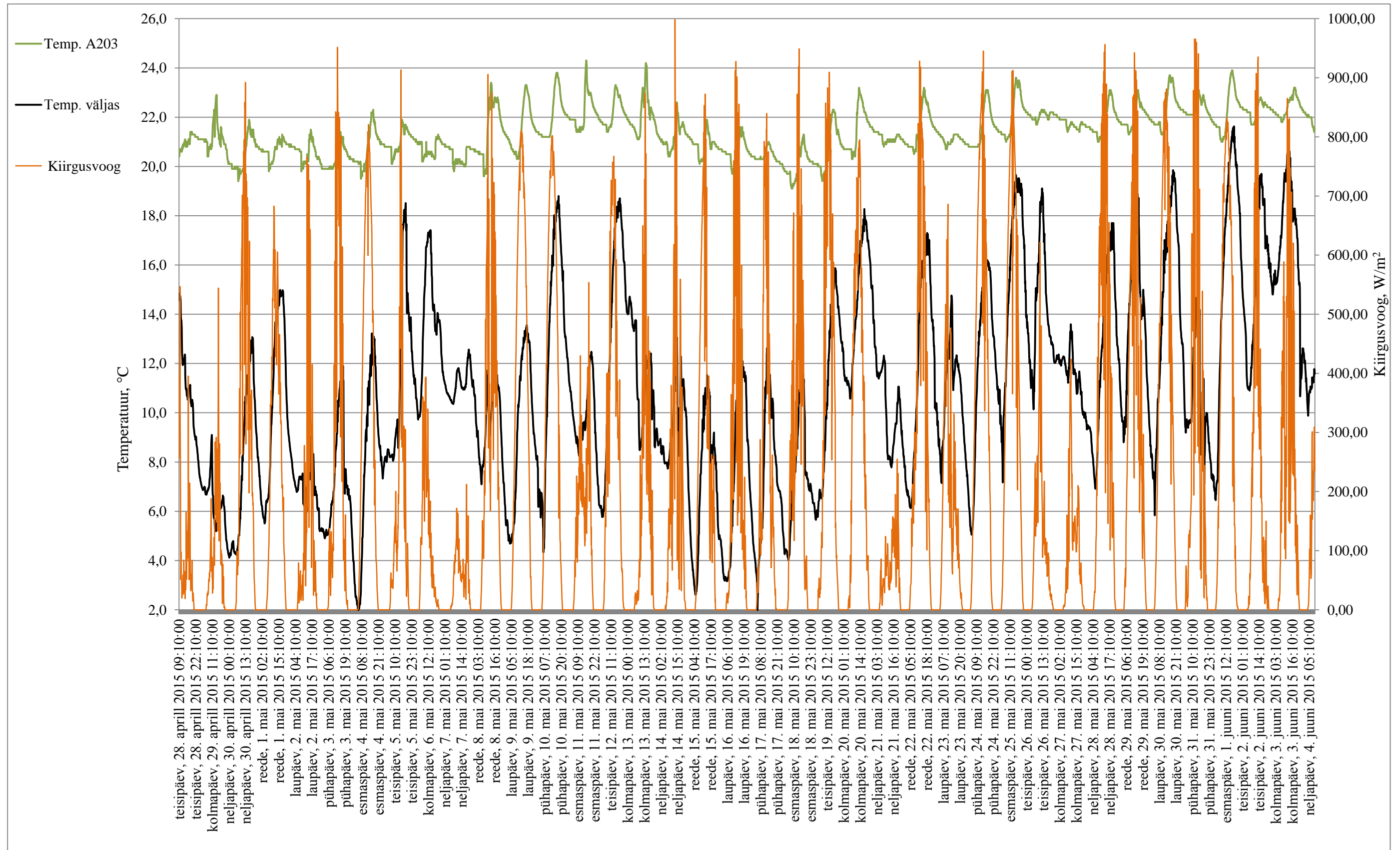
Lisa 2. Temperatuur ja kiirgusvoog auditooriumis A102 perioodil 28. aprill kuni 4. juuni 2015



Lisa 3. Temperatuur ja kiirgusvoog auditooriumis A104 perioodil 28. aprill kuni 4. juuni 2015



Lisa 4. Temperatuur ja kiirgusvoog auditooriumis A203 perioodil 28. aprill kuni 4. juuni 2015



Lisa 5. Temperatuur ja kiirgusvoog auditooriumis A205 perioodil 28. aprill kuni 4. juuni 2015

