



1918

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
TARTU KOLLEDŽ

Säästva tehnoloogia õppetool

KÜLMASILDADE JA SISEKLIIMA UURING BÜROOHOONES TARTU TEADUSPARGI NÄITEL

EVALUATION OF THERMAL BRIDGES AND INDOOR CLIMATE IN TARTU
SCIENCE PARK

Magistritöö
materjalide taaskasutuse ja ettevõtte juhtimise erialal

Üliõpilane: **Mati Sõber**

Juhendaja: **Aime Ruus**

Tartu, 2014

ABSTRACT

The aim of this research is to evaluate thermal bridges and indoor climate in Tartu Science Park, an office building. Thermal bridges are analyzed in two ways, first using thermography and then with 2D heat transfer software called Therm. The results from thermography and Therm are used to calculate the temperature index of a thermal bridge. Temperature index shows if there is any risk of mold growth or water condensation near the thermal bridge. Indoor climate is evaluated by measuring the indoor temperature, relative humidity and CO₂ concentration. These measurements are then compared with the recommended values.

The results show that most thermal bridges in the building are located at the joints of exterior walls and window frames. The research found over 60 cases, where there was a risk of mold growth, and over 40 cases, where water condensation could occur. Many thermal bridges were found at the joints of window frames and glass panels, some were found at the joints of first story floors and exterior walls. The main cause of thermal bridges in those areas was found to be poor construction work. Thermal bridges at the joints of windows frames and glass panels are believed to be caused by flaws in the manufacturing process.

The results of indoor climate study show that the main problem in the building was too low relative humidity, which may pose health risks such as dry skin, irritated sinuses and itchy eyes. The average relative humidity in the building was 23 %, at some points it got as low as 11%. The main cause of low relative humidity was found to be over ventilation of rooms. Ventilation rates were calculated using CO₂ concentration in rooms, the results showed that in all the rooms the ventilation rate was higher than recommended. Low CO₂ concentrations in rooms also implied over ventilation. Indoor temperature and CO₂ concentration were at recommended levels most of the time.

SISUKORD

SISSEJUHATUS	5
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE	6
1.1 ENERGIATÕHUSUSE MIINIMUMNÕUDED	6
1.1.1 Nõuded ventilatsioonile ja ruumitemperatuurile	6
1.1.2 Nõuded välispiiretele	6
1.1.3 Nõuded tehnosüsteemidele	7
1.1.4 Energiatõhususe miinimumnõuetele vastavuse tõendamine.....	7
1.2 KÜLMASILLAD	7
1.2.1 Külmasildade kriitiline tase	8
1.2.2 Termovisioon ja selle kasutamine hoonete külmasildade avastamiseks.....	10
1.3 SISEKLIIMA	12
1.3.1 Siseõhu temperatuur.....	13
1.3.2 Siseõhu suhteline niiskus	14
1.3.3 Siseõhu puhtus	15
1.4 SISEKLIIMAT HALVENDAVAD TEGURID	16
1.5 PÕHILISED EHITUSVEAD, MIS SUURENDAVAD SOOJUSENERGIA KADUSID	18
1.5.1 Vundamendi, sokli ja põranda soojustusvead.....	18
1.5.2 Seinte soojustusvead	19
1.5.3 Katuslae soojustusvead	20
2. TÖÖ EESMÄRK JA ÜLESANDED	21
3. MATERJAL JA METOODIKA	22
3.1 ÜLEVAADE UURIMISOBJEKTIKS OLEVAST HOONEST	22
3.1.1 Hoone konstruktsioonid	22
3.2 MEETODID KÜLMASILDADE UURIMISEKS	23
3.2.1 Termovisioon	23
3.2.2 Külmasilla hindamine kasutades temperatuurivälja arvutust	24
3.3 MEETODID SISEKLIIMA UURIMISEKS	25
4. TULEMUSED	27
4.1 KÜLMASILDADE KRIITILISUSE HINDAMINE KASUTADES TERMOVISIOONI	27
4.1.1 Välisseina ja esimese korruse põranda liitekoht	27

4.1.2	Välisseina ja vahelae liitekoht	29
4.1.3	Välisseina ja katuslae liitekoht.....	30
4.1.4	Akende ümbrus	31
4.1.5	Akna klaaspaketi ja raami liitekoht.....	32
4.1.6	Külmasillad teistes piirkondades	33
4.2	KÜLMASILLDADE KRIITLINE TASE KASUTADES TEMPERATUURIVÄLJA ARVUTUST.....	34
4.2.1	Välisseina ja esimese korruse pöranda liitekoht	35
4.2.2	Välisseina ja vahelae liitekoht	37
4.2.3	Välisseina ja katuslae liitekoht.....	40
4.2.4	Välisseina ja akna liitekoht	42
4.3	SISEKLIIMA MÕÕTMISTE TULEMUSED RUUMIDE KAUPA	45
4.3.1	Sisekliima mõõtmistulemused nõupidamisruumis	45
4.3.2	Sisekliima mõõtmistulemused ruumis nr. 210.....	46
4.3.3	Sisekliima mõõtmistulemused ruumis nr. 312.....	48
4.3.4	Sisekliima mõõtmistulemused ruumis nr. 308.....	49
4.3.5	Sisekliima mõõtmistulemused ruumis nr. 109.....	51
4.3.6	Sisekliima mõõtmistulemused ruumi nr. 146 kontoris	52
4.3.7	Sisekliima mõõtmistulemused ruumi nr. 146 tootmises	54
4.3.8	Sisekliima mõõtmistulemused seminariruumis	55
4.4	SISEKLIIMA MÕÕTMISTE KOKKUVÕTLIKUD TULEMUSED.....	57
4.4.1	Siseõhu temperatuur.....	57
4.4.2	Siseõhu suhteline niiskus	58
4.4.3	Siseõhu CO ₂ kontsentratsioon.....	59
5.	JÄRELDUSED.....	61
5.1	KÜLMASILLAD JA VÕIMALUSED NENDE VÄHENDAMISEKS	61
5.2	SISEKLIIMA JA SELLE PARANDAMISE VÕIMALUSED	61
	KOKKUVÕTE.....	63
	KASUTATUD KIRJANDUS	64
	LISAD	67

SISSEJUHATUS

Enamikes maailma riikides on energia hinnad pideval tõusuteel. Seetõttu on Euroopas viimase kahekümne aasta jooksul hakatud järjest rohkem tähelepanu pöörama hoonete energiakasutuse vähendamisele. Energiakasutuse vähendamine ei tohi aga kaasa tuua hoonete sisekliima halvenemist. Euroopa liidu liikmesriigid on sätestanud endi seas mitmeid eesmärke, mille saavutamine tagaks energiakulu vähenemise:

- 1) Kasvuhoonegaaside heitkoguseid tuleb vähendada vähemalt 20% võrreldes 1990te. aastatega.
- 2) 20% Euroopa Liidu energiast peab tulema taaskasutatavatest allikatest.
- 3) Primaarenergia kulu tuleb vähendada 20%, see saavutada hoonete energiatõhususe suurendamisega. [1]

Eestis on eelpool mainitud eesmärkide täitmiseks sätestatud hoonete energiatõhususe miinimumnõuded, aga ka nõuded ruumide sisekliimale. Energiatõhususe miinimumnõuded esitavad energiakasutuse piirmäärad ja nõuded ehitatavatele ja oluliselt rekonstrueeritavatele hoonetele. Energiakasutuse miinimumnõuded lähtuvad hoonete kasutamise otstarbest ning võtavad arvesse nende tehnilisi näitajaid. [2]

Käesolevas töös kirjeldatakse kehtivaid miinimumnõudeid, analüüsitakse ehitustel tehtavaid vigu ja uuritakse erinevaid meetodeid külmasildade ja sisekliima hindamiseks. Töö konkreetsemaks eesmärgiks oli hinnangu andmine 2006. aastal rekonstrueeritud uurimisobjekti välispiirete külmasildade kriitilisusele ja ruumide sisekliima kvaliteedile.

1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

1.1 ENERGIATÕHUSUSE MIINIMUMNÕUDED

1.1.1 Nõuded ventilatsioonile ja ruumitemperatuurile

Energiatõhususe miinimumnõuetes on määratud, kui suur peab olema ventilatsiooni välisõhu vooluhulk hoone kasutusajal, samuti on ära määratud nõuded ruumitemperatuurile. Välisõhu vooluhulga all on mõeldud minimaalset nõutud ventilatsiooni välisõhu vooluhulka hoone kätava pinna kohta. Välisõhu vooluhulga suurus sõltub hoone kasutusotstarbest, antud juhul on tegemist teadushoonega, seega on vastav vooluhulga suurus $2 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$. Ette on nähtud, et talvel ei langeks teadushoones temperatuur alla $21 \text{ }^\circ\text{C}$ ning suvel ei tohi temperatuur ületada $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Siiski võib suvel olla temperatuur ajutiselt (kuni 100 tundi) ka kõrgem. Et vältida ruumide ülekuumenemist, tuleks eelistada passiivseid jahutusmeetodeid, st. vältida ruumide ülekuumenemist erinevate ehituslike ja arhitektuursete lahendustega. Sellisteks lahendusteks on näiteks hoone päikesekaitse, hoone asend ilmakaarte suhtes ja klaaspindade suurus. Ruumide õine jahutus tuleks tagada ventilatsiooniga. [2]

1.1.2 Nõuded välispiiretele

Nõuded välispiiretele puudutavad eelkõige välispiirete õhupidavust ja soojustatust. On nõutud, et välispiirded peavad olema piisavalt soojustatud ja pikaajaliselt õhkupidavad. Soojustuse määramisel tuleb lähtuda hoone energiatõhususe nõuetest, hallituse ning kondensaadi vältimisest ja ruumide soojuslikust mugavusest. Et tagada ruumide soojuslik mugavus peab piirde soojuslähivus olema üldjuhul väiksem kui $0,5$ vatti ruutmeetri ja kraadi kohta $[\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})]$. Avatäidete puhul, millel on kõrgem soojuslähivus kui $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, tuleb soojuslik mugavus tagada küttelahendustega. Valides soojustust tuleb lähtuda sellest, et ehitus oleks hea energiatõhususe tasemega. Teadushoone välispiirete puhul võib esialgselt lähtuda järgmistest väärtustest:

- 1) Põranda ja katuse soojuslähivus $0,1-0,2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
- 2) Uste ja akende soojuslähivus $0,6-1,1 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
- 3) Välisseinte soojuslähivus $0,15-0,25 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ [2]

Soojuslähivuse leidmiseks tuleb kõigepealt leida piirde kogusoojustakistus, mis leitakse üksikute kihtide arvutuslike soojustakistuste ning sise- ja välispindade soojustakistuste

liitmisel. Soojustakistuse leidmiseks tuleb teada tarindis paiknevate materjalide paksust ja materjalide soojusjuhtivust. [3]

Et vältida niiskuskonvektsiooni riske, tuleb tarindite kriitilised sõlmed teha võimalikult õhkupidavaks. Kriitilised sõlmed on näiteks katuse ja seina ühendus, põranda ja vundamendi ning seina ühendus, õhu- või aurutõkke jätkukohad. [2]

1.1.3 Nõuded tehnosüsteemidele

Miinimumnõuete kohaselt peavad tehnosüsteemid olema projekteeritud ja paigaldatud nii, et oleks tagatud nende võimalikult efektiivne ja pikaajaline töötamine. Tuleks vältida üleliigseid energiakadusid, see saavutada torustike ja soojussalvestite isoleerimisega. Siseõhu kvaliteedi tagamiseks kasutatakse üldjuhul sundventilatsiooni. Et saavutada ventilatsiooni energiatõhusus, kasutatakse võimalikult suure kasuteguriga ventilaatoreid ja juhtseadmeid, efektiivset soojustagastust, madala rõhulanguga torustikke ja ventilatsiooniseadmete komponente. [2]

1.1.4 Energiatõhususe miinimumnõuetele vastavuse tõendamine

Energiatõhususe miinimumnõuetele vastavust on võimalik kontrollida kahel meetodil:

- 1) Arvutuslikult
- 2) Lihtsustatud tõendamismeetodi abil

Esimesel juhul arvutatakse hoone energiatõhususarv hoone standardkasutusel. Selleks summeeritakse kogu imporditud energia ja energiakandjate kaalumistegurite korrutised ning sellest lahutatakse eksporditud energia ja energiakandjate kaalumistegurite korrutised. Teisel juhul hoone energiatõhususarvu ei arvutata, vaid tõendatakse hoone energiatõhususe piirväärtustele vastavust. [2]

Käesolevas töös on uuritud hoone ruumide sisetemperatuuri ja ventilatsiooni vooluhulkade vastavust miinimumnõuetele.

1.2 KÜLMASILLAD

Külmasildadeks nimetatakse piirdetarindis olevaid kohti, kus soojusjuhtivus on lokaalselt suurem[4]. Külmasillad jaotatakse kahte gruppi:

- 1) Geomeetrilised – näiteks põranda ja välisseina liitumine, välisseina ja katuslae liitumine, välisseina välisnurk, välisseina ja vahelae liitekoht.

2) Ehitustehnilised – näiteks välisvoodri sidemed, tarindite läbiviigid. [5]

Külmasildu võivad põhjustada soojustuse valesti paigaldamine või soojustuse puudumine, aga ka märjaks saanud soojustus, lekked õhutõkkes ning ventilatsiooni- ja küttesüsteemide toimivus [5]. Külmasildadega arvestamine on väga oluline mitmel põhjusel:

- 1) Kuna külmasillal on suurem soojusjuhtivus, siis tekitab see madalama sisepinna temperatuuri. Madal sisepinnatemperatuur tähendab aga kõrgemat suhtelist niiskust, mis võib põhjustada tarindi pinnal mikroorganismide kasvu või veeauru kondenseerumist tarindis. Kui suhteline niiskus on 100% ja temperatuur langeb alla küllastustemperatuuri, siis veeaur kondenseerub. Hallituse tekkimiseks toatemperatuuril peaks suhteline niiskus olema vähemalt 75-80 %.[5,6]
- 2) Külmasillad põhjustavad hoonete suuremat energiakulu. Kuna läbi külmasildade tekivad soojakaod, siis kulutatakse rohkem soojusenergiat ruumi kütmiseks.[6]
- 3) Madalamad tarindite pinnatemperatuurid vähendavad soojuslikku mugavust – külmematelt tarindipindadelt allalangev jahtunud õhk tekitab toas külmasid õhuvoolusid.[6]

Välispiirete (välisseinte, põrandate ja katuste) soojuskadude arvutamisel leitakse soojakaod välispiirde soojajuhtivuse ning sisemõõtudega arvutatud pindala järgi. Lisaks on vaja leida külmasildadest põhjustatud lisasoojuskaod, mis võetakse arvesse leides külmasildade lisajuhtivused. Külmasildade lisajuhtivused jaotatakse kahte gruppi:

- 1) Joonkülmasillad ψ , $W/(m \cdot K)$
- 2) Punktkülmasillad χ , $W/(tk \cdot K)$ [6]

Külmasildade lisajuhtivuseks nimetatakse soojuskadu vattides läbi külmasilla, kui temperatuuride erinevus on üks kraad. [7]

1.2.1 Külmasildade kriitiline tase

Külmasildadest tingituna on piirdetarindi sisepinna temperatuur madalam. Et määrata kui kriitiline on antud külmasild, arvutatakse selle temperatuuriindeks.

Temperatuuriindeks on sisepinnatemperatuuri ja välistemperatuuri erinevuse ja siseõhutemperatuuri ja välistemperatuuri erinevuse suhe [8, 9]:

$$f_{Rsi} = \frac{t_{si} - t_e}{t_i - t_e}, \quad (1.1)$$

kus: f_{Rsi} - temperatuuriindeks

t_{si} - sisepinnatemperatuur, °C

t_i - siseõhu temperatuur, °C

t_e - välisõhu temperatuur, °C

Pinnatemperatuurid saab määrata kas termograafilise mõõdistamise käigus või siis temperatuurivälja arvutusega. Edasi saab arvutada temperatuuriindeksi, mida tuleb võrrelda selle piirarvuga. Kui temperatuuriindeks on väiksem, kui ettenähtud piirarv, siis on külmasillas hallituse tekkimise oht [10]. Eesti kohta on külmasildade hindamiseks kasutatava temperatuuriindeksi piirväärtused välja arvanud prof. T. Kalamees aastal 2006 [4]. Temperatuuriindeksi piirsuurused lähtuvad Eestis eelkõige hoonete niiskuskooormusest ning hallituse kasvu ja veeauru kondenseerumise vältimise kriteeriumitest. Mida suurem on ruumide niiskuskooormus, seda paremini peavad olema soojustatud hoonepiirded ja nende liitekohad. Eelkõige tuleks temperatuuriindeksite arvutamisel kasutada hallituse vältimise kriteeriumit. Hoone akendel, kus on lühiajaliselt lubatud ka vee kondenseerumist, võib kasutada ka kondenseerumise vältimise kriteeriumit [5]. Temperatuuriindeksi piirväärtused Eestis on järgmised [4]:

1) Kui niiskuskooormus talvel +6 g/m³ ja suvel +2,5 g/m³, siis:

a) Hallituse vältimine: $f_{Rsi, \min} = 0,8$

b) Kondenseerumise vältimine: $f_{Rsi, \min} = 0,7$

2) Kui niiskuskooormus talvel +4 g/m³ ja suvel +1,5 g/m³, siis:

a) Hallituse vältimine: $f_{Rsi, \min} = 0,65$

b) Kondenseerumise vältimine: $f_{Rsi, \min} = 0,55$

Niiskuskooormuse leidmiseks saab kasutada arvutusvalemit [11]:

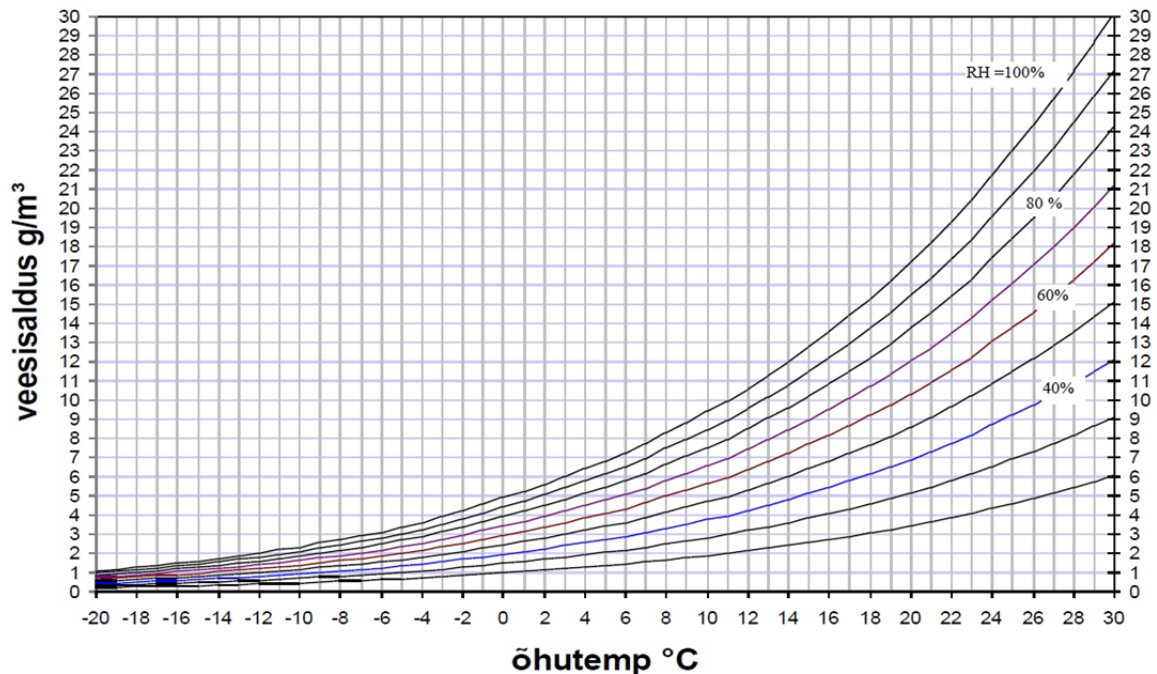
$$\Delta v = v_i - v_e, \quad (1.2)$$

kus: Δv - niiskuskooormus, g/m³

v_i - siseõhu veeaurusisaldus, g/m³

v_e - välisõhu veeaurisisaldus, g/m^3

Selleks, et leida sise- ja välisõhu veeaurisisaldust, tuleb teada hoone sise- ja välistemperatuuri ning sise- ja välisõhu suhtelist niiskust. Neid andmeid teades saab veesisalduse leidmiseks kasutada tabeliandmeid või graafikut, mis on toodud joonisel 1.1.



Joonis 1.1 Veesisaldus õhus sõltuvalt temperatuurist ja suhtelisest niiskusest

1.2.2 Termovisioon ja selle kasutamine hoonete külmasildade avastamiseks

Termovisioon on uuritava objekti ja selle pinna temperatuurijaotuse pildistamine. Termovisiooni käigus mõõdetakse kehalt kiirgunud või peegeldunud soojusenergiat. Soojuskiirgus on laetud osakeste soojusliikumise tõttu tekkiv elektromagnetiline kiirgus ja teades ümbritseva keskkonna tingimusi ning pildistatava pinna omadusi, saab arvutada selle pinna temperatuuri. Ehituses on termovisioon väga oluline abivahend, sest selle abil saab teostada mitmeid uuringuid ilma, et oleks vaja tarindeid avada. [12, 13]

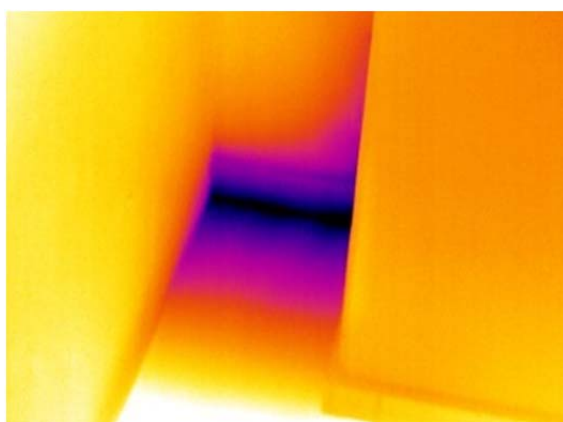
Peamised termograafia eesmärgid ehituses on [12]:

- 1) Hoone välispiirete pinnatemperatuuride ebahütluse määramine, mis viitab soojusjuhtivuse ja niiskuse ebahütlusele.
- 2) Hinnata erinevate pinnatemperatuuride alusel, kui palju erineb hoonepiirete soojajuhtivus.

- 3) Õhulekkekohtade leidmine ja nende suuruse hindamine. Selle jaoks tuleb teha termopildid nii tavatingimustes kui ka alarõhu tingimustes ning seejärel saab antud tulemusi võrrelda.
- 4) Ehituskvaliteedi hindamine – külmasillad ning nendega seonduv on enamasti tingitud halvast ehituskvaliteedist.
- 5) Põranda- ja seintesiseste veetorude ning ülekuumenenud elektrijuhtmete leidmine.

Termopildistamise ajal on oluline tähele panna, et sise- ja välistemperatuuride vahe oleks võimalikult suur, see peaks olema vähemalt 15 °C. Samuti on tähtis, et selline temperatuuride vahe oleks enne mõõtmisperioodi ühtlaselt püsinud [12]. Lisaks sellele tuleb tähele panna, et pilte ei tohiks teha konstruktsioonidest kuhu päike otse peale paistab. Hoonele peale paistev päike soojendab välispiirdeid ning nii ei pruugi külmasildu näha olla.

Piirete sisepinnatemperatuur on kõrgem, kui need on paremini soojustatud. Seega on hästi soojustatud piiretel ka kõrgem temperatuuriindeks. Kui piirdetarindis asub külmasild, on seal sisepinna temperatuur madalam, mistõttu on seal suhteline niiskus kõrgem. Mida kõrgem on suhteline niiskus, seda suurem tõenäosus on hallituse tekkeks [12]. Termopiltidel on erineva temperatuuriga piirkonnad kirjeldatud erinevate värvidega, madalamad temperatuurid on pildidel tavaliselt tumesinised kuni mustad, kõrged temperatuurid aga kollased ja punased. Tehes termopilte hoone seest, on külmasillad eristatavad tumedamate toonide ning välispidisel termografeerimisel heledamate kohtade järgi. Joonisel 1.2 on toodud näide külmasilla kohta seespidisel termografeerimisel.



Joonis 1.2 Näide külmasillast seespidisel termografeerimisel

1.3 SISEKLIIMA

Hoone sisekliima hõlmab endas mitmeid näitajaid, mis on seotud õhu ja õhukeskkonnaga. Hea sisekliima on väga oluline, et tagada seal viibivate inimeste hea enesetunne ning et vähendada haigestumise ohtu. Samuti võib hea sisekliima suurendada inimeste tööviljakust [14]. Sisekliima määravad mitmed tegurid, milleks on [15]:

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

Töötervishoiu ja tööohutuse seadus sätestab, et töökoha sisekliima peab olema tööülesande täitmiseks sobiv. See hõlmab endas peamiselt just õhutemperatuuri ja –niiskuse ning õhu liikumise näitajaid. Samuti on oluline tagada töökohtade varustatus värske õhuga. Sisekliima loomisel tuleb arvestada töötajate arvuga ruumides, tööruumi suurust, töötajate füüsilist ja vaimset koormust, tehnoloogilise protsessi iseloomu ning töövahendite spetsiifikat. Töökeskkonnas olev müra ei tohi kahjustada inimeste tervist. Vaimset tööd tegevate inimeste puhul ei tohi müra segada tööülesannete täitmist. [15]

Eesti standard EVS-EN 15251:2007 sätestab kõik soovituslikud väärtused sisekliima parameetritele, lähtudes hoone sisekliima soojusliku mugavuse klassist. Soojuslik mugavus on subjektiivne mõiste, mis väljendab inimeste rahulolu ruumis olevate sisekliima tingimustega. Selle standardi järgi on sisekliima jaotatud 4 erinevasse klassi. Nende klasside kirjeldused on toodud tabelis 1.1 [16]. Kuna käesolevas töös uuritav hoone on 2006. aastal põhjalikult renoveeritud, võib selle hoone sisekliima soojusliku mugavuse klassiks võtta II. Antud uuringus on käsitletud kolme olulist sisekliima näitajat (õhutemperatuur, õhuniiskus ja CO₂ kontsentratsioon õhus) ning hinnatud nende vastavust soovitatavatele väärtustele lähtudes sisekliima klassist II.

Tabel 1.1 Sisekliima klasside kirjeldus [16]

Sisekliima klass	Rahulolematute inimeste hulk ruumis, %	Selgitus
I	<6	Kõrged nõudmised sisekliima kvaliteedile. Soovitatav ruumides, kus viibivad väga tundlikud, nõrga tervisega ja erinõuetega inimesed
II	<10	Tavapärased nõudmised sisekliima kvaliteedile. Tuleks rakendada uutes ja renoveeritavates hoonetes
III	<15	Mõõdukad nõudmised sisekliima kvaliteedile. Võib rakendada olemasolevates hoonetes
IV	>15	Sisekliima kvaliteedi väärtused, mis jäävad väljapoole eelmainitud klasse. Antud klass võib olla vastuvõetav ainult piiratud ajal aastast

1.3.1 Siseõhu temperatuur

Üks peamisi sisekliima soojusliku mugavuse näitajaid on ruumi õhutemperatuur [17]. Lisaks sellele mõjutab ruumitemperatuur suuresti ka energiakulu. Soomes tehtud uuringu kohaselt toob 1 °C sisetemperatuuri muutus kaasa energiakulu muutuse ~5 % [18]. Kui hoone välispiirded on halvasti soojustatud (suure soojuslähivusega) on nende sisemine pinnatemperatuur väiksem. Väiksem sisepinnatemperatuur toob kaasa ka väiksema ruumitemperatuuri ja seetõttu hakkavad inimesed enda mugavuse tagamiseks seda ruumi rohkem kütma. See toob kaasa aga suurema soojusenergiakulu [5, 19]. Soovituslikud ruumitemperatuurid sõltuvad hoone või ruumi tüübist ja on nendest lähtuvalt jaotatud kolme klassi [16]. Käesolevas töös uuritava hoone tüübi kohta on tabelis 1.2 toodud soovituslikud ruumitemperatuurid talveperioodil. Lähtudes sisekliima klassist II on uuritava hoone soovituslik temperatuurivahemik talvel 20-24 °C.

Tabel 1.2 Soovituslikud ruumitemperatuurid talveperioodil sisekliima kolmes klassis

[16]

Hoone või ruumi tüüp	Sisekliima klass	Temperatuurivahemik, °C
Kontoriruumid, avatud bürood, konverentsiruumid, auditooriumid	I	21-23
	II	20-24
	III	19-25

1.3.2 Siseõhu suhteline niiskus

Teine väga oluline sisekliima soojusliku mugavuse indikaator on õhu suhteline niiskus [20]. Suhteline niiskus on veeauru osarõhu ja samadel füüsikalistel tingimustel küllastunud veeauru osarõhu suhe [21]. Siseõhu suhteline niiskus sõltub nii ventilatsiooni toimivusest, õhuvahetusest, välisõhust, temperatuurist kui ka niiskustootlusest ruumis. Suhtelise õhuniiskuse juures mängib suurt rolli temperatuur: ühesuguse veeauru sisaldusega õhu suhteline niiskus on külmemas keskkonnas kõrgem ja soojemas keskkonnas madalam. Talvel on enamasti välisõhu suhteline niiskus kõrge, kuid veeauru sisaldus väike. Seetõttu on ka siseruumide suhteline niiskus talvel madalam. Järelduseks võib öelda, et kuna suhteline niiskus sõltub temperatuurist, ei anna see infot selle kohta, kas ruumides on väike või suur niiskuskooormus. Et teada saada, kui suur on siseruumide niiskuskooormus, tuleb leida sise- ja välisõhu veeaurusisalduste erinevus [5]. Mida suurem on hoone niiskustootlus ja mida väiksem on õhuvahetus, seda suurem on niiskuskooormus. Kui hoones on suur niiskuskooormus võib see halvendada sisekliimat ning põhjustada ka välispiirete niiskuskahjustusi. Välispiirete niiskuskahjustused võivad lisaks konstruktsioonide kahjustamisele põhjustada ka inimeste terviseprobleeme, kuna kõrgem õhuniiskus soodustab mikroorganismide paljunemist ja levikut. Liiga väike suhteline niiskus võib samuti tekitada hoones terviseprobleeme, kuna põhjustab liigset kuivust ja hingamisteede ning silmade ärritust [20]. Soovituslikud niiskussisalduse väärtused inimestega hõivatud ruumides on toodud tabelis 1.3. Lähtudes sisekliima klassist II on uuritava hoone soovituslik niiskusvahemik 25-60% [16].

Tabel 1.3 Soovituslikud niiskussisalduse väärtused inimestega hõivatud ruumides
[16]

Sisekliima klass	Soovituslik niiskusvahemik, %RH
I	30-50 %
II	25-60 %
III	20-70 %

1.3.3 Siseõhu puhtus

Inimesed veedavad väga suure osa enda elust siseruumides, mõningate uuringute kohaselt kuni 90%, seega on oluline pöörata siseõhu puhtusele suurt tähelepanu [22]. Hoone ruumidesse eraldub saasteaineid mitmetest allikatest - inimtegevuse tagajärjel, seadmetest kui ka ehitus- ja viimistlusmaterjalidest. Saasteained võivad kahjustada nii inimeste tervist kui ka ehituskonstruksioone, seetõttu on oluline need ruumidest eemaldada. Et tagada ruumide siseõhu kvaliteet kasutatakse selleks ventilatsiooni. Ventilatsiooniks nimetatakse erinevate seadmete ja meetmete kogumit, et õhuvahetuse abil tagada õhu puhtus, temperatuur, niiskus ja õhu liikumise kiirus [12].

Siseõhu kvaliteeti mõjutavad mitmed faktorid - CO₂, tolmu ja niiskuse tase, lisaks veel tubakasuitsu põlemisproduktide tase ning teiste gaasilises või hõljuvas olekus olevate lisandite ja mikroorganismide tase [12]. Kui peamiseks õhusaastajaks ruumis on inimesed, iseloomustab just CO₂ sisaldus õhu kvaliteeti [23]. Eestis käsitleb siseõhu CO₂ sisaldust hoonetes hoonete energiatõhususe lähteparameetrite määramise standard (EVS-EN 15251:2007) ja sisekliima projekteerimiskriteerium (CR 1752). Käesolevas töös on kasutatud just standardi EVS-EN 15251:2007 poolt esitatud soovituslikke CO₂ väärtusi, mis on toodud tabelis 1.4. Lähtudes sisekliima klassist II on uuritava hoone soovituslik maksimaalne CO₂ kontsentratsioon 850 ppm [16].

Tabel 1.4 Soovituslikud CO₂ kontsentratsioonid esitatult üle välisõhu kontsentratsiooni [16]

Sisekliima klass	Vastav CO ₂ kontsentratsioon üle välisõhu taseme, väljendatuna ppm-des (miljondikosades)	CO ₂ kontsentratsioon välisõhu tasemel 400 ppm
I	350	700
II	500	850
III	800	1150
IV	>800	>1150

Teades siseõhu CO₂ kontsentratsiooni saab tuletada ligikaudse ventilatsiooni õhuvooluhulga. Ventilatsiooni õhuvooluhulga järgi saab hinnata, kas ruum on piisavalt ventileeritud või esineb üle- või alaventileerimist. Õhuvooluhulga määramiseks ruumis, kus inimeste tase on enamjaolt konstantne, saab kasutada järgmist valemit [24]:

$$Q = \frac{G}{c_{in} - c_{out}}, \quad (1.3)$$

kus: Q – ventilatsiooni vooluhulk, m³/s

G – CO₂ toodang ruumi, mg/s

c_{in} – Siseõhu CO₂ kontsentratsioon, mg/m³

c_{out} – Välisõhu CO₂ kontsentratsioon, mg/m³

CO₂ toodang ruumi on võetud 19 l/h inimese kohta [25], mis on ligikaudu 10,4 mg/s.

Energiatõhususe miinimumnõuded sätestasid, et büroohoonetes peaks ventilatsiooni õhuvooluhulk ruumides olema 2 l/s·m².

1.4 SISEKLIIMAT HALVENDAVALD TEGURID

Hoone siseõhu kvaliteedi halvenemist võivad põhjustada mitmed tegurid [26, 27]:

- 1) Projekteerimistöö käigus valitud ehitusmaterjalid
- 2) Projekteerimistöö käigus ebapiisavalt kavandatud kütte- ja ventilatsioonisüsteemid

- 3) Ebakvaliteetne ehitustöö, ehitustöö käigus ruumidesse kogunev tolm ja muud saasteained
- 4) Hoone vundamendi ja põranda ebapiisav kaitse maapinnas leiduvate saasteainete eest (nt. radoon)
- 5) Hoone ruumides olevatest seadmetest ja inimtegevuse tagajärjel tulenevad kahjulikud saasteained

Ehitusmaterjalide valik mõjutab oluliselt sisekliima kvaliteeti. Mitmetes ehitus- ja viimistlusmaterjalides kasutatakse kemikaale, mis võivad olla kahjulikud inimeste tervisele. Viimistlusmaterjalides olevad kahjulikud kemikaalid on näiteks formaldehüüdid ja erinevad orgaanilised lahustid (nt. ksüleen, benseen), mis võivad põhjustada nahaärritusi ja kantserogeene ning vähendada viljakust. Viimistlusmaterjalide valikul on oluline jälgida nende koostist ja eelistada tuleks looduslikke materjale, kus puuduvad kahjulikud kemikaalid. Lisaks kemikaalidele halvendavad sisekliima kvaliteeti veel asbest ja tsemenditolm [26, 27]. Asbesti on varasemalt laialdaselt kasutatud isoleer- ja ehitusmaterjalides (nt. katuseplaadid). Asbesti töötlemisel ja kasutamisel satub õhku kiuline tolm, mis on inimeste tervisele väga kahjulik [28]. Ehitusel kasutatav tsement levitab tsemenditolmu, mis võib põhjustada erinevaid hingamisteede kahjustusi [29].

Üks peamisi halva sisekliima põhjusi on ventilatsiooni ebapiisav toimimine. Ventilatsiooni süsteem saab värske õhu väliskeskkonnast, kuid sageli võivad sissepuhkeavad olla erinevate saasteallikate läheduses (nt. kauba laadimisala) ja seetõttu võib saastunud õhk pääseda hoonesse. Probleeme võib esineda ka välisõhu ühtlase jaotamisega siseruumidesse, õhu soojendamise ja välisõhu filtreerimisega. Ventilatsioonisüsteemi ebakvaliteetne paigaldus võib samuti põhjustada saasteainete levikut, näiteks kui ei ole ventilatsiooni soojustusmaterjal isoleeritud ventileeritavast õhust. Ventilatsiooniseadmed võivad põhjustada ka liigset müra, mis võib kostuda hoone siseruumidesse ja seeläbi halvendada hoone sisekliimat. [27, 30]

Ehitustööde käigus võib sageli tekkida suurel hulgal ehitustolmu ja muid saasteaineid, mis on kahjulikud tervisele. Need saasteained tuleb regulaarselt ehituse käigus eemaldada. Kõiksugu tehnoloogilisedavad konstruktsioonides tuleb isoleerida, et vältida nendesse tolmu sattumist. Betoonpinnad siseruumides võivad eraldada tsemenditolmu, seega on need oluline viimistlusmaterjaliga katta. Kehvast ehituskvaliteedist põhjustatud külmasillad on sageli hallituse tekkimise põhjuseks

sisepindadel, hallitus aga põhjustab väga mitmeid tervisehädasid. Põranda ja vundamendi kehv ehituskvaliteet võib põhjustada erinevate saasteainete pääsemist maapinnast hoonesse. Üheks selliseks saasteaineks on radoon – looduslik radioaktiivne gaas, mis põhjustab mitmeid terviseprobleeme (nt. kopsuvähk). Radoon pääseb majja enamasti läbi vundamendi ja põrandas olevate pragude. [26, 31]

1.5 PÕHILISED EHITUSVEAD, MIS SUURENDAVAD SOOJUSENERGIA KADUSID

Eestis on tehtud mitmeid uuringuid eluhoonete kohta. Uuritud on nii nende hoonete ehitustehnilist seisukorda kui ka eluiga. Ajavahemikul 2009 – 2012 on tehtud neli suuremahulist uuringut [5,7,10,12], milles on käsitletud nii puitelamute, paneelelamute, telliskivielamute kui ka uute kortermajade seisukorda. Tehtud uuringud on teostanud Tallinna Tehnikaülikooli ehitusteaduskond koostöös erinevate ametkondadega. Antud uuringud on ehituslikust seisukohast ülekantavad ka mitteeluhoonetele, kuna kasutatavad ehitusmaterjalid ning ehitusvead on sarnased. Need uuringud annavad hea ülevaate erinevatest ehitusvigadest, mis võivad põhjustada soojusenergia kadusid ja käsitlevad erinevate hooneosade võimalikke ehitusprobleeme, mis võivad vähendada hoone eluiga ning soojapidavust.

1.5.1 Vundamendi, sokli ja põranda soojustusvead

Soojustusisolatsioonide puhul on peamiseks ehitusveaks soojustuse valesti paigaldamine, samuti materjalide mittevastavus ja sobimatus konkreesse paigalduskohta. Sageli võivad vead alguse saada juba projektist, kui seal ei ole soojustuslahendusi täpselt kirjeldatud ja lahti seletatud. Vundamendi ja sokli soojustus peab lisaks heale soojapidavusele olema ka vastupidav koormustele ning niiskusele. Eestis kasutatavad soojustusmaterjalid on enamjaolt kõik oma soojapidavuse poolest võrreldavad, kuid nende vastupidavus niiskusele ja koormustele võib olla mitmeid kordi erinev. Vundamentide, keldrite ja soklite puhul on tegemist suurte niiskus- ja kasutuskoormustega: pinnase koormus, nihked, sadevesi, külmumine ja sulamine. Kõik eelpool mainitud tegurid võivad soojustusmaterjale oluliselt kahjustada ja see omakorda vähendab tarindi soojapidavust. Sageli on probleemiks ka soojustusvuukide puudulik tihendamine, lisaks veel soojustusplaatide fikseerimata jätmine. Joonisel 1.3 on toodud näide, kus soojustus ei ole tarindisse korralikult paigaldatud. [5]



Joonis 1.3 Ebakorrektselt paigaldatud soojustus [5]

Põrandate soojustamisel võib probleeme tekitada külma keldri kohal asuvate ruumide põranda jahedus. Üks põhjuseid võib olla külma ligipääs puuduva tuuletõkke tõttu. Seda saab hõlpsasti tuvastada, kasutades termokaamerat või alarõhu testi. Teiseks põhjuseks võib olla halvasti paigutatud või liiga vähene soojustuse kiht. Kui tegemist on korrustevahelise põrandaga, siis tuleb enamasti viga otsida põranda ja välisseina ühendussõlmest - selles piirkonnas on tegemist vuukide ja liitekohtade puuduliku tihendamisega. [5]

1.5.2 Seinte soojustusvead

Seinte soojakaod võivad moodustada kokku kuni 1/3 kogu hoone soojakadudest, seega on äärmiselt oluline neid vältida. Seinte puhul on põhilisteks probleemideks soojustuse valik ning selle paigaldamine, sageli kasutatakse ehitusel materjale, mis erinevad projektis näidatust. Eriti probleemsed on erinevad sõlmed: avatäidete ümbrus ja hoone nurgad. Nendes sõlmedes on põhiveaks nii soojustuse kui ka tuuletõkke paigaldamine. Kasutades elastseid soojustusmaterjale, ei tohi neid liialt kokku suruda, samuti ei tohi jätta õhuvahesid. Sageli on probleemiks soojustusekraani tihedus (ülekatte, vuugid ja liitekohad). Elastsed soojustusmaterjalid peavad alati täitma kogu karkassi paksuse ning asetsema tihedalt vastu tuuletõket. Suurimaks probleemiks tuuletõkke paigaldusel on keerulisemate sõlmede ja liitekohtade (nt. välisnurkade, katuslae ja seina ühenduse) tuuletihedus. Esineb olukordi, kus tuuletõkete puhul ei

kasutada vuukide täitmiseks sobivaid vahendeid, vaid vuugid täidetakse käepäraste materjalidega (jäigad montaaživahud, odavad kileteibid). Nende materjalide sobivus ja eluiga ei ole aga vastavuses hoone eluea standarditega. Tuuletõkkena ei tohiks kasutada ehituspaberit või nn. „mittehingavad“ materjale. [5, 10]

1.5.3 Katuslae soojustusvead

Katus on hoone üks tähtsamaid ja ilmastiku poolt enim mõjutatavaid piirkondi. Seetõttu on oluline, et see oleks hästi soojustatud ning ilmastikule vastupidav. Probleeme võib esineda nii materjali valikul kui ka paigaldusel ja eriti just soojustuse ja tuuletõkke liitekohtades. Kaldkatuste puhul esineb vigu piisava tuulutuse tekitamisega katusekatte all, probleem on ka kondensaadi valgumine soojustuse sisse. Lamekatuste puhul on põhilised vead seotud materjali valikuga (nt. soojustuse ebapiisav survetugevus), niiskuse eraldamisega ning sadevete ärajuhtimisega. Kasutades katuslagedes puistevilla on põhilised probleemid seotud puistevilla paksuse ning selle mõõtmise täpsusega. Soojustust paigaldades tehakse töid sageli tehnoloogiliselt halval ajal, soojustust ei kaeta ilmastikumõjude eest, mille tõttu võib soojustus saada märjaks ning niiskust sisse imeda. Joonisel 1.4 on toodud näide tarindis märjaks saanud soojustuse kohta. [7, 5, 12]



Joonis 1.4 Märgunud soojustus [5]

2. TÖÖ EESMÄRK JA ÜLESANDED

Käesolevas töös on kaks peamist eesmärki:

- 1) Uurida Tartu Teaduspargi külmasildade kriitilisust ja analüüsida saadud tulemusi.
- 2) Anda hinnang Tartu Teaduspargi sisekliima kvaliteedile uurides kolme olulist sisekliima näitajat – temperatuur, siseõhu suhteline niiskus ja CO₂ kontsentratsioon õhus.

Nende eesmärkide täitmiseks tuleb lahendada järgmised ülesanded:

- 1) Termovisiooni kasutades leida hoonele külmasildade temperatuuriindeksid põhilistes konstruktsioonisõlmedes ja võrrelda neid piirväärtustega.
- 2) Temperatuurivälja arvutust kasutades leida hoone konstruktsioonisõlmede temperatuuriindeksid, võrrelda neid piirväärtustega ja termovisiooni käigus saadud tulemustega.
- 3) Analüüsida saadud tulemusi ja kirjeldada võimalusi külmasildade vähendamiseks.
- 4) Analüüsida sisekliimat kolme olulise sisekliima parameetri – temperatuur, siseõhu suhteline niiskus ja siseõhu CO₂ kontsentratsioon – põhjal. Võrrelda saadud tulemusi soovituslike väärtustega.
- 5) Kirjeldada võimalusi teaduspargi sisekliima kvaliteedi ja energiatõhususe parandamiseks.

3. MATERJAL JA METOODIKA

3.1 ÜLEVAADE UURIMISOBJEKTIKS OLEVAST HOONEST

Uurimisobjektiks on Tartu Teaduspargi inkubatsioonikeskus, mis on rekonstrueeritud 2006. aastal. Hoone asub Tartu linnas, aadressiga Riia 181a. Inkubatsioonikeskuse põhitegevuseks on rendipindade andmine ning ärialustusteenuste pakkumine uutele firmadele. Hetkel on inkubatsioonikeskuses üle paarikümne firma ja asutuse. Enne 2006. aastat oli tegemist ühekorruselise hoonega, praegu on hoonel kolm korrust. L –tähelise kujuga hoone keskses osas asuvad trepikoda koos liftišahtiga, fuajee, kohvikuruumid koos köögiplokiga, teisel korrusel konverentsiruumid ja fuajee. Esimesel korrusel paiknevad laboriruumid ja kontoripinnad, lisaks tualetid ja riietusruumid. Teisel ja kolmandal korrusel asuvad väljarenditavad büroopinnad. Joonisel 3.1 on näidatud inkubatsioonikeskuse esikülge.



Joonis 3.1 Inkubatsioonikeskuse esikülg

3.1.1 Hoone konstruktsioonid

Hoone vana osa on ehitatud telliskividest, teise korruse juurdeehitus on tehtud kergplokkseintest ning katuslagi monteeritavast raudbetoonist. Uuem hooneosa on tehtud kolmekorruselisena, konstruktsiooniks on raudbetoonist postidest ja vahelaest koosnev karkass. Uuema hooneosa välisseinteks on termoprofiilist kergseinad. Mõningad seinad on rajatud ka raudbetoonist. Kõik hoone aknad on vahetatud välja 2006. aastal. Nii uues

kui ka vanas osas on akendeks kahekordse klaaspaketiga aknad. Aknaid on nii metall- kui plastraamistusega. Kõik välisused on metallraamiga, klaasitud ukсед.

3.2 MEETODID KÜLMASILDADE UURIMISEKS

3.2.1 Termovisioon

Kasutatud on FLIR Systems Thermacam SC640 termokaamerat (joonisel 3.2). Kõik pildid on tehtud hoone tavatingimustes. Termokaameraga hoone sisepindu vaadates oli näha, kus on ümbritsevaga võrreldes nähtavalt külmem pind, pildid tehti just nendest kohtadest. Külmem pind oli ümbritsevast alast eristatav tumedamate toonidega, näide sellest on toodud alajaotises 1.2.2 joonisel 1.2. Termografeerimise ajal oli sise- ja välistemperatuuride vahe $>20^{\circ}\text{C}$. Antud termokaameraga sai hõlpsasti mõõta välispiirde sisepinnatemperatuuri, mis on vajalik temperatuuriindeksi leidmiseks.

Termokaamera peamised parameetrid:

- 1) Mõõtevahemik: $-40\dots+1500^{\circ}\text{C}$
- 2) Tundlikkus: $0,06^{\circ}\text{C}$
- 3) Mõõtmistäpsus: $\pm 2^{\circ}\text{C}$, $\pm 2\%$ näidust
- 4) Sensor: 640×480 pikslit



Joonis 3.2 FLIR Systems Thermacam SC640 termokaamera [32]

Temperatuuriindeksi leidmiseks on vajalik teada ka siseõhutemperatuuri. Selle leidmiseks kasutati Kimo instruments AMI 300 mõõteseadet, mis on näidatud joonisel 3.3. Kimo instruments AMI 300 peamised parameetrid:

- 1) Mõõtevahemik: $-40\dots+85\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 2) Tundlikkus: $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 3) Mõõtmistäpsus: $\pm 0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\pm 0,3\text{ \%}$ näidust



Joonis 3.3 Kimo instruments AMI 300 mõõteseadet [33]

Kolmas parameeter temperatuuriindeksi leidmiseks on välistemperatuur. Selle määramiseks kasutati Tartu Ülikooli Füüsika Instituudis asuva ilmajaama andmeid. Kuna antud ilmajaam on uuritavast objektis vaid paarisaja meetri kaugusel, võib eeldada, et need andmed on kõige täpsemad.

3.2.2 Külmasilla hindamine kasutades temperatuurivälja arvutust

Temperatuurivälja arvutusega on võimalik määrata külmasilla kriitilisust. Arvutusega leitakse külmasilla sisemine pinnatemperatuur ja seeläbi on võimalik leida temperatuuriindeks, mida saab kasutada külmasilla kriitilisuse hindamiseks. Temperatuurivälja arvutusega on võimalik leida ka külmasilla soojuse lisajuhtivusi, mida saab kasutada hoone soojakadude hindamisel. [10]

Antud uuringus on kasutatud temperatuurivälja programmi Therm 6.3. Esmalt tuleb programmiga joonestada uuritav sõlm ning määrata erinevate materjalide soojuserijuhtivused. Seejärel tuleb paika panna õhutemperatuurid nii sees- kui väljaspool piiret, lisaks ka pinnatakistuse suurused [10]. Arvutustes kasutatavad pinnatakistused on

erinevad sõltuvalt sellest, et millises suunas liigub soojusvool. Arvutustes kasutatud pinnatakistuste suurused on toodud tabelis 3.1 [12].

Tabel 3.1 Arvutustes kasutatud pinnatakistuste suurused [12]

	Soojavoolu suund		
	Üles (lagi)	Horisontaalne (sein)	Alla (põrand)
Sisepinnatakistus $R_{si}, m^2 \cdot K/W$	0,17	0,20 (seina ülaosas) 0,25 (seina alaosas)	0,25
Välispinnatakistus $R_{so}, m^2 \cdot K/W$	0,04	0,04	0,04

Edasi arvutab programm soojusvoolu läbi tarindite liitekohtade, arvestades materjalide paiknemist liitekohas ning nende materjalide omadusi [10]. Pärast tulemuste arvutamist on võimalik kuvada joonestatud sõlmele temperatuurijaotus, soojusvoolu suund ja isotermid. Isotermid ehk samatemperatuurjooned on jooned, mis ühendavad ühesuguse temperatuuriga punkte. Temperatuurijaotuse jooniselt saab kätte sisepinnatemperatuuri väärtuse, mille järgi on võimalik määrata temperatuuriindeksit.

3.3 MEETODID SISEKLIIMA UURIMISEKS

Käesolevas töös on uuritud kolme olulist sisekliima näitajat – õhutemperatuur, õhuniiskus ja CO₂ kontsentratsioon õhus. Mõõtmised teostati teaduspargis baseeruva firma Evikon MCI poolt, algandmed saadi firma juhatuse esimehe Madis Einasto käest. Nende parameetrite mõõtmised on soovitatav teha talve tingimustes, kuna külmal perioodil on värske õhu sissepuhe väiksem ja seeläbi saab parema ülevaate tegelikust ruumi sisekliimast. Suuremates hoonetes ei pea hindama kõiki ruume, vaid piisab, kui mõõtmised on tehtud 5-10% ulatuses kõikidest ruumidest. Seejuures tuleks valida ruumid erinevatest hoone piirkondadest, et esindatud oleks võimalikult suur osa kogu hoonest [34]. Eelpool nimetatud sisekliima näitajate leidmiseks kasutati õhukvaliteedi monitor-logereid Evikon E6226, mis on välja toodud joonisel 3.4. Evikon E6226 õhukvaliteedi monitori peamised parameetrid:

- 1) Mõõtevahemik: 0...10 000 ppm CO₂, 0...100 %RH, -10...+50 °C
- 2) Mõõtmistäpsus: ±50 ppm CO₂, ±4 %RH, ±0.6 °C



Joonis 3.4 Evikon E6226 õhukvaliteedi monitor

Need logerid mõõtsid sisekliima parameetreid kaheksas erinevas teaduspargi ruumis. Ruumid valiti erinevatest teaduspargi piirkondadest ja kõikidelt korrustelt, et saada võimalikult hea ülevaade kogu hoone kohta. Logerid salvestasid andmeid 5 minutilise intervalliga nii päeval kui öösel. Enamikes ruumides mõõdeti sisekliima parameetreid kahe nädala vältel.

Käesolevas töös on tehtud andmete tötlust ja võrreldud sisekliima parameetrite vastavust Eesti standardi EVS-EN 15251:2007 soovituslikele väärtustele ja energiatõhususe miinimumnõuetes sätestatud väärtustele. Seeläbi saab anda hinnangu kogu hoone sisekliimale.

4. TULEMUSED

4.1 KÜLMASILDAD E KRIITILISUSE HINDAMINE KASUTADES TERMOVISIOONI

Hoone külmasildade kriitilisuse hindamiseks leiti antud külmasilla temperatuuriindeks. Temperatuuriindeksi piirväärtuse leidmiseks tuli kõigepealt leida hoone niiskuskooormus, selle leidmiseks tuli arvutada nii sise- kui välisõhu veeaurusisaldused.

Siseõhu veeauru sisalduse arutasin kõikides mõõdetud ruumides ning keskmiseks veeauru sisalduseks tuli $v_i = 4,2 \text{ g/m}^3$.

Tartu füüsikainstituudi ilmajaama kohaselt oli hoone keskmiseks välistemperatuuriks mõõtmisperioodil $-4,1 \text{ }^\circ\text{C}$ ja välisõhu suhteliseks niiskuseks 67%. Seega on välisõhu veeaurusisaldus $v_e = 2,4 \text{ g/m}^3$.

Hoone keskmiseks niiskuskooormuseks tuleb $\Delta v = 4,2 - 2,4 = 1,8 \text{ g/m}^3$.

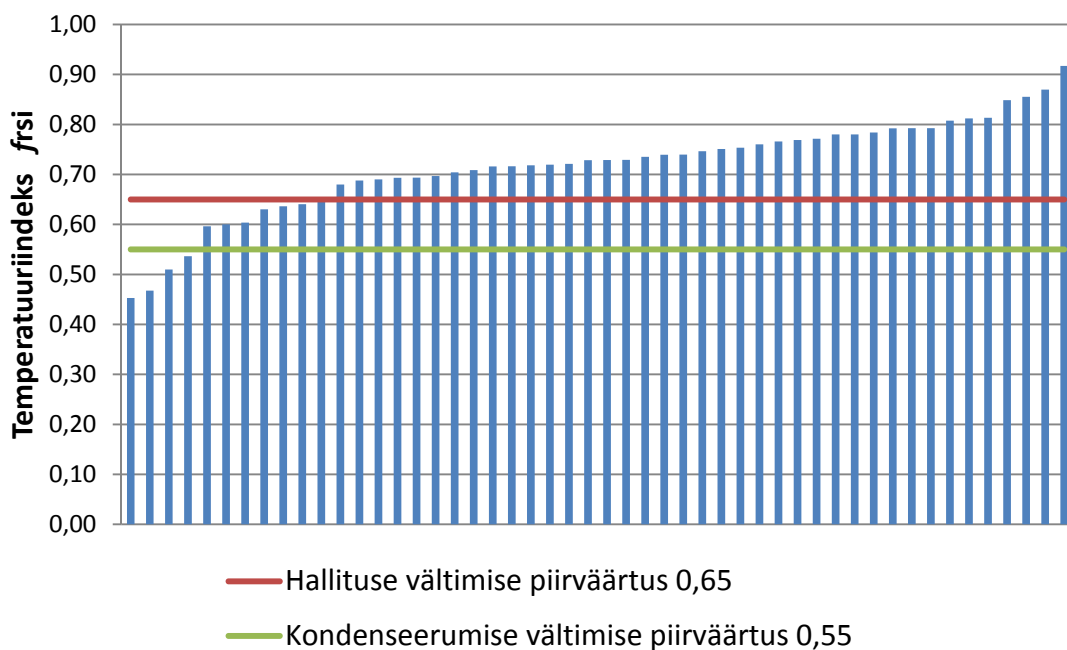
Järelikult on tegemist üsna väikse niiskuskooormusega hoonega, kus konstruktsioonide juures on võetud temperatuuriindeksi piirväärtuseks 0,65 (hallituse vältimise kriteerium). Hoone aknaklaaside juures kasutan temperatuuriindeksi piirväärtust 0,55 (kondenseerumise vältimise kriteerium).

Järgnevalt on välja toodud erinevate liitekohtade jaoks arvatud temperatuuriindeksid. Kokku on hoone seest tehtud 240 pilti, iga pildi kohta on eraldi välja arvatud külmasilla temperatuuriindeks vastavalt valemile. Järgnevates alajaotustes on näitena toodud erinevaid külmasildade termopilte, lisaks on töö lisas nr. 1 välja toodud iseloomulikumaid kriitilisi külmasildu erinevates sõlmedes ja ruumides. Ruumide numbrid on võetud hoone arhitektuursetelt joonistelt. Juhul kui arhitektuursetel joonistel ruumi number puudus, võeti ruumide numbrid Tartu Teaduspargi kodulehelt territooriumi plaanilt. Kõik hoone sees tehtud pildid antakse koos arvatud temperatuuriindeksitega üle Tartu Teaduspargile.

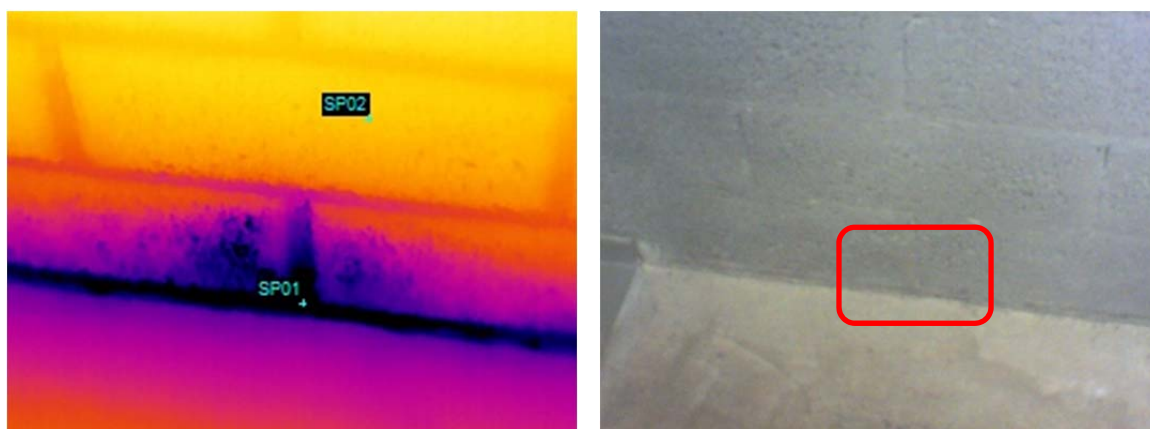
4.1.1 Välisseina ja esimese korruse põranda liitekoht

Välisseina ja esimese korruse põranda liitekohta temperatuuriindeksid on toodud joonisel 4.1. Termopildistamise näide on toodud joonisel 4.2, kus on kujutatud külmasild esimese korruse soojasõlme ruumis. Kokku on sellest piirkonnast tehtud 50 pilti. 39 korral oli temperatuuriindeks ülalpool piirväärtust - nendes kohtades esinevad küll

mõningased soojakaod, kuid hallituse ja veeauru kondenseerumise ohtu ei ole. Üheteistkümnel korral oli temperatuuriindeks piirnormist väiksem, seega on nendes piirkondades oht hallituse tekkeks. Neljal juhul oli temperatuuriindeks allapoole kondenseerumise vältimise piiri, nii et nendes kohtades võib veeaur kondenseeruda ja põhjustada kahju tarinditele.



Joonis 4.1 Temperatuuriindeksi väärtused välisseina-põranda liitekohas

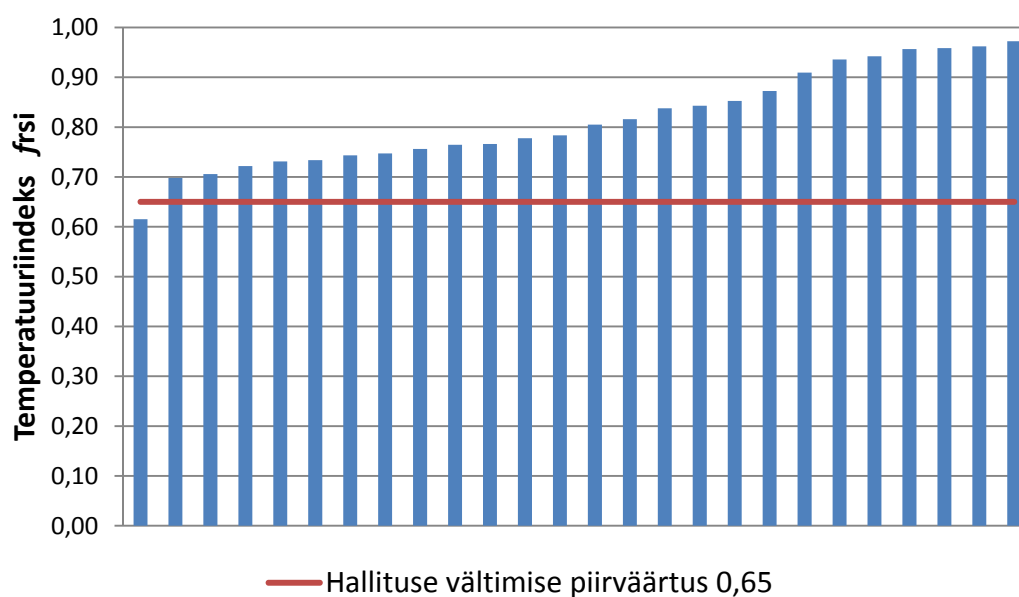


	Sisepinnatemperatuur:	Temperatuuriindeks:
Välistemperatuur: - 3,9 °C	SP01: 11,9 °C	$f_{Rsi, 1} = 0,52$
Sisetemperatuur: 26,3 °C	SP02: 25,0 °C	$f_{Rsi, 2} = 0,96$

Joonis 4.2 Külmasild välisseina-põranda liitekohas soojasõlme ruumis

4.1.2 Välisseina ja vahelae liitekoht

Välisseina ja vahelae liitekohta temperatuuriindeksid on välja toodud joonisel 4.3. Termopildistamise näide on kujutatud joonisel 4.4, kus on tegemist külmasillaga trepikojas nr. 242. Kokku on nendest liitekohtadest tehtud 26 pilti. 25 korral oli temperatuuriindeks ülalpool piirväärtust. Ainult ühel korral oli temperatuuriindeks piirnormist väiksem. Seega võib öelda, et olukord välisseina ja vahelae liitekohas on üsna hea, ainult ühes kohas võib olla oht hallituse tekkeks.



Joonis 4.3 Temperatuuriindeksi väärtused välisseina-vahelae liitekohas

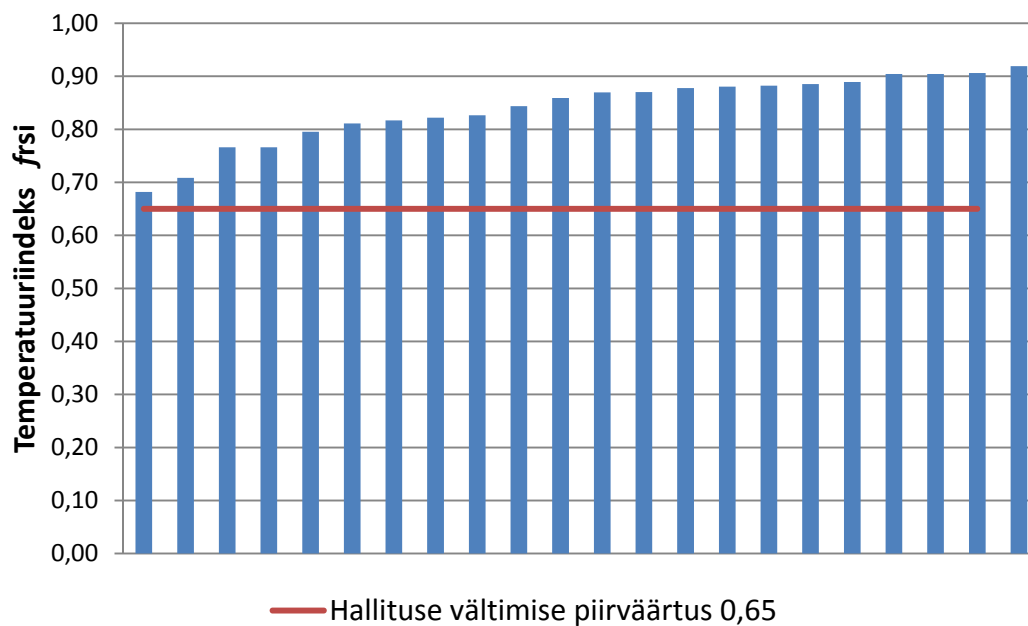


	Sisepinnatemperatuur:	Temperatuuriindeks:
Välistemperatuur: - 5,1 °C	SP01: 14,2 °C	$f_{Rsi, 1} = 0,73$
Sisetemperatuur: 21,3 °C	SP02: 19,0 °C	$f_{Rsi, 2} = 0,91$

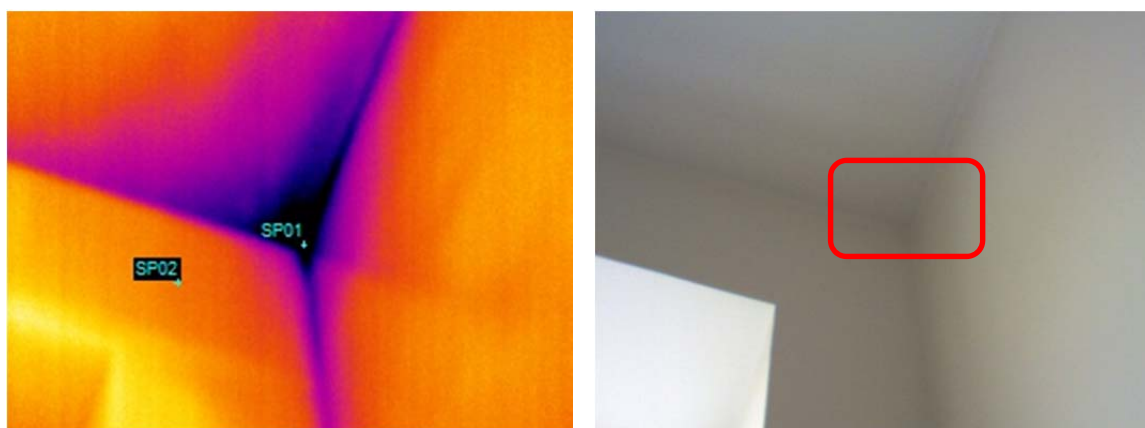
Joonis 4.4 Külmasild välisseina-vahelae liitekohas trepikojas nr. 242

4.1.3 Välisseina ja katuslae liitekoht

Välisseina ja katuslae liitekohta temperatuuriindeksid on toodud joonisel 4.5. Termopildistamise näide on kujutatud joonisel 4.6, kus on tegemist külmasillaga trepikojas nr. 126. Kokku on sellest piirkonnast tehtud 22 pilti. Kõikidel juhtudel oli temperatuuriindeks ülalpool piirväärtust, järelikult võib öelda, et katuslael veeauru kondenseerumise ega hallituse ohtu ei ole.



Joonis 4.5 Temperatuuriindeksi väärtused välisseina-katuslae liitekohas

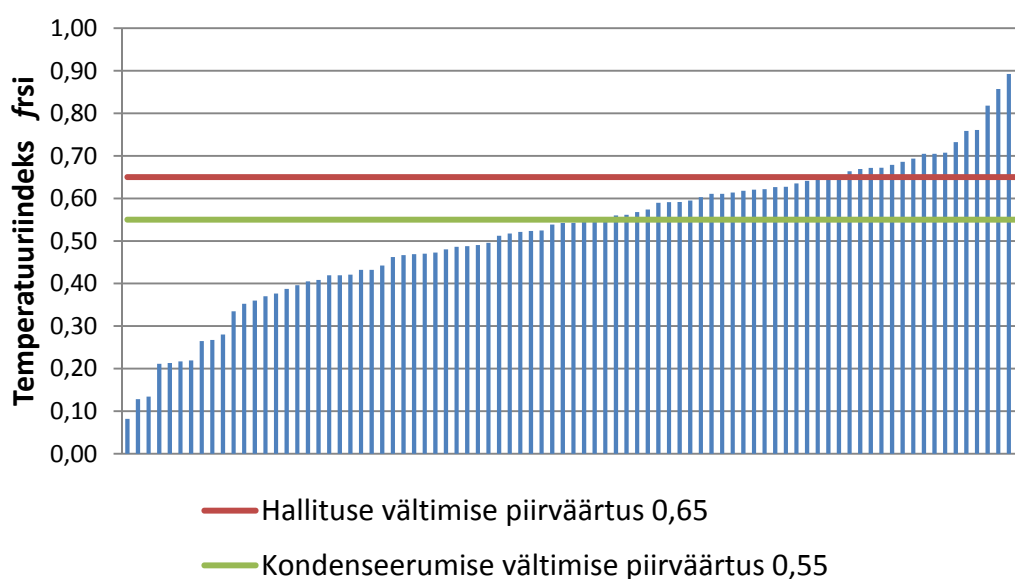


	Sisepinnatemperatuur:	Temperatuuriindeks:
Välistemperatuur: - 4,4 °C	SP01: 13,6 °C	$f_{Rsi, 1} = 0,68$
Sisetemperatuur: 22,0 °C	SP02: 17,9 °C	$f_{Rsi, 2} = 0,84$

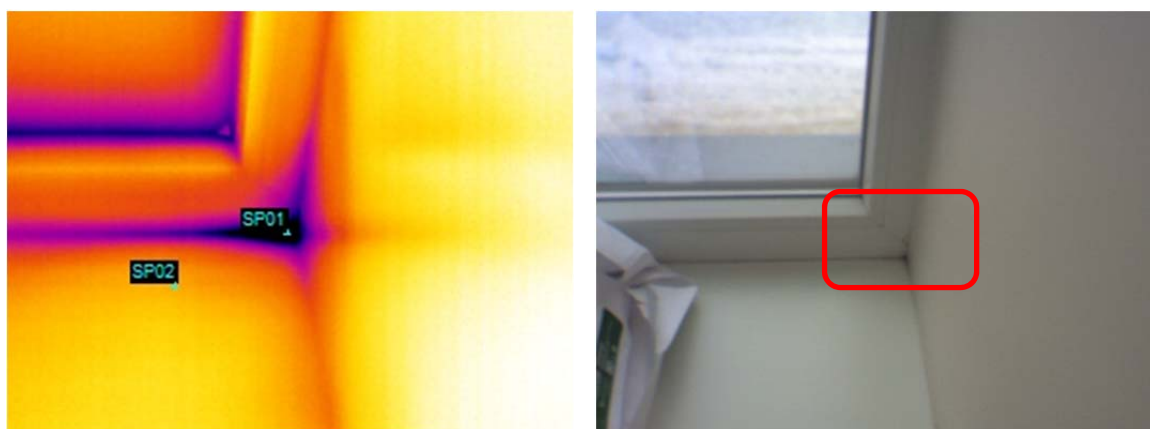
Joonis 4.6 Külmasild välisseina-katuslae liitekohas trepikojas nr. 126

4.1.4 Akende ümbrus

Akende ümbruse temperatuuriindeksid on välja toodud joonisel 4.7. Termopildistamise näide on kujutatud joonisel 4.8, kus on tegemist külmasillaga ruumis 235b. Kokku on sellest piirkonnast tehtud 85 pilti. Ainult 18 korral oli temperatuuriindeks ülalpool piirväärtust. 67 korral oli temperatuuriindeks piirnormist väiksem, seega on nendes kohtades oht hallituse tekkeks. 46 juhul oli temperatuuriindeks allapoole kondenseerumise vältimise piiri, nii et seal võib veeaur kondenseeruda ja põhjustada kahju tarinditele. Üldiselt võib öelda, et kõige probleemsema osa hoone külmasildadest moodustavad just akende ümbrused.



Joonis 4.7 Temperatuuriindeksi väärtused akende ümbruses

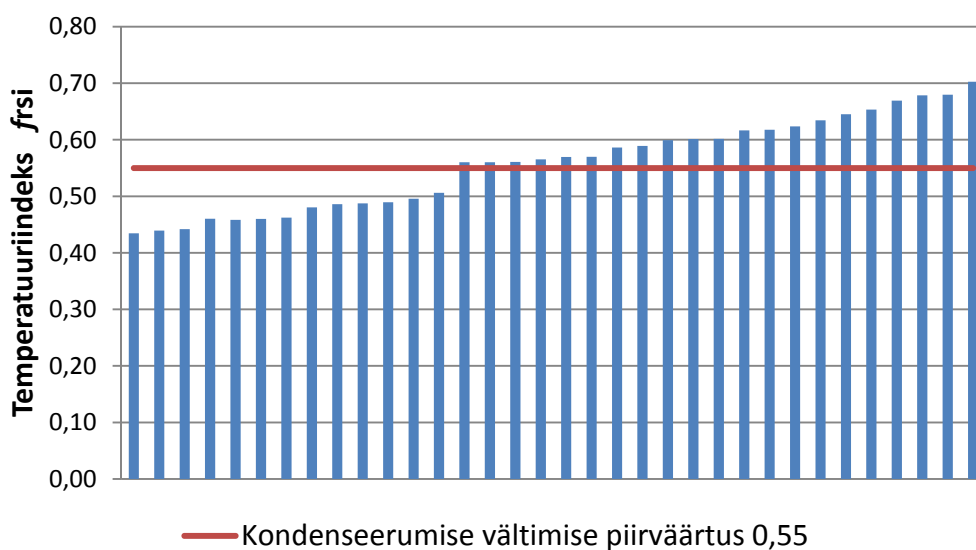


	Sisepinnatemperatuur:	Temperatuuriindeks:
Välistemperatuur: - 5,2 °C	SP01: 6,5 °C	$f_{Rsi, 1} = 0,41$
Sisetemperatuur: 23,2 °C	SP02: 18,7 °C	$f_{Rsi, 2} = 0,84$

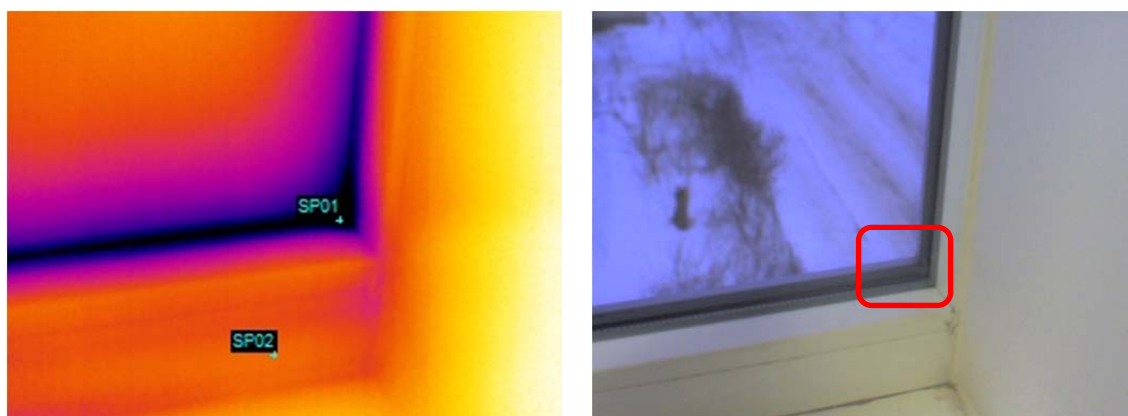
Joonis 4.8 Külmasild akna lähiümbruses ruumis 235b

4.1.5 Akna klaaspaketi ja raami liitekoht

Akna klaaspaketi ja raami liitekohta temperatuuriindeksid on välja toodud joonisel 4.9. Termopildistamise näide on kujutatud joonisel 4.10, kus on tegemist külmasillaga kolmanda korruse puhkeruumis. Külmasillad selles piirkonnas on tingitud eelkõige akende puudulikust tootmistehnoloogiast. Kokku on akna klaaspaketi ja raami liitekohast tehtud 34 pilti. 21 korral oli temperatuuriindeks ülalpool piirväärtust. 13 korral oli temperatuuriindeks piirnormist väiksem, seega on nendes piirkondades oht veeauru kondenseerumiseks.



Joonis 4.9 Temperatuuriindeksi väärtused akna klaaspaketi ja raami liitekohas

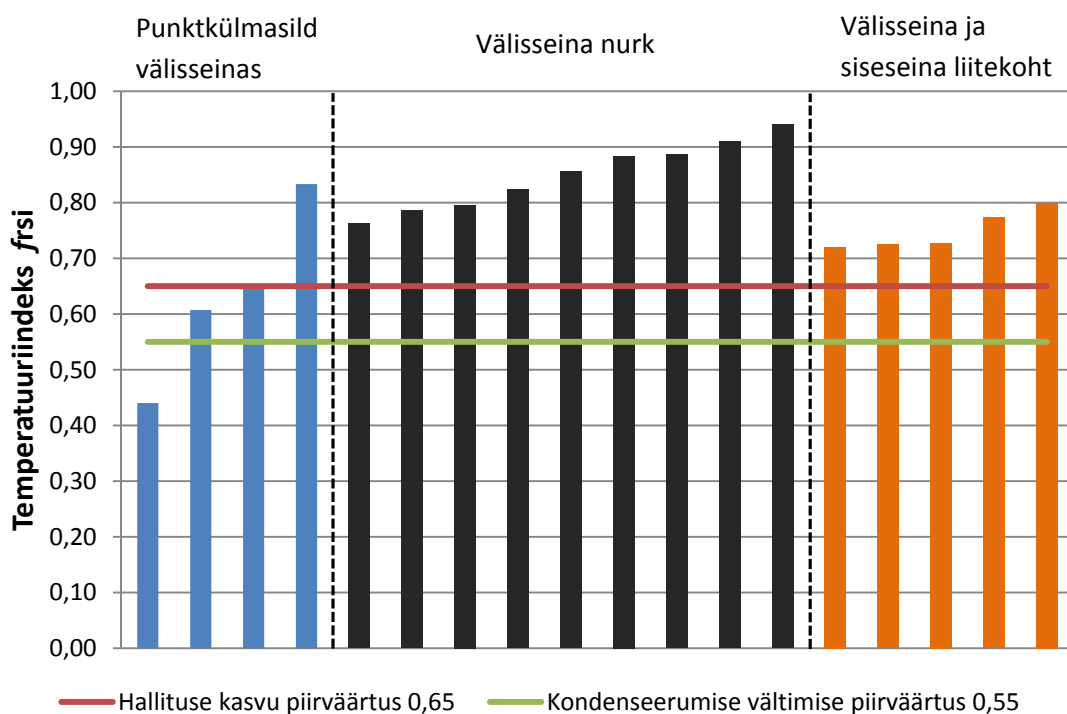


	Sisepinnatemperatuur:	Temperatuuriindeks:
Välistemperatuur: - 5,1 °C	SP01: 7,5 °C	$f_{Rsi, 1} = 0,46$
Sisetemperatuur: 22,3 °C	SP02: 16,0 °C	$f_{Rsi, 2} = 0,77$

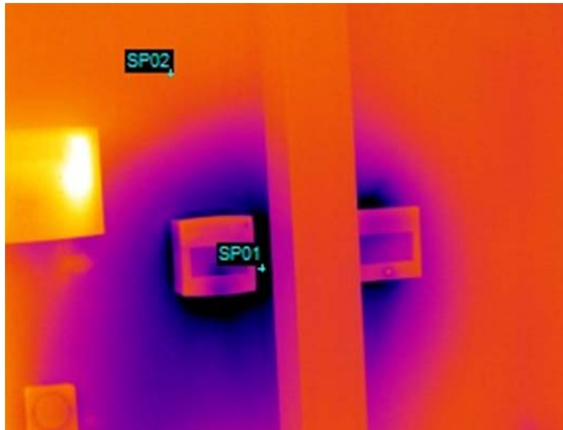
Joonis 4.10 Külmasild akna klaaspaketi ja raami liitekohas 3. korruse puhkeruumis

4.1.6 Külmasillad teistes piirkondades

Kuna järgnevatel piirkondades tehtud pilte oli tunduvalt vähem, koondati need kokku ühe joonise peale. Vaadeldud külmasillad võib jagada kolme erinevasse alasse: punktkülmasild välisseinas, välisseina nurk ja välisseina ning siseseina liitekoht, millest kokku on tehtud 18 pilti. Nende piirkondade temperatuuriindeksid on välja toodud joonisel 4.11. Kõik temperatuuriindeksid välisseina nurkades ja välisseina ning siseseina liitekohtades olid üleval pool hallituse piirväärtust. Seega nendes kohtades ohtu hallitusele ega kondenseerumisele ei ole. Probleeme oli paari punktkülmasillaga. Ühel juhul oli temperatuuriindeks allapoole hallituse piirväärtust ning teisel juhul ka allapoole kondenseerumise piirväärtust. Punktkülmasillad seintes on suure tõenäosusega põhjustatud ehitusvigadest soojustuse paigaldamisel. Termopildistamise näide punktsillast on toodud joonisel 4.12 ja välisseina nurgast joonisel 4.13.

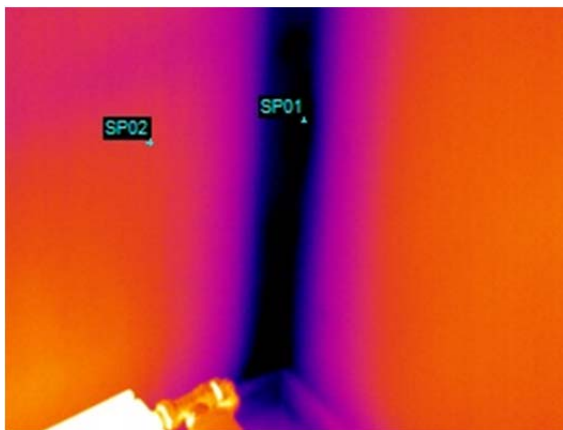


Joonis 4.11 Temperatuuriindeksi väärtused muudes piirkondades



	Sisepinnatemperatuur:	Temperatuuriindeks:
Välitemperatuur: - 3,8°C	SP01: 12,9 °C	$f_{Rsi, 1} = 0,61$
Sisitemperatuur: 23,7 °C	SP02: 24,0 °C	$f_{Rsi, 2} = 1,01$

Joonis 4.12 Punktkülmasild välisseinas hoone peasissepääsu juures



	Sisepinnatemperatuur:	Temperatuuriindeks:
Välitemperatuur: - 5,4°C	SP01: 14,5 °C	$f_{Rsi, 1} = 0,76$
Sisitemperatuur: 20,7 °C	SP02: 20,7 °C	$f_{Rsi, 2} = 1,00$

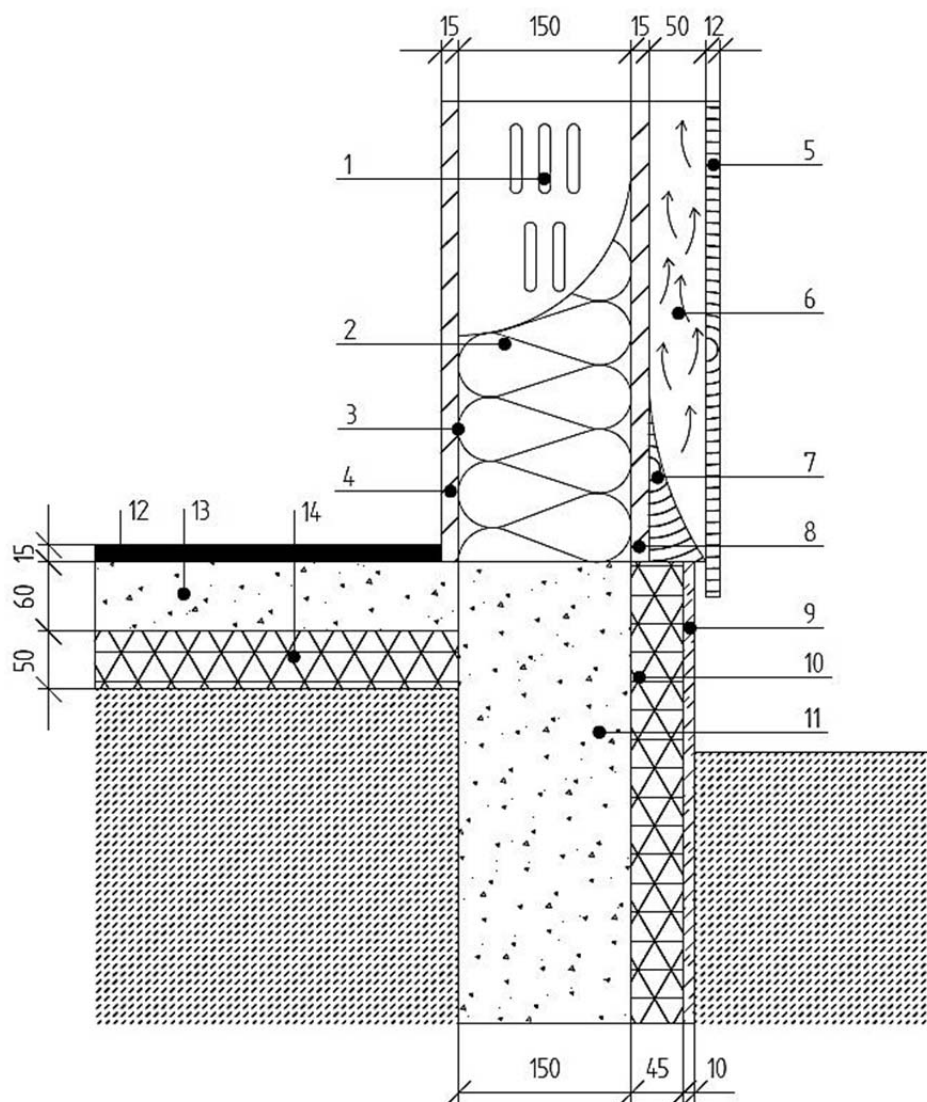
Joonis 4.13 Külmasild välisseina nurgas ruumis nr. 112

4.2 KÜLMASILDADE KRIITLINE TASE KASUTADES TEMPERATUURIVÄLJA ARVUTUST

Sõlmede külmasilla kriitilise taseme leidmiseks on kasutatud vaadeldavates ruumides olnud sisitemperatuuri ja välitemperatuuri mõõtetulemusi – need tingimused on valitud selle järgi, et termovisiooni käigus saadud mõõtmistulemusi ja temperatuurivälja arvutuse järgi saadud arvutustulemusi võrrelda.

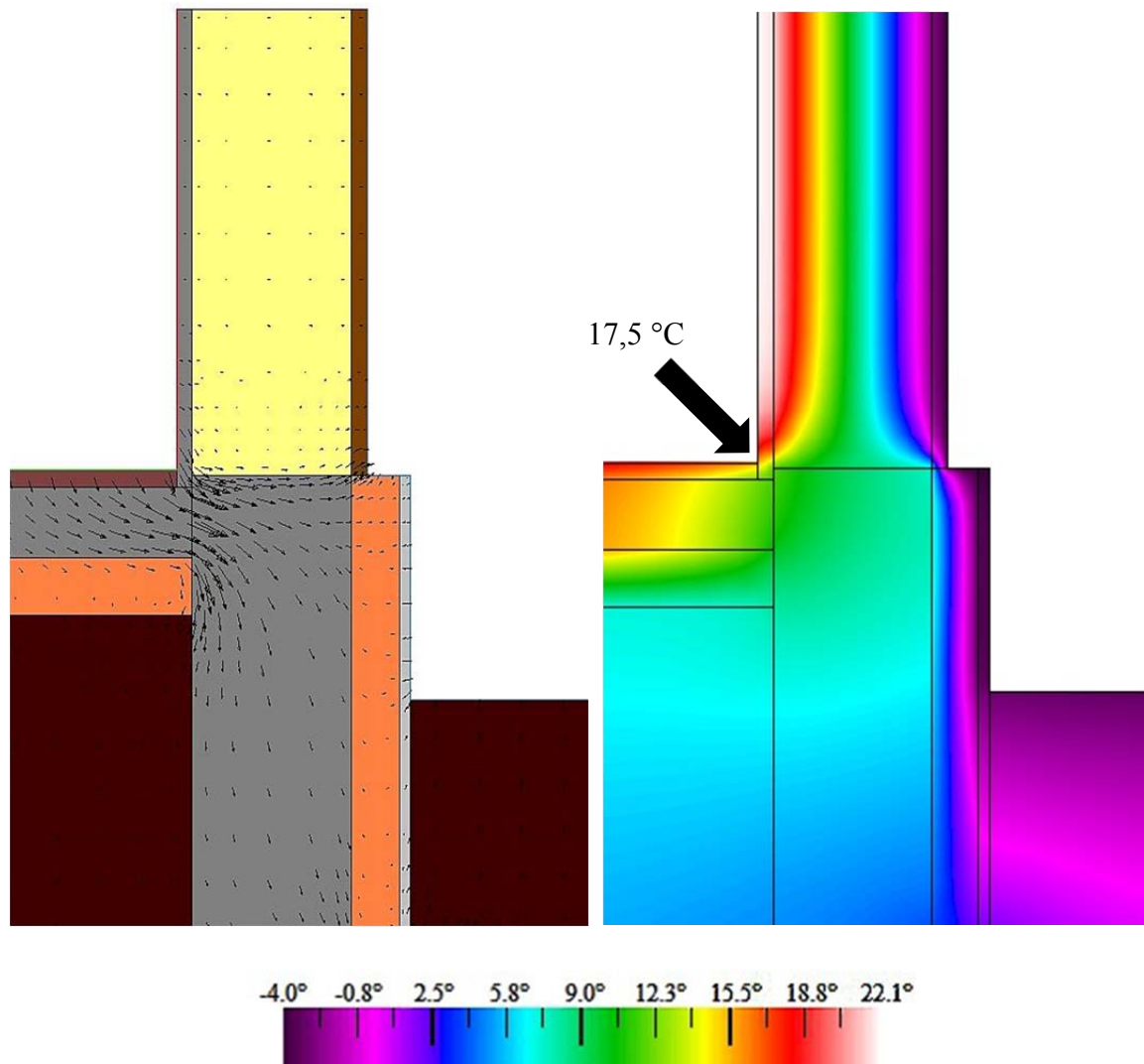
4.2.1 Välisseina ja esimese korruse põranda liitekoht

Välisseina ja esimese korruse põranda liitekoht on toodud joonisel 4.14 ja sõlme temperatuurijaotus ning soojusvoolu suund joonisel 4.15. Liitekoha sisepinnatemperatuuri väärtus on saadud temperatuurivälja arvutuse joonisel 4.15 ja selleks tuli 17,5 °C. Edasi leiti antud sõlme temperatuuriindeks, milleks tuli $f_{Rsi} = 0,77$. Seega võib järeldada, et selles sõlmes ei tohiks olla hallituse ega kondensaadi tekkimise ohtu.



Joonis 4.14 Välisseina ja esimese korruse põranda liitekoha läbilõige

1 – termoprofiil, 2 – klaasvill, 3 – aurutõke, 4 – kipsplaat, 5 – fassaadivineer, 6 – tuulutusahe, 7 – puitroov, 8 – tuuletõkkeplaat, 9 – krohv, 10 – vahtpolüstürool, 11 – betoonist vundament, 12 – põrandakate, 13 – betoonpõrand, 14 – vahtpolüstürool



Joonis 4.15 Vasakul soojusvoolu suund ja paremal temperatuurijaotus välisseina ja esimese korruse põranda liitekohas

Võrreldes antud sõlme arvutuslikke temperatuurindekseid ja termovisiooni käigus saadud temperatuurindekseid, selgus, et kuigi arvutuste kohaselt ei tohiks antud sõlmes kriitlist külmasilda olla, oli tegelikkuses 11 korral tegemist kriitilise külmasillaga. Nendes külmasildades oli temperatuurindeks hallituse vältimise piirnormist väiksem, seega on oht hallituse tekkeks. Eelkõige võib nende kriitiliste külmasildade põhjuseks olla puudulik ehitustegevus. Joonisel 4.16 on toodud välja üks välisseina ja esimese korruse põranda liitekohas olev külmasild, kus on tegelik temperatuurindeks oluliselt väiksem arvutuslikust temperatuurindeksist.



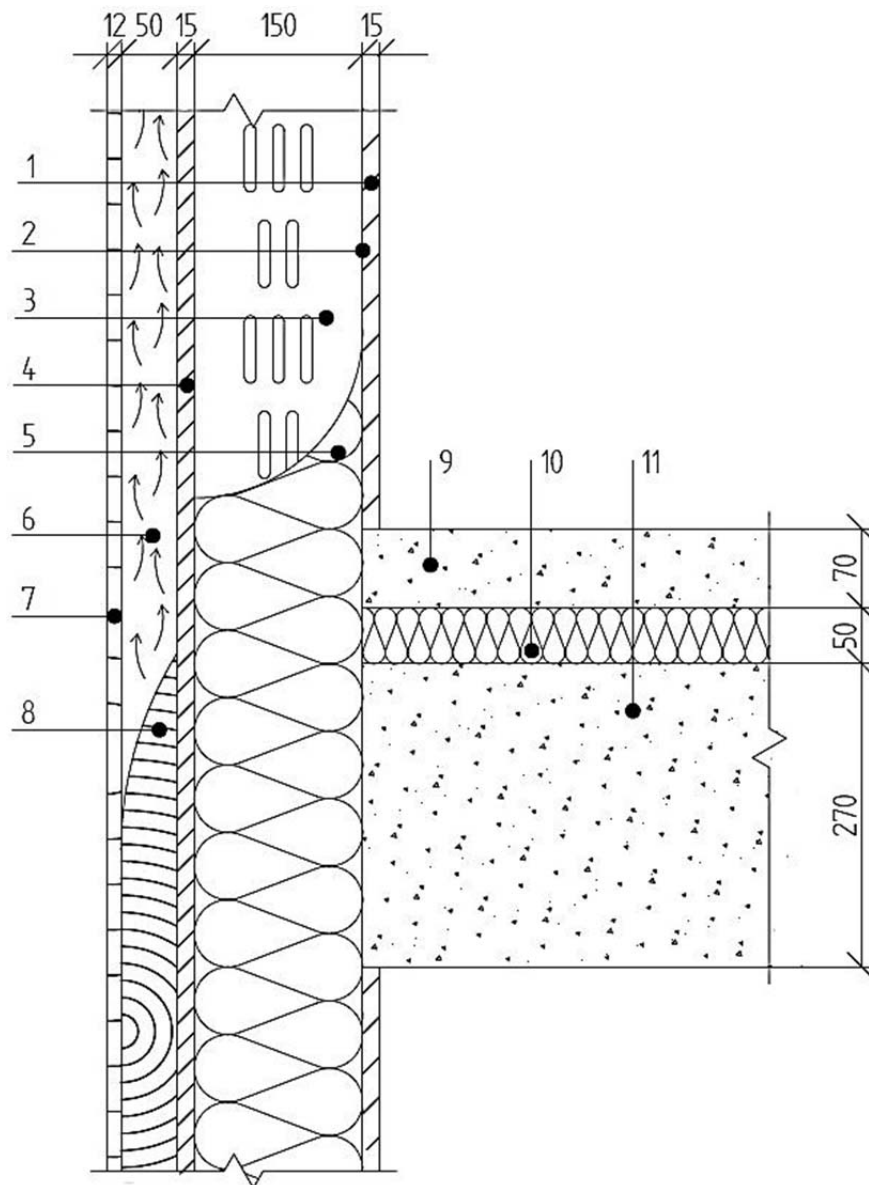
	Sisepinnatemperatuur:	Temperatuuriindeks:
Välistemperatuur: $-3,8^{\circ}\text{C}$	Mõõtetulemus SP01: $12,8^{\circ}\text{C}$	$f_{Rsi, 1} = 0,60$
Sisetemperatuur: $23,7^{\circ}\text{C}$	Arvutuslik: $17,5^{\circ}\text{C}$	$f_{Rsi, 2} = 0,77$

Joonis 4.16 Külmasild teaduspargi kohvikus, termovisiooni käigus saadud temperatuuriindeksi ja arvutusliku temperatuuriindeksi võrdlus

4.2.2 Välisseina ja vahelae liitekoht

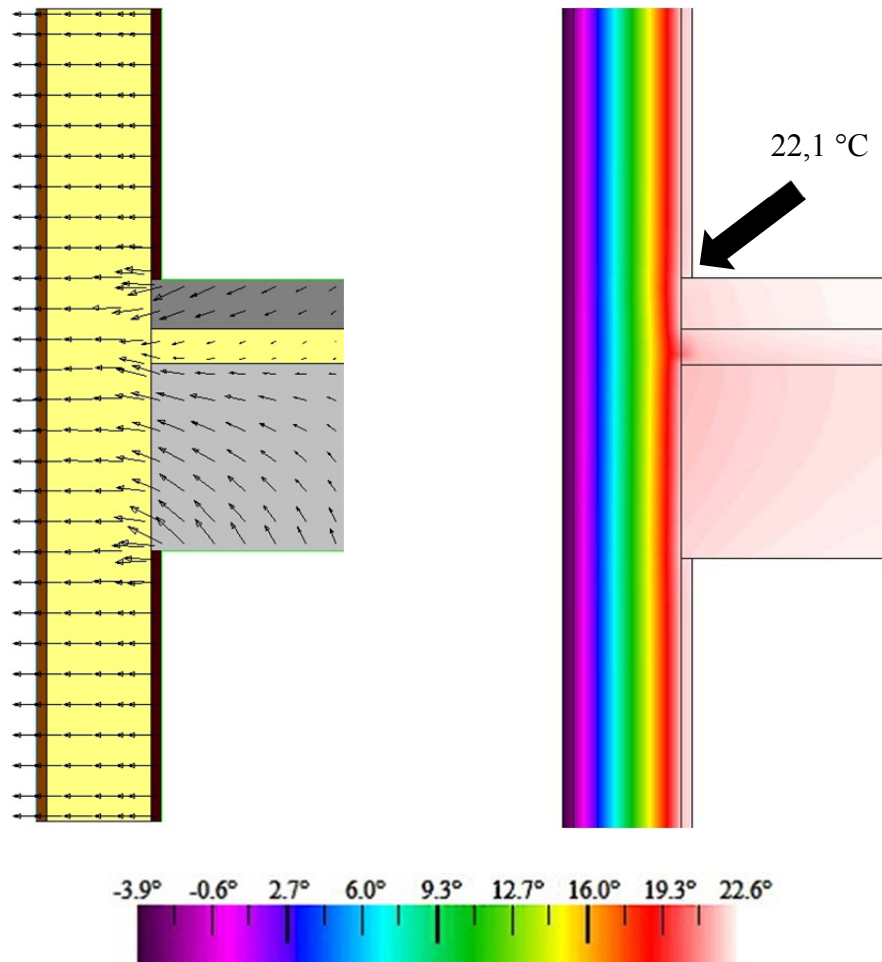
Välisseina ja vahelae liitekoht on välja toodud joonisel 4.17 ja sõlme temperatuurijaotus ning soojusvoolu suund joonisel 4.18. Liitekoha sisepinnatemperatuuriks tuli arvutuste kohaselt $22,1^{\circ}\text{C}$. Kasutades sisepinnatemperatuuri, välistemperatuuri ja sisetemperatuuri väärtuseid, leiti antud sõlme temperatuuriindeks, milleks tuli $f_{Rsi} = 0,93$. Tegemist on kõrge temperatuuriindeksiga, seega ei tohiks sõlmes olla ohtu hallituse ega kondensaadi tekkeks.

Võrreldes antud sõlme arvutuslikke temperatuuriindekseid ja termovisiooni käigus saadud temperatuuriindekseid, selgus, et enamikes kohtades kriitilised külmasillad puuduvad. Vaid ühel juhul oli antud sõlmes temperatuuriindeks allapoole hallituse tekkimise piirväärtust, selles kohas on oht hallituse tekkeks. Seega võib väita, et välisseina ja vahelae liitekoha ehitamisel on tehtud üsnagi rahuldavat tööd. Joonisel 4.19 on võrreldud termovisiooni käigus saadud temperatuuriindeksit ja arvutuslikku temperatuuriindeksit välisseina ja vahelae liitekohas.

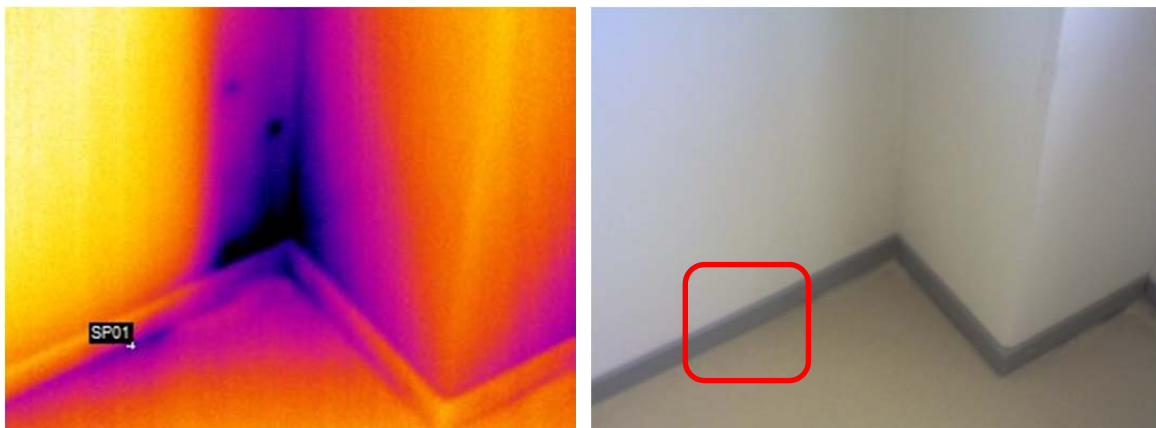


Joonis 4.17 Välisseina ja vahelae liitekohta läbilõige

1 – kipsplaat, 2 – aurutõke, 3 – termoprofiil, 4 – tuuletõkkeplaat, 5 – klaasvill, 6 – tuulutusvahe, 7 – fassaadivineer, 8 – puitroov, 9 – betoonpõrand, 10 – klaasvill, 11 – raudbetoon õõnespaneelid



Joonis 4.18 Vasakul soojusvoolu suund ja paremal temperatuurijaotus välisseina ja vahelae liitekohas

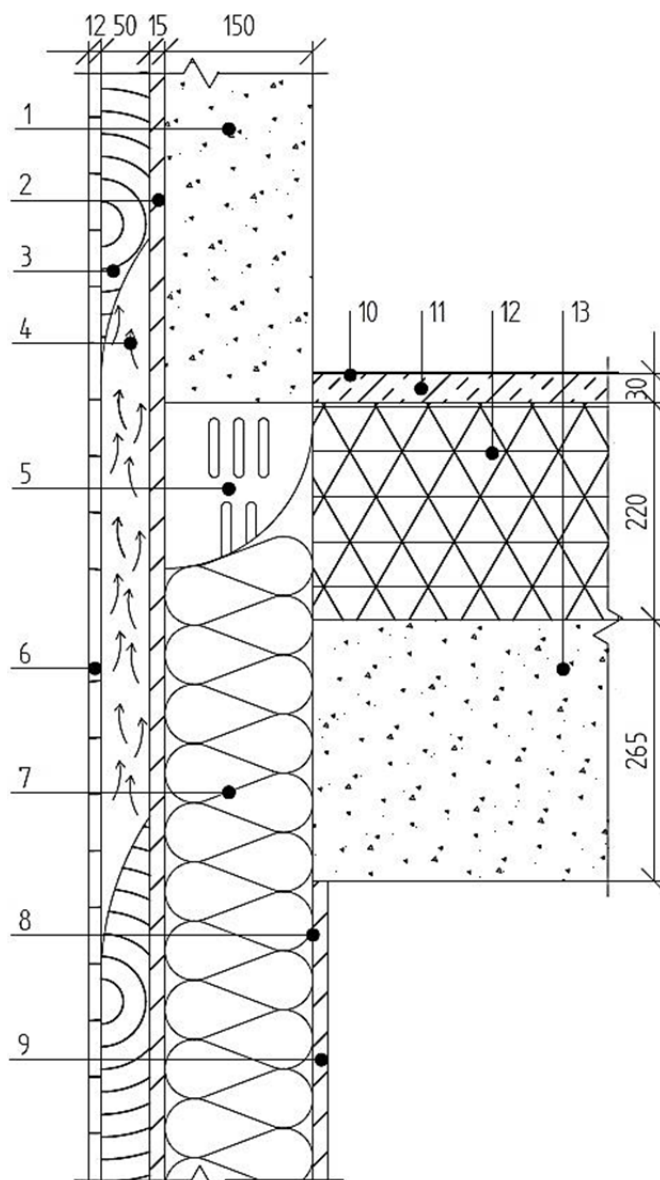


	Sisepinnatemperatuur:	Temperatuuriindeks:
Välistemperatuur: - 5,3°C	Mõõtetulemus SP01: 18,4 °C	$f_{Rsi, 1} = 0,82$
Sisetemperatuur: 23,5 °C	Arvutuslik: 22,1 °C	$f_{Rsi, 2} = 0,95$

Joonis 4.19 Külmasild ruumis 217, termovisiooni käigus saadud temperatuuriindeksi ja arvutusliku temperatuuriindeksi võrdlus

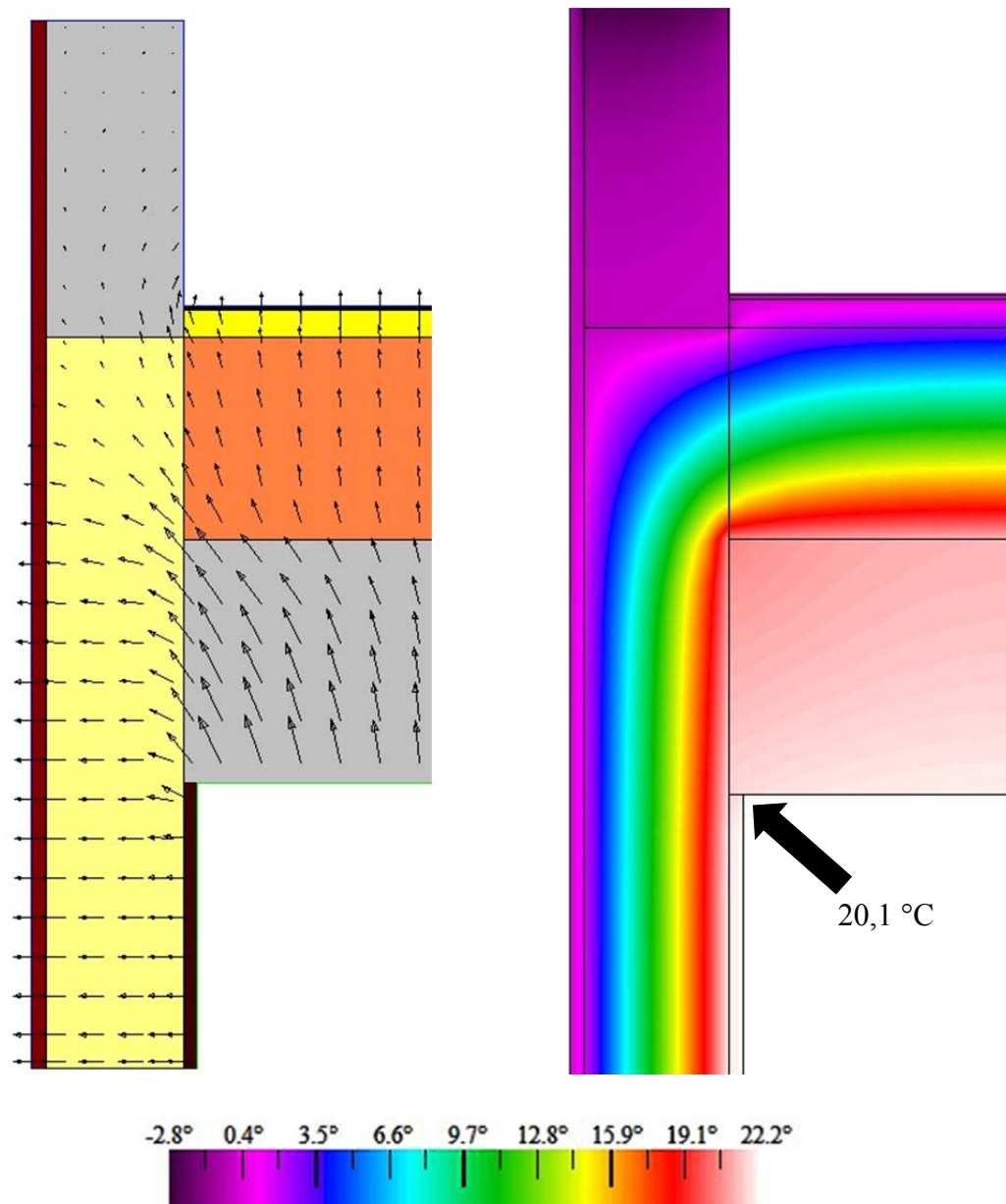
4.2.3 Välisseina ja katuslae liitekoht

Välisseina ja katuslae liitekoht on välja toodud joonisel 4.20 ja sõlme temperatuurijaotus ning soojusvoolu suund joonisel 4.21. Liitekoha sisepinnatemperatuuriks tuli arvutuste kohaselt $20,1^{\circ}\text{C}$. Edasi on leitud antud sõlme temperatuuriindeks, milleks tuli $f_{Rsi} = 0,90$. Seega ei tohiks sõlmes olla ohtu veeauru kondenseerumiseks ega hallituse tekkeks.



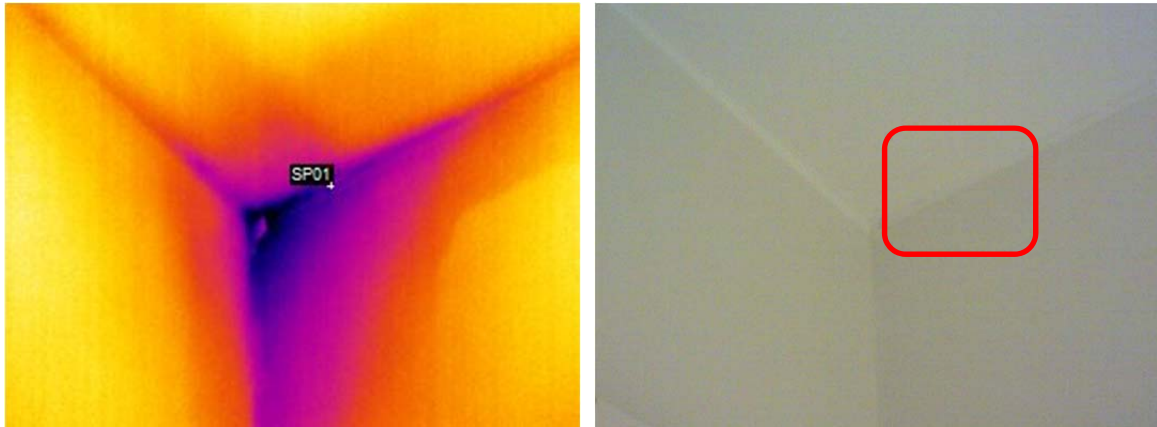
Joonis 4.20 Välisseina ja katuslae liitekoha läbilõige

1 – betoon, 2 – tuuletõkkeplaat, 3 – puitroov, 4 – tuulutussvahe, 5 – termoprofiil, 6 – fassaadivineer, 7 – klaasvill, 8 – aurutõke, 9 – kipsplaat, 10 – SBS katusekate, 11 – koormustaluv mineraalvillaplaat, 12 – vahtpolüstürool, 13 – raudbetoon õõnespaneel



Joonis 4.21 Vasakul soojusvoolu suund ja paremal temperatuurijaotus välisseina ja katuslae liitekohas

Võrreldes antud sõlme arvutuslikke temperatuurindekseid ja termovisiooni käigus saadud temperatuurindekseid, selgub, et mõlemal juhul kriitilised külmasillad puuduvad. Seega võib väita, et välisseina ja katuslae liitekohas hallituse ja kondenseerumise ohud puuduvad, ehitustöö on teostatud korralikult. Joonisel 4.22 on võrreldud termovisiooni käigus saadud temperatuurindeksit ja arvutuslikku temperatuurindeksit välisseina ja katuslae liitekohas.



	Sisepinnatemperatuur:	Temperatuuriindeks:
Välis temperatuur: $-2,1^{\circ}\text{C}$	Mõõtetulemus SP01: $17,8^{\circ}\text{C}$	$f_{Rsi, 1} = 0,80$
Sisetemperatuur: $22,7^{\circ}\text{C}$	Arvutuslik: $20,1^{\circ}\text{C}$	$f_{Rsi, 2} = 0,90$

Joonis 4.22 Külmasild ruumis 242, termovisiooni käigus saadud temperatuuriindeksi ja arvutusliku temperatuuriindeksi võrdlus

4.2.4 Välisseina ja akna liitekoht

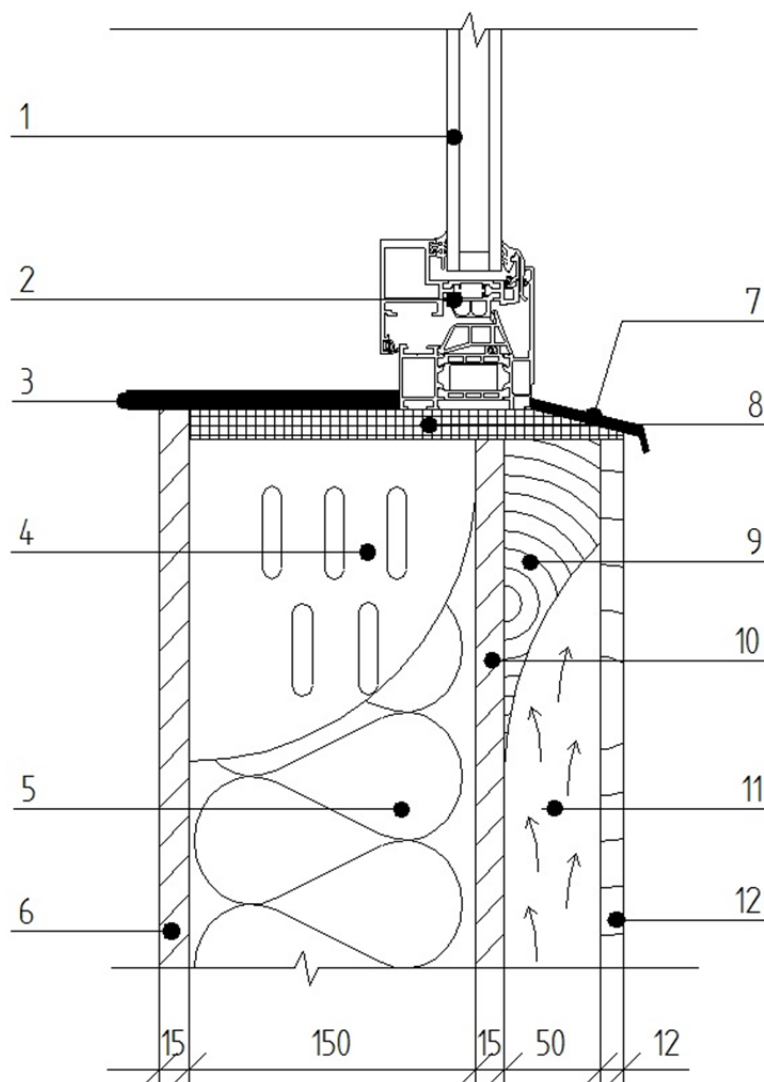
Välisseina ja akna liitekoht on välja toodud joonisel 4.23 ja sõlme temperatuurijaotus joonisel 4.24. Liitekoha sõlmest saab kätte nii akna ümbruse temperatuuri kui ka klaaspaketi ja aknaraami liitekoha temperatuuri. Aknaraami ümbruse sisepinnatemperatuuriks tuli arvutuste kohaselt $18,6^{\circ}\text{C}$. Edasi leiti sõlme temperatuuriindeks, milleks tuli $f_{Rsi} = 0,88$. Seega ei tohiks aknaraami ümbruses olla ohtu veeauru kondensaadi ega hallituse tekkeks.

Võrreldes välisseina ja akna liitekoha arvutuslikke temperatuuriindekseid ning termovisiooni käigus saadud temperatuuriindekseid, selgus, et kuigi arvutuste kohaselt ei tohiks antud sõlmes kriitlist külmasilda olla, oli tegelikkuses 67. korral tegemist kriitilise külmasillaga. Saadud tulemused näitavad, et akende paigaldamisel on tehtud puudulikku tööd, suurema enamuse akende ümbruses on oht hallituse või isegi kondensaadi tekkeks. Joonisel 4.25 on võrreldud termovisiooni käigus saadud temperatuuriindeksit ja arvutuslikku temperatuuriindeksit nii välisseina ja aknaraami liitekohas kui ka aknaraami ja klaaspaketi liitekohas.

Aknaraami ja klaaspaketi liitekoha sisepinnatemperatuuriks tuli arvutuste kohaselt $13,0^{\circ}\text{C}$, edasi on arvutatud sõlme temperatuuriindeks, milleks tuli $f_{Rsi} = 0,65$.

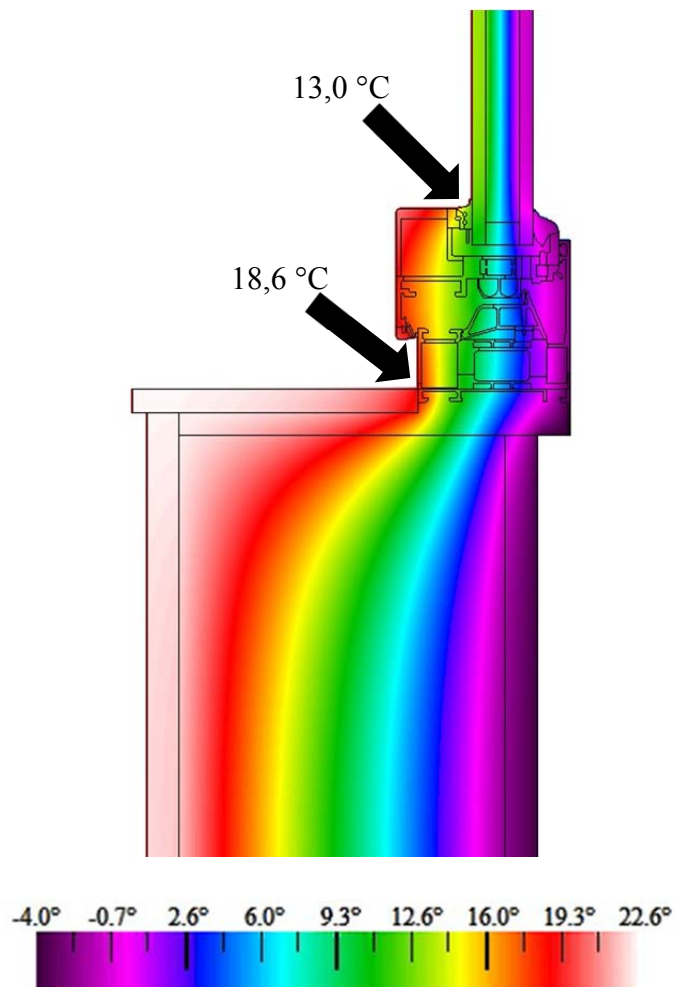
Aknaraami ja klaaspaketi liitekohas kehtib kondenseerumise vältimise piirmäär 0,55, seega ei tohiks antud sõlmes vesi kondenseeruda.

Võrreldes aknaraami ja akna klaaspaketi liitekoha arvutuslike temperatuuriindekseid ning termovisiooni käigus saadud temperatuuriindekseid, selgus, et erinevalt arvutustulemustest, mille kohaselt ei tohiks antud sõlmes kriitlist külmasilda olla, oli tegelikkuses 13. korral selles piirkonnas temperatuuriindeks piinormist madalam. Nendes kohtades võib vesi kondenseeruda ja põhjustada kahju tarinditele. Võib järeldada, et antud piirkonnas on puudusi tekkinud akende tootmisel.

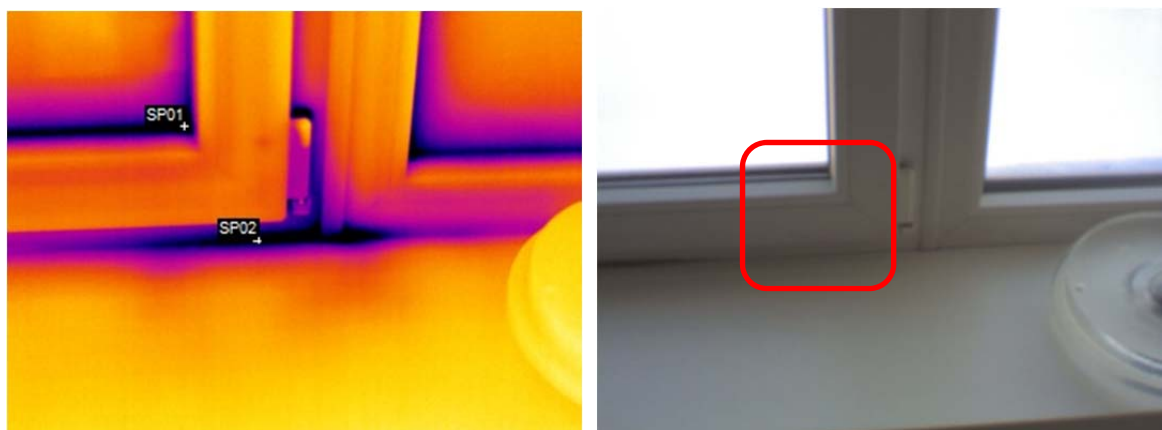


Joonis 4.23 Välisseina ja akna liitekoha läbilõige

1 – kahekordne klaaspakett, 2 – aknaraam, 3 – aknalaud, 4 – termoprofiil, 5 – klaasvill, 6 – kipsplaat, 7 – aknalaud, 8 – akna tihendusmaterjal (polüretaanvaht), 9 – puitroov, 10 – tuuletõke, 11 – tuulutavahe, 12 – fassaadivineer



Joonis 4.24 Temperatuurijaotus välisseina ja akna liitekohas



		Sisepinnatemperatuur:	Temperatuuriindeks:
Välistemperatuur:	- 2,8 °C	Mõõtetulemus SP01: 7,3 °C	$f_{Rsi, 1} = 0,41$
		Arvutuslik: 13,0 °C	$f_{Rsi, 2} = 0,65$
		Mõõtetulemus SP02: 5,8 °C	$f_{Rsi, 1} = 0,35$
Sisetemperatuur:	21,6 °C	Arvutuslik: 18,6 °C	$f_{Rsi, 2} = 0,88$

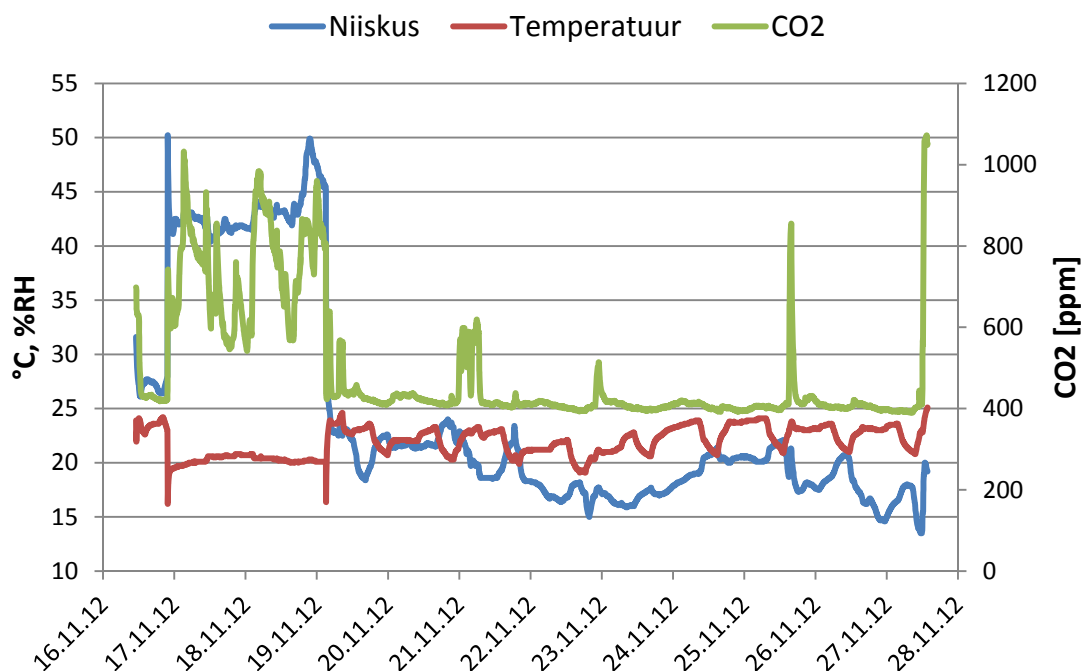
Joonis 4.25 Külmasild ruumis 248, termovisiooni käigus saadud temperatuuriindeksite ja arvutuslike temperatuuriindeksite võrdlus

4.3 SISEKLIIMA MÕÕTMISTE TULEMUSED RUUMIDE KAUPA

Sisekliima parameetreid mõõdeti kaheksas teaduspargi ruumis. Ruumides, kus inimeste arv päeval püsis enam-vähem konstantsena, arvatati CO₂ kontsentratsiooni põhjal ka ventilatsiooni õhuvooluhulgad. Lisas 2 on toodud ruumides tehtud õhuvooluhulga arvutuskäigud.

4.3.1 Sisekliima mõõtmistulemused nõupidamisruumis

Nõupidamisruumist kogutud andmete tulemused on näha joonisel 4.26 ja tabelis 4.1. Antud ruumis mõõdeti sisekliima parameetreid ajavahemikus 16 – 28 november 2012. Perioodi keskmiseks õhuniiskuseks oli 24%, maksimaalseks õhuniiskuseks 50% ja minimaalseks õhuniiskuseks 14%. Ruumi keskmine õhuniiskus jäi 75,6% kordadest allapoole minimaalse soovitusliku piiri, seega on valdav enamus ajast ruumis liiga kuiv. Keskmine õhutemperatuur oli 21,9 °C, maksimaalne õhutemperatuur 25,1 °C ja minimaalne õhutemperatuur 16,3 °C. 93,2% kordadest jäi õhutemperatuur soovituslikesse piiridesse. Keskmine CO₂ kontsentratsioon mõõtmisperioodil oli 490 ppm, maksimaalne CO₂ kontsentratsioon 1072 ppm ja minimaalne CO₂ kontsentratsioon 390 ppm. CO₂ väärtused jäid 95,3% kordadest soovituslikesse piiridesse.



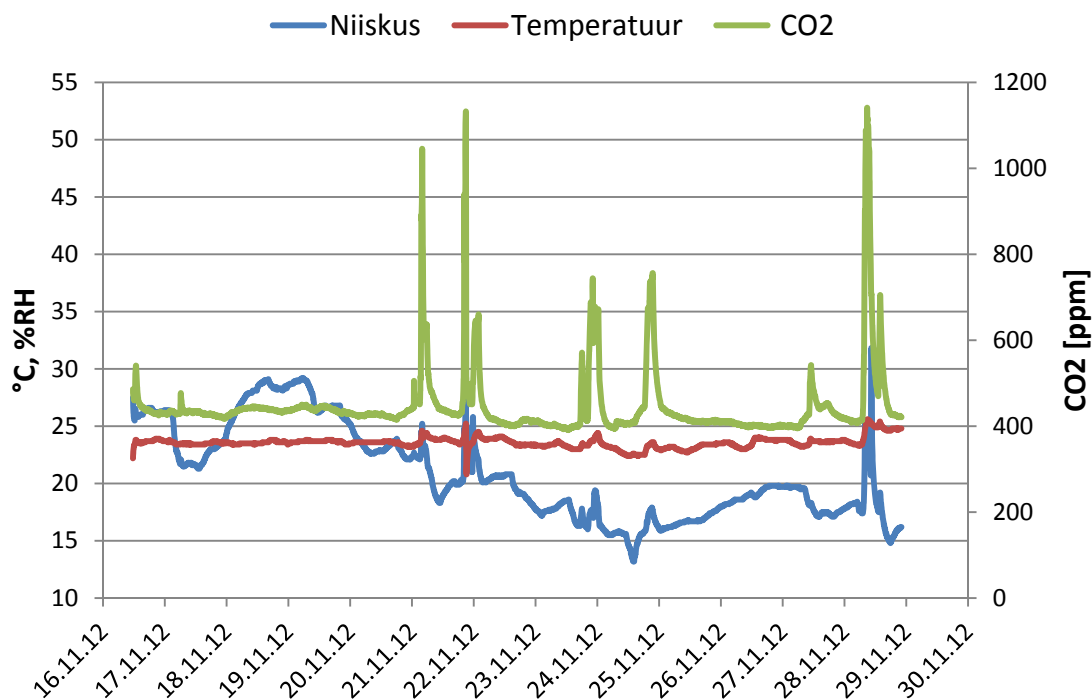
Joonis 4.26 Temperatuuri, niiskuse ja CO₂ väärtused nõupidamisruumis

Tabel 4.1 Temperatuuri, niiskuse ja CO₂ keskmised mõõtmistulemused ja tulemuste jaotus nõupidamisruumis

Parameetrid	Mõõdetud keskmine väärtus	Soovituslik väärtus	Parameetrite vahemikud	% kõigist mõõtetulemustest
Niiskus, %RH	24	25 – 60	>60	0 %
			25 – 60	24,4 %
			<25	75,6 %
Temperatuur, °C	21,9	20 – 24	>24	2,1 %
			20 – 24	93,2 %
			<20	4,7 %
CO ₂ , ppm	490	<850	>850	4,8 %
			≤850	95,3 %

4.3.2 Sisekliima mõõtmistulemused ruumis nr. 210

Ruumis nr. 210 kogutud mõõtmistulemused on näha joonisel 4.27 ja tabelis 4.2. Antud ruumis mõõdeti sisekliima parameetreid ajavahemikus 16 – 30 november 2012. Perioodi keskmiseks õhuniiskuseks oli 21%, maksimaalseks õhuniiskuseks 32% ja minimaalseks õhuniiskuseks 13%. Kogunisti 78,4% kordadest jäi keskmine õhuniiskus allapoole soovituslikku piirväärtust. Keskmine õhutemperatuur oli 23,6 °C, maksimaalne õhutemperatuur 25,6 °C ja minimaalne õhutemperatuur 20,8 °C. Keskmine CO₂ kontsentratsioon mõõtmisperioodil oli 446 ppm, maksimaalne CO₂ kontsentratsioon 1140 ppm ja minimaalne CO₂ kontsentratsioon 391 ppm. Nii keskmine temperatuur kui ka CO₂ kontsentratsioon jäid valdav osa ajast soovituslikesse piiridesse.



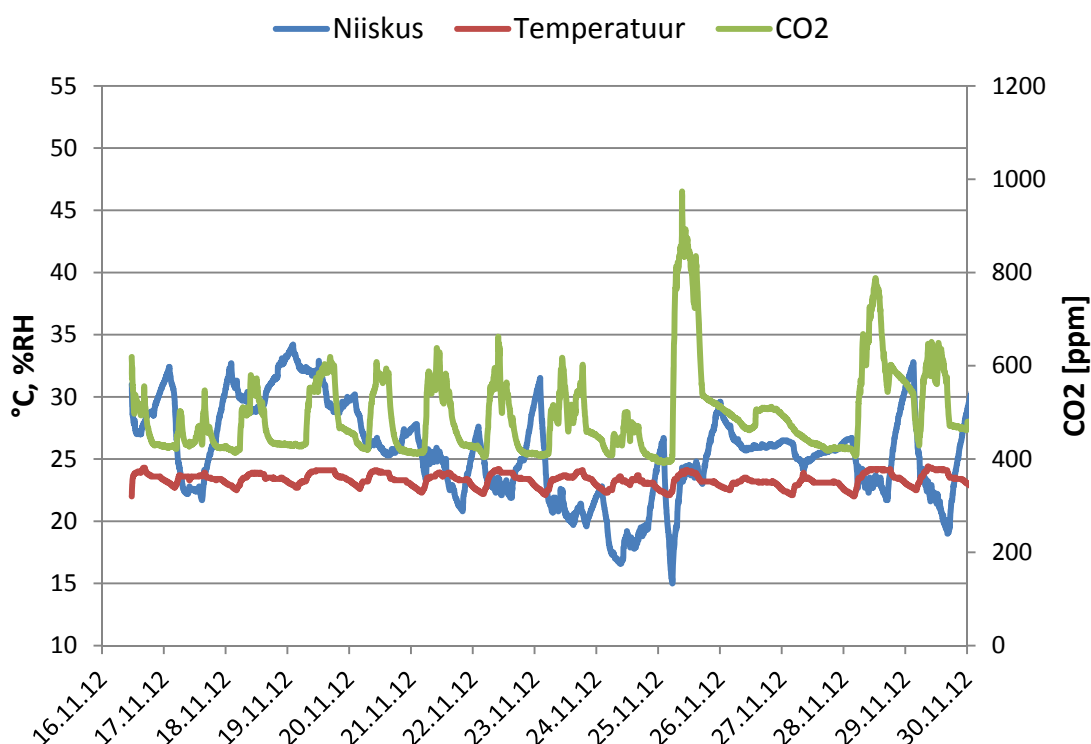
Joonis 4.27 Temperatuuri, niiskuse ja CO₂ väärtused ruumis nr. 210

Tabel 4.2 Temperatuuri, niiskuse ja CO₂ keskmised mõõtmistulemused ja tulemuste jaotus ruumis nr. 210

Parameetrid	Mõõdetud keskmine väärtus	Soovituslik väärtus	Parameetrite vahemikud	% kõigist mõõtetulemustest
Niiskus, %RH	21	25 – 60	>60	0 %
			25 – 60	21,6 %
			<25	78,4 %
Temperatuur, °C	23,6	20 – 24	>24	7,9 %
			20 – 24	92,1 %
			<20	0 %
CO ₂ , ppm	446	<850	>850	1,0 %
			≤850	99,0 %

4.3.3 Sisekliima mõõtmistulemused ruumis nr. 312

Ruumis nr. 312 kogutud andmete tulemused on näha joonisel 4.28 ja tabelis 4.3. Antud ruumis mõõdeti sisekliima parameetreid ajavahemikus 16 – 30 november 2012. Perioodi keskmiseks õhuniiskuseks oli 26%, maksimaalseks õhuniiskuseks 34% ja minimaalseks õhuniiskuseks 15%. 59,2% kordadest jäi niiskus soovituslikesse piiridesse, 40,8% kordadest oli õhuniiskus soovituslikust väiksem. Keskmise õhutemperatuur oli 23,3 °C, maksimaalne õhutemperatuur 24,4 °C ja minimaalne õhutemperatuur 22,0 °C. Keskmise CO₂ kontsentratsioon mõõtmisperioodil oli 494 ppm, maksimaalne CO₂ kontsentratsioon 972 ppm ja minimaalne CO₂ kontsentratsioon 392 ppm. Suurem osa ajast olid nii CO₂ kui ka temperatuuri väärtused normi piires. Antud ruumis arvatati CO₂ keskmise kontsentratsiooni põhjal ka ventilatsiooni õhuvooluhulk, selleks tuli 3,08 l/s·m². Võrreldes seda soovitusliku õhuvooluhulgaga 2 l/s·m² ja CO₂ kontsentratsiooniga, järeldub, et tegemist on üleventileeritud ruumiga. Üleventileerimisele viitab ka madal õhuniiskuse tase (keskmise 26%, 40,8% ajast alla 25%) ja niiskuskoormus (hoone vaatlusperioodi keskmine 1,8 g/m³).



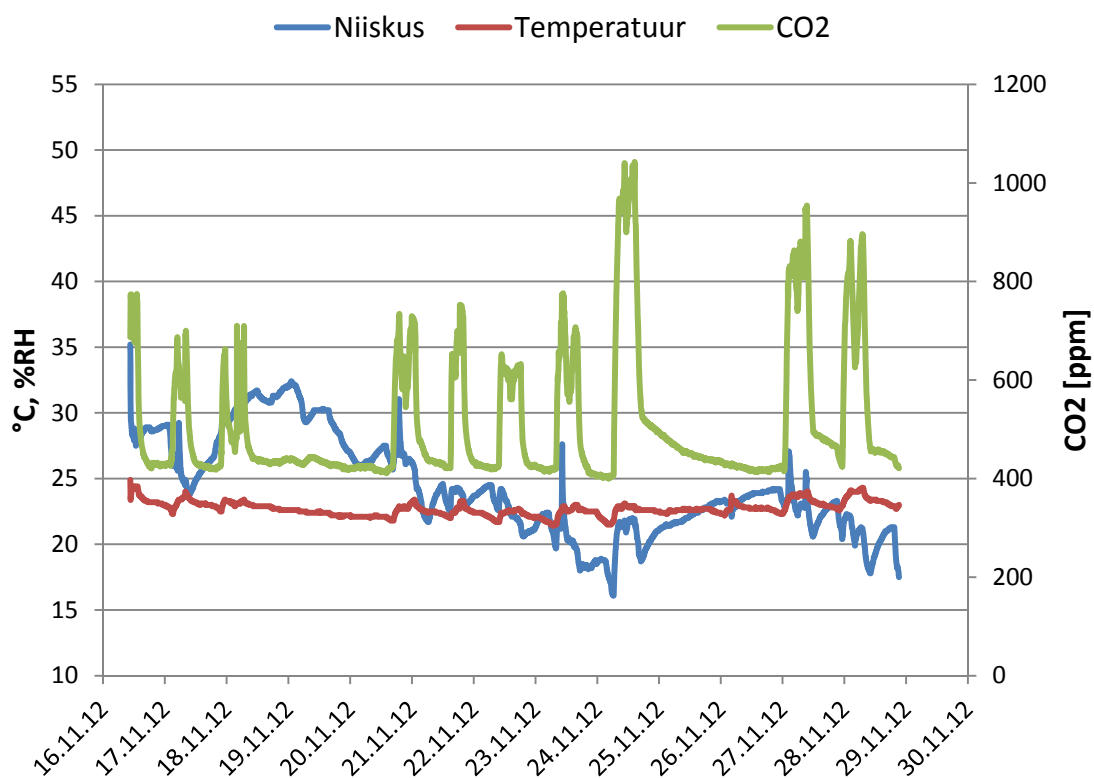
Joonis 4.28 Temperatuuri, niiskuse ja CO₂ väärtused ruumis nr. 312

Tabel 4.3 Temperatuuri, niiskuse ja CO₂ keskmised mõõtmistulemused ja tulemuste jaotus ruumis nr. 312

Parameetrid	Mõõdetud keskmine väärtus	Soovituslik väärtus	Parameetrite vahemikud	% kõigist mõõtetulemustest
Niiskus, %RH	26	25 – 60	>60	0 %
			25 – 60	59,2 %
			<25	40,8 %
Temperatuur, °C	23,3	20 – 24	>24	9,0 %
			20 – 24	91 %
			<20	0 %
CO ₂ , ppm	494	<850	>850	0,7 %
			≤850	99,3 %

4.3.4 Sisekliima mõõtmistulemused ruumis nr. 308

Ruumis nr. 308 kogutud andmete tulemused on näha joonisel 4.29 ja tabelis 4.4. Antud ruumis mõõdeti sisekliima parameetreid ajavahemikus 16 – 30 november 2012. Perioodi keskmiseks õhuniiskuseks oli 24%, seega valdav osa ajast on tegemist üsna kuiva õhuga. 64,2% kordadest jäi keskmine õhuniiskus allapoole soovitusliku piirväärtust. Maksimaalseks õhuniiskuseks oli 35% ja minimaalseks õhuniiskuseks 16%. Keskmine õhutemperatuur mõõtmisperioodil oli 22,7 °C, maksimaalne õhutemperatuur 24,9 °C ja minimaalne õhutemperatuur 21,4 °C. Keskmine CO₂ kontsentratsioon mõõtmisperioodil oli 507 ppm, maksimaalne CO₂ kontsentratsioon 1042 ppm ja minimaalne CO₂ kontsentratsioon 400 ppm. Nii ruumitemperatuur kui ka siseõhu CO₂ kontsentratsioon jäid enamiku ajast normi piiresse. Selles ruumis arvutati CO₂ keskmise kontsentratsiooni põhjal ventilatsiooni õhuvooluhulk, selleks tuli 3,11 l/s·m². Võrreldes seda soovitusliku õhuvooluhulgaga 2 l/s·m², tuleb välja, et tegemist on üleventileeritud ruumiga. Üleventileerimisele viitab ka madal CO₂ kontsentratsioon ja madal õhuniiskuse tase (64,2% ajast alla 25%).



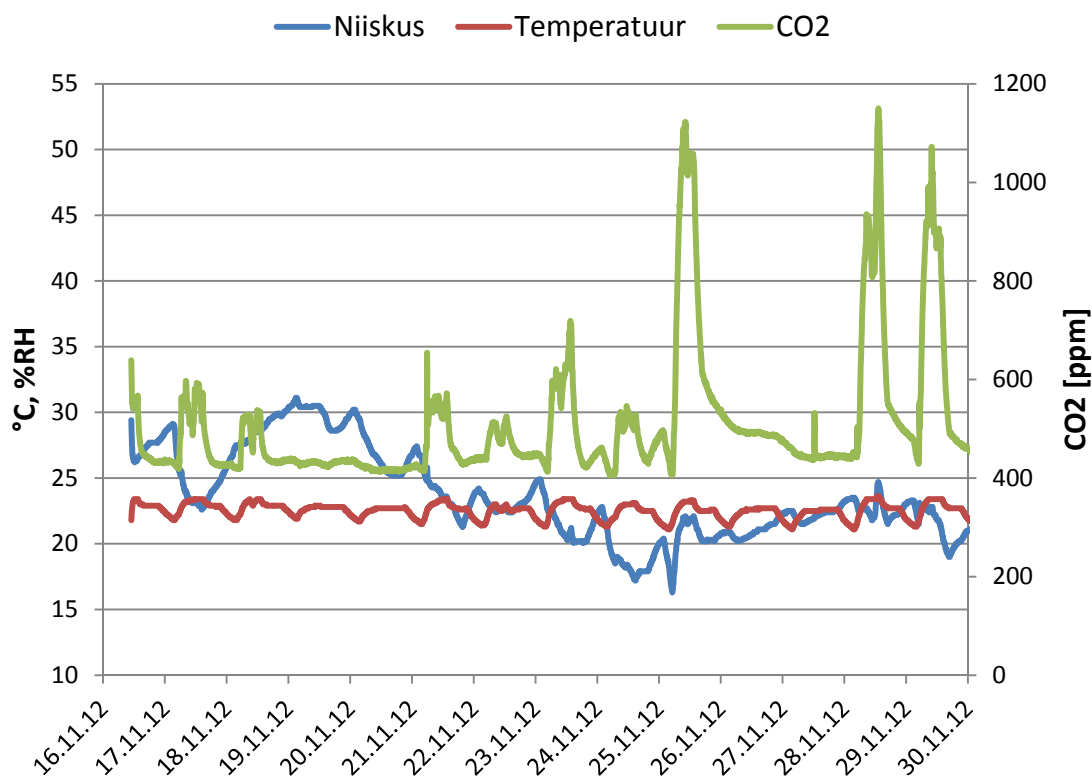
Joonis 4.29 Temperatuuri, niiskuse ja CO₂ väärtused ruumis nr. 308

Tabel 4.4 Temperatuuri, niiskuse ja CO₂ keskmised mõõtmistulemused ja tulemuste jaotus ruumis nr. 308

Parameetrid	Mõõdetud keskmine väärtus	Soovituslik väärtus	Parameetrite vahemikud	% kõigist mõõtetulemustest
Niiskus, %RH	24	25 – 60	>60	0 %
			25 – 60	35,8 %
			<25	64,2 %
Temperatuur, °C	22,7	20 – 24	>24	1,8 %
			20 – 24	98,2 %
			<20	0 %
CO ₂ , ppm	507	<850	>850	3,9 %
			≤850	96,1 %

4.3.5 Sisekliima mõõtmistulemused ruumis nr. 109

Ruumis nr. 109 kogutud andmete tulemused on näha joonisel 4.30 ja tabelis 4.5. Antud ruumis mõõdeti sisekliima parameetreid ajavahemikus 16 – 30 november 2012. Perioodi keskmiseks õhuniiskuseks oli 23%, suurimaks õhuniiskuseks 31% ja minimaalseks õhuniiskuseks 16%. Keskmise õhuniiskuse oli 71,4% kordadest alla soovitusliku minimaalse piirmäära. Keskmise õhutemperatuur oli 22,5 °C, maksimaalne õhutemperatuur 24,0 °C ja minimaalne õhutemperatuur 21,1 °C. Kõik õhutemperatuuri väärtused jäid mõõtmisperioodi jooksul normi piiresse, üheski teises ruumis nii head tulemust ei olnud. Keskmise CO₂ kontsentratsioon mõõtmisperioodil oli 522 ppm, 93% kordadest jäi see soovituslikesse piiridesse. Maksimaalne CO₂ kontsentratsioon oli 1143 ppm ja minimaalne CO₂ kontsentratsioon 406 ppm. Antud ruumis arvutati CO₂ keskmise kontsentratsiooni põhjal ventilatsiooni õhuvooluhulk, selleks tuli 3,38 l/s·m². Kõrge ventilatsiooni õhuvooluhulk ja madal keskmine CO₂ kontsentratsioon viitavad mõlemad üleventileerimisele. Õhuniiskuse madal tase (71,4% ajast alla 25%) viitab samuti üleventileerimisele.



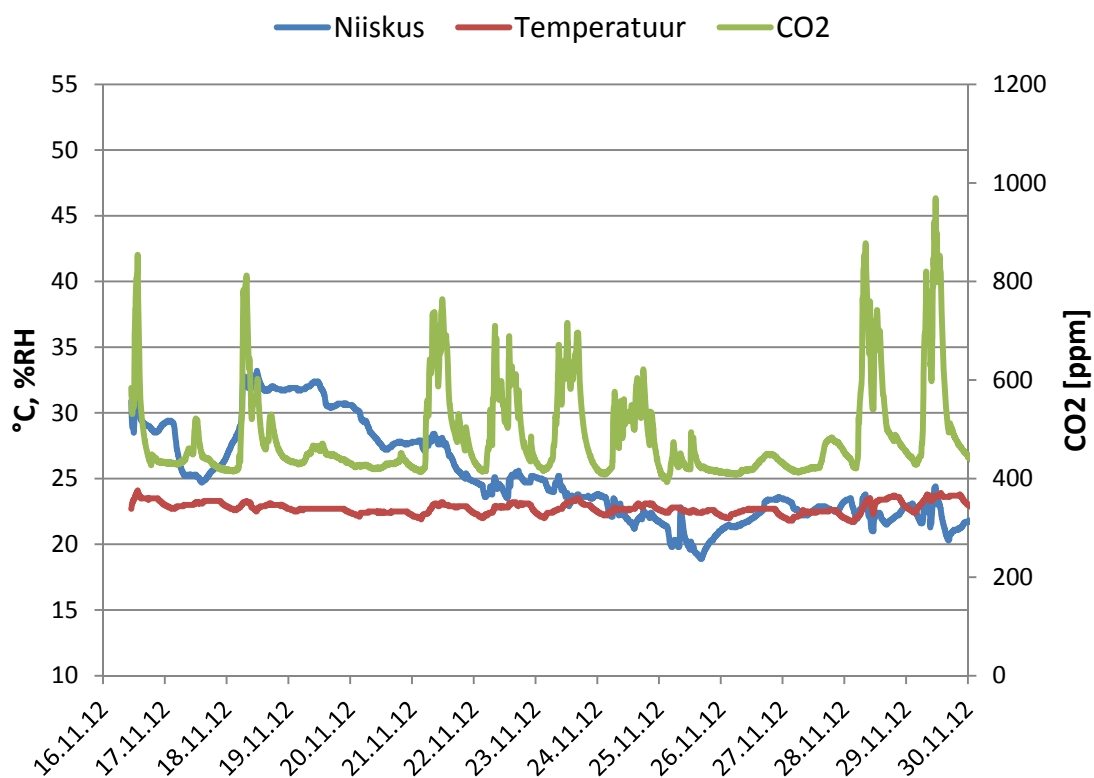
Joonis 4.30 Temperatuuri, niiskuse ja CO₂ väärtused ruumis nr. 109

Tabel 4.5 Temperatuuri, niiskuse ja CO₂ keskmised mõõtmistulemused ja tulemuste jaotus ruumis nr. 109

Parameetrid	Mõõdetud keskmine väärtus	Soovituslik väärtus	Parameetrite vahemikud	% kõigist mõõtetulemustest
Niiskus, %RH	23	25 – 60	>60	0 %
			25 – 60	28,6 %
			<25	71,4 %
Temperatuur, °C	22,5	20 – 24	>24	0 %
			20 – 24	100 %
			<20	0 %
CO ₂ , ppm	522	<850	>850	7,0 %
			≤850	93,0 %

4.3.6 Sisekliima mõõtmistulemused ruumi nr. 146 kontoris

Ruumi nr. 146 kontoris kogutud andmete tulemused on näha joonisel 4.31 ja tabelis 4.6. Antud ruumis mõõdeti sisekliima parameetreid ajavahemikus 16 – 30 november 2012. Perioodi keskmiseks õhuniiskuseks oli 25%, kuid siiski 58% kordadest jäi see allapoole 25% piiri. Maksimaalseks õhuniiskuseks tuli 33% ja minimaalseks õhuniiskuseks 19%. Keskmine õhutemperatuur oli 22,8 °C, maksimaalne õhutemperatuur 24,1 °C ja minimaalne õhutemperatuur 21,7 °C. Ligi 100% temperatuuri väärtusest jäid soovituslikesse piiridesse. Keskmine CO₂ kontsentratsioon mõõtmisperiodil oli 484 ppm, maksimaalne CO₂ kontsentratsioon 969 ppm ja minimaalne CO₂ kontsentratsioon 393 ppm. 99,5% kordadest oli CO₂ kontsentratsioon normi piires. Selles ruumis arvutati CO₂ keskmise kontsentratsiooni põhjal ventilatsiooni õhuvooluhulk, milleks tuli 4,15 l/s·m². Järelikult võib väita, et tegemist on oluliselt üleventileeritud ruumiga.



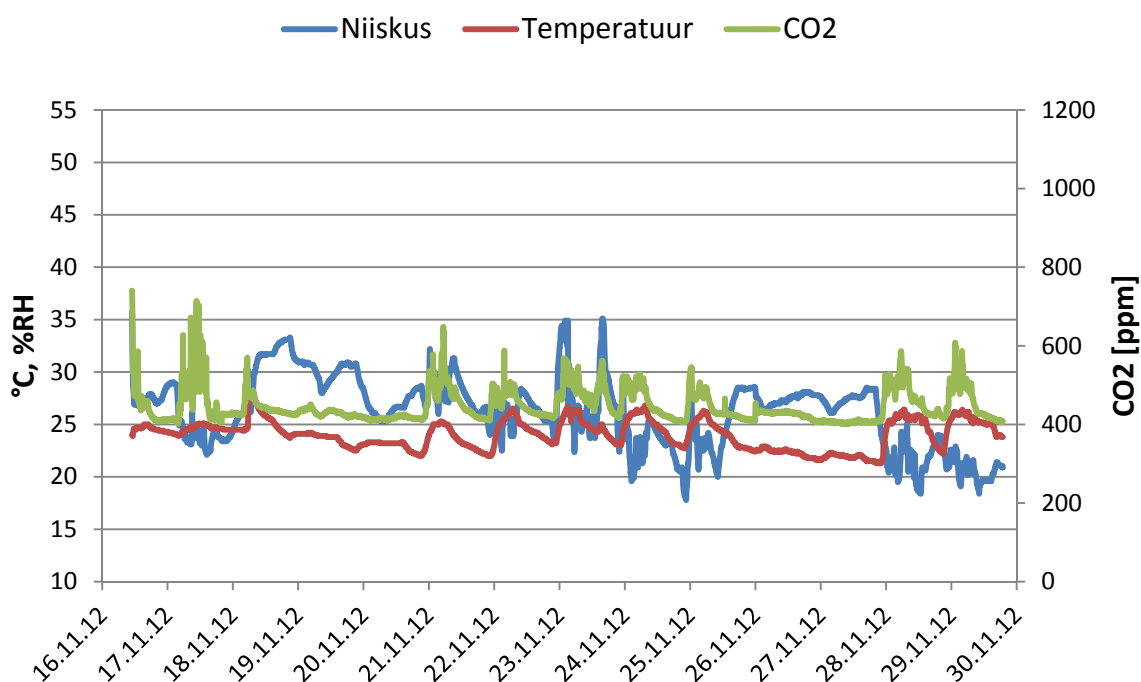
Joonis 4.31 Temperatuuri, niiskuse ja CO₂ väärtused ruumi nr. 146 kontoris

Tabel 4.6 Temperatuuri, niiskuse ja CO₂ keskmised mõõtmistulemused ja tulemuste jaotus ruumi nr. 146 kontoris

Parameetrid	Mõõdetud keskmine väärtus	Soovituslik väärtus	Parameetrite vahemikud	% kõigist mõõtetulemustest
Niiskus, %RH	25	25 – 60	>60	0 %
			25 – 60	42,0 %
			<25	58,0 %
Temperatuur, °C	22,8	20 – 24	>24	0 %
			20 – 24	100 %
			<20	0 %
CO ₂ , ppm	484	<850	>850	0,5 %
			≤850	99,5 %

4.3.7 Sisekliima mõõtmistulemused ruumi nr. 146 tootmises

Ruumi nr. 146 tootmises kogutud andmete tulemused on näha joonisel 4.32 ja tabelis 4.7. Antud ruumis mõõdeti sisekliima parameetreid ajavahemikus 16 november – 30 november 2012. Perioodi keskmiseks õhuniiskuseks oli 26%, maksimaalseks õhuniiskuseks 35% ja minimaalseks õhuniiskuseks 18%. 65,5% õhuniiskuse tulemustest jäid soovituslikku vahemikku, 34,5% tulemustest olid allapoole soovituslikku piirmäära 25%. Keskmine õhutemperatuur oli 24,0 °C, sealjuures 47,2% mõõtetulemustest jäid soovituslikesse piiridesse. 52,8% kordadest oli õhutemperatuur ülalpool maksimaalset soovituslikku õhutemperatuuri 24 °C. Maksimaalne õhutemperatuur oli 28,1 °C ja minimaalne õhutemperatuur 21,3 °C. Keskmine CO₂ kontsentratsioon mõõtmisperioodil oli 446 ppm, maksimaalne CO₂ kontsentratsioon 740 ppm ja minimaalne CO₂ kontsentratsioon 401 ppm. Kõik CO₂ mõõtmistulemused jäid soovituslikesse piiridesse.



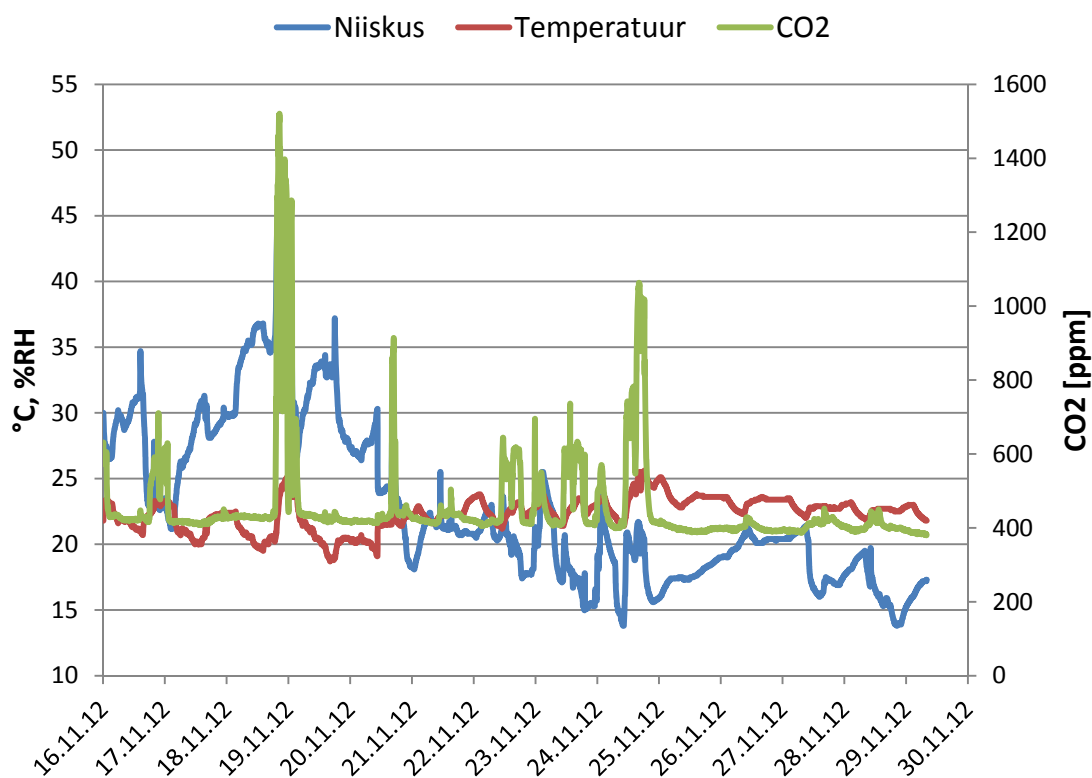
Joonis 4.32 Temperatuuri, niiskuse ja CO₂ väärtused ruumi nr. 146 tootmises

Tabel 4.7 Temperatuuri, niiskuse ja CO₂ keskmised mõõtmistulemused ja tulemuste jaotus ruumi nr. 146 tootmises

Parameetrid	Mõõdetud keskmine väärtus	Soovituslik väärtus	Parameetrite vahemikud	% kõigist mõõtetulemustest
Niiskus, %RH	26	25 – 60	>60	0 %
			25 – 60	65,5 %
			<25	34,5 %
Temperatuur, °C	24,0	20 – 24	>24	52,8 %
			20 – 24	47,2 %
			<20	0 %
CO ₂ , ppm	446	<850	>850	0 %
			≤850	100 %

4.3.8 Sisekliima mõõtmistulemused seminariruumis

Seminariruumist kogutud andmete tulemused on näha joonisel 4.33 ja tabelis 4.8. Antud ruumis mõõdeti sisekliima parameetreid ajavahemikus 16 – 30 november 2012. Perioodi keskmiseks õhuniiskuseks oli 23%, maksimaalseks õhuniiskuseks 44% ja minimaalseks õhuniiskuseks 14%. 69,8% kõikidest mõõdetud õhuniiskuse väärtustest jäid allapoole soovituslikku piirmäära. Keskmine õhutemperatuur oli 22,3 °C, 90,8% juhtudest jäi temperatuur normi piiresse. Maksimaalne õhutemperatuur oli 25,6 °C ja minimaalne õhutemperatuur 18,7 °C. Keskmine CO₂ kontsentratsioon mõõtmisperioodil oli 456 ppm, maksimaalne CO₂ kontsentratsioon 1520 ppm ja minimaalne CO₂ kontsentratsioon 380 ppm. 97,2% CO₂ mõõtetulemustest jäid allapoole soovituslikku piirväärtust.



Joonis 4.33 Temperatuuri, niiskuse ja CO₂ väärtused seminariruumis

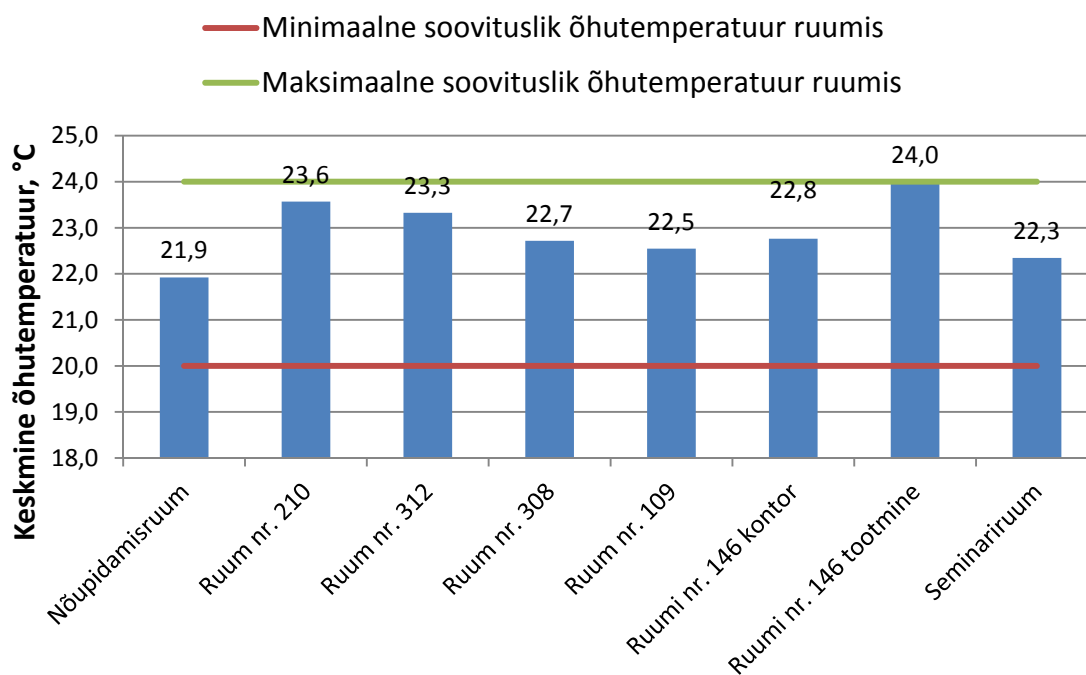
Tabel 4.8 Temperatuuri, niiskuse ja CO₂ keskmised mõõtmistulemused ja tulemuste jaotus seminariruumis

Parameetrid	Mõõdetud keskmine väärtus	Soovituslik väärtus	Parameetrite vahemikud	% kõigist mõõtetulemustest
Niiskus, %RH	23	25 – 60	>60	0 %
			25 – 60	30,2 %
			<25	69,8 %
Temperatuur, °C	22,3	20 – 24	>24	5,7 %
			20 – 24	90,8 %
			<20	3,5 %
CO ₂ , ppm	456	<850	>850	2,8 %
			≤850	97,2 %

4.4 SISEKLIIMA MÕÕTMISTE KOKKUVÕTLIKUD TULEMUSED

4.4.1 Siseõhu temperatuur

Teaduspargi siseõhu temperatuuri kokkuvõtlikud tulemused on toodud joonisel 4.34 ja tabelis 4.9. Kõikides mõõdetud ruumides jäi hoone keskmine siseõhu temperatuur soovituslikesse piiridesse 20 – 24 °C. Hoone keskmiseks siseõhu temperatuuriks tuli 22,9 °C. Kõige väiksem keskmine siseõhu temperatuur (21,9 °C) oli nõupidamisruumis ja kõige suurem ruumi nr. 146 tootmises (24,0 °C). 9,9% juhtudest ületas siseõhu temperatuur maksimaalset soovituslikku piiri ja 1% juhtudest oli siseõhu temperatuur allpool minimaalset soovituslikku piiri. Seega võib väita, et enamik ajast on temperatuur teaduspargis normis ja liiga madalast või liiga kõrgest temperatuurist tulenevaid soojusliku mugavuse probleeme ei tohiks esineda.



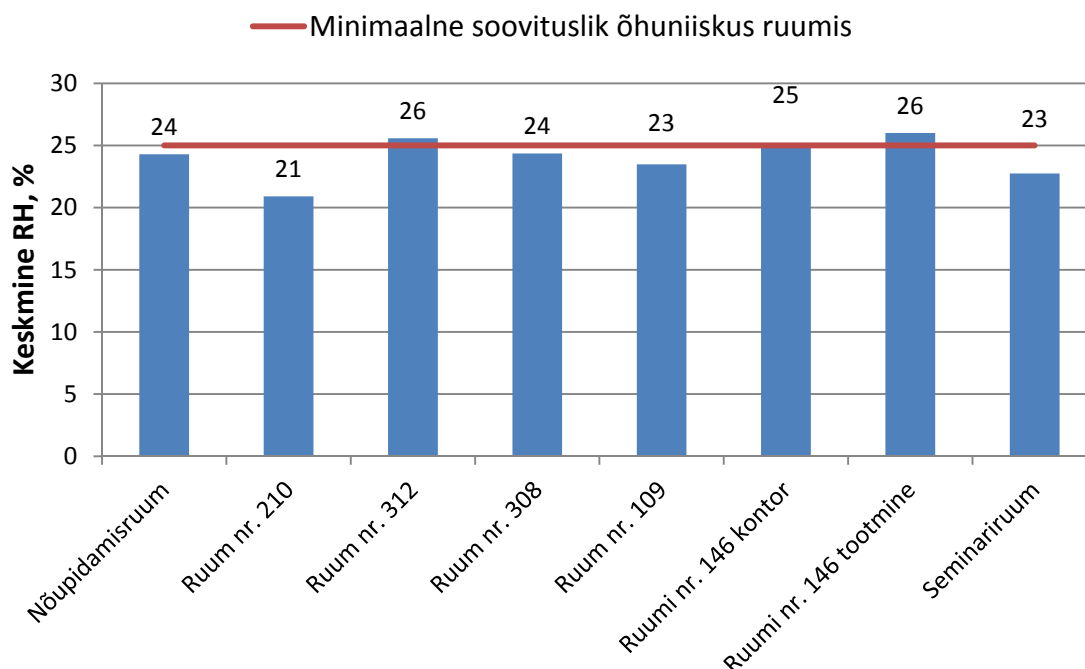
Joonis 4.34 Keskmised siseõhu temperatuuri väärtused teaduspargi ruumides

Tabel 4.9 Teaduspargi keskmine siseõhu temperatuur ja tulemuste jaotus

Parameeter	Mõõdetud keskmine väärtus	Soovituslik väärtus	Parameetrite vahemikud	% kõigist mõõtetulemustest
Temperatuur, °C	22,9	20 – 24	>24	9,9 %
			20 – 24	89,1 %
			<20	1,0 %

4.4.2 Siseõhu suhteline niiskus

Teaduspargi suhtelise õhuniiskuse kokkuvõtlikud tulemused on toodud joonisel 4.35 ja tabelis 4.10. Kaheksast mõõdetud ruumist jäi keskmine õhuniiskus kolmes ruumis soovituslikesse piiridesse, ülejäänud ruumides oli tegemist liiga madala õhuniiskusega. Mitte kordagi ei tõusnud hoones õhuniiskus üle maksimaalse soovitusliku õhuniiskuse piiri 60%, järelkult oht hallituse ja mikroorganismide tekkeks on väike. Kõige madalam keskmine õhuniiskus (21%) oli ruumis nr. 210, kõige kõrgem (26%) ruumi nr. 146 tootmises. Hoone keskmiseks suhteliseks õhuniiskuseks tuli 24%, kõikidest mõõtetulemustest vaid 38,4% jäid soovituslikesse piiridesse. Seega võib öelda, et hoones tervikuna on liiga väike suhteline õhuniiskus. See on tõenäoliselt põhjustatud liigest hoone ventileerimisest, kuna talveperioodil on siseõhu niiskus niigi madalam ja ülemäärane ventileerimine vähendab seda veelgi. Ka ruumides tehtud ventilatsiooni õhuvooluhulga arvutusest järeldus, et ruumides esineb üleventileerimist. Liiga väike siseõhu niiskus võib põhjustada teaduspargis töötavatel inimestel terviseprobleeme, eelkõige naha kuivust, silmade ja hingamisteede ärritust ja sügelust. Pikaajaline sellises keskkonnas viibimine võib vähendada inimeste vastupanu võimet viirustele, sealjuures levivad mitmed viirused madalama õhuniiskuse juures paremini.



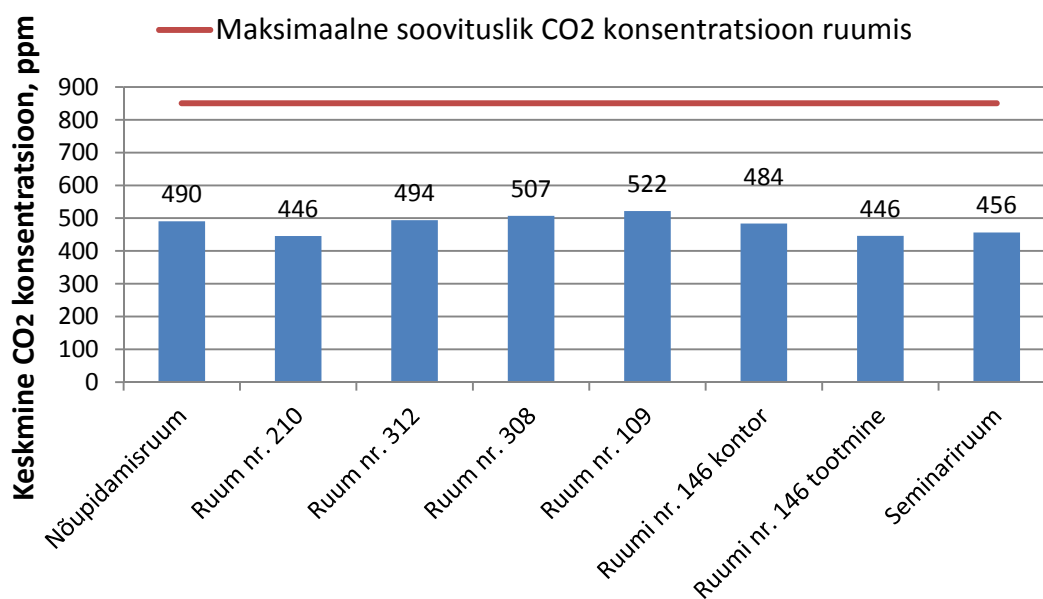
Joonis 4.35 Keskmised suhtelise õhuniiskuse väärtused teaduspargi ruumides

Tabel 4.10 Teaduspargi keskmine õhuniiskus ja tulemuste jaotus

Parameeter	Mõõdetud keskmine väärtus	Soovituslik väärtus	Parameetrite vahemikud	% kõigist mõõtetulemustest
Niiskus, %RH	24	25 – 60	>60	0 %
			25 – 60	38,4 %
			<25	61,6 %

4.4.3 Siseõhu CO₂ kontsentratsioon

Teaduspargi siseõhu CO₂ kontsentratsiooni kokkuvõtlikud tulemused on toodud joonisel 4.36 ja tabelis 4.11. Kõikides ruumides jäi keskmine siseõhu CO₂ kontsentratsioon oluliselt allapoole maksimaalset soovituslikku piirmäära 850 ppm. CO₂ keskmiseks kontsentratsiooniks teaduspargis tuli 481 ppm. Vaid 2,6% kordadest olid CO₂ kontsentratsiooni väärtused ülalpool piirmäära. Kõige suurem keskmine CO₂ kontsentratsioon oli ruumis nr. 109 (522 ppm), kõige väiksem ruumis nr. ja ruumi nr. 146 tootmises (446 ppm). CO₂ kontsentratsiooni järgi tehtud ventilatsiooni õhuvooluhulga arvutused näitasid, et kõikides mõõdetud ruumides esines üleventileerimist – keskmiseks ventilatsiooni õhuvooluhulgaks tuli 3,43 l/s·m². Seega võib väita, et teaduspargis on CO₂ kontsentratsiooni väärtused enamik ajast normis ning õhu puhtusega ei tohiks probleeme tekkida, siiski on hoone ruumid üleventileeritud, mis põhjustab suuremat energiakulu.



Joonis 4.36 Keskmised siseõhu CO₂ kontsentratsiooni väärtused teaduspargis

Tabel 4.11 Teaduspargi keskmine siseõhu CO₂ kontsentratsioon ja tulemuste jaotus

Parameeter	Mõõdetud keskmine väärtus	Soovituslik väärtus	Parameetrite vahemikud	% kõigist mõõtetulemustest
CO ₂ , ppm	481	<850	>850	2,6 %
			≤850	97,4 %

5. JÄRELDUSED

5.1 KÜLMASILLAD JA VÕIMALUSED NENDE VÄHENDAMISEKS

Termovisiooni tulemused näitasid, et kõige probleemsemad külmasillad hoones esinesid välisseina ja akende liitekohas ning aknaraami ja klaaspaketi liitekohas. 67. korral oli akende ümbruses oht hallituse tekkeks, nendes kohtades olid temperatuuriindeksi väärtused vahemikus 0,08 – 0,65. 47. juhul oli aknaraami ümbruses veeauru kondenseerumise oht (temperatuuriindeksid vahemikus 0,08 – 0,55). Üksteist külmasilda esines ka välisseina ja esimese korruse põranda liitekohas, nendes kohtades olid temperatuuriindeksid vahemikus 0,45 – 0,65. Välisseina ja vahelae liitekohas esines vaid 1 kriitiline külmasild, välisseina ja katuslae liitekohas aga ei olnud mitte ühtegi kriitilist külmasilda. Aknaraami liitekohas olevad külmasillad on põhjustatud eelkõige ebakvaliteetsest paigaldusest. Aknaraami ja klaaspaketi ühenduskohas olevad külmasillad on põhjustatud puudustest akende tootmisel. Külmasillad välisseina ja esimese korruse põranda liitekohas on eelkõige tingitud kehvast ehitustööst.

Aknaraami ümbruses olevaid külmasildu saab vähendada tihendades aknaraami ja välisseina vahelisi liitekohti. Kui renoveerimise käigus on märgata ulatuslikke niiskus- või hallituskahjustusi, tuleks esmalt kahjustused likvideerida ja siis mõelda akende väljavahetamisele. Aknaraami ja klaaspaketi vahelised külmasillad on põhjustatud vigadest tootmistehnoloogias, nende likvideerimiseks tuleks eelkõige mõelda akende väljavahetamisele. Välisseina ja esimese korruse põranda liitekohas olevaid külmasildu on võimalik vähendada vundamendi lisasoojustamisega.

5.2 SISEKLIIMA JA SELLE PARANDAMISE VÕIMALUSED

Sisekliima mõõtmisandmete töötamise tulemused näitasid, et peamine probleem hoones on liiga väike suhteline siseõhu niiskus. Soovitav minimaalne õhuniiskus ruumis on alates 25%, kuid hoone keskmiseks õhuniiskuseks tuli 24%. Kohati esines perioode, kus õhuniiskus langes kuni 13%-ni. Nii väike siseõhu niiskus võib põhjustada seal töötavatel inimestel mitmeid terviseprobleeme. Suure tõenäosusega on liiga väikese õhuniiskuse põhjuseks hoone üleventileerimine. Hoone üleventileerimisele viitas madal keskmine CO₂ kontsentratsioon ruumides, samuti CO₂ kontsentratsiooni põhjal tehtud ventilatsiooni õhuvooluhulga arvutused. Temperatuuri ja CO₂ kontsentratsiooni väärtused

jäid hoones enamik ajast normi piiresse, keskmine õhutemperatuur hoones oli 22,8 °C ja keskmine CO₂ kontsentratsioon 499 ppm.

Siseõhu niiskuse suurendamiseks tuleks hoones vähendada ventilatsiooni sissepuhke vooluhulka, sealjuures tuleb aga jälgida, et see liigselt ruumide CO₂ kontsentratsiooni ei tõstaks. Teine võimalus on ruumides kasutada õhuniisuteid, kuid ka nendega tuleb olla ettevaatlik, et mitte ruumi niiskuskooormust liiga suureks ajada.

KOKKUVÕTE

Käesolevas töös uuriti Tartu Teaduspargi inkubatsioonikeskuse külmasildade kriitilisust ja sisekliima kvaliteeti. Külmasildade kriitilisuse hindamiseks kasutati nii termovisiooni mõõtmistulemusi kui ka temperatuurivälja arvutuslikke tulemusi. Neid tulemusi kasutades leiti külmasildade temperatuuriindeksid, mis andsid ülevaate sellest, kas sõlmedes esineb kriitilisi külmasildu. Temperatuurivälja arvutusega leitud temperatuuriindeksid näitasid, et mitte üheski uuritud sõlmes ei tohiks esineda kriitilisi külmasildu. Kohapeal mõõdetud termovisiooni tulemused aga tõid välja mitmeid kriitilisi külmasildu, kus oli oht hallituse tekkeks või isegi veeauru kondenseerumiseks. Kõige rohkem probleemseid külmasildu esines aknaraami ümbruses ja aknaraami ning klaaspaketi liitekohas, kusjuures aknaraami ümbruses oli koguniski 67. korral oht hallituse tekkeks. Mõningaid kriitilisi külmasildu esines ka välisseina ja esimese korruse põranda liitekohas. Peamiseks kriitiliste külmasildade põhjuseks võib pidada ebakvaliteetset ehitustööd, kus konstruktsioonide liitekohad ei ole piisavalt tihendatud või soojustatud. Aknaraami ja klaaspaketi liitekohas olevad külmasillad on tingitud puudustest akende tootmisel. Lisaks hallituse ja veeauru kondenseerumise kahjulikele mõjudele konstruktsioonides, põhjustavad külmasillad ruumides suuremaid soojusenergiakadusid, mis omakorda suurendavad hoone energiakulu.

Hoone sisekliimat uuriti kolme parameetri alusel – õhutemperatuur, õhu suhteline niiskus ja CO₂ kontsentratsioon õhus. Kasutati teaduspargis baseeruva firma Evikon MCI poolt saadud mõõtmisandmeid, mis olid kogutud kahenädalase mõõtmisperioodiga. Sisekliima mõõtetulemusi võrreldi standardites ja energiatõhususe miinimumnõuetes sätestatud piirväärtustega. Sisekliima mõõtetulemused tõid välja, et hoone keskmised ruumitemperatuurid ja CO₂ kontsentratsioonid olid normide piires, kuid keskmine suhteline õhuniiskus oli liiga väike – kõigest 24%. Väike suhteline õhuniiskus siseruumides võib põhjustada inimestel mitmeid terviseprobleeme, seega tuleks seda kindlasti vältida. Liiga väikese suhtelise õhuniiskuse põhjuseks võib pidada hoone üleventileerimist. Üleventileerimisele viitasid ka CO₂ kontsentratsioonide põhjal tehtud ventilatsiooni õhuvooluhulga arvutused, kus välisõhu sissepuhke väärtused olid tunduvalt suuremad soovituslikest väärtustest. Lisaks sellele viitas üleventileerimisele CO₂ kontsentratsioonide madal tase. Üleventileerimine suurendab kahtlemata ka hoone energiakulu, seega tuleks kindlasti kaaluda ventilatsiooni sissepuhke vooluhulkade vähendamist.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Hani, A. *Investigation of Energy Efficiency in Buildings and HVAC Systems: PhD Dissertation*. Tallinn University of Technology Press, Tallinn, 2012.
2. Energiatõhususe miinimumnõuded. Riigi Teataja I, 05.09.2012, 4.
3. Hoonete energiatõhususe arvutamise meetodika. Riigi Teataja I, 18.10.2012,1.
4. Kalamees, T. *Critical values for the temperature factor to assess thermal bridges: Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*. Tallinn, Tallinna Tehnikaülikool, 2006.
5. Kalamees, T., Ilomets, S., Liias, R., Raado, L.M., Kuusk, K., Maivel, M., Ründva, M., Klõšeiko, P., Liho, E., Paap, L., Mikola, A., Seinre, E., Lill, I., Soekov, E., Paadam, K., Ojamäe, L., Kallavus, U., Mikli, L., Kõiv, T.A. Eesti eluasemefondi ehitustehniline seisukord – ajavahemikul 1990-2010 kasutusele võetud korterelamud: uuring. Tallinn, Tallinna Tehnikaülikool, 2012.
6. Ben Larbi, A. *Statistical modelling of heat transfer for thermal bridges of buildings*. Energy and Buildings 37 (9), lk. 945-951, 2005.
7. Kalamees, T., Kõiv, T.A., Liias, R., Õiger, K., Kallavus, U., Mikli, L., Ilomets, S., Kuusk, K., Maivel, M., Mikola, A., Klõšeiko, P., Agasild, T., Arumägi, E., Liho, E., Ojang, T., Tuisk, T., Raado, L.M., Jõesaar, T. Eesti eluasemefondi telliskorterelamute ehitustehniline seisukord ning prognoositav eluiga: uuring. Tallinn, Tallinna Tehnikaülikool, 2010.
8. Hens, H. *Condensation and Energy, Guidelines and Practice*. Vol. 2, Annex 14, International Energy Agency, KU Leuven, 1990.
9. *Hygrothermal performance of building components and building elements - Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation - Calculation methods*. Standard EVS-EN ISO 13788, 2012.
10. Kalamees, T., Õiger, K., Kõiv, T.A., Liias, R., Kallavus, U., Mikli, L., Lehtla, A., Kodí, G., Luman, A., Arumägi, E., Mironova, J., Peetrimägi, L., Korpen, M., Männiste, L., Murman, P., Hamburg, A., Tali, M., Seinre, E. Eesti eluasemefondi suurpaneel-korterelamute ehitustehniline seisukord ning prognoositav eluiga: uuring. Tallinn, Tallinna Tehnikaülikool, 2009.
11. Kalamees, T., Alev, Ü., Arumägi, E., Ilomets, S., Just, A., Kallavus, U. Maaelamute sisekliima, ehitusfüüsika ja energiasääst I: uuring. Tallinn, Tallinna Tehnikaülikool, 2011.

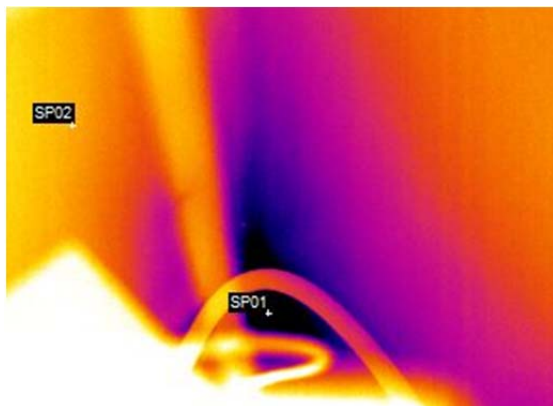
12. Kalamees, T., Arumägi, E., Just, A., Kallavus, U., Mikli, L., Thalfeldt, M., Klõšeiko, P., Agasild, T., Liho, E., Haug, P., Tuurmann, K., Lias, R., Õiger, K., Langeproon, P., Orro, O., Välja, L., Suits, M., Kodi, G., Ilomets, S., Alev, Ü., Kurik, L. Eesti eluasemefondi puitkorterelamute ehitustehniline seisukord ning prognoositav eluiga: uuring. Tallinn, Tallinna Tehnikaülikool, 2011.
13. Bergman, L. T., Lavine, A. S., Incropera, F. P., Dewitt, D. P. *Fundamentals of heat and mass transfer*, Vol. 7, lk. 8, 2011.
14. Brown, S. K., *Indoor air quality*, 1997.
15. Töötervishoiu ja tööohutuse seadus. Riigi Teataja I, 16.04.2014,10.
16. Sisekeskkonna algandmed hoonete energiatõhususe projekteerimiseks ja hindamiseks, lähtudes siseõhu kvaliteedist, soojuslikust mugavusest, valgustusest ja akustikast. Standard EVS-EN 15251:2007.
17. Fanger, P.O. *Thermal Comfort Analysis and Applications in Environmental Engineering*. Kopenhaagen, Danish Technical Press, 1970.
18. Vinha, J., Korpi, M., Kalamees, M., Eskola, L., Palonen, J., Kurnitski, J., Valovirta, I., Mikkilä, A., Jokisalo, J. *Indoor temperature and humidity conditions, ventilation and airtightness of Finnish timber-framed detached houses*. Tampere, Tampere Tehnikaülikool, 2005.
19. *Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*. Standard ISO 7730:2005.
20. Kalamees, T. *Indoor climate conditions and ventilation performance in Estonian Lightweight Detached Houses*. Tallinn, Tallinna Tehnikaülikool, 2006.
21. Allen, G.R., Pereira, S.L., Raes, D., Smith, M. *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements*. Rooma, 1998.
22. Lech, J.A., Wilby, K., McMullen, E., Laporte, K. *The Canadian human activity patterns survey: Report of Methods and Population Surveyed, Chronic Diseases in Canada*. Kanada, 1996.
23. Kõiv, T.A., *Indoor climate and ventilation in Tallinn school buildings*. *Estonian Journal of Engineering*, Tallinn, 2007.
24. Emmerich, S.J., Persily, A.K. *State-of-the-Art Review of CO₂ Demand Controlled Ventilation Technology and Application*. Ameerika Ühendriigid, 2001.
25. Jokl, M.V. *Evaluation of indoor air quality using the decibel concept based on carbon dioxide and TVOC*. *Building and Environment*, 2000,35,8, lk 677-697.

26. Bronsema, B., Björck, M., Carrer, P., Clausen, G., Fitzner, K., Flatheim, G., Follin, T., Haverinen, U., Jamriska, M., Kurnitski, J., Maroni, M., Mathisen, H. M., Morawska, L., Müller, B., Nathanson, T., Nevalainen, A., Olesen, B. W., Pasanen, P., Seppänen, O., Säteri, J., Witterseh, T. *Performance criteria of buildings for health and comfort*, Helsingi, Helsingi Tehnikaülikool, 2004.
27. Redlich, C. A., Sparer, J., Cullen, M. R. *Sick-building syndrome*. Ameerika Ühendriigid, Yale Tehnikaülikool, 1997.
28. Spengler, J.D., Sexton, K. *Indoor air pollution: a public health perspective*. Ameerika Ühendriigid, Harvard School of Public Health, 1983.
29. Dietz, A., Ramroth, H., Urban, T., Ahrens, W., Becher, H. *Exposure to cement dust, related occupational groups and laryngeal cancer risk: Results of a population based case-control study*. Saksamaa, 2003.
30. Hedge, A., Erickson, W.A., Rubin, G. *Effects of man-made mineral fibers in settled dust on sick building syndrome in air-conditioned offices*. Helsingi, 1993.
31. Nazaroff, W.W., Nero, A.V. *Radon and its decay products in indoor air*. Ameerika Ühendriigid, 1988.
32. Flir Thermacam SC640. Kättesaadav:
http://www.thermografie-xtra.de/fileadmin/user_upload/pics/products/flir-thermacam-sc640.jpg
33. Kimo Instruments AMI 300. Kättesaadav:
<http://2.imimg.com/data2/KM/BV/MY-3764870/kimo-multifunction-meter-500x500.jpg>
34. *Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings - addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*. Euroopa standard EN 15251:2006.

LISAD

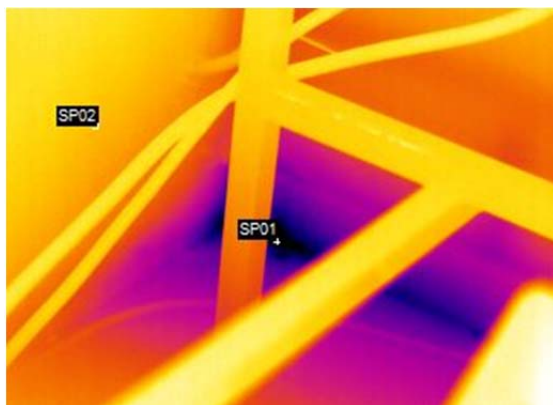
LISA 1 – valik kriitilisi külmasildu

NB! Ruumi numbrid on võetud hoone arhitektuursetelt joonistelt. Juhul kui arhitektuursetel joonistel ruumi number puudus, võeti number Tartu Teaduspargi kodulehelt territooriumi plaanilt.



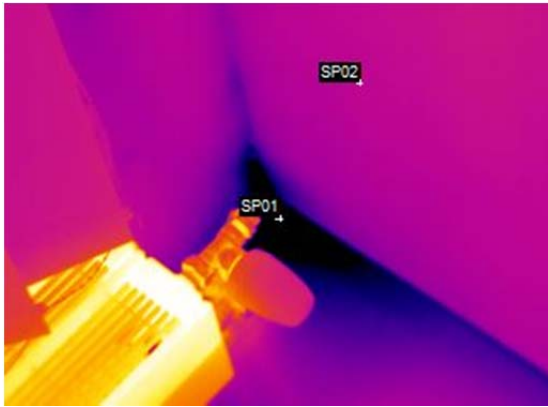
	Sisepinnatemperatuur:	Temperatuuriindeks:
Välistemperatuur: - 4,0 °C	SP01: 11,9 °C	$f_{Rsi, 1} = 0,60$
Sisetemperatuur: 22,5 °C	SP02: 18,5 °C	$f_{Rsi, 2} = 0,85$

Ruum 143 – välisseina ja põranda liitekoht



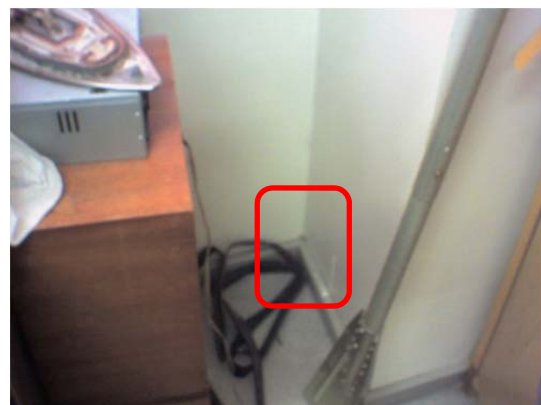
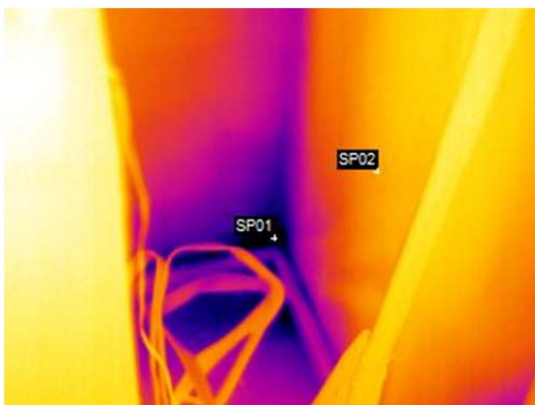
	Sisepinnatemperatuur:	Temperatuuriindeks:
Välistemperatuur: - 4,0 °C	SP01: 8,0 °C	$f_{Rsi, 1} = 0,45$
Sisetemperatuur: 22,5 °C	SP02: 19,4 °C	$f_{Rsi, 2} = 0,88$

Ruum 143 – välisseina ja põranda liitekoht



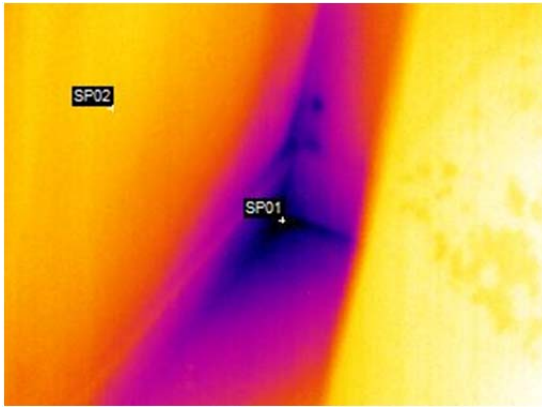
	Sisepinnatemperatuur:	Temperatuuriindeks:
Välitemperatuur: - 3,8 °C	SP01: 9,2 °C	$f_{Rsi, 1} = 0,47$
Sisitemperatuur: 24,0 °C	SP02: 21,9 °C	$f_{Rsi, 2} = 0,92$

Ruum 102 – välisseina ja põranda liitekoht



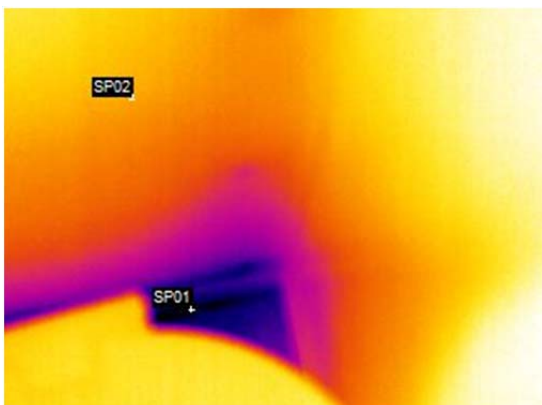
	Sisepinnatemperatuur:	Temperatuuriindeks:
Välitemperatuur: - 4,3 °C	SP01: 13,6 °C	$f_{Rsi, 1} = 0,63$
Sisitemperatuur: 24,1 °C	SP02: 21,7 °C	$f_{Rsi, 2} = 0,92$

Ruum 127 – välisseina ja põranda liitekoht



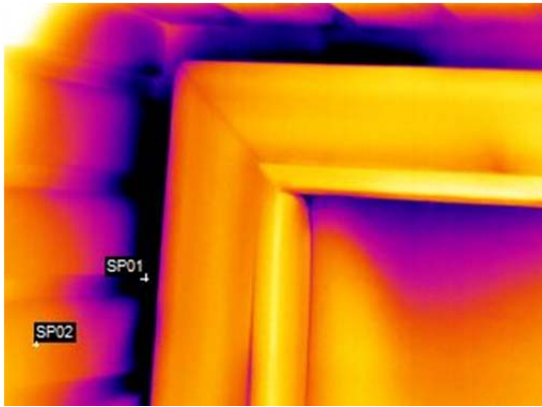
	Sisepinnatemperatuur:	Temperatuuriindeks:
Välitemperatuur: - 5,4 °C	SP01: 9,3 °C	$f_{Rsi, 1} = 0,64$
Sisitemperatuur: 17,7 °C	SP02: 14,8 °C	$f_{Rsi, 2} = 0,87$

Koridor 106 – välisseina ja põranda liitekoht



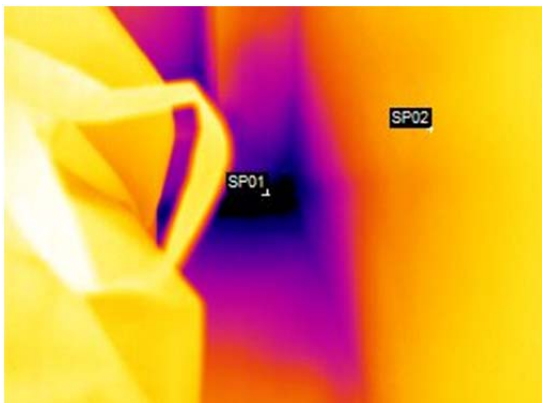
	Sisepinnatemperatuur:	Temperatuuriindeks:
Välitemperatuur: - 5,4 °C	SP01: 10,1 °C	$f_{Rsi, 1} = 0,64$
Sisitemperatuur: 18,8 °C	SP02: 16,2 °C	$f_{Rsi, 2} = 0,89$

Köök 105 – välisseina ja põranda liitekoht



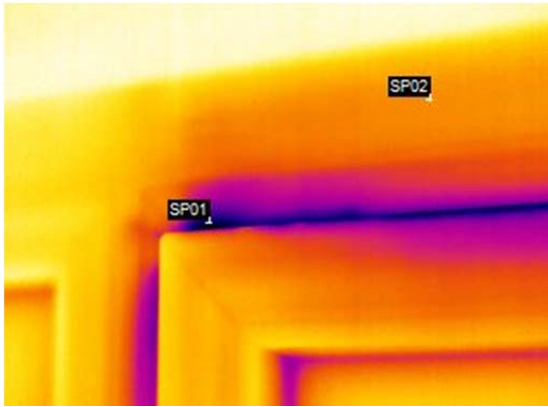
	Sisepinnatemperatuur:	Temperatuuriindeks:
Välistemperatuur: - 5,2 °C	SP01: -3,0 °C	$f_{Rsi, 1} = 0,08$
Sisetemperatuur: 21,6 °C	SP02: 10,7 °C	$f_{Rsi, 2} = 0,59$

Ruum 250D – aknaraami ümbrus



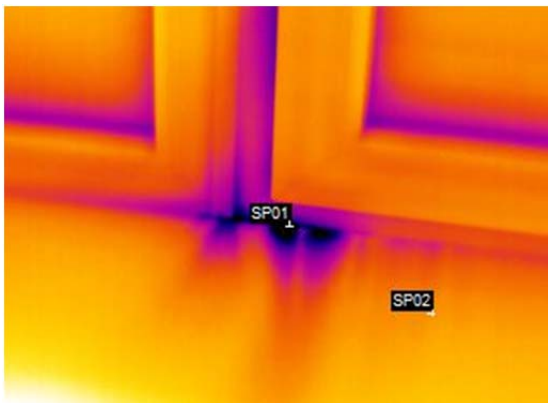
	Sisepinnatemperatuur:	Temperatuuriindeks:
Välistemperatuur: - 5,1 °C	SP01: 5,6 °C	$f_{Rsi, 1} = 0,37$
Sisetemperatuur: 23,8 °C	SP02: 19,6 °C	$f_{Rsi, 2} = 0,85$

Ruum 237 – aknaraami ümbrus



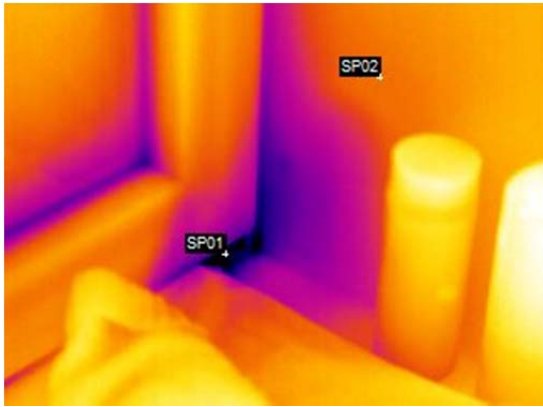
	Sisepinnatemperatuur:	Temperatuuriindeks:
Välitemperatuur: - 2,6 °C	SP01: 10,1 °C	$f_{Rsi, 1} = 0,49$
Sisitemperatuur: 23,3 °C	SP02: 18,5 °C	$f_{Rsi, 2} = 0,85$

Ruum 247 – aknaraami ümbrus



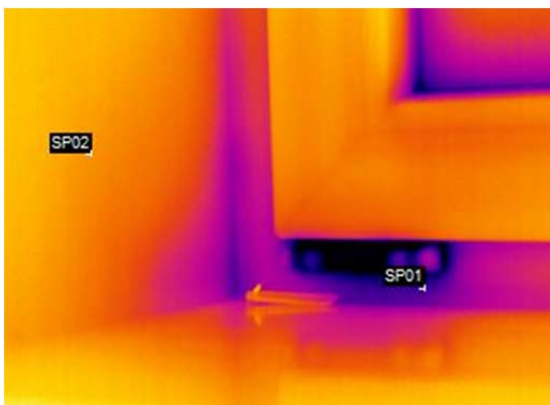
	Sisepinnatemperatuur:	Temperatuuriindeks:
Välitemperatuur: - 2,3 °C	SP01: 3,2 °C	$f_{Rsi, 1} = 0,22$
Sisitemperatuur: 22,8 °C	SP02: 18,0 °C	$f_{Rsi, 2} = 0,81$

Ruum 243 – aknaraami ümbrus



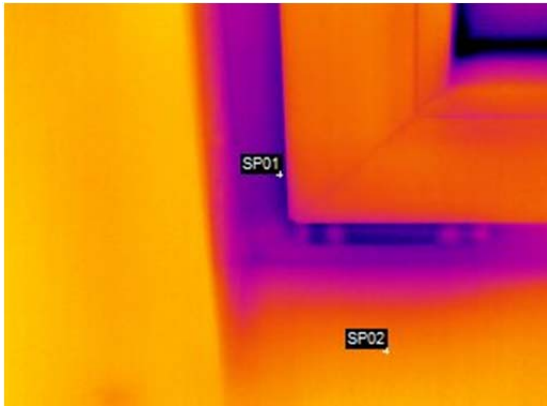
	Sisepinnatemperatuur:	Temperatuuriindeks:
Välistemperatuur: - 4,3 °C	SP01: 7,8 °C	$f_{Rsi, 1} = 0,43$
Sisetemperatuur: 23,7 °C	SP02: 17,0 °C	$f_{Rsi, 2} = 0,76$

Ruum 118A(kontor) – aknaraami ümbrus



	Sisepinnatemperatuur:	Temperatuuriindeks:
Välistemperatuur: - 4,3 °C	SP01: 8,1 °C	$f_{Rsi, 1} = 0,43$
Sisetemperatuur: 24,4 °C	SP02: 18,5 °C	$f_{Rsi, 2} = 0,79$

WC (ruumi 118A kõrval) – aknaraami ümbrus



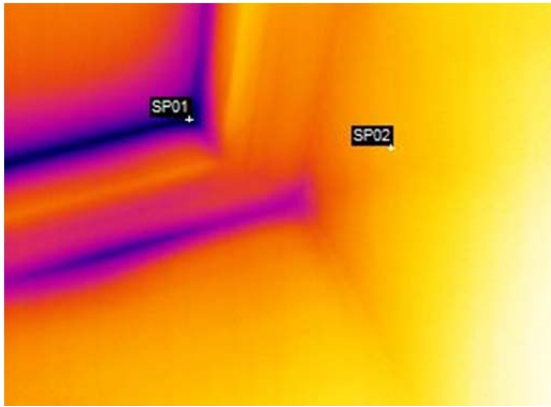
	Sisepinnatemperatuur:	Temperatuuriindeks:
Välitemperatuur: - 5,1 °C	SP01: 12,7 °C	$f_{Rsi, 1} = 0,62$
Sisitemperatuur: 23,7 °C	SP02: 19,4 °C	$f_{Rsi, 2} = 0,85$

Ruum 307 – aknaraami ümbrus



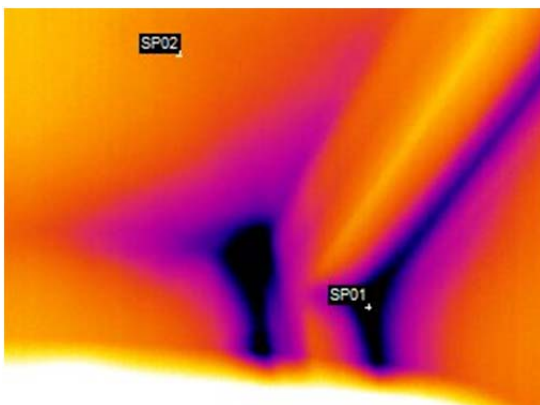
	Sisepinnatemperatuur:	Temperatuuriindeks:
Välitemperatuur: - 5,4 °C	SP01: 7,7 °C	$f_{Rsi, 1} = 0,56$
Sisitemperatuur: 18,0 °C	SP02: 14,9 °C	$f_{Rsi, 2} = 0,87$

Ruum 112 – aknaraami ümbrus



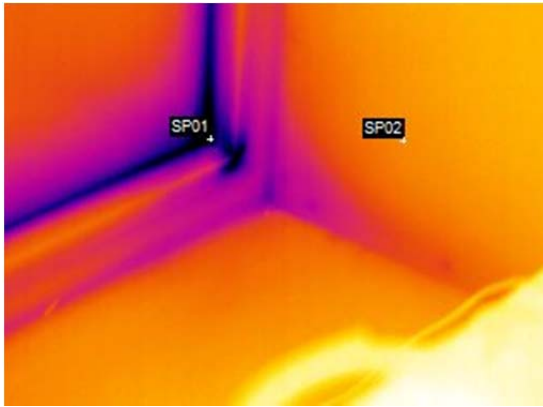
	Sisepinnatemperatuur:	Temperatuuriindeks:
Välitemperatuur: - 2,5 °C	SP01: 9,1 °C	$f_{Rsi, 1} = 0,46$
Sisitemperatuur: 22,6 °C	SP02: 18,6 °C	$f_{Rsi, 2} = 0,84$

Ruum 246 – aknaraami ja klaaspaketi liitekoht



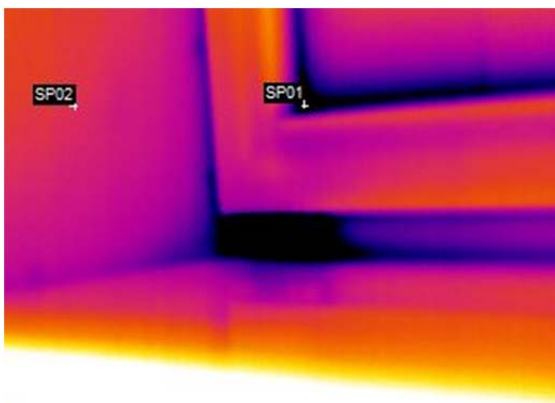
	Sisepinnatemperatuur:	Temperatuuriindeks:
Välitemperatuur: - 2,9 °C	SP01: 8,5 °C	$f_{Rsi, 1} = 0,44$
Sisitemperatuur: 22,9 °C	SP02: 17,5 °C	$f_{Rsi, 2} = 0,79$

Ruum 249 – aknaraami ja klaaspaketi liitekoht



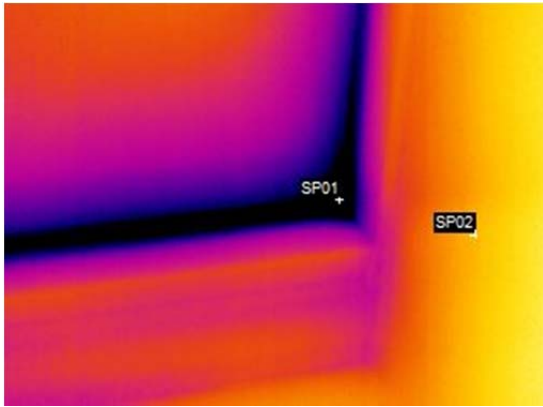
	Sisepinnatemperatuur:	Temperatuuriindeks:
Välitemperatuur: - 4,1 °C	SP01: 9,8 °C	$f_{Rsi, 1} = 0,49$
Sisitemperatuur: 24,3 °C	SP02: 21,2 °C	$f_{Rsi, 2} = 0,89$

Ruum 117 – aknaraami ja klaaspaketi liitekoht



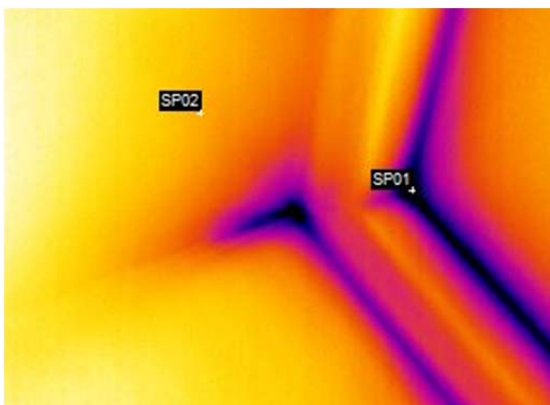
	Sisepinnatemperatuur:	Temperatuuriindeks:
Välitemperatuur: - 4,4 °C	SP01: 9,0 °C	$f_{Rsi, 1} = 0,48$
Sisitemperatuur: 23,5 °C	SP02: 16,0 °C	$f_{Rsi, 2} = 0,73$

WC (ruumi 118A kõrval) – aknaraami ja klaaspaketi liitekoht



	Sisepinnatemperatuur:	Temperatuuriindeks:
Välitemperatuur: - 5,1 °C	SP01: 7,5 °C	$f_{Rsi, 1} = 0,46$
Sisitemperatuur: 22,3 °C	SP02: 18,4 °C	$f_{Rsi, 2} = 0,86$

3. korruse puhkeala – aknaraami ja klaaspaketi liitekoht



	Sisepinnatemperatuur:	Temperatuuriindeks:
Välitemperatuur: - 2,8 °C	SP01: 7,8 °C	$f_{Rsi, 1} = 0,43$
Sisitemperatuur: 21,6 °C	SP02: 16,4 °C	$f_{Rsi, 2} = 0,79$

Ruum 248 – aknaraami ja klaaspaketi liitekoht

LISA 2 – ventilatsiooni õhuvooluhulkade arvutuskäigud

$$Q = \frac{G}{C_{in} - C_{out}}, \quad (1.3)$$

kus: Q – ventilatsiooni vooluhulk, m^3/s

G – CO_2 toodang ruumi, mg/s

C_{in} – Siseõhu CO_2 kontsentratsioon, mg/m^3

C_{out} – Välisõhu CO_2 kontsentratsioon, mg/m^3

$$G = \text{inimeste arv} * 10,4$$

kus: 10,4 – ühe inimese keskmine CO_2 eraldus bürooruumides, mg/s

Välisõhu CO_2 kontsentratsioon on võetud 2012 aasta keskmise taseme järgi milleks oli 392 ppm.

Ruum nr. 312

Algandmed:

$$G = 6 * 10,4 = 62,4 \text{ mg/s}$$

$$C_{in} = 494 \text{ ppm} = 889,2 \text{ mg/m}^3$$

$$C_{out} = 392 \text{ ppm} = 705,6 \text{ mg/m}^3$$

$$\text{Ruumi pindala} = 110,3 \text{ m}^2$$

$$Q = \frac{62,4}{889,2 - 705,6} = 0,34 \frac{m^3}{s} = 340 \frac{l}{s} = \mathbf{3,08} \frac{l}{m^2 * s}$$

Ruum nr. 308

Algandmed:

$$G = 5 * 10,4 = 52,0 \text{ mg/s}$$

$$C_{in} = 507 \text{ ppm} = 912,6 \text{ mg/m}^3$$

$$C_{out} = 392 \text{ ppm} = 705,6 \text{ mg/m}^3$$

$$\text{Ruumi pindala} = 80,7 \text{ m}^2$$

$$Q = \frac{52,0}{912,6 - 705,6} = 0,25 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 250 \frac{\text{l}}{\text{s}} = \mathbf{3,11} \frac{\text{l}}{\text{m}^2 * \text{s}}$$

Ruum nr. 109

Algandmed:

$$G = 5 * 10,4 = 52,0 \text{ mg/s}$$

$$C_{in} = 522 \text{ ppm} = 939,6 \text{ mg/m}^3$$

$$C_{out} = 392 \text{ ppm} = 705,6 \text{ mg/m}^3$$

$$\text{Ruumi pindala} = 65,8 \text{ m}^2$$

$$Q = \frac{52,0}{939,6 - 705,6} = 0,22 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 220 \frac{\text{l}}{\text{s}} = \mathbf{3,38} \frac{\text{l}}{\text{m}^2 * \text{s}}$$

Ruum nr. 146 kontor

Algandmed:

$$G = 1 * 10,4 = 10,4 \text{ mg/s}$$

$$C_{in} = 484 \text{ ppm} = 871,2 \text{ mg/m}^3$$

$$C_{out} = 392 \text{ ppm} = 705,6 \text{ mg/m}^3$$

$$\text{Ruumi pindala} = 18,2 \text{ m}^2$$

$$Q = \frac{10,4}{871,2 - 705,6} = 0,08 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 80 \frac{\text{l}}{\text{s}} = \mathbf{4,15} \frac{\text{l}}{\text{m}^2 * \text{s}}$$