



**TALLINNA TEHNICAÜLIKOOL**  
INSENERITEADUSKOND  
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**AJALOOLISTE EHITISTE KÜTTE- JA  
VENTILATSIOONISÜSTEEMIDE  
REKONSTRUEERIMINE JA SISEKLIIMA  
TAGAMINE**

**INDOOR CLIMATE SYSTEMS OF RENOVATED ANTIQUE  
AND HISTORICAL BUILDINGS**

EA70LT MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane:	Aleksei Saveljev
Üliõpilaskood:	162932EAXM
Juhendaja:	Erkki Seinre, PhD, dipl. kütte-, ventilatsiooni- ja jahutusinsener, tase 7
Kaasjuhendaja:	Alo Mikola, nooremteadur

Tallinn 2020

*(Tiitellehe pöördel)*

## **AUTORIDEKLARATSIOON**

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"25" mai 2020.a

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." mai 2020.a

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....." mai 2020.a

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

# Inseneriteaduskond, Hooned ja rajatised

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Aleksei Saveljev, 162932EAXM  
**Õppekava, peeriala:** EAXM15, Hooned ja rajatised, Küte ja ventilatsioon  
**Juhendaja(d):** Erkki Seinre (+372 53007151)  
**Konsultant:** Ants Viilup

### Lõputöö teema:

Ajalooliste ehitiste kütte- ja ventilatsioonisüsteemide rekonstrueerimine ja sisekliima tagamine

Indoor climate systems of renovated antique and historical buildings

### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Uurida kütte- ja ventilatsioonisüsteemide ehitamise võimalusi ajaloolistes hoonetes, toetudes välismaisele kogemusele
2. Analüüsida kaasaegsete kütte- ja ventilatsioonisüsteemide rakendamise võimalusi Kaarjärve Mõisa näitel

### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Lõputöö eesmärgi püstitamine ja metoodika väljatöötamine	16.10.19
2.	Tehnilised lahendused, võrdlus ja analüüs	18.11.19
3.	Varem tehtud mõõdistuste analüüs, arvutused ja tulemused	02.12.19
4.	Vormistamine ja töö kujundamine	20.05.20

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

**Üliõpilane:** Aleksei Saveljev ..... "25" mai 2020.a  
/ allkiri /

**Juhendaja:** Erkki Seinre ..... "25" mai 2020.a  
/ allkiri /

**Konsultant:** Ants Viilup ..... "....." mai 2020.a  
/ allkiri /

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

*Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel*

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina, Aleksei Saveljev, 22.09.1979

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose "AJALOOLISTE EHITISTE KÜTTE- JA VENTILATSIOONISÜSTEEMIDE REKONSTRUEERIMINE JA SISEKLIIMA TAGAMINE",

mille juhendaja on Erkki Seinre,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

---

<sup>1</sup> Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.

\_\_\_\_\_ (allkiri)

\_\_\_\_\_ (kuupäev)

# SISUKORD

EESSÕNA .....	7
Lühendite ja tähiste loetelu .....	8
SISSEJUHATUS .....	9
1. Rekonstrueerimata ajaloolised hooned .....	11
1.1 Kütte- ja ventilatsiooni süsteemid .....	11
1.1.1 Küttelehendused ja võimalikud põhistrateegiad .....	11
1.1.2 Friendly-heating project .....	17
1.1.3 Ventilatsioonisüsteemide strateegiad ja lahendused .....	18
1.2 Kaasaegsete tehnosüsteemide kasutusele võtmine .....	20
1.2.1 Sisekliima süsteemide varjatud paigaldamine.....	21
2. Meetodid .....	23
2.1 Soojus- ja niiskustehnilised arvutused .....	23
2.1.1 Piirdetarindite soojusläbivus.....	23
2.1.2 Sisepinna temperatuur ja kastepunkti temperatuur.....	23
2.1.3 Niiskustehnilise olukorra analüüs.....	24
2.1.4 Soojus- ja niiskuserežiimi arvutustarkvara.....	27
2.1.5 Niiskuslisa .....	31
2.2 Loomuliku ventilatsiooni hindamine.....	32
2.2.1 Sisepuhke õhu vooluhulk mõõdetud CO <sub>2</sub> baasil .....	32
2.3 Energiakulud .....	33
2.3.1 Soojustarbe määramine .....	33
2.4 Akustika ja müraarvutus, põhimõtted.....	33
2.4.1 Õhuvoolumüra .....	33
2.4.2 Põlvede poolt genereeritav müra .....	34
2.4.3 Lõppelemendi ja reguleerklapi poolt genereeritav müra .....	35
2.4.4 Mürasummutid.....	35
2.4.5 Müratasemete liitumine .....	36
2.4.6 Ruumi sumbuvus.....	37
3. Kaagjärve mõisahoone rekonstrueerimine.....	40
3.1 Mõisahoone olemasolev olukord.....	40
3.1.1 Hoone seisukord enne rekonstrueerimist .....	40
3.1.2 Projekteeritava hoone probleemide tuvastamine.....	41
3.1.3 Lõõriuuring .....	42
3.2 Hoone soojustehnilised aspektid .....	42
3.2.1 Keldri ruumide otstarve.....	42
3.2.2 Keldriosa välisseinte soojus- ja niiskustehniline toimivus .....	43

3.2.3 Keldriosa välisseinte seespoolse lisasoojustuse analüüs .....	46
3.2.4 Seinkütte lahendus keldris niisketes ruumides.....	49
3.2.5 Radiaatorküte .....	54
3.3 Hoone ventilatsiooni renoveerimine.....	54
3.3.1 Ventilatsiooni- ja suitsulõõride renoveerimine .....	54
3.3.2 Õhuvooluhulgad hoones .....	56
3.3.3 Ruumides CO <sub>2</sub> taseme kontroll ja järeldused .....	56
3.3.4 Majanduslikud aspektid KV süsteemide ehitamisel .....	60
3.3.5 Ventilatsiooni lahendused hoones .....	61
3.4 Akustika ja müra .....	65
3.4.1 Müra kontroll multifunktsionaal saalis .....	65
SOOVITUSED PROJEKTEERIJATELE .....	67
KOKKUVÕTE .....	70
SUMMARY.....	72
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	74
KASUTATUD TARKVARA LOETELU .....	76
LISAD .....	77
Lisa 1. Mudeldamine ja sellega seotud probleemid .....	78
Lisa 2. Lähteandmed objekti projekteerimiseks .....	79
Lisa 3. CO <sub>2</sub> mõõdistuste tulemused ja arvutus.....	80
Lisa 4. Seinkütte plaan ja skeem .....	82
Lisa 5. Seinkütte K <sub>H</sub> konstandi väärtused .....	83
Lisa 6. Keldrikorruse seinad. T simulatsioon .....	84
Lisa 7. Hoone tehnilised näitajad .....	86
Lisa 8. Kraadpäevad Valgamaal, 2017.a .....	87
Lisa 9. Multifunktsionaal saali akustiline arvutus .....	88

## **EESSÕNA**

Magistritöös on analüüsitud vana- ja ajaloolistes ehitistes kütte- ja ventilatsiooni planeerimise ja ehitamisega seotud probleemide üle mõisahoone näitel. Töös viidatud kirjandusallikate kohaselt on analoogsed probleemid on ka teistes mõisades, mõisakoolides ja muudes vanades ehitistes. On käsitletud üldisi sisekliima kujundamise aspekte kütte- ja ventilatsiooni planeerimise ja ehitamise seisukohalt, keskendudes just mõisade eripäradele.

Magistri töö eesmärgiks on anda soovitusi kütte- ja ventilatsiooni projekteerijatele ja ehitajatele sisekliima tagamiseks arvestades vanahoonete arhitektuuri keerukamate nüanssidega. Töö autor töötab kütte-, ventilatsiooni- ja jahutusinsenerina ettevõttes Esplan OÜ, mille põhitegevuseks on arhitektuur-, ehituskonstruksioonide- ning eriosade projekteerimine.

Teema valiku ja pealkirja sõnastamisel oli abiks Eesti Maaülikooli lektor Ants Viilup, keda autor tänab Kaagjärve-Mäemõisa KV põhiprojekti teostamise ajal osutatud abi ning nõuannete eest.

Tallinn, 20. mai 2020

Aleksei Saveljev

## Lühendite ja tähiste loetelu

<i>KV</i>	küte ja ventilatsioon
<i>EVS</i>	Eesti Vabariigi standart, on koostatud rahvuslikes standardimis-organisatsioonides. Pea koordineerija - Eesti Standardikeskus
<i>RT</i>	Riigi Teataja Eesti riigi ametlik väljaanne, kus avaldatakse seadused, rahvusvahelised aktid, määrused, juhised
<i>Rh, %</i>	suhteline õhuniiskus, on veeauru osarõhu ja samadel füüsikalistel tingi-mustel küllastunud veeauru osarõhu suhe
<i>xx/yy°C</i>	soojuskandja pealevoolu / tagasivoolu temperatuur
<i>DN</i>	nimiläbimõõt
<i>EIxx</i>	tuletõkke klass, xx - minutid
<i>dB(A)</i>	helivõimsuse (LwA) või helirõhu (LpA) taseme ühik, A-korreksioon – võtab arvesse inimkõrva kuulmisaistingu tundlikkuse, vähendades oktaavribades mõõtetulemustest madalate ja kõrgete sageduste mõju;
<i><math>\tau_b, h</math></i>	Ajakonstant
<i><math>\rho</math></i>	Tihedus (nt. õhu)
<i>T, t</i>	Temperatuur
<i><math>\lambda</math></i>	Soojusjuhtivustegur
<i><math>\Delta\theta_H</math></i>	Temperatuuride keskmine logaritmiline erinevus
<i><math>\mu</math></i>	Veeaurudifusioonitakistustegur



## **SISSEJUHATUS**

Sisekliima projekteerimine on kompleksne ülesanne, mis nõuab arusaamist eri valdkondadest, alates psühholoogiast kuni eri insenerivaldkondadeni. On loomulik, et kõiki neid teemasid on ühel inimesel raske vallata, sama kehtib ka sisekliima projekteerijate kohta. Teadmiste tase saab olla parem, kui on olnud aega enne projekteerimist infot koguda ning on kogemus sarnase otstarbega hoonete projekteerimisega. Kui tegemist on muinsuskaitseobjekti projekteerimistöödega, siis tihtipeale vastaval inseneril jääb vajaka muinsuskaitse alastest teadmistest, kuna see valdkond on erinev tänapäevastest uusehitistest ning ei ole lisatud inseneride õppeprogrammi haridusasutustes.

Praegu omandatakse teadmised töö käigus ja valdavalt on nendeks inimesteks muinsuskaitse spetsialistid, valdkonnale spetsialiseerunud arhitektid ja erikursuse läbinud üldehitusinsenerid. Need inimesed peavad juhendama ka eriosade (sh ventilatsiooni) valdkonda, kus neil aga puudub piisav erialaspetsiifiline kogemus. Seepärast on vaja leida teistsugune lähenemine muinsuskaitseobjektidele. Hea lahendus oleks muinsuskaitsekoolitus vastavate eriosade spetsialistidele nii projekteerimises kui ka ehitamises. Sellisel juhul on suurem võimalus, et muinsuskaitsete poolset eesmärgid saavad täidetud.

Restaureerimisprogrammide üheks kõige olulisemaks aspektiks võib lugeda ajalooliste hoonete varustamise kaasaegsete insenerisüsteemidega sisekliima loomiseks. Juhul kui ajalooline hoone on arhitektuurimälestis ning seda kasutatakse samaaegselt kui haridus-, muuseumi- või puhkeasutusena võivad nõuded sisekliimale osutada vastuolulisteks. KV süsteemide spetsialistid peavad tagama hoone säilimise ning igasuguste muudatuste sisseviimine hoone interjööri nõuab sellisel juhul erilisi teadmisi paljudes valdkondades. Ilma komplekse lähenemiseta probleemile ning ilma kõigi asjaolude põhjaliku analüüsita pole töö edukus võimalik. Arhitektid, insenerid, restauraatorid, seadmete tarnijad ja hoonete omanikud võivad leida asjatundlikud tehnilised lahendused ainult sellisel juhul kui nad tajuvad hoonet selle ajaloolises kontekstis.

Rekonstrueeritavad ajaloolised hooned peavad olema varustatud kõigi kaasaegsete lahendustega, mis käsitlevad ventilatsiooni ning sisekliima ülalhoidmisega seotud küsimusi. Suuresti sõltub iga hoone seisund selle siseõhu soojuslik-niiskuslikest parameetritest ning ajaloolisi ehitisi peab säilitama heas seisundis nii kaua kui võimalik. Sageli paiknevad ajaloolistes hoonetes muuseumide ekspositsioonid, kuid arhitektuurimälestiste sisekliimale ning muuseumide sisekliimale esitatavad nõuded

võivad erineda. Töö eesmärk on anda juhised ajalooliste hoonete rekonstrueerimise korral KV projekteerimiseks baseerudes välisriikide (ja Eesti) kogemusel, et vältida laiaulatusliku professionaalide töögrupi (arhitektid, tehnikaeksperdid, restauraatorid jne) moodustamist iga projekti jaoks.

Käesoleva töö raames analüüsida vanade hoonete sisekliima tagamise lahendused, hinnata ühtede või teiste meetodite otstarbekust ning nende potentsiaalset puudused. Näidata mõningate meetodite ja lahenduste kasutamist KV projekti näitel, arvestades hoone funktsiooni.

Töö põhiosa jaotatud kolmeks peatükiks. Esimeses osas tõstatatakse ajalooliste hoonete kütte ja ventilatsioonisüsteemide rekonstrueerimise üldküsimused, muuhulgas sisekliimat puudutavad küsimused ning nende lahendamise variandid, samuti vaadeldakse välisriikide kogemust. Selle alusel püstitakse hüpoteesid ja võimalikud lahendusvariandid hoone rekonstrueerimisel KV süsteemide projekteerimiseks ja rajamiseks.

Teises ja kolmas osades käsitletakse töös kasutatud meetodid ja KV süsteemide rekonstrueerimist Kaagjärve mõisahoone näitel, kirjeldatakse nii kooskõlastatud kui ka alternatiivseid lahendusi põhjendades ühe eelistust teisele. Teostati mõningate sõlmede arvutused, kontroll ja analüüs.

Magistrant on Kaagjärve-Mäemõisa peahoone kütte- ja ventilatsiooni projekteerija, lahenduse autor ja vastutav insener.

# 1. Rekonstrueerimata ajaloolised hooned

Paljudes ajaloolistes hoonetes õhuvahetus toimub peamiselt loomuliku ventilatsiooni abil ja kütteallikaks on vanad ahjud-kaminad. Tänapäeval saab edukalt selliseid soojusallikaid jätkuvalt nii lisa- kui põhiküttena kasutada, eriti kui hoone ei vaja aastaringselt konkreetse sisekliima hoidmist. Kui aga toimub hoone rekonstrueerimine ja selle kasutuse iseloom muutub, siis võivad sellised lahendused osutuda tänapäeva kontekstis ebaotstarbekaks, energiakulukaks ja keerukaks. Need lahendused ei ole tänapäevases kontekstis energiatõhusad ja mõistlikud. Selliste hoonete rekonstrueerimisel tuleb kasutada kaasaegseid tehnosüsteeme tagamaks hoones hea sisekliima. Leidub minevikus korduvalt rekonstrueeritud hooned, s.h. lisatud nt. keskkütte- ja mehaanilised ventilatsioonisüsteemid, mis on tänapäevases mõistes ajale jalgu jäänud, mitte-energiatõhusad ja ebaefektiivsed. Selliste rekonstrueeritud hoonete tehnosüsteemid on tihti ka paigaldatud arvestamata sisearhitektuuriga.

Uue kaasaegse ventilatsioonisüsteemi paigaldamine võib kaasa tuua suured füüsilised ja visuaalsed muudatused – näiteks paigaldatakse suure diameetriga metallist õhukanalid ja kütetorustik, mis jääb selgelt interjööri mõjutama kui neid ei kaeta, mida reeglina ei tehta. Pea alati on selle süsteemi projekteerimine ja kasutusele võtmine rida kompromisse, mille käigus võetakse arvesse hoone sisemuse ja välimuse säilimus, vanade materjalide ja näiteks muuseumieksponaatide säilimus. Seejuures on vajalik saavutada kõikide siseõhu parameetrite maksimaalne vastavus kaasaegsetele nõuetele.

## 1.1 Kütte- ja ventilatsiooni süsteemid

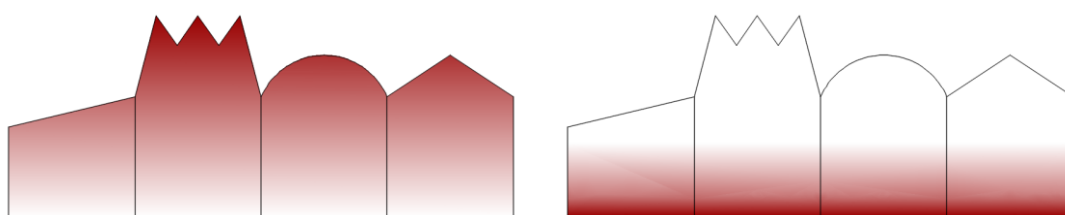
Tänapäevased kütte- ja ventilatsioonisüsteemidele esitatavad normatiivsed nõudmised on vanade hoonete suhtes ei ole täis mahus rakendatavad. Ka nende nõuete järgimine toob kaasa suuri investeeringuid ja potentsiaalset suuri energiakulusid (nt. märkimisväärsed kulud küttele suurtes saalides, mis vanasti olid kütmata). Samuti kaasneb hoone kahjustuse oht KV süsteemide ehituse käigus. Erinevalt kaasaegsetest hästi isoleeritud hoonetest on ajaloolistes hoonetes sisekliima loomine delikaatne ülesanne, mis põhineb keskkonna säilivuse ja inimeste mugavusel. Arvesse tuleb võtta standardeid [1], [2] ja [3].

### 1.1.1 Küttelahendused ja võimalikud põhistrateegiad

Vastavalt standardile [2] võib peamised strateegiad jaotada 3 tüübiks: 1) konserveeriv küte, rakendatakse lahendusi, mis säästavad maksimaalselt interjööri ja esemeid, põhiline eesmärk on ennetada niiskuse kõikumisi ning kondensaadi ladestumist külmadel pindadel, see küte ei pruugi olla sobivaim inimestele. Üldiselt see on tsooniline

kiirgusküte; 2) konvektiivne küte, hoonetes või hoone ruumides, kus inimeste mugavustunne peab olema tagatud täismahus, mugavuse tagava kütmisega kaasneb Rh varieerumine, toimub soojade õhumasside liikumine; 3) kombineeritud küte hoonetes, kus on ruumid nii kõrge lagedega, kus konvektiivsed soojamassid ebasoovituslikud, kui ka väiksed ruumid, kus konvektsioonküte on aktsepteeritav.

Samuti võib kütteleike jagada tsoonide ja aktiivsuse aja järgi: kogu maja kütmine, lokaalne, pidev, nõudluspõhine kütmine. Vaatleme järgnevalt Eestis kasutuses olevaid variante.



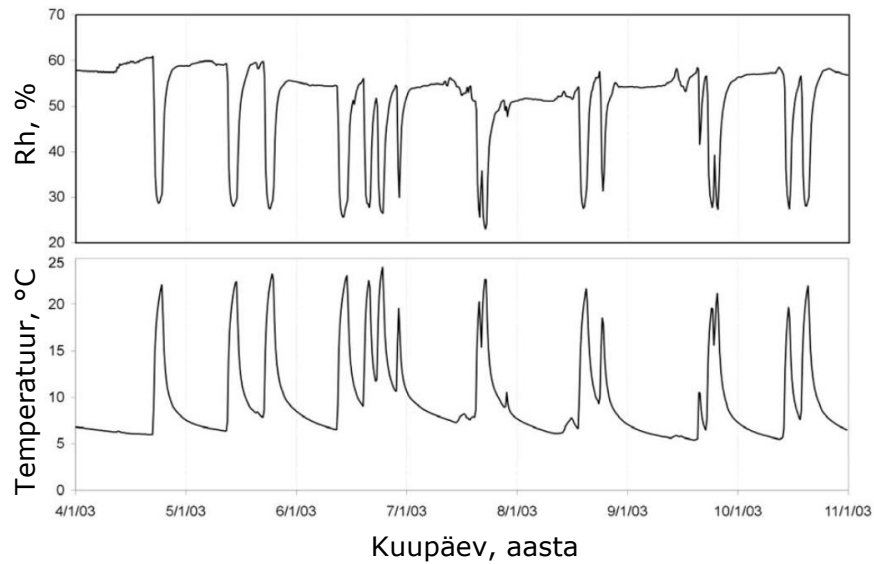
Joon. 1 Konvektiivne küte (vasak joonis) ja küte kiirguritega (parem joonis)

**Hoone konvektiivne küte (joonis 1, vasak)** eeldab soojuse homogeenset jagunemist kogu ruumala ulatuses, sh nendesse tühimikesse, mis pole inimese mugavuse seisukohast kuidagi olulised (nt. kõrgete lagedega ruumide ülemised segmendid). Suurem osa soojusest koondub sellisel juhul just üles. Tüüpilised soojaallikad antud juhul - radiaatorid/konvektorid, õhkküte.

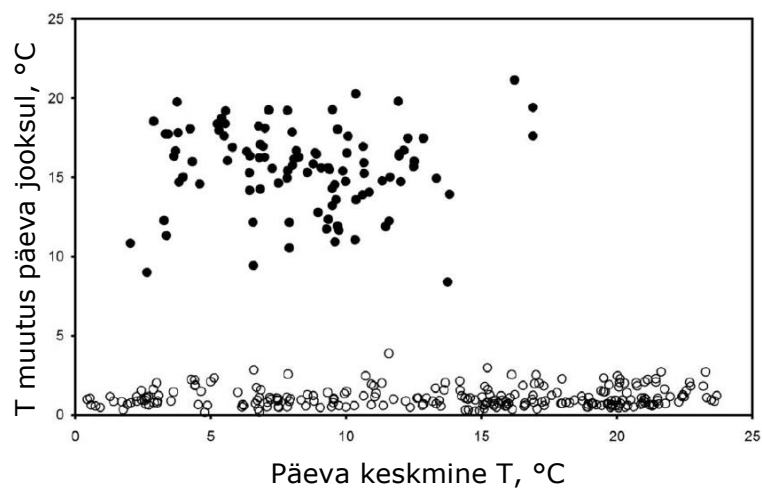
Interjöõri seisukohast tuleb meeles pidada, et taoline kütteviis muudab ruumi kliima võrreldes selle ajaloolise variandiga [11]. Kriitilisteks faktoriteks võivad olla järsud õhutemperatuuri ja suhtelise õhuniiskuse langemise tippnäidud, näiteks konvektiivse/õhkkütte perioodilise kasutamise puhul.

Hoone täismahu kütmine nõuab suurt energiahulka, millest osa läheb kaduma tänapäeva mõistes halbade näitajatega piirdekonstruktsioonide, külmasildade jmt tulemusel ning millest teine osa, sooja õhumassi kujul, koguneb laevõlvide alla (õhutemperatuuri kihistumine). Võib öelda, et madala energiaefektiivsusega ja keerulise suurte õõnsustega/mahtudega geomeetriaga hoonete puhul on maja täielik klassikaline üldküte väheefektiivne, eriti kui inimeste mugavuse tagamiseks kasutatakse sellest vaid vähest osa. Konserveeriv efekt nõrk, komfort kõrge.

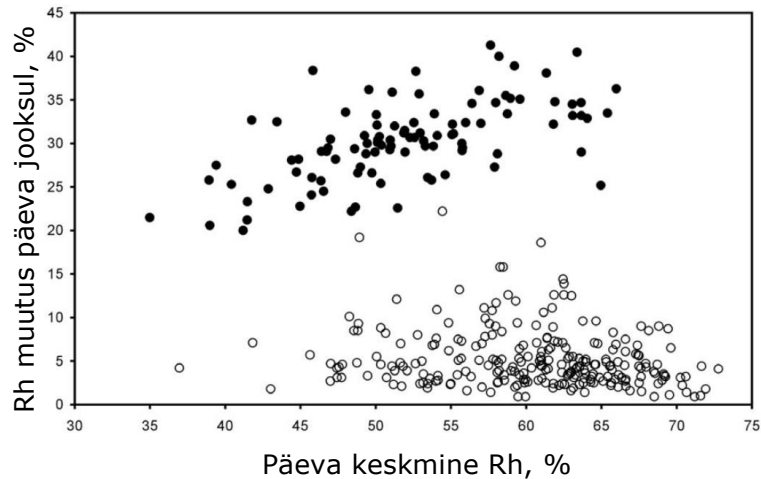
Näide selle kohta, kuidas sisekliima erineb ajaloolisest, on toodud joonisel 2 [12]. Need mõõtmisandmed on pärit Rocca Pietore kirikust (Itaalia, 2003.a), kuhu paigaldati tavaline konvektsioonküttesüsteem (radiaatorid ja soojapuhurid). Andmeteproofil võeti kõrguselt +4,5m altari kohalt. Graafikutel on näha temperatuuri- ja Rh kõikumised, mida tekitab vahelduv kütmine, vastavalt päevaste teenistuste kavale.



Joon. 2 T ja Rh kõikumine kirikus, tingituna perioodilisest küttest [12]



Joon. 3 Ajaloolised sisetemperatuurid ja "küttega" sisetemperatuurid kirikus [12]



Joon. 4 Rh kirikus, ajalooline ja "küttega" pilt [12]

Sisetemperatuurid ja suhteline niiskus Rocca Pietore kirikus (joonis 3 ja joonis 4). T ja Rh päevased kõikumised päeva keskmiste näitajate suhtes. Tühjad punktid peegeldavad loomulikku ajaloolist pilti, mustad punktid näitavad olukorda vahelduva kütmise juhul.

**Hoone lokaalne kiirgusküte (vt. ka joonis 1, parem).** See on vana punkt- või tsoonikütte printsiip, mida pole võimalik realiseerida konvektiivse õhkkütte abil. Enne keskküttesüsteemide ilmumist XX sajandil köeti hooneid peamiselt soojusallikaga, nt. kaminaga või puu/sõeahjuga ning sageli köeti hoones vaid mõningaid tube. Kiirguskütte allikas loob lokaalse sisekliima, mis võib erineda toa teistest osadest. Temperatuuri ebahütlast jaotumist kompenseerib mõningal määral õhutemperatuuri ühtlane iseloom ja selle liikumine, st. kõige korrektsemaks mugavuse näitajaks on operatiivne temperatuur. Konserveeriv efekt kõrge, soojuslik mugavus keskmine.



Joon. 5 Gaasikiirgurid Itaalia kirikus (vasak joonis) ja elektrilised kiirgurid St. Michaels kirikus Inglismaal (parem joonis)

Üldiselt paigaldatakse kas vee-, elektri- või gaasikütel kiirgurid. Veega ja gaasiga variant nõuab hoone arhitektuurilis-konstruktivist analüüsi vee- ja gaasimagistraalide paigaldamise seisukohast konstruktsioonide sisse või nende pinnale.



*Joon. 6* Pingialune infrapuna soojendi, elektriline. Projekteeritud carlo Loysch Austria ettevõttega, mis tegeleb kirikute kütte lahendustega

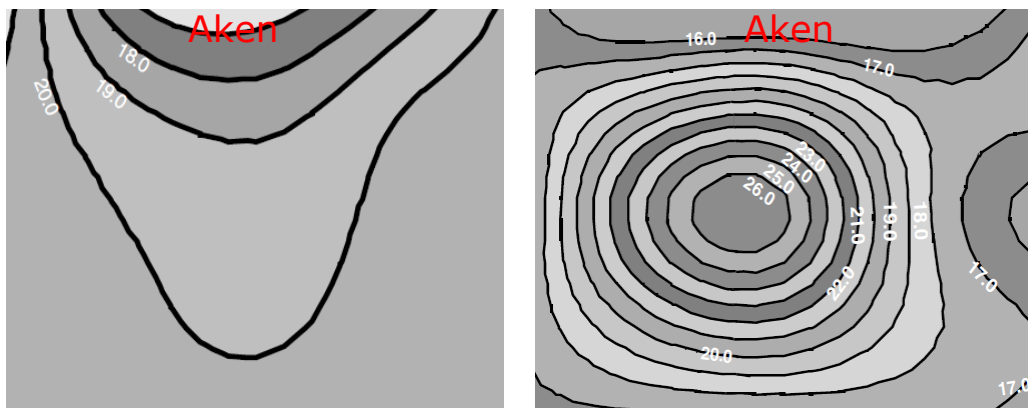
Lokaalsed kiirguskütte lahendused Eestist:



*Joon. 7* Kõpu Peetri koguduses on pingialused elektrilised kiirgurid (vasak joonis), diislikütel põrandapealsed soojuskiirgurid, Kadrina kirikus, Lüganuse kirikus, Valga Peetri-Luke koguduses (keskmine joonis), elektrilised seinapealsed kiirgurid Kose Püha Nikolause koguduses (parem joonis)

Keskmisel joonisel olevad kiirgurid ei ole kokkusobivad sisearhitektuuriga. Tänu sellele, et seadmed mobiilsed, võivad olla nagu ajutised küttekehad, mis asuvad ruumis ainult kütteperioodil.

Soojuse jagunemine ruumis konvektiivse- ja kiirguskütte puhul [10]:



Joon. 8 Konvektiivne küte, plaan (vasak joonis) ja küte kiirguritega, plaan (parem joonis)

Joonis 8, vasak. Soojuse jagunemine toas, mida köetakse õhkkütte (konvektiivse) süsteemiga. Ruumi keskmine temperatuur on 20°C. Kui jätta kõrvale külma aknapinna mõju, on temperatuur kogu ruumis suhteliselt püsiv.

Joonis 8, parem. Soojuse jagunemine samas toas, mida köetakse ruumi kesksaigast asuva kiirgus-soojusallikaga. Kütteallikas võib olla nii infrapunasoojendi lae all kui ka nt. kamin. Kokkuvõttes avaneb hoopis teine pilt kui konvektiivse kütte korral. Kõige kõrgem kiirguse temperatuur mõõdetakse ruumi keskosas. Seejärel langeb temperatuur kiiresti kontsentrilistes ringides suunaga toa külgedele poole. Kiirguse minimaalse ja maksimaalse temperatuuri erinevus on palju suurem kui konvekt. küttesüsteemi puhul. Lisaks, nagu ka päikesekiirguse puhul, võivad teised objektid varju heita, mis tähendab, et isegi mööbli paigutus võib mõjutada soojuse jagunemist toas.

Mittehomogeense sisekliima probleem kiirguse asümmeetrias – erinevus kiirguse temperatuuris erinevate kehaosade vahel. Lahtise tule ees istuv inimene saab piisavalt soojuskiirgust ühele keha poolele, samas kui teine keha pool annab ära soojust külmale õhule ja pindadele ruumi vastaspooles. Keha võib olla soojustasakaalus – soojakadu ühelt poolt on võrdne soojuse juurdevooluga, kuid kui temperatuuri kõikumised on liiga suured, on soojusmugavus madal.

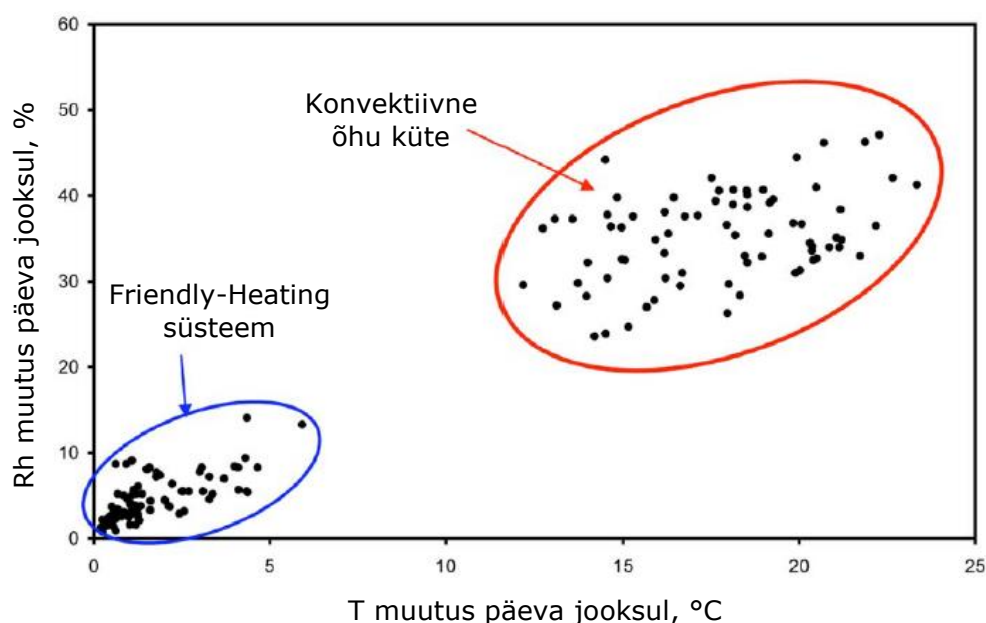
Järeldused: vaadelda iga hoonet individuaalselt, võttes arvesse hoone funktsiooni ja selles inimeste viibimise iseloomu. Väikse mahuga ruumides on kulude, kasutuslihtsuse kui üldise mugavuse seisukohast sageli otstarbekam korraldada konvektiivne küte.



### 1.1.2 Friendly-heating project

Euroopa Liidus initsieeriti 2002-2005.a. uurimisprogramm [10], [12] erinevate küttesüsteemide ja nende mõju uurimisele sisekliima säilivusele (Friendly-Heating Project). Projekt on suunatud optimaalse küttelehenduse leidmisele ajaloolistes hoonetes, mis annaks rahuldava tulemuse mõlema taotletava, ent omavahel konfliktis oleva eesmärgi jaoks – nimelt säilitaks objekti ja tagaks inimestele mugavuse.

Joonis 9: temperatuuri ja suhtelise õhuniiskuse kõikumiste võrdlus sõltuvalt sellest, milline strateegia on valitud. Tulemused on saadud ühes ja samas kirikus eri päevadel. On näha, et esimene variant (Friendly-Heating) mõjutab objekti oluliselt vähem.



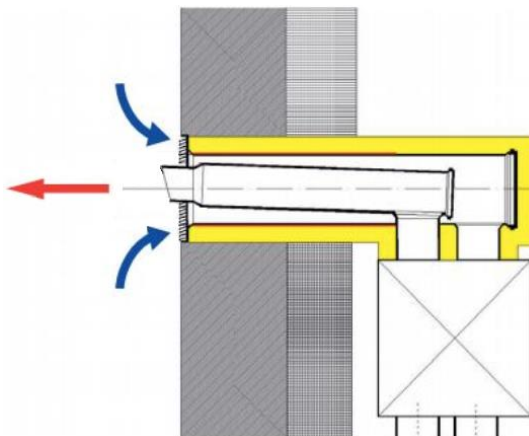
Joon. 9 Siseõhu temperatuuri ja suhtelise niiskuse kõikumine kirikus, muutuva kütte pärast [12]

Saadud uurimistulemused võib taandada lihtsale järeldusele – mida vähem invasiivsed süsteemid, seda rohkem on võimalusi saavutada hoone struktuuri ja interjööri, selles paiknevate kunsti- ja ajalooliste eksponaatide pikaajalist säilivust. Uuringute tulemusel eelistatakse suurte mahtude lokaalselt kiirguskütet konvektiivsetele liikuvatele õhuvooludele. Külmas kliimas on niisugune strateegia kasutatav, kuid konflikt inimeste mugavuse ja objekti säilimise vahel on teravam. Kõige külmemal perioodil võib ka piirata kasutusaega. Friendly-Heating sobib kõige enam olukorra jaoks, mil prioriteediks on objekti säilimine, kui hoone on väike, kui kasutamine pole pidev.

### 1.1.3 Ventilatsioonisüsteemide strateegiad ja lahendused

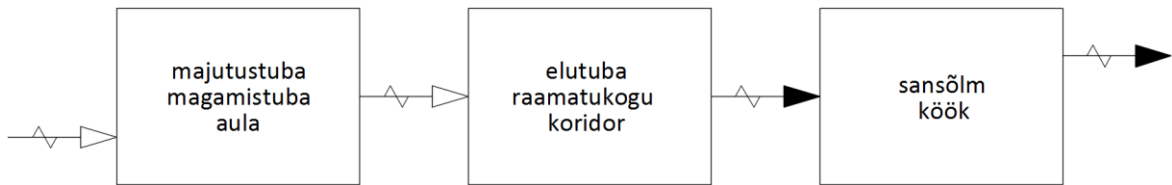
**Tsentraalne mehaaniline ventilatsioon.** Süsteem baseerub peamiselt sissepuhke- ja väljatõmbe ventilatsiooniseadmel, mis teenindab hoonet tervikuna või selle osa. Eelisteks on väike väliste (õhuvõtu- ja väljaviske) elementide hulk fassaadil või nende täielik puudumine, kui need elemendid on katusel või maa peal. Kuna seade paigutatakse tehnoruumi, on müraprobleem minimaalne ja selgelt lahendatav. Puudusteks on keerulisem projekteerimine, suurte magistraal ventilatsioonikanalite keerukas paigaldamine. Vanades hoonetes pole sageli spetsiaalseid tehnilisi ruume ja nende ehitamine võib olla problemaatiline. Samuti on nõutavad tuleohutusmeetmed, kui ventilatsioonikanalid läbivad tuletõkketsoone.

**Detsentraalne mehaaniline ventilatsioon.** Väikeste ventilatsiooniseadmete kasutamine hoone eraldi sõltumatute piirkondade jaoks. Peamisteks eelisteks on spetsiaalse tehnilise ruumi vajaduse puudumine (seadmed võivad asuda teenindavates ruumides), suurte magistraal ventilatsioonikanalite puudumine, paindlik kasutusgraafik ja sellega seotud energiakokkuhoid. Puudustena võib esile tuua vajadust paigaldada õhuvõtu- ja väljaviske elemendid iga seadme jaoks, mis põhjustab fassaadi üldilme muutumise – probleemi saab osaliselt lahendada, paigaldades õhuvõtu- ja väljaviske elemendid katusele või vähendades fassaadiavauste hulka, kasutades kombineeritud reste (joon. 10). Samuti esineb süsteemi kõrgenenud mürataseme risk.



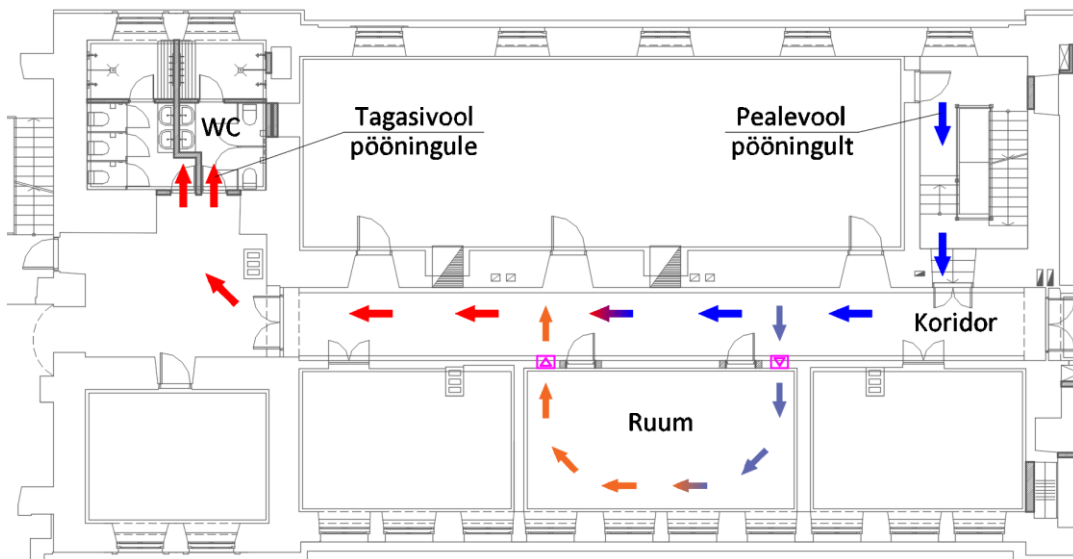
*Joon. 10* Kombineeritud koaksiaalne õhuvõtu ja väljaviske rest, välja töötanud Innsbruck Ülikoolis [13]

**Kaskaadne mehaaniline ventilatsioon.** Õhu prioriteetsetest, eeskätt sissepuhkeventilatsiooniga piirkondadest väljatõmbeventilatsiooniga piirkondadesse suunamise põhimõtte, kaasates transiitpiirkondi. Peamiseks eeliseks on ventilatsioonikanalite ja lõppelementide koguse vähenemine.



Joon. 11 Kaskaadne ventilatsioon [13]

**Ülevoolne mehaaniline ventilatsioon (active overflow).** Selle põhimõtte baseerub õhu edasiandmisele ventilatsiooniagregaadiga tehnilisest ruumist (näiteks pööningult) trepikodadesse ja koridoridesse. Mehaanilise väljatõmbe sansõlmedest võtab pööningul üle sama plaatsoojusvahetiga agregaat või eraldi väljatõmbe moodul – vahesoojuskanaljaga ühendatud sissepuhke mooduliga.



Joon. 12 Ülevoolne ventilatsioon mõisakoolidele [13]

(Klassi)ruumides omakorda toimub koridoriõhu tsirkuleerimine: sissepuhke- ja väljatõmbeventilaatorid võivad paikneda klassi ja koridori vahelises seinas. Peamise õhuvahetuse reguleerimine koridoriõhu CO<sub>2</sub> anduri alusel. Klassiruumide ventilaatorid peavad oma tööd alustama veidi enne tundide algust. Niisuguse strateegia peamine eelis on paigaldamise lihtsus, nähtavate elementide minimaalne kogus ja õhukanalite väike hulk. Antud süsteemi tõhusus on madalam tavalise, jagatud ventilatsioonikanalite võrguga süsteemi omast.

**Soojustagastusega mehaaniline väljatõmbe ventilatsioon.** Väljatõmbeõhu soojuspumba kasutamise tööpõhimõtte hoone ventileerimisel on täpselt sama, mis mehaanilisel tsentraalsel väljatõmbesüsteemil, kuid antud juhul jahutatakse ruumidest

väljatõmmatav õhk soojusvahetis ning saadud soojusenergia kantakse soojuspump tehnoloogiat kasutades üle kütte- või sooja tarbevee süsteemile. Ventilatsioonisoojuspumba kasutamisel on sarnaselt mehaanilise väljatõmbesüsteemiga ruumidesse sisse puhutatav õhk eelsoojendamata ehk suureneb ruumide ja hoone soojuskoormus ning võib tekkida probleeme nn tuuletõmbusega. Süsteem sobib alternatiivseks lahenduseks, kui tsentraalse süsteemi välja ehitamine on arhitektuurselt keerukas või ei ole majanduslikult ratsionaalne, kuid tasub arvestada, et energia tootmine toimub vaid ventilatsioonisüsteemi töötamisel (soojusvõimsus on aurusti poole võimsuse ja kompressori elektrilise võimsuse summa). Ventilatsioonisoojuspump kompenseerib osaliselt talvisel perioodil külma välisõhuga ruumide suurenenud küttekoormust ning kevad-sügis perioodil annab tootnud soojusenergia lisaks ruumide küttele ka tarbevee soojendamiseks. Suvisel perioodil töötab pump ainult tarbevee soojendajana.

## **1.2 Kaasaegsete tehnosüsteemide kasutusele võtmine**

Pole olemas ühest õiget vastust küsimusele, millised ventilatsiooni-, kütte- ja konditsioneerisüsteemid on kõige efektiivsemad ühe või teise ajaloolise ehitise puhul. Iga juhtum nõuab individuaalset tehnilist ja loomingulist lähenemist, sest eri hoonetes tagavad samad seadmed erinevad parameetrid. Ei ole võimalik anda üldist soovitusi ajaloolise hoone KV süsteemide kavandamiseks, näiteks kas lahendada alati radiaatorküttega ja kasutada soojustagastusega ventilatsiooni või mitte.

Olukorra muudab keerulisemaks muuseumi- ja näituseruumide olemasolu hoones. Muuseumi eksponaadid esitavad sisekliimale kitsamaid nõudeid, mis uute süsteemide projekteerimise käigus võivad olla piisavalt keerulised. Mõningatel erijuhtudel on parem loobuda kaasaegsete süsteemide paigaldamisest mõisahoonetesse, kui see toob endaga kaasa vanade materjalide hävinemise (õhu liiga madal või liiga kõrge Rh) või muudatuse hoone tajumises külastajate poolt (näiteks nähtavad tehnosüsteemid).

Ajaloolistes hoonetes on sageli konstruktsioonelemente, mida saab kasutada hoone kütte- ja jahutuskoormuste vähendamisel uute KV süsteemide poolt. Näiteks massiivsed kiviseinad, suured katusekividest varikatused, väikesed aknad. Insenerid peavad arvestama nende passiivsete meetmete mõju KV süsteemi võimsuse arvutamisel.

On olemas mõned üldised arusaamad, mis põhinevad vajadusel tagada samaaegselt nii ehitise kui ka näiteks muuseumikollektsioonide säilimus ning millega peab arvestama, projekteerides uusi insenerisüsteeme vanadesse hoonetesse. Peamised arusaamad taanduvad järgmisele:

- Paigaldatavate süsteemide poolt tekitatav võimalik koormus konstruktsioonidele tuleb varakult välja arvutada, et mitte kahjustada neid, ka mitte kahjustada muinsusmaterjale, nendega kokkupuutes.
- Hoonete viimistluses kasutatavad vanad materjalid on enamasti kulunud; nende kadumine põhjustab pöördumatu kahju ehitise ajaloolisele välimusele.
- Eksponaatide paremaks säilitamiseks soovitatakse kaaluda võimalust esemete paigutamiseks eralistesse näitusevitriinidesse (võimalik, et hermeetilistesse).
- Sisekliima süsteem peab moodustama terviku hoone konstruktsioonidega ning peab vastama omaniku ressursidele finantseerimise, hooldamise ja remondi seisukohast.

### **1.2.1 Sisekliima süsteemide varjatud paigaldamine**

Selleks, et leida parim viis insenerisüsteemide paigaldamiseks ajaloolises interjööris, tuleb arhitektide töösse kaasata ka restauraatorid. Tehnosüsteemide projekti kvaliteedi määrab kindlaks see, mil määral kaasatakse olemas olevaid materjale ja konstruktsioone, kuidas õnnestub sulandumine hoone üldplaneeringuga ning juba olemas olevate ümberkujunduste kasutamine. Interjööri märkimisväärse osa kasutamine selleks, et peita õhujaotureid ja –torustikke, põhjustab ajaloolisele hoonele märkimisväärset kahju [14].

Seega on sisekliimasüsteemide väljatöötamisel koostöös disaineritega soovituslik kasutada süsteemide paigaldamiseks kõikvõimalikke nišše, poolkorruseid, trepikodasid, suitsulõõre, panipaiku ning muid hoones olevaid abiruume. Vanu ventilatsiooniavasid pörandas või laes, mis esialgu olid mõeldud köetud õhu edastamiseks, kasutatakse samuti sundventilatsiooni avadena. Uusi restre saab paigaldada pörandaliistude või karniiside juurde, seejuures kujundatakse nende välimus vastavalt ruumi kogu sisustuse stiilile. Olemasolevaid pööninguaknaid saab kasutada ventileeritava õhuvõtu ja väljavise organiseerimiseks. Selgitatakse välja ligipääsuvõimalus personali ja küllastajate poolt harva või mitte kasutatavatesse hoone osadesse, sellised nagu on pööning, abi- ja laoruumid keldris, uuritakse olemas olevaid ventilatsioonikanaleid nende korduvkasutuse eesmärgil. Lisaks kontrollitakse kõiki süvendeid, tubade vahelisi ühendusavasid, söe laadimise avasid, suitsutorusid ja teisi tühemikke, mida saaks uues süsteemis kasutada.

Mõningates hoonetes maskeerivad ümberehitused kaminaid, pliitide väljatõmmet, püsttorusid, vahelagede võlve. Sageli saab seadmete paigaldamiseks kasutada suuri sisse ehitatud kappe, puhveteid, sahvreid või aknanišše. Oma olemuselt on mugavad karniisid ja rõdud, mis varjavad ruumi suvisel ajal, kuid talvel, madala päikese korral, ei takista loomulikku soojenemist päikese abil. Aknaluukide ja ribakardinate avamise ja sulgemise võib lisada töötajate igapäevaste kohustuste hulka. See on sooja laekumise reguleerimise võimalus ning samaaegselt ka kolleksioonide kaitsmine ultraviolettkiirguse kahjustuste eest.

Õhuvõtu restid, ventilaatorid, ventilatsiooniseadmed, konditsioneeride välised plokid ning muud seadmed ei tohi olla silmatorkavad. Ajaloolise interjööri sobitumise nõue esitatakse ka erinevatele anduritele, termostaatidele, tuleohutus- ja valvesignalisatsioonile jmt, kuna need ei tohi rikkuda disaini terviklikkust.

Üldventilatsiooni projekti ühine väljatöötamine inseneride, arhitektide ja teiste spetsialistide poolt võimaldab leida ebatraditsioonilisi lahendusi, mis eristuvad tavapäraest seinäärsetest juhtmestikukarbiidest, laest alla tulevatest soffititest ning kandilistest ventilatsioonivõredest, mis nii sageli rikuvad elegantseid vanaaegseid interjööre.

Üldventilatsioonisüsteemide väljatöötamisel on oluline seada endale realselt saavutatavad eesmärgid lihtsuse, efektiivsuse, teenindusmugavuse ja antud objektile kasutamise otstarbekuse seisukohast. Samuti tuleb meeles pidada sisekliima loomuliku reguleerimise võimaluste kasutamist. Tasub otsida energia säästmise võimalusi vähendades soojuskadusid, liigsoojenemist läbi akende kasutades ribikardinaid, aknaluuke ja muid energiat säästvaid vahendeid; vähendades vabasoojust valgustusest, seadmetest valides efektiivseid madala soojuseraldusega seadmeid. Asjakohast mõju energia kasutusele ventilatsioonisüsteemide poolt võib avaldada administratsiooni otsus jagada hoone erinevateks tsoonideks, vastavalt erinevatele nõudmistele sisekliimale või vastavalt ruumide kasutamise ajagraafikule.

## 2. Meetodid

### 2.1 Soojus- ja niiskustehnilised arvutused

#### 2.1.1 Piirdetarindite soojuslähivus

Hoonete üheks peamiseks eesmärgiks on eraldada sisekeskkond väliseskkonnast ja luua inimeste sisekliima, mis pakub kaitset ebasoodsate kliimatiliste olude eest. Hoonete välispiirded peavad olema pikaajaliselt õhkupidavad ja piisavalt soojustatud. Piirete soojuslähivus arvutatakse standardi EVS-EN ISO 6946:2017 "Hoonete piirdetarindid ja komponendid. Soojustakistus ja soojuslähivus. Arvutusmeetodid". Piirete soojuslähivuse arvutusmeetodi põhimõtted on järgmised:

- arvutatakse piirdetarindi iga soojuslikult homogeense kihi soojustakistus;
- määratakse üksikute kihtide soojustakistuse järgi piirdetarindi kogutakistus.

Välisseina soojustakistus [16]:

$$R = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n} \quad [\text{m}^2\text{K/W}] \quad (1)$$

Välisseina kogu soojustakistus (täpsustatud väärtus) [23]:

$$R_0 = R_{si} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n} + R_{se} \quad [\text{m}^2\text{K/W}], \quad (1.1)$$

kus  $\delta$  on materjalikihi paksus, m;

$\lambda$  on soojusjuhtivustegur, W/mK;

$R_{si}$  on piirde sisepinna soojustakistus [16], [ISO 6946]: 0,13m<sup>2</sup>K/W;

$R_{se}$  on piirde välispinna soojustakistus [16], [ISO 6946]: 0,04m<sup>2</sup>K/W.

Välisseina soojuslähivus [16]:

$$U = \frac{1}{R_0} \quad [\text{W/m}^2\text{K}], \quad (2)$$

kus  $R_0$  on välisseina kogu soojustakistus, täpsustatud väärtus.

#### 2.1.2 Sisepinna temperatuur ja kastepunkti temperatuur

Selleks et teada saada temperatuuri piirdetarindi pinnal, peab teadma, kui suure osa piirdetarindi üldisest soojustakistusest moodustab piirdetarindi pinna soojustakistus.

Temperatuur välispiirdetarindi sisepinnal [19]:

$$t_p = t_s - \left[ \frac{(t_s - t_v)}{R_0} \right] * R_{si} \quad [^{\circ}\text{C}], \quad (3)$$

kus  $t_s$  on siseõhu arvutuslik temperatuur ruumis;

$t_v$  on välisõhu arvutuslik talvine temperatuur;

$R_{si}$  on sisepinna soojustakistus;

$R_0$  on välisseina kogu soojustakistus, täpsustatud väärtus.

Kastepunkti temperatuuri määramine (Magnus-Tetens võrrand):

$$T_{kp} = \frac{17,27 * f(Rh, t_s)}{237,7 - f(Rh, t_s)} \quad [^{\circ}\text{C}], \quad (4)$$

$$f(Rh, t_s) = \ln\left(\frac{Rh}{100}\right) + \frac{17,27 * t_s}{237,7 + t_s} \quad (4.1)$$

kus  $t_s$  on siseõhu arvutuslik temperatuur ruumis;

$Rh$  on suhteline niiskus ruumis.

### 2.1.3 Niiskustehnilise olukorra analüüs

Hoone välispiirded peavad olema sellised, et ei tekiks kondensvett, või juhul, kui see tekib, peab olema võimalik selle väljakuivamine. Selle olukorra väljaselgitamiseks on H. Glaseri väljatöötatud, normis [9] kirjeldatud meetod.

Difusiooniarvutuste juures kasutatakse difusioonikonstant  $\mu$ , mis kirjeldab, mitu korda on materjali difusioonitakistus suurem kui sama paksu seisva õhu kihi oma. Samas pole võimalik selle kaudu anda teavet materjalist tehtud seinakihi aurutakistuse  $S_d$  kohta, mis annab pildi kogu seina difusioonsest käitumisest [8]:

$$S_d = \mu * s \quad [\text{m}], \quad (5)$$

kus  $\mu$  on vaadeldava ehitusmaterjali difusioonitakistuskonstant;

$s$  on materjalikihi paksus, m.

"Seinade konstrueerimisel kehtib rusikareegel: seinakihtide aurutakistused peavad seest väljapoole vähenema. See tähendab, et väljaspool oleva kihi aurutakistus ei tohi olla sisemise omast suurem" [26]. Reeglist kinnipidamiseks ei oma tähtsust, kui suur on seina summaarne aurutakistus. Kogu seina aurutakistus koosneb üksikute kihtide aurutakistuse summast [8]:

$$S_d = S_{d1} + S_{d2} + S_{d3} + \dots + S_{dN} \quad [\text{m}] \quad (5.1)$$



Glaseri meetod võimaldab programme kasutamata välja arvutada kondensvee tekkeohu. Partsiaalrõhk ehk veeauru osarõhk ruumis tuleneb valemist [19]:

$$P = P_s * Rh \quad [\text{Pa}], \quad (5.2)$$

kus  $P_s$  on küllastunud aururõhk, Pa;  
 $Rh$  on suhteline õhuniiskus, %.

Materjalikihi veeauru difusioonitakistus [9], [26]:

$$\frac{1}{\Delta} = \mu * s * \frac{1}{\delta_L} \quad [\text{m}^2\text{hPa/kg}], \quad (5.3)$$

kus  $\mu$  on küllastunud aururõhk, Pa;  
 $s$  on ehitusmaterjali kihi paksus, m;  
 $\delta_L$  on õhu aurujuhtivusväärtus, kg/(mhPa).

$\delta_L$  on seotud ümbritseva õhu temperatuuriga, aga antud arvutustes võib seda võtta kui konstanti [9], [26]:

$$\delta_L = 0,68 * 10^{-6} \quad [\text{kg/mhPa}] \quad (5.4)$$

Seina veeauru difusioonitakistus mitmekihilise seinaga korral on:

$$\frac{1}{\Delta} = \Sigma (\mu_n * s_n) * 1,5 * 10^6 \quad [\text{m}^2\text{hPa/kg}], \quad (5.5)$$

kus  $\Sigma(\mu_n * s_n)$  on difusioonitakistuskonstandi ja seinakihi aurutakistuste summa.

Veeauru difusioonivoog [9], [26]:

$$i = \frac{p_i - p_a}{1/\Delta} \quad [\text{kg/m}^2\text{h}], \quad (5.6)$$

kus  $p_i$  on sisemine partsiaalrõhk, Pa;  
 $p_a$  on välimine partsiaalrõhk, Pa;  
 $1/\Delta$  on mitmekihilise seinaga veeauru difusioonitakistus, m<sup>2</sup>hPa/kg.

Difusiooni arvutuse eesmärk on kindlaks teha, kas difusiooni tõttu tekib konstruktsiooni kondensvett või ei. Kondensvee tekkimisel on oluline, et see ei tohi kahjustada seinakonstruktsioone ja soojustusmaterjale. Selle saavutamiseks tuleb jälgida, et [9]:

- kondenseerumisperioodil tekkiv kondensvesi peab kuivamisperioodil välja kuivama;

- konstruktsioon ei tohi kondensvee tõttu kahjustatud saada (korrosioon, seened);
- kondensvee kogus ei tohi olla rohkem kui  $1,0\text{kg/m}^2$ ;
- kapillaarselt mitteimavate ehitusmaterjalide puhul on kondensvee koguseline piirang  $0,5\text{kg/m}^2$ ;
- puidu puhul on piiranguks niiskusesisaldus 5%, puidust ehitusmaterjalide korral 3%.

Raamtingimused, mis arvesse võetakse arvutuste tegemisel [9], [26]:

Kondenseerumisperiodil ( $t_T$ ) on väliskliima temperatuur  $t=-10^\circ\text{C}$  ja suhteline niiskus  $R_h=80\%$ ; sisekliima tingimused on temperatuur  $t=+20^\circ\text{C}$  ja suhteline niiskus  $R_h=50\%$ . Perioodi pikkus 60 päeva ehk 1440h, kuid Eesti tingimustes võiks see periood olla pikem – 90 päeva ehk 2160h.

Aurustumisperiodil ( $t_V$ ) on seinte ja mitte vastu katust olevate lagede puhul väliskliima tingimused  $t=+12^\circ\text{C}$ ,  $R_h=70\%$ ; sisekliima  $t=+12^\circ\text{C}$ ,  $R_h=70\%$ . Kondenseerumiskoha kliima  $t=+12^\circ\text{C}$ ,  $R_h=100\%$  ning perioodi pikkus on 90 päeva ehk 2160t.

Kondensvee kogus  $W_T$  on arutatav valemiga:

$$W_T = t_T * (i_i - i_a) \quad [\text{kg/m}^2], \quad (5.7)$$

kus  $t_T$  on kondenseerumisperiod, h;

$i_i$  on difusioonivoo tihedus seest kondenseerumispiirkonda, valem (5.8):

$$i_i = \frac{p_i - p_{sw}}{1/\Delta_i} \quad [\text{kg/m}^2\text{h}], \quad (5.8)$$

kus  $p_i$  on sisemine partsialrõhk, Pa;

$p_{sw}$  on kondenseerumispunkti rõhk, Pa;

$1/\Delta_i$  on mitmekihilise seina veeauru difusioonitakistus,  $\text{m}^2\text{hPa/kg}$ .

Difusioonivoo tihedus  $i_a$  kondenseermispiirkonnast välja [9], [26]:

$$i_a = \frac{p_{sw} - p_a}{1/\Delta_a} \quad [\text{kg/m}^2\text{h}], \quad (5.9)$$

kus  $p_{sw}$  on kondenseerumispunkti rõhk, Pa;

$p_a$  on välimine partsialrõhk, Pa;

$1/\Delta_a$  on mitmekihilise seina veeauru difusioonitakistus,  $\text{m}^2\text{hPa/kg}$

Kuivava vee  $W_v$  kogus:

$$W_v = t_v * (i_i + i_a) \quad [\text{kg/m}^2], \quad (5.10)$$

kus  $t_v$  on kuivamisperiood, t;

$i_a$  on difusioonivoo tihedus kondenseermispiirkonnast välja,  $\text{kg/m}^2\text{h}$ , valem (5.9);

$i_i$  on difusioonivoo tihedus kondenseerumispiirkonnast ruumi sisse, valem (5.11):

$$i_i = \frac{p_{sw} - p_i}{1/\Delta_i} \quad [\text{kg/m}^2\text{h}], \quad (5.11)$$

kus  $p_{sw}$  on kondenseerumispunkti rõhk, Pa;

$p_i$  on sisemine partsiaalrõhk, Pa;

$1/\Delta_i$  on mitmekihilise seina veeauru difusioonitakistus,  $\text{m}^2\text{hPa/kg}$ .

Kondenseerunud vee kogus on aktsepteeritav, kui  $W_v < 1,0 \text{ kg/m}^2$  (või kapillaarselt mitteimavate materjalide puhul  $0,5 \text{ kg/m}^2$ ), ja lisaks  $W_v > W_\tau$  [26].

#### 2.1.4 Soojus- ja niiskuserežiimi arvutustarkvara

Käesolevas töös on tehtud uuritavate tarindite (keldrikorruse välisseinad) soojus- ja niiskustehnilised arvutused tarkvara Delphin 6.0 abil. Delphin tarkvara on välja töötatud Saksamaal Dresdeni Tehnikaülikooli Ehitusklimatoloogia instituudis ülikooli teadlaste Andreas Nicolai, John Grunewaldi, Heiko Fechneri ja Ulrich Ruisingeri poolt [21]. Delphin 6.0 on numbrilisi arvutusmeetodeid kasutav dünaamiline simulatsiooniprogramm, millega on võimalik määrata soojuse, niiskuse ja materia liikumist poorsetes materjalides.

Tarkvara Delphin 6.0 aluseks on *CHAMPS* füüsikaline mudel. *CHAMPS* on lühend sõnadest "*coupled heat, air, moisture, pollutant simulation*", mis tähendab kombineeritud soojuse, õhu, niiskuse ja saasteainete simulatsiooni. Nimetatud mudel koosneb mitmetest osatuletistega võrranditest, mille lahendamiseks kasutatakse lõplike elementide meetodit, täpsemalt lõpliku ruumala kontrolli meetodit. Tarkvara jaotab sisestatud konstruktsioonilise geomeetria ühemõõtmelistes arvutustes kas võrdse või muutuva paksusega materjalikihtideks ning kahemõõtmelistes arvutustes kas võrdse või muutuva pindalaga niinimetatud tükikesteks. Kasutajal on võimalik määrata ka elementide arv, mille alusel jagab tarkvara ise konstruktsiooni vastavateks osadeks. Integreerimisel üle ruumala on võrrandid lahutatud harilikeks diferentsiaalvõrranditeks, mille kõik tundmatud sõltuvad ajast. Nimetatud diferentsiaalvõrrandid lahendatakse arvmeetodeid kasutava lahendaja (inglise keeles *solver*) abil [21].

**Simulatsioon ja tasakaaluvõrrandid.** Järgnevalt on toodud tasakaaluvõrrandid, mida tarkvara lahendamisel kasutab. Tasakaaluvõrrandi eelduseks ja lihtsustuseks arvestatakse, et [21]:

- jääd ei teki;
- vee difusioon ja faasidevaheline rõhkude erinevus on tühiselt väikesed (seega neid ei arvestata);
- kehtib Kelvini seadus poorirõhu ja suhtelise niiskuse kohta;
- tahkete materjalide deformatsioonid on tühiselt väikesed (seega seda ei arvestata);
- kõikide faaside vahel esineb rõhkude tasakaal.

Niiskuse massi tasakaaluvõrrand [21]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_{REV}^{m_{w+v}} = \frac{\partial}{\partial x} [j_{conv}^{m_w} + j_{conv}^{m_v} + j_{diff}^{m_w}] + \sigma_{REV}^{m_{w+v}} \quad [\text{kg/m}^2\text{s}], \quad (6)$$

kus  $\rho_{REV}^{m_{w+v}}$  on koguniiskuse tihedus antud ruumalaühikus,  $\text{kg/m}^3$ ;

$j_{conv}^{m_w}$  on vee konvektiivse (kapillaarse) liikumise voog,  $\text{kg/m}^2\text{s}$ ;

$j_{conv}^{m_v}$  on veeauru konvektiivse (kapillaarse) liikumise voog,  $\text{kg/m}^2\text{s}$ ;

$j_{diff}^{m_w}$  on veeauru difuusse liikumise voog,  $\text{kg/m}^2\text{s}$ ;

$\sigma_{REV}^{m_{w+v}}$  on niiskuslisa/kadu antud ruumaühikus  $\text{kg/m}^3\text{s}$ .

Veeauru liikumine kapillaarsel teel:

$$j_{conv}^{m_w} = c_t^{m_w} * j_{conv}^{m_t} \quad [\text{kg/m}^2\text{s}], \quad (6.1)$$

kus  $c_t^{m_w} = 1$  on tegur, mis määrab vee kontsentratsiooni vedelikus;

$$j_{conv}^{m_t} = -K_l \left[ \frac{\partial p_l}{\partial x} + \rho_l g \right] \quad [\text{kg/m}^2\text{s}], \quad (6.2)$$

kus  $K_l$  on vedela vee juhtivus,  $\text{kg}/(\text{m}^*\text{s}*\text{Pa})$ ;

$p_l$  on vedela vee rõhk, Pa;

$\rho_l$  on vedela vee tihedus,  $\text{kg/m}^3$ ;

$g$  on gravitatsioonikonstant  $\text{m/s}^2$ .

Veeauru liikumine konvektiivsel teel:

$$j_{conv}^{m_v} = c_g^v * j_{conv}^{m_g} \quad [\text{kg/m}^2\text{s}], \quad (6.3)$$

kus  $c_g^v$  on veeauru massi kontsentratsioon gaasis:

$$c_g^v = \frac{p_v}{p_a + p_v} * \frac{R_a}{R_v} \quad [\text{kg/kg}], \quad (6.4)$$

kus  $p_v$  on veeauru osarõhk, Pa;

$p_a$  on õhu rõhk, Pa;

$R_a$  on universaalne gaasikonstant, J/(kg\*K);

$R_v$  on veeauru gaasikonstant, J/(kg\*K);

$j_{conv}^{m_g}$  on gaasi konvektiivne voog, kg/(m<sup>2</sup>s).

Difusiooni teel liikuv veeaur [21]:

$$j_{diff}^{m_w} = -\frac{D_{v,air}(T)}{\mu R_v T} f(\theta_g) \frac{\partial p_v}{\partial x} \quad [\text{kg/m}^2\text{s}], \quad (6.5)$$

kus  $D_{v,air}$  on seisva õhu veeaurujuhtivus, m<sup>2</sup>/s;

$\mu$  on difusioonitakistustegur;

$f(\theta_g)$  on funktsioon gaasi mahust ruumalaühikus;

$\theta_g$  on niiskuselisa/kadu antud ruumaühikus:

$$\theta_g = \theta_{por} - \theta_l \quad [\text{m}^3/\text{m}^3], \quad (6.6)$$

kus  $\theta_{por}$  on materjali poorsus, m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>;

$\theta_l$  on vee maht ruumalaühikus, m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>.

Õhu massi tasakaal. Tasakaaluvõrrandi eelduseks arvestatakse, et [21]:

- kuiv õhk koosneb O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> ja teistest vähemtähtsatest osakestest, välja arvatud VOC-d (volatile organic compounds ehk lenduvad orgaanilised ühendid) ja H<sub>2</sub>O (veeaur);
- õhk koosneb kuivast õhust, veeaurust (H<sub>2</sub>O) ja VOC-dest;
- soojuse, niiskuse ja saasteainete transport ei oma õhu liikumisele muud efekti peale üleslükkejõu;
- arvestatakse vaid laminaarse gaasivooluga;
- liikumisfaasis on kineetiline energia tühiselt väike, seega sellega ei arvestata;
- kuiva õhu gaasikonstant kehtib ka niiskele õhule

Õhu konvektiivse liikumise voo:

$$j_{conv}^{m_a} = c_g^{m_a} * j_{conv}^{m_g} \quad [\text{kg/m}^2\text{s}], \quad (6.7)$$

kus  $c_g^{m_a}$  on õhu massi kontsentratsioon gaasis:

$$c_g^{m_a} = \frac{p_a}{p_a + p_v} * \frac{R_v}{R_a} \quad [\text{kg/kg}], \quad (6.8)$$

kus  $p_v$  on veeauru osarõhk, Pa;

$p_a$  on õhu rõhk, Pa;

$R_a$  on universaalne gaasikonstant, J/(kg\*K);

$R_v$  on veeauru gaasikonstant, J/(kg\*K);

$j_{conv}^{m_g}$  on gaasi konvektiivne voog, kg/(m<sup>2</sup>s):

$$j_{conv}^{m_g} = -K_g \left[ \frac{\partial p_g}{\partial x} + \rho_g g \right] \quad [\text{kg/m}^2\text{s}], \quad (6.9)$$

kus  $K_g$  on materjali gaasi läbilaskvus, s;

$p_g$  on gaasi rõhk;

$\rho_g$  on gaasi tihedus, kg/m<sup>3</sup>.

Energiabilanss. Tasakaaluvõrrandi eelduseks arvestatakse, et [24]:

- siseenergia ja entalpia vaheline erinevus on tühiselt väike, seega sellega ei arvestata kõikide faaside vahel esineb temperatuuride tasakaal;
- kõikide faaside vahel esineb temperatuuride osakaal.

Niiskuse massi tasakaaluvõrrand [21]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_{REV}^U = \frac{\partial}{\partial x} \left[ j_{diff}^Q + u_l * j_{conv}^{m_l} + u_g * j_{conv}^{m_g} + h_v * j_{diff}^{m_v} + h_{voc,g} * j_{diff}^{m_{voc,g}} \right] + \sigma_{REV}^U \quad (6.10)$$

kus  $\rho_{REV}^U$  on siseenergia tihedus, J/m<sup>3</sup>;

$u_l$  on vee eri siseenergia, J/kg;

$j_{conv}^{m_l}$  on vee konvektiivse liikumise voog, kg/m<sup>2</sup>s;

$u_g$  on gaasi eri siseenergia, J/kg;

$j_{conv}^{m_g}$  on gaasi konvektiivne voog, kg/(m<sup>2</sup>s);

$h_v$  on veeauru entalpia, J/kg;

$j_{diff}^{m_v}$  on veeauru difuusse liikumise voog, W/m<sup>2</sup>;

$h_{voc,g}$  on lenduvate orgaaniliste osakeste eri entalpia, J/kg;

$j_{diff}^{m_{voc,g}}$  on lenduvate orgaaniliste osakeste difuusse liikumise voog, W/m<sup>2</sup>;

$\sigma_{REV}^{m_w+v}$  on energiakaod/lisad antud ruumaühikus W/m<sup>3</sup>s;

$j_{diff}^Q$  on soojusenergia voog:

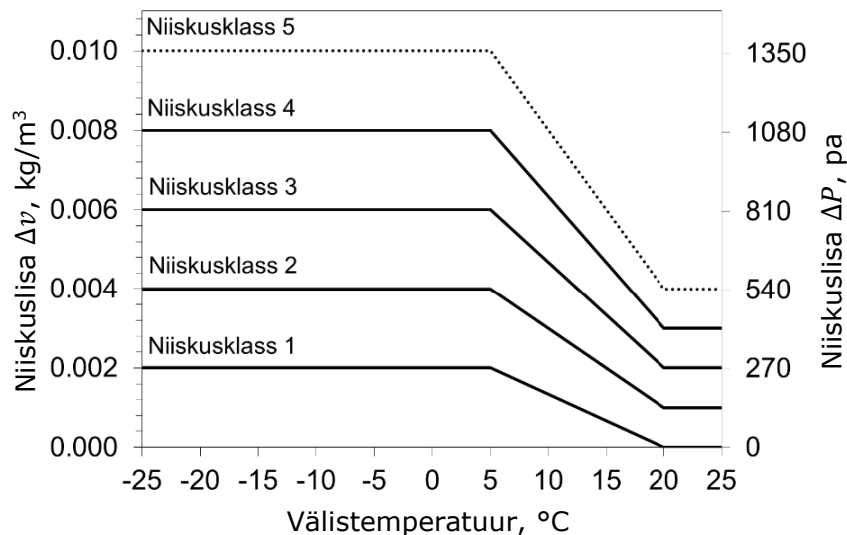
$$j_{diff}^Q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad [\text{W/m}^2], \quad (6.11)$$

kus  $\lambda$  on materjali soojusjuhtivustegur, W/mK;

$T$  on temperatuur, K.

### 2.1.5 Niiskuslisa

Siseõhu niiskustase sõltub peamiselt niiskustootlusest siseruumides, mis on omakorda põhjustatud peamiselt hoonesisisest inimtegevusest. Suhteline niiskus ei näita ruumide niiskuskooormust, kuna see sõltub sisetemperatuurist ja välisõhu niiskusest [19].



Joon. 13 Arvutusliku niiskuslisa sõltuvus välistemperatuurist Eesti hoonetel [8]

Niisutusklassid:

- Niiskusklass 5: Spordihallid, köögid, sööklad
- Niiskusklass 4: Eriotstarbelised hooned, nt. pesumajad, pruulikojad, basseinid
- Niiskusklass 3: Teadmata niiskuskooormusega elamud. Eluruumid asustustihedusega kuni 30m<sup>2</sup> inimese kohta
- Niiskusklass 2: Eluruumid asustustihedusega üle 30m<sup>2</sup> inimese kohta
- Niiskusklass 1: Väga väikese niiskustootlusega uued mitteelamud: töö- ja õpperuumid, jms.

## 2.2 Loomuliku ventilatsiooni hindamine

### 2.2.1 Sissepuhke õhu vooluhulk mõõdetud CO<sub>2</sub> baasil

Teadaoleva CO<sub>2</sub> taseme järgi määratakse õhuhulk. Loomuliku ventilatsiooniõhu kulu ruumis avaldatav järgmise valemiga (kehtib statsionaarse seisundi, st pikaajalise konstantse emissiooni ja statsionaarset tasakaalukontsentratsiooni saavutamise korral) [6]:

$$L = \frac{n * g_e}{C_m - C_{sp}} * 1000 \quad [l/s], \quad (7)$$

kus  $g_e$  on täiskasvanu CO<sub>2</sub> massiline eristus, puhkuse ajal, mg/s;

$n$  on inimeste arv ruumis;

$C_m$  on süsihappegaasi mõõdetud väärtus ruumis, mg/m<sup>3</sup>, valem (7.1);

$C_{sp}$  on süsihappegaasi kontsentratsioon välisõhus, mg/m<sup>3</sup>, valem (7.1).

Süsihappegaasi massiline sisaldus õhus [34]:

$$C_{m,sp} = 0,0409 * C_{ppm} * M \quad [mg/m^3], \quad (7.1)$$

kus  $C_{ppm}$  on süsihappegaasi sisaldus, ppm;

$M$  on gaasi molekulaarne mass, g/mol (CO<sub>2</sub> puhul on 44,01).

Lühiajalise emissiooni korral on võimalik, et statsionaarset tasakaalukontsentratsiooni ei saavutata ja õhuvoolu võib vähendada vastavalt antud maksimaalse kontsentratsiooni tasemele. Kontsentratsiooni ajaline muutus ruumis on avaldatud järgmisega valemiga (teoreetiline mudel) [6]:

$$C(t) = C_v + \frac{m}{L} - \left( C_v + \frac{m}{L} - C_0 \right) * \left( e^{-\frac{L}{V}t} \right) \quad [ppm], \quad (7.2)$$

kus  $C_v$  on süsihappegaasi kontsentratsioon välisõhus, ppm;

$m$  on süsihappegaasi eraldused ruumi, l/h;

$L$  on õhuvahetus ruumis, l/h;

$C_0$  on süsihappegaasi algkontsentratsioon ruumi õhus, ppm;

$V$  on ruumi efektiivne maht, m<sup>3</sup>;

$t$  on aeg, h.

Õhuvahetuse ( $L$ ) hindamiseks ruumis tuleb kasutada vähimruutude meetodit. Selle meetodi ideeks on leida sellised tundmatute ( $m$ ,  $L$ ,  $V$ ) väärtused, mille korral mõõdetud CO<sub>2</sub> tasemed ja teoreetilise mudeli abil saadud väärtused oleksid võimalikult sarnased. Selleks võiks kasutada ka "solver" funktsiooni Excel programmis.



## 2.3 Energiakulud

### 2.3.1 Soojustarve määramine

Olenevalt sellest, kas kasutatakse hoone küttekoormust või hoonele arvutatud erisoojuskadusid, saame kütte soojusenergia kulu arvutada valemi järgi [16]:

$$Q_k = \frac{\Phi_k * S * 24 * 10^{-3}}{\Delta t} \quad [\text{MWh}], \quad (8)$$

kus  $\Phi_k$  on küttekoormus, kW;

$S$  on hoone tasakaalutemperatuurile vastav kraadpäevade arv;

24 on tundide arv ööpäevas;

$\Delta t$  on sise- ja välistemperatuuride vahe, °C.

Kraadpäevade arvutamiseks võiks kasutada valemit [16]:

$$S = \sum_{i=1}^n (t_B - t_{Vi}) * \delta_i \quad [^\circ\text{Cd}], \quad (8.1)$$

kus  $S$  on kraadpäevade arv, °Cd;

$n$  on päevade arv (kuus või aastas);

$t_B$  on arvestuslik sisetemperatuur (tasakaalutemperatuur), °C;

$t_{Vi}$  on  $i$ -nda päeva välisõhu temperatuur, °C;

$\delta_i = 1$ , kui  $t_B > t_{Vi}$ ;

$\delta_i = 0$ , kui  $t_B \leq t_{Vi}$ .

## 2.4 Akustika ja müraarvutus, põhimõtted

### 2.4.1 Õhuvoolumüra

Vabas õhuvoolus tekib heli, sest vool pole laminaarne, vaid selles on rõhuerinevusi ja keeriseid. Keerise kohtumisel takistusega tekib rohkem heli kui vabal voolamisel. Heli tekib nii vooluse kohtumisel takistusega kui ka sellest eemaldumisel. Mida suurem on takistus ja mida rohkem see põhjustab rõhukadu, seda tugevam heli tekib. Tehnosüsteemide poolt põhjustatud õhuvoolust tekkiva helivõimsustaseme saab arvutada valemist [VDI 2081 part 1 "Noise generation and noise reduction in air-conditioning systems"]:

$$L_W = 10 \log_{10} S + n \log_{10} v + L_0 \quad [\text{dB}], \quad (9)$$

kus  $S$  on õhuvoolu ristlõike pindala, m<sup>2</sup>;

$v$  on kiirus, m/s;

$L_0$  on erimüravõimsustase (sirges kanal 7...10dB), dB;

$n$  on tegur, mis näitab kui palju tekkiv müravõimsus erineb kiirusest:

kui õhuvoolumis on vähe pöörised (sirge lõik)  $n=50$ ;

kui õhuvoolumis on palju pöörised (põlved, restid, klapid)  $n=60$ .

Lekkekohad kanalites põhjustavad voolumüra, mida võib vähendada kanalite korraliku tihendusega. Rõhu langemisel lekkeheli helivõimsustase väheneb, seetõttu suurema kanali valik aitab kaasa lekkeheli helivõimsustaseme vähenemisele.

## 2.4.2 Põlvede poolt genereeritav müra

Põlve poolt genereeritava müra määramisel lähtutakse Strouhi sarnasusarvust, mis iseloomustab õhuvoolu kiiruse, sageduse ja läbimõõdu vahelist seost [19]:

$$Str = \frac{f * d}{v} \quad (10)$$

kus  $f$  on oktaavriba kesksagedus, Hz;

$d$  on kanali läbimõõt, m;

$v$  on õhu kiirus, m/s.

Valemist (10) lähtub, et mida suurem on õhu kiirus kanal 7...10dB, seda väiksem on Strouhi arv (konstantse ristlõike pindala ja sama oktaavriba kesksageduse puhul). Järelikult, mida suurem on Strouhi arv, seda väiksem peab olema põlve poolt genereeritav müra, sest helivõimsustase kasvab õhu kiiruse kasvamisega. Siledapinnaliste plekkkanalite helivõimsustasemete arvutamiseks võib kasutada järgmisi ligikaudseid valemeid [18]:

*Sujuvad põlved, A:  $Str < 20$ ; B:  $Str > 20$ :*

$$A \quad L_W = 10 \log_{10} d + 60 \log_{10} v - 11 \quad [\text{dB}] \quad (10.1)$$

$$B: \quad L_W = -10 \log_{10} d + 80 \log_{10} v - 20 \log_{10} f + 15 \quad [\text{dB}] \quad (10.2)$$

*Mitte sujuvad põlved A:  $Str < 10$ ; B:  $Str > 10$ :*

$$A: \quad L_W = -10 \log_{10} d + 80 \log_{10} v - 20 \log_{10} f + 10 \quad [\text{dB}] \quad (10.3)$$

$$B: \quad L_W = 10 \log_{10} d + 60 \log_{10} v - 10 \quad [\text{dB}] \quad (10.4)$$

Liigse müra tekkimise vältimiseks tuleks kasutada sujuvaid põlvi. Kui see pole võimalik, siis tuleb kasutada põlves suunajaid, mis aitab eriti vähendada madalate helide teket.

### 2.4.3 Lõppelemendi ja reguleerklapi poolt genereeritav müra

Õhuvooluse survet kanalivõrgus reguleeritakse erinevate klappide ja lõppseadmete abil. Surve ja õhuvoolu kiirus kasvavad siis, kui pindala reguleerimisseadme kohas väheneb ja mida suurem on survemuutus ja õhu voolukiirus kanalivõrgus, seda rohkem müra ventilatsioonist tekib. Teatud piirides saab heli tekkimist mõjutada kanaliosade valikuga ja õhuvoolude kiiruse aeglasemaks projekteerimisega. Lõppelemendi helivõimsustasemeid leiab tootekataloogist. Vajadusel, helivõimsustaseme arvutamiseks võib kasutada valemi (11),  $n=60$ .

### 2.4.4 Mürasummutid

Suurema osa ventilaatorimürast summutatakse ventilaatori läheduses paikneva summuti abil. Mürasummuti kogusummutust  $D$  saab vaadelda nelja üksteist sõltumatu liidetava summana [17]:

$$D = D_{alg} + D_{põik} + D_{piki} + D_{lõpp} \quad [\text{dB}], \quad (11)$$

kus  $D_{alg}$  on algsummutus;  
 $D_{põik}$  on põikvälja summutus;  
 $D_{piki}$  on pikisuunaline helisummutus;  
 $D_{lõpp}$  on lõppsummutus.

Alg- ja lõppsummutus ei tarvitse arvesse võtta, sest nad erinevad nullist vaid siis, kui summuti ristlõikepindala erineb sellele eelneva kanaliosa ristlõike pindalast. Harilikult on ristlõikepindala muutus nii väike, et võib eeldada, et  $D_{alg}=0$  ja  $D_{lõpp}=0$ . (Erandiks on suured kambersummutid).  $D_{põik}$  on piirsagedusest madalamal null ( $f < f_c$ ) ja piirsagedusest kõrgemal ( $f > f_c$ )  $D_{põik}$  jääb 3 ja 10dB vahele.  $D_{põik}$  ei olene summuti pikkusest. Piirsagedusest madalamal esineb heliväli ainult piki kanalit.  $D_{piki}$  summutamine on keerulisem kui  $D_{põik}$  summutamine. [17]. Helisummutuse  $D_{piki}$  saab teada Piening valemist [17]:

$$D_{piki} = 1,5 * \frac{P}{S} * \alpha * L \quad (f < f_c) \quad [\text{dB}], \quad (11.1)$$

kus  $P$  on kanaliringi perimeeter, m;  
 $S$  on kanali ristlõike pindala, m<sup>2</sup>;  
 $\alpha$  on seinal oleva materjali neeldumistihedus;  
 $L$  on mürasummuti pikkus.

Heli ruumist õhukanalisse. Reeglina tehnuurumides on kõrge helirõhu tase, millega tuleb arvestada ventilatsioonisüsteemi projekteerimiseks. Ruumist õhukanali tulev helivõimsus [19]:

$$L_W = L_P - R' + 10 \log(S'/4) \quad [\text{dB}], \quad (11.2)$$

kus  $L_P$  on helirõhu tase ruumis (hajus), dB;

$R'$  on kanali seina müraisolatsioon, [21], [22];

$S'$  on ruumis paikneva õhutoru välispindala, m<sup>2</sup>.

## 2.4.5 Müratasemete liitumine

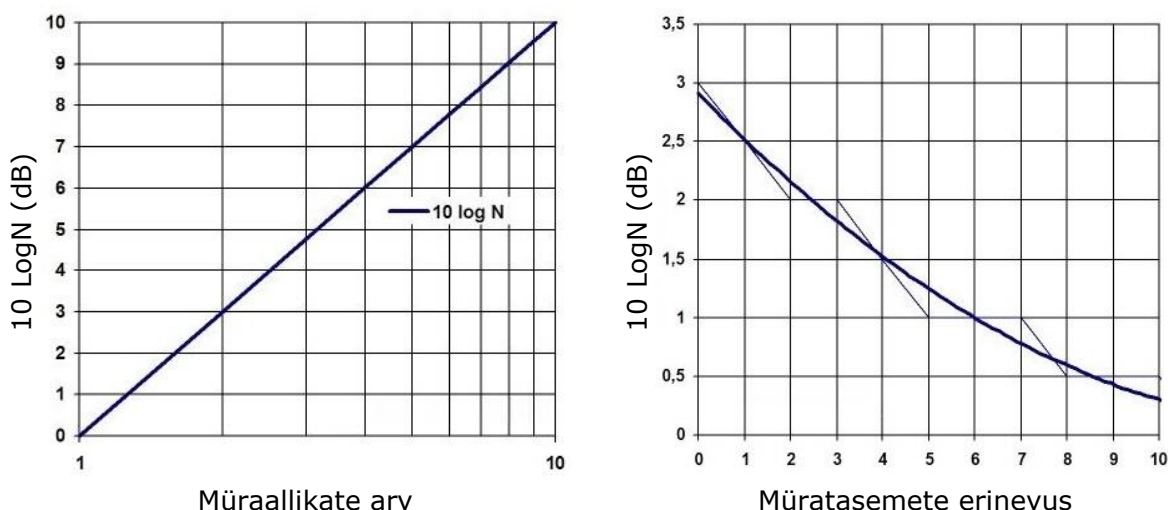
Müraallikate koosmõju saab väljendada järgmise valemiga [19], [34]:

$$L_{W_{tot}} = 10 \log_{10} \sum_{i=1}^n 10^{0,1L_i} \quad [\text{dB}], \quad (12)$$

kus  $L_i$  on elemendi helirõhutase, dB;

$n$  on müraallikate arv.

Müratasemete saab summeerida ka näidatud joonistel 14 graafikute abil. Näiteks, liites kolm heli ühesuguse helivõimsusega, saame tulemuseks helivõimsuse muutuse 4,8dB (joonis 14, vasak). Kui müraallikad on erinevate müratasemetega, siis mürataseme väljaarvutamiseks on kõige lihtsam kasutada joonisel 14 kujutatud parema diagrammi. Näiteks, kui ruumis on kaks heli allikad 28dB ja 32dB, siis müratasemete erinevus võrdub: 32-28=4dB ja summaarne helivõimsustase võrdub: 32+1,5=33,5dB.



Joon. 14 Müratasemete liitumine, sama tasemega (vasak joonis) ja erinevate tasemetega (parem joonis) [34]

## 2.4.6 Ruumi sumbuvus

Ekvivalentne ruumi helineeldumispind arvutatakse järgmisega valemiga [17]:

$$A = (2L * B + 2L * H + 2B * H) * \alpha \quad [\text{m}^2\text{-Sab}], \quad (13)$$

kus  $A$  on ruumi ekvivalentne helineeldumispind,  $\text{m}^2\text{-Sab}$ ;

$L, B, H$  on ruumi mõõdud,  $\text{m}$ ;

$\alpha$  on kõvadusindeks, vt. tabel 1.

Tabel 1 Kõvadusindeksid

Indeks	Kirjeldus
$\alpha=0,40$	väga sumbuvus
$\alpha=0,25$	sumbuvus
$\alpha=0,20$	keskmise
$\alpha=0,15$	normaalne
$\alpha=0,10$	kõva
$\alpha=0,05$	väga kõva

Ruumisummutust on võimalik arvutada järgmise valemi järgi [17]:

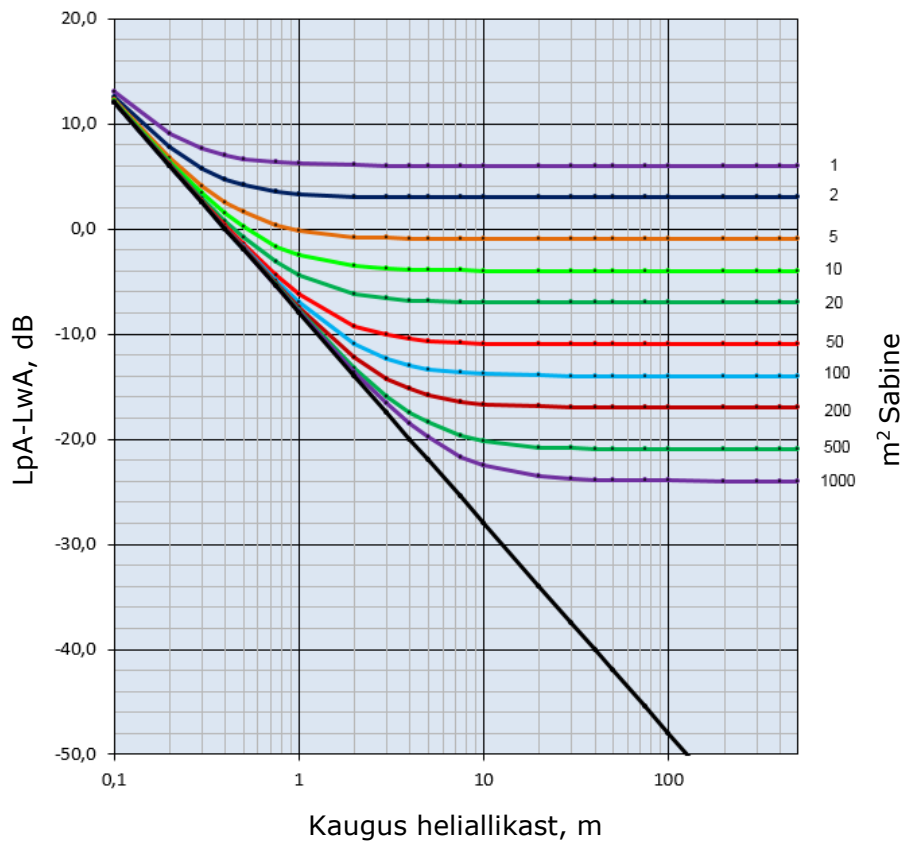
$$D_{ruum} = 10 \log_{10} \frac{A}{4} \quad [\text{dB}], \quad (13.1)$$

kus  $D_{ruum}$  on ruumisummutus,  $\text{dB}$ ;

$D_{ruum} = 0$ , kui  $A=4\text{m}^2\text{-Sab}$ ;  $D_{ruum} = 4$ , kui  $A=10\text{m}^2\text{-Sab}$ ;

$A$  on ruumi ekvivalentne helineeldumispind,  $\text{m}^2\text{-Sab}$ .

On ka võimalik hinnata sumbumist ( $L_p - L_w$ ) alloleva joonise abil:



Joon. 15 Ruumi sumbuvus

Valemit (13.2) kasutatakse siis, soovitakse hinnata heliallika tekitatavat helitaset kaugusel  $r$  [m] heliallikast [19]:

$$L_p - L_w = 10 \log_{10} \left[ \frac{k}{\Omega r^2} + \frac{4}{A} \right] \quad [\text{db}], \quad (13.2)$$

- kus  $L_w$  on heliallika helivõimsus, dB;  
 $A$  on ruumi summaarne helineeldumispind,  $\text{m}^2\text{-Sab}$ ;  
 $k$  on heliallika suunategur [34], tabel 2;  
 $\Omega$  on ruumi nurk [17], tabel 3;  
 $r$  on kaugus heliallikast.

Tabel 2 Heliallika suunategur

<b>Suuna tegur</b>	<b>Asukoht</b>
k=1	ruumi keskel, avatult
k=2	seinal, laes
k=3	lae või pörandal lähedal seinal
k=4	nurgas

Tabel 3 Ruuminurga väärtus  $\Omega$  lõppseadme erinevates kohtades

<b>Asukoht</b>	<b><math>\Omega</math></b>
Ruumi keskel	$4\pi$
Seinal, laes või pörandal	$2\pi$
Välisnurgas	$\pi$
Sisenurgas	$\pi/2$

## **3. Kaagjärve mõisahoone rekonstrueerimine**

### **3.1 Mõisahoone olemasolev olukord**

#### **3.1.1 Hoone seisukord enne rekonstrueerimist**

Mõisa peahoone on kahekorruseline soklikorruse ja pööninguga ehitised. Hoone välisilme ja maht on 1950-ndate aastate ümberehituste järgne. Algupärasest on säilinud Läänefassaad, kahe platvormiga vaatetorn, osaliselt akende paigutus ja suurus ning fassaadidekoor esimese korruse ulatuses. Aknad on ümberehituste ajal vahetatud. Hoone seinad on laotud tellistest ja viimistletud silekrohviga, vundament ja sokkel on maakividest ja tellistest. Katusekonstruktsioon on puidust, algupärasena säilinud põhjatiivas ja tornis, keskmise osa viilkatus on eterniitkattega. Vihmaveerennid ja -torud ning akende veeplekid on roostetanud. Välisseintel on krohv pragunenud ja kohati maha koorunud. Maakividest alusmüüre on tsementmördiga parandatud, üldiselt on sokkel heas seisukorras.

Soklikorrust on pärast 1998. aastat remonditud - võlvlaed on krohvitud, kuid krohvis on märgata pragusid. Krohvimata tellisseinu on tsementmördiga parandatud.

Esimese korruse ruumid on pärast viimast remonti üsna heas seisukorras. Algupärase karniisidega peegellaed on taastatud, säilitatud on (osaliselt ka vanadest laiadest laudadest) laudpõrandad. Osa vanu tahveluksi on restaureeritud, trepikodade klaastahvlitega ukSED on hilisemast ajast. Korteris osas on viis restaureerimata tahvelust. Koridori seinad on viimistletud puitpaneelidega.

Teise korruse ruumides on ajaloolisi detaile hoone lääne- ja idatiivas, mis olid ehitusaegselt kahekorruselised. Säilinud on laekarniisid ja stukkornament, laiadest laudadest põrandad, tahveluksed ja kremoonidega aknad. Krohv on laes pragudega, seinte alumised osad kaetud puitpaneelidega. Säilinud ahjud arhitektuuriajaloolist väärtust ei oma.

Vaatetornis on säilinud peegellaed, vanad aknad ja aknalauad. Torni puidust trepp on heas korras. Pööningul on näha ehitusaegseid, hiljem viilkatuse alla jäänud välisseina karniise ja valgmiikke. Eterniidist katusekate on halvas seisus ja läbijooksudega, sarikatel on näha niiskuskahjustusi ja hallitust.



Läbi on viidud mõningate toimivate KV süsteemide inspekteerimine, mis korraldati hoone viimase mittekapitaalse rekonstruktsiooni ajal, toodi välja eelneva rekonstruktsiooni vead ning puudujäägid.



Joon. 16 Rekonstrueerimata hoone, 2018. Fassaad, aula ja vana lõõrid

### 3.1.2 Projekteeritava hoone probleemide tuvastamine

Vaadeldavas hoones kütte- ja ventilatsioonisüsteemide ehitamine on seotud põhimagistraalide paigaldamise ja varjamise raskustega. Üks eesmärk on normatiivse või sellele lähedase õhuvahetuse tagamine, kasutades ventilatsioonikanalite mõõtmeid,

mida on võimalik paigaldada olemas olevatesse šahtidesse, niššidesse ja teistesse varjatud konstruktsioonitühimikesse.

Vastavalt projektieelsetele praktilistele uuringutele ning hoone töötajate kommentaaridele, on keldriosas täheldatud suurenenud niiskust ning teatud ilmastikuolude puhul rõskust ja kondensaati seinapindadel. Kohati on täheldatud hallituse teket ning interjööri viimistluse purunemist. Ruumid, mis on loodud või mida on uuendatud keldri rekonstrueerimise käigus: köök sööklaga, toiduainete ladu, minispaa, sh saun, aurusaun, duširuumid, ruum väikese basseini ja kaminaga, riietusruum.

Kaagjärve mõisahoone antud osa projektitöö eesmärk seisnes eelkõige kondensaadi moodustumise ja hallituse tekkimise probleemide kõrvaldamises keldrikorrusel ning mugavate kliimaparameetrite (õhu temperatuur, Rh) tagamises. Juhul kui ei rakendata meetmeid sisekliima tehniliseks reguleerimiseks seoses ruumide kasutamise eesmärgi/iseloomu muutumisega, võivad rõskuse ja kõrgeenenud niiskusega seotud probleemid süveneda, mida kinnitavad ka arvutused ptk. 3.2.2.

### **3.1.3 Lõõriuuring**

Projektieelsel etapil uuriti olemas olevaid ventilatsioonikanaleid nende korduvkasutuse eesmärgil. Lisaks sellele on võimalik kontrollida kõiki süvendeid, tubade vahelisi ühendusavasid, söe tarnimise avasid, suitsulõõre ja teisi õõnsusi, mida on võimalik kasutada uues süsteemis.

Uuringute tulemuste kohaselt olid paljud ventilatsiooni- ja küttekanaalid halvas seisundis, määratud ja läbimatud, mistõttu võeti vastu otsus renoveerida osaliselt olemas olevad kivist/tellisest ventilatsioonikanalid ning ahjulõõrid.

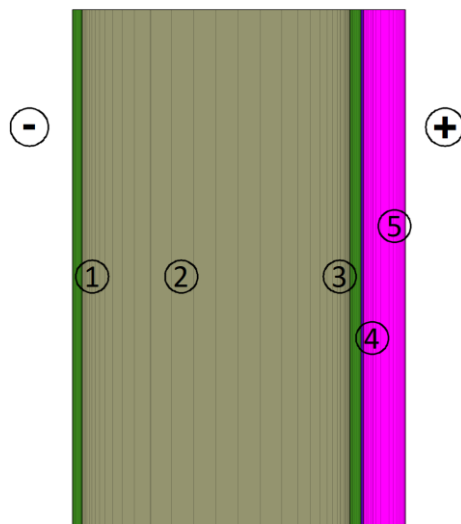
## **3.2 Hoone soojustehnilised aspektid**

### **3.2.1 Keldri ruumide otstarve**

Sageli eeldatakse Eesti mõisade ja teiste vanade hoonete puhul ehitise keldriosa kasutamist praktilisteks vajadusteks, nagu nt. administratsioon või asutuse külastajad. Käesolevas töös vaadeldavale hoonele analoogsete objektide projekteerimise kogemuse põhjal võib öelda, et keldrite otstarve varieerub ladudest ja arhiividest kuni väikeste spordisaalide, saunakomplekside ning köökideni.

### 3.2.2 Keldriosa välisseinte soojus- ja niiskustehniline toimivus

**Välisseinad ja lisanduvad soojustusmaterjalid.** Välisseinte konstruktsioon on võetud arhitektuur projektist 1R-2017 (tabel 4, kihid 1,2,3).



Joon. 17 Välisseina lõige, kihtide kirjeldus vt. tabel 4

Edaspidise simulatsiooni teostamiseks kasutatud materjalide soojus- ja niiskustehniliste materjaliomaduste ning renoveerimisel kasutatavate soojustusmaterjalide omaduste puhul kasutati võimalikult palju materjalitootjate ja programmi Delphin andmebaasis olemasolevaid usaldusväärseid andmeid [22]:

- veeaurujuhtivusena kasutati tootja poolt esitatud andmeid, mis on mõõdetud vastavalt standardile EVS-EN 12572:2016 (Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties) või on mõõdetud vastavatel Euroopa tehnilistele spetsifikatsioonidele läbiviidud testidel. Mõõdetud andmete puudumisel teostati vajalikud lisamõõtmised, vähemoluliste materjalide puhul kasutati standardis EVS-EN ISO 10456:2008 (Ehitusmaterjalid ja -tooted. Soojus- ja niiskustehnilised omadused) toodud tabelväärtusi või arvutustarkvara andmebaasi väärtusi;
- soojuserijuhtivuse väärtustena kasutati tootja poolt esitatud andmeid (Ehitusmaterjalid ja -tooted. Soojus- ja niiskustehnilised omadused, EVS-EN ISO 10456:2008 või EVS-EN 12524:2006) toodud tabelväärtusi või arvutustarkvara andmebaasi väärtusi;
- täiendavalt vajalikud materjaliomadused on: niiskusmahtuvus, kapillaarne veeimavus, materjaliomaduste sõltuvus keskkonnatingimustest (temperatuur, suhteline niiskus), jne

Tabel 4 Simulatsioonis kasutatud materjalide omadused

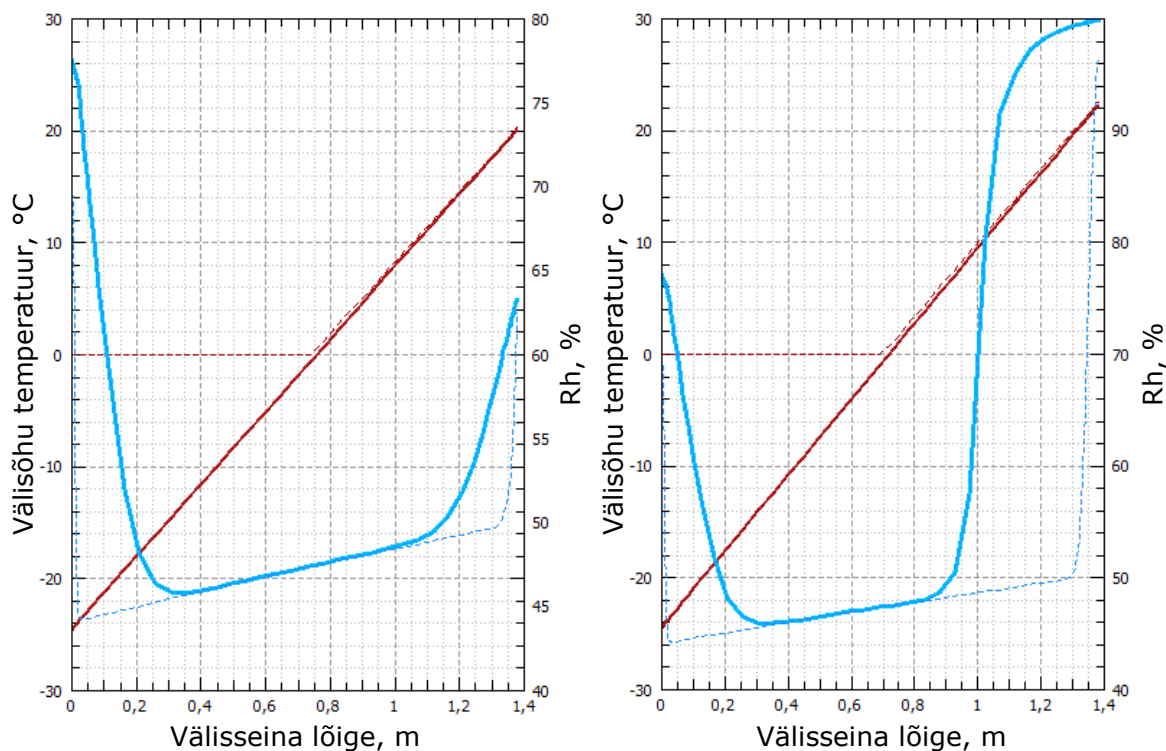
	Väliskrohv, sisekrohv	Sein õhuõõnsus- tega	Liim	Liim	CaSi paneel	Remmers IQ-Therm	PIR
Kihi nr., joonis 1	1, 3	2	4	4	5	5	5
Kirjeldus	lubimört liivaga	maakivi	Calsitherm KP	IQ-Fix	kaltsiumsiilikaat Calsitherm Climate Board	vahtpolüuretaan kapilaaraktiiv- sete kanalitega	polüisotsüaanu- raatvaht paneel
Kihi paksus, mm	20	1340	5	5	50	50	40
Tihedus, kg/m <sup>3</sup>	1700	2400	1410	1313	267	49	35
Soojusjuhtivus- tegur $\lambda$ , W/mK	0,87	0,89	0,60	0,497	0,074	0,037	0,025
Veeaurudifusioo- nitakistustegur $\mu$	37	110	23	19	7	27	310
Veeimavus $A_w$ , kg/(m <sup>2</sup> h <sup>0.5</sup> )	0,036	0,012	0,0038	0,0051	0,8487	0,0129	8e-06

**Niiskustehniline kontroll, olemasolev olukord.** Hoone keldri osa maapealsed välisseinad. Talvised arvutuslikud välisõhu parameetrid Valgamaal [EVS 844:2016]: talvel välis T=-26,0°C ( $\Delta t_s=4,0^\circ\text{C}$  ja  $t_b<100$ ); Rh=90%; suvel välis T=+27,0°C; RH=50%. Arvutuslikud siseõhu parameetrid niisketes ruumides: Ruumide kasutuse ajal: T=+24,0...+26,0°C; Rh>70%. Välisseina soojustakistus (joonis 17, kihid 1...3)  $R=1,55\text{m}^2\text{K/W}$  (valem 1, tabel 4), välisseina kogu soojustakistus (täpsustatud väärtus)  $R_0=1,72\text{m}^2\text{K/W}$  (valem 1.1, tabel 4). Seega välisseina soojuslähivus  $U=1/1,72=0,58\text{W/m}^2\text{K}$  (2).

Selleks, et määrata kondensaadi sadestumise riske seina sisepinnaile, tuleb kindlaks määrata selle pinna temperatuur talvisel ajal (valem 3):  $t_p=20,5^\circ\text{C}$ . Kastepunkti temperatuur ruumis, Rh 70% ja T=+26°C juhul, (valem 4):  $T_{kp}=20,8^\circ\text{C}$ .

Arvutustest nähtub, et juba suhtelise õhuniiskuse Rh=70% juhul (mini-spaa kompleksis) kastepunkti temperatuuriga olukord on piiripealne, kondensaadi tekkimise mõttes. Kõikumised õhuniiskuses on üsna olulised antud tüüpi ruumide puhul ning teatud piirkondades, nagu nt. basseinala, duširuumid, saunad jmt, on seinapindade

temperatuur õhukuivatite puudumisel (mis on täiesti loomulik taoliste väikeste ja mitte pidevalt funktsioneerivatele kompleksidele) madalam kastepunktist ning kondensaat välisseinte sisepinnal hakkab kindlasti tekkima.



Joon. 18 Kelder, Rh=50% (vasak joonis) ja Rh>70% (parem joonis);  
T (pruun) ja Rh (sinine) profiil

Joonis 18, vasak: madala või normaalse suhtelise õhuniiskusega ruumid ( $T=24^{\circ}\text{C}/\text{Rh}=50\%$ ); mitte kuskil seinakonstruktsioonis ei teki 100% niiskust ehk kondensvett, mis kontrollitav ka Glaseri meetodiga (kus küllastunud aururõhu kõver ei puutu kokku tegeliku osarõhu sirgega), valemid (5), (5.1) ja (5.2). Antud objekti kontekstis on taoline pilt aktuaalne ka esimese korruse jaoks (seinad on laotud tellisest/kividest). Joonis 18, parem: olukord niiskete ruumidega ( $T=26^{\circ}\text{C}/\text{Rh}>70\%$ ); veeauru väljakondenseerumine seinal. Objekti projektieelse uurimise käigus täheldati krohvikihi ja kogu viimistluse kahjustusi ning hallituse teket (niisked ruumid organiseeriti enne hoone rekonstrueerimist).

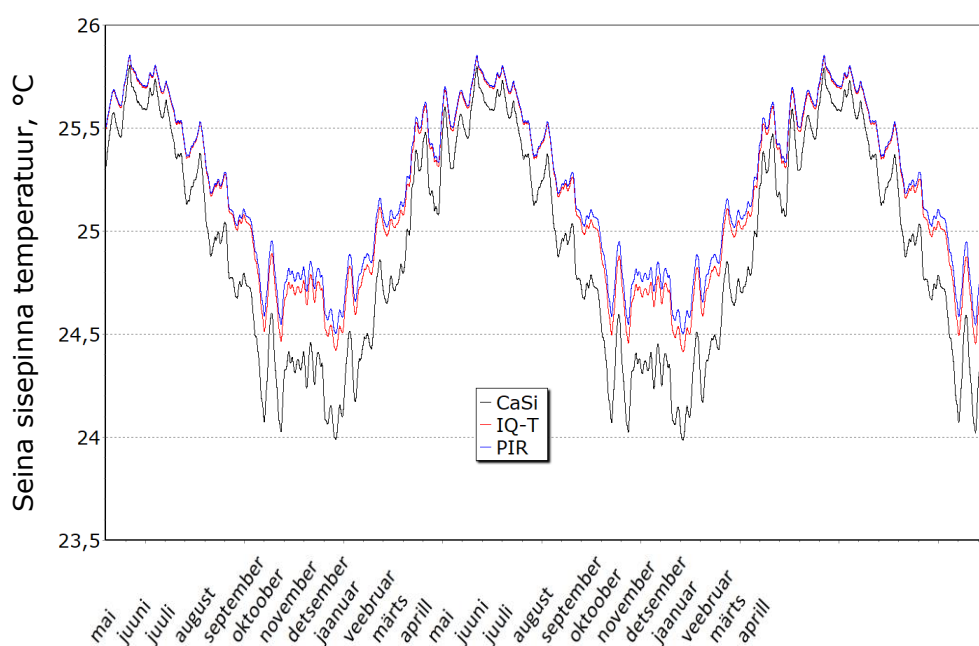
Järeldused: niiskete keldriruumide olukord nõuab kondensaadi teket ja sellega seonduvaid probleeme ennetavate meetmete kasutusele võtmist. Ülejäänud ruumid, millel on sarnane seinahitus, kuid madalam õhuniiskus, ei vaja olulist konstruktiivset sekkumist.

### 3.2.3 Keldriosa välisseinte seespoolse lisasoojustuse analüüs

Ajaloolistel hoonetel raskendatud/võimatu fassaadi välispinna muutmine, antud töö lõikes vaadeldakse ja hinnatakse seespoolset lisasoojustamist, sellega seotud riskid. Vaadeldakse 3 soojustusvariandi (tabel 4, kiht 5), selgitatakse milliste materjalide juhul on riskid väiksemad. Teostatakse arvutuslik analüüs hoone keldri maapealse välispiirde soojus- ja niiskustehnilise toimivuse kontrollimiseks dünaamilise simulatsiooni abil. Käesolevas töös uuritava välistarindi arvutused on tehtud kahemõõtmelise 1D mudeliga. Väliskliimana on kasutatud Eesti niiskustehnilisi testaastaid [23].

Lisasoojustamise välistarindi niiskustehnilistel arvutustel on väljunditeks (Delphin tarkvaras output) valitud temperatuur ning suhteline niiskus enim huvi pakkuvates punktides tarindi sees. Lisasoojustamine langetab temperatuuri esialgse sein ja soojustuse liites, osutub enamasti kriitiliseks pinnaks just see. Seega vaadeldav punkt on esialgse sein ja lisasoojustus konstruktsiooni vahel (joonis 17). Teine vaadeldav punkt on tarindi sisepinnal (joonis 17).

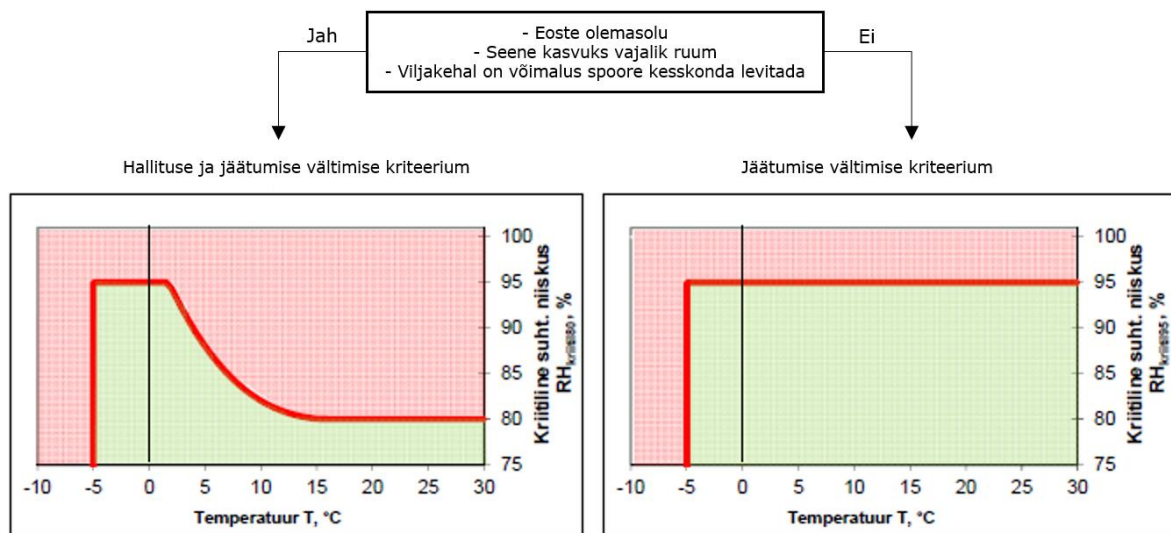
**Hindamiskriteeriumid.** Niiske ruumide (nt. mini Spaa tsoon) rekonstrueerimisel ühe kriteeriumina oli välisseina sisepinna temperatuur, et see ei langeks kastepunktitemperatuuri tasemini  $T_{kp}=20,8^{\circ}\text{C}$ . Peale lisasoojustamist pinnatemperatuurid on oluliselt kõrgem võrreldes olemasolevaga olukorraga  $t_p=20,5^{\circ}\text{C}$  (vt. joonis 19). Antud kriteerium on täidetud.



Joon. 19 Isoleeritud välisseina sisepinna temperatuurid, erinevate isolatsioonimaterjalide puhul. Niisked ruumid,  $T_{\text{õhk}}=26^{\circ}\text{C}$ . Simulatsiooni periood 3a

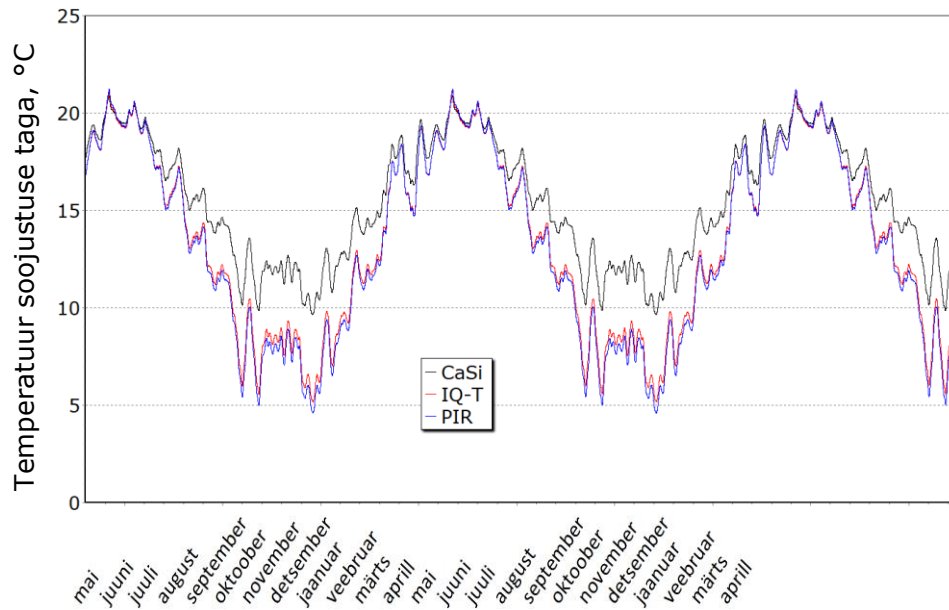


Soojustusmaterjalide turvalise toimivuse kontrollimiseks hinnati niiskustehnilisi näitajaid seinä ristlõikes. Kuna lisasoojustades temperatuur seinä sisepinnal tõuseb ja  $R_h$  seinäl langeb, väheneb 1D olukorras seinä sisepinna kriitilisus kondensaadi ja hallituse tekkeks võrreldes soojustamata olukorraga. Hindamiskriteeriumid erinevatele soojustusmaterjalidele on valitud vastavalt nende eripäradele – kuna CaSi ja IQ-T liimitakse terves seinä pinnas ja kasutusel pole hallitustundlikke materjale, on lähtuvalt joonis 21-st nendel materjalidel määravaks kondenseerumise vältimise kriteerium [22]. Kuna PIR paigaldatakse nael- või kruvitüüblitega, seinä ja soojustuse vahele võib jääda õhuruumi ning soojustuse seinapoolne pind on tootmisprotsessi iseärasuste tõttu kaetud paberiga, on selle materjali puhul lisaks jäätumise vältimisele vaja jälgida ka hallituse vältimise kriteeriumi  $R_{h,crit80}$  [25] või  $R_{h,crit85}$  (hallitusele vähetundlike materjalide puhul [25]).



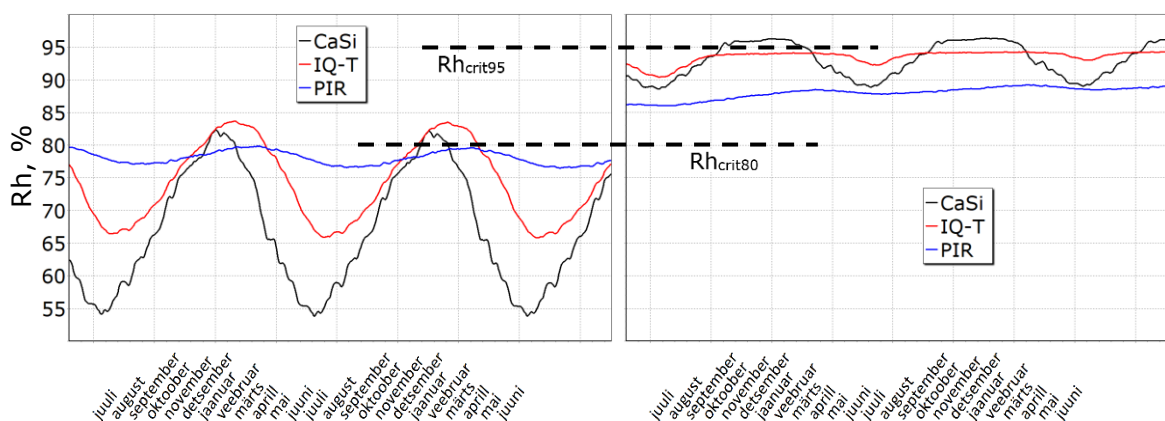
Joon. 20 Soojustuse niiskustehniliselt turvalise toimivuse hindamiskriteeriumid soojustussüsteemi ja esialgse seinä vahelise kihi jaoks [24], [25]

**Arvutisimulatsiooni tulemused ja kokkuvõte.** Simulatsiooniga kontrolliti soojustusmaterjalide sobivust Eesti niiskustehniliste testaaastate tingimustes. Kontroll oli teostatud nii ruumidele tavalise suhtelise niiskuse tasemega kui ka niiske ruumidele. Kõigil juhtudel ja kõikide soojustusmaterjalide puhul ei langenud temperatuur soojustuse taga alla 5°C (joon. 21) – esialgse tarindi sisekihis on jäätumine seega välditud.



Joon. 21 Pinna temperatuurid soojustuse taga, erinevate isolatsioonimaterjalide puhul.  $T_{\text{õhk}}=21^{\circ}\text{C}$ . Simulatsiooni periood 3a

Keskmiistel niiskuskooormustel ( $\Delta v +4\text{g}/\text{m}^3$ ) toimusid kõik lahendused rahuldavalt. PIR materjaliga soojustatud seinal esinesid praktiliselt kogu aeg teistest lahendustest kõrgemad suhtelise niiskuse tasemed (joonis 22, vasak). Hallituse tekkimise riski mõttes, soojustusmaterjal PIR on kriitilise piiri peal ( $R_{h\text{crit}80}$ ). Hallituse vältimise kriteerium ei ole täidetud, materjal seina soojustamiseks ei sobi. Niisketes ruumides ja kõrgete niiskuskooormustega ( $\Delta v +10\text{g}/\text{m}^3$ ) ruumides kõik kasutatud simulatsioonis soojustusmaterjalid ei sobi, hallituse vältimise kriteerium  $R_{h\text{crit}80}$  kui ka kondenseerumise vältimise kriteeriumid ei ole täidetud (joonis 22, parem).



Joon. 22 Rh väärtused vaadeldavas seinakonstruktsiooni punktis, keldris. Vasak joonis: ruumi  $R_h=50\%$ , niiskuslisa  $\Delta v +4\text{g}/\text{m}^3$  [8]; Parema joonis:  $R_h > 70\%$ , niiskuslisa  $\Delta v +10\text{g}/\text{m}^3$  [8]



PIR materjali oleks võimalik kasutada ruumides madala niiskuskooormustega ( $\Delta v + 2g/m^3$ ), ehk hallituse vältimise kriteeriumi täitmiseks (paberist seinapoolse kihi tõttu). PIR kasutuspotentsiaali oleks tootel, millel puuduks plaadi seinapoolses osas paberikiht, probleemiks võib osutuda sademete mõju esialgse seina niiskusrežiimile – veeaurutiheda materjaliga pärsitakse selle ruumidesse kuivamise võimalusi. Kapillaaraktiivsete materjalide (nt. CaSi) kasutuseeldus on soojustatava seiniosa kõrgete niiskussisalduste taluvus, kui soojustamise tõttu tõuseb mõne materjali niiskussisaldus üle selle taluvuspiiri, siis kapillaaraktiivseid materjale kasutada ei tohi.

Tabel 5 Keldrikorruse soojuskadude võrdlus keldrikorruisel

Sein	Isoleerimata	CaSi	IQ-T
U, W/m <sup>2</sup> K	0,58	0,42	0,33
Soojuskaod, W	22780	19400	18220

### 3.2.4 Seinkütte lahendus keldris niisketes ruumides

Juhul kui ei ole võimalik kasutada välist soojusisolatsiooni rakendatakse peamiselt 2 meetodit, mis aitavad kõrvaldada niiskete külmade siseseinte ja hallituse probleeme:

- Täiendava sisepinna soojustusstruktuuri loomine (eelmine töö lõik).
- Sein soojenduse paigaldamine soojustuskihi alla või ilma selleta.

Lahendamaks kondensaadi probleemi seintel niisketes ruumides võtsid tellija ja projekteerija vastu otsuse kasutada *teist meetodit* – seinküte kindlates probleemsetes ruumides ilma olulise täiendava soojustusega (lisa 4). Lisaks oma peamisele ülesandele – kastepunkti ära nihutamine seina sisepinna pealt, täitab küte ka mugavat funktsiooni mini-spaa ala pindade soojendamisel. Kuna peamise kütteallikana (soojakadude kompenseerimiseks) hoone keldriosas kasutatakse põrandkütet, siis lihtsustati seinkütte arvestusi, võttes arvesse selle piiratud ülesandeid.

*Paigaldus kuiv- ja märgmeetodil.* Kuivpaigalduse korral paigaldatakse toru seina sisse, kasutamata segu või krohvi. Selleks puhuks on hea näiteks soonestatud isolatsioonimaterjal, mille sisse sobivad kütetoru ja soojusjaotusplaat või siinid. Kuivpaigaldusega lahenduse saab peita näiteks kipsplaadi või mõne kergpaigaldatava plastist paneelkatte taha. Seinakatteks ei sobi sellisel juhul materjal, mis on soojust isoleeriva toimega. Tapeeditud või värvitud kipsplaadist sein on kuivpaigalduse korral igati kõlblik. Märgpaigaldusel peidetakse kütetoru krohvi või segu sisse. Esimese tööna tuleb lahendada soojusisolatsiooni küsimused, seejärel kinnitatakse seinale

paigaldusreelsid, kus toru kinnitub vastavate klambrite vahele. Lõpuks kaetakse torustik krohviga, mille kiht võiks torude peal olla 10...20mm.

Seinküte monteeritakse keldris "märjal meetodil", kütetorud paigaldatakse krohvikihhi sisse. Difusiooni tõkkekihiga kütetorud System KAN-Therm PE-Xc/PE-RT 14x2.0mm kinnitatakse seinale torude fikseerimiseks mõeldud paigaldustalda, seejärel kaetakse krohvikihiga paksusega ligi 30-40mm, moodustades kütteplaadi. Krohvi minimaalne paksus toru kohal on 10mm. Paigaldussamm 150mm. Süsteemist õhu eemaldamiseks tuleb tagada minimaalne soojuskandja vooluhulk 0,35l/min, mis vastab voolukiirusele 0,2m/s [30].

Seinküttesüsteemide üldised eelised:

- Ruumi soojakao kompenseerimine kuni 150W/m<sup>2</sup>. See on kõrgem kui vesipõrandkütte korral. See on seotud sellega, et küttesüsteemi pealevoolu vee temperatuuri saab tõsta kuni 50°C ning temperatuuride vahe soojade seinte süsteemis võib olla kuni 15°C. Tuleb meeles pidada, et mida kõrgemaks pealevoolu temperatuuri viia, seda suuremaks läheb ka lisanduv soojuskadu läbi välispiirde, st. temperatuuri tõstmisel küttesüsteemi koguefektiivsus väheneb.
- Majanduslik aspekt. Seoses sellega, et võrreldes põrandküttega on soojuskandja vooluhulk väiksem ( $\Delta T$  võib olla suurem), võib soojade seinte süsteemi korral piirduda väiksema tootlikkusega tsirkulatsioonipumpadega.
- Soojusvahetus soojadelt seintelt toimub suures osas soojuskiirgusvahetuse arvelt. Konvektiivse voo viimine miinimumini vähendab ning paljudel juhtudel peatab tolmu ringluse ruumis.



Joon. 23 Seinküte pööningul, näidis

**Seinkütte arvutused.** Põranda- ja seinkütte süsteemide arvutus põhineb standardis [7] määratletud meetodil. Köetavate ruumide (seinteküttega ja põrandküttega) arvutuslikud soojuskadod on 2700W, sellest 1630W põrandküttele ja 1070W seinteküttele (KV projekt). Temperatuuride keskmine logaritmiline erinevus arvutatakse valemi järgi [16], [30]:

$$\Delta\theta_H = (t_{pv} - t_{tv}) / \ln \left[ \frac{t_{pv} - t_r}{t_{tv} - t_r} \right] \quad [^\circ\text{C}], \quad (11)$$

kus  $t_{pv}$  on soojuskandja pealevool;  
 $t_{tv}$  on soojuskandja tagasivool;  
 $t_r$  on ruumiõhu temperatuur

Seega niisketes ruumides  $\Delta\theta_H = (38-33) / \ln((38-26)/(33-26)) = 9,3^\circ\text{C}$ ; riietusruumides  $\Delta\theta_H = (38-33) / \ln((38-24)/(33-24)) = 11,3^\circ\text{C}$ .

Pinnakütteseadmetest eralduv pinnasoojusvoo tihedus arvutatakse valemi järgi [30]:

$$q = K_H * \Delta\theta_H \quad [\text{W}/\text{m}^2], \quad (11.1)$$

kus  $\Delta\theta_H$  on temperatuuride keskmine logaritmiline erinevus;  
 $K_H$  on konstant, mis põhineb järgnevatel admetel, vt. lisa 5:

- toru läbimõõt;
- toru paigaldamissamm, m;
- krohvikihi paksus, m;
- katte takistus  $R_{\lambda B}$  [ $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ ]:
  - 0,00 keraamilised plaadid, paksusega <12mm, kivist <25mm
  - 0,05 sünteetilised materjalid, vaigud, <6mm
  - 0,10 seinapaneelid <10mm ja kangast kate <6mm
  - 0,15 puidupaneelid <15mm ja paks kangast kate <10mm

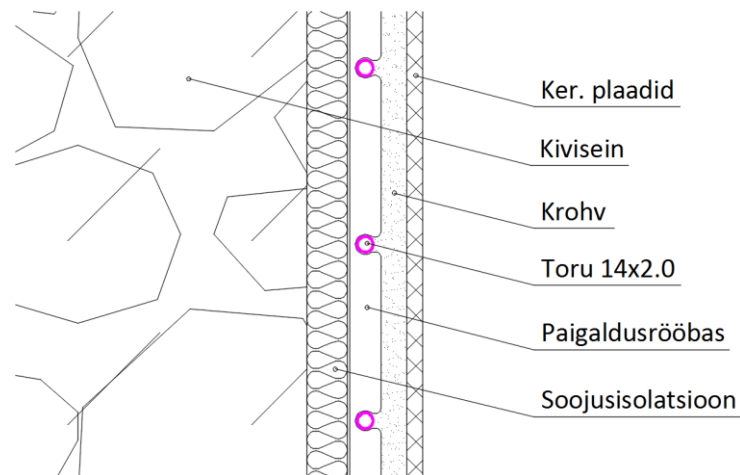
Niisketes ruumides:  $q = 5,8 * 9,3 = 53,8 \text{W}/\text{m}^2$ ; riietusruumides  $q = 5,8 * 11,3 = 65,6 \text{W}/\text{m}^2$ .

Seinkütte torustik kinnitatakse seina peale, siinide abil, arvestades sellega, et seina soojuslähivus on  $0,40 \text{W}/\text{m}^2\text{K}$  või väiksem [30]. Antud hoone keldri seina juhul soojuslähivus on  $0,58 \text{W}/\text{m}^2\text{K}$ , mis tähendab seda, et seinad vajavad lisaisoleerimist.

Isover KL35 mineraalvilla isolatsiooni soojusjuhtivustegur  $\lambda = 0,035 \text{W}/\text{mK}$ ; valemi (2, pöördkujul) ja tabeli 4 järgi tuleb arvutada villisolatsiooni kihi paksust, arvestades

sellega, et seina soojuslähivus peab olema  $0,35\text{W/m}^2\text{K}$ : kihi paksus peab olema  $S=40\text{mm}$ . Sobib Isover KL35 standartpaksusega  $50\text{mm}$ .

Kapillaarniiskusega probleemide lahendused on kirjeldatud arhitektuur projektis, välisseinte maaaluses osas kasutatakse kaitse- ja dreneažimatti Iso-Drain & Geo ja hüdroisolatsiooni Izolex Stybrit 2000.



Joon. 24 Kõetava seina lõige

**Pinnatemperatuuri kontroll.** Pinna temperatuuri arvutatakse valemi järgi [7]:

$$T_p = t_{\delta} + \frac{q_p}{\alpha_{si}} \quad [^{\circ}\text{C}], \quad (11.2)$$

kus  $q_p$  on pinnasoojusvoo tihedus,  $\text{W/m}^2$ ;

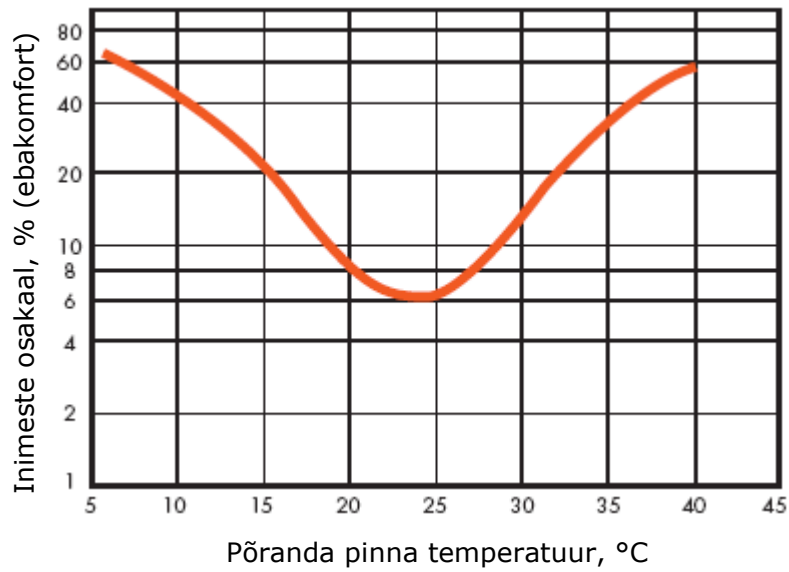
$t_{\delta}$  on õhutemperatuur,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\alpha_{si}$  on soojusülekannekoefitsient [7]:

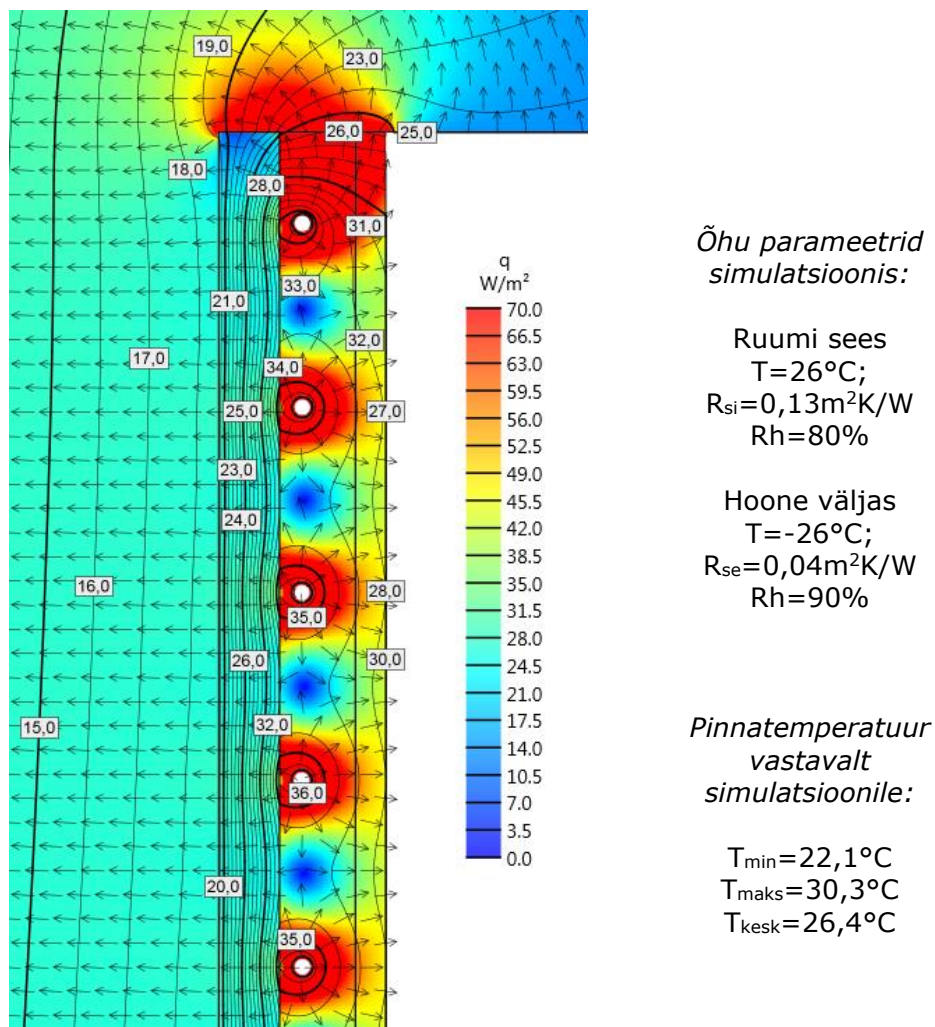
- põrandalt õhku  $11\text{W/m}^2\text{K}$ ;
- seinalt õhku  $8\text{W/m}^2\text{K}$

Seega keskmised pinnatemperatuurid (seinad) on: niisketes ruumides  $T_p=26+53,8/8=26,8^{\circ}\text{C}$ ; riietusruumides  $T_p=24+65,6/8=25,0^{\circ}\text{C}$ .

Põrandapinna maksimaalne temperatuur on  $29^{\circ}\text{C}$ , optimaalse temperatuuri võiks hinnata ka joonise 25 järgi. Maksimaalne temperatuur niisketes ruumides on  $33^{\circ}\text{C}$ . Spaa mõttes, kus inimestel on kokkupuude seintega, pindade temperatuuri limiidid võivad olla sama nagu põrandküttele. Seinküttele on tehtud kontrollsimulatsioon, HTflux tarkvaraga (joonis 26).



Joon. 25 Pinnatemperatuuri tõenäoslik mugavustunde hinnang (PMV) [7]



Joon. 26 Seinkütte simulatsioon. Niisked ruumid keldris

### 3.2.5 Radiaatorküte

Ajalooliste hoonete puhul taanduvad radiaatorkütte projekteerimise aspektid suuresti sisearhitektuuri esteetikanõuete ja disaini nõuete täitmisele. XX sajandi alguse ja vanemate, range arhitektuuriga ahiküttega hoonetes lahendatakse radiaatorite kasutamise küsimus viimaste varjamisega paneelide abil (joonis 27), niššides ja karpides. Kütte efektiivsus sõltub otseselt radiaatorite ligipääsetavusest, st nende avatusest. See tähendab, et radiaatorite katmisel väheneb olulisel määral õhu konversioon ja see omakorda põhjustab kütte kvaliteedi vähenemise. Nii sünnib kompromiss, mille puhul radiaatorkütte efektiivsus väheneb, kuid interjäär seejuures ei kannata.



Joon. 27 Küttekehade peitmine karpikutes, näidis

Sellegi poolest ei tohiks karpide konstruktsioon takistada õhu õiget tsirkulatsiooni radiaatori ümber, mille jaoks on ette nähtud avatud alad ja pilud (mh aknalauas) õhu korrektseks ringlemiseks. Radiaatorid, eriti just avatud paigalduse korral, ei tohi olla vastuolus ruumi üldise stilistikaga. Antud objektil kasutati "Viadrus" Kalor ja Hellas malmradiaatoreid [31] ja Purmo "Delta" terasradiaatoreid.

Radiaatorkütte toitemagistraalide ehitamisel keerulise sisemise geomeetriaga hoonetes (nt. võlvlagedega hoonetes) tuleb võimalusel eelistada kollektorsüsteeme, harude jaotusega renoveeritava põranda konstruktsioonis.

## 3.3 Hoone ventilatsiooni renoveerimine

### 3.3.1 Ventilatsiooni- ja suitsulõõride renoveerimine

Üsna puhastes ning sirgetes lõõrides kasutati standardseid torusid  $\varnothing 100\text{...}160\text{mm}$ . Sellegi poolest on ventilatsioonikanalite renoveerimine tavaliste tsingitud terasest torude abil raskendatud ja kohati võimatu kanalite keerulise, ebatäpse ja häiritud sisemise geomeetria tõttu (ptk. 3.1.3). Sellistes šahtides kasutati hülssimist ettevõtte



"FuranFlex" polümeersete vahetükkide abil (vt. joonis 28), sh tooted "VentiFlex" ventilatsioonišahtide renoveerimiseks [32], [33].

Tabel 6 Lõõrivooderdussukade tehnilised andmed:

	<b>FuranFlex Classic</b>	<b>FuranFlex RWV</b>
Maksimaalne kasutustemperatuur	250°C/450°C	450°C
Külmataluvus	-50°C	-50°C
Kütised	kütteõli, gaas, tahked kütised	tahked kütised
Võimalikud pikkused	1m - 80m	1m - 80m
Läbimõõt	80mm - 1000mm	100mm - 800mm
Materjali tõmbetugevus	kuni 400N/mm <sup>2</sup>	kuni 400N/mm <sup>2</sup>
Seina paksus	2,0mm - 3,0mm	3,0mm - 4,0mm
Soojusjuhtivus	0,4W/m <sup>2</sup> K	0,4W/m <sup>2</sup> K
Tihedus	1,5g/cm <sup>3</sup>	1,5g/cm <sup>3</sup>
Painutusnurk küttesüsteemides	kuni 30°C	kuni 30°C
Painutusnurk ventilatsioonisüsteemides	kuni 90°C	kuni 30°C
Korrosioonikindlus	väga hea	väga hea
Korrosioonigarantii	25 aastat	10 aastat

Peamised eelised kanalite renoveerimisel paindlike hülsside abil:

- Võimalus paigaldada kogu šahti pikkuses ilma ühendusmuhvideta.
- Võimalus paigaldada šahtidesse keerulise ning mittesirge geomeetriaga.
- Gaasi- ja õhukindlad.
- Kuumakindlus kuni 450°C (suitsulõõri renoveerimisel).
- Kergesti puhastatavad.



Joon. 28 Lõõrid enne (vasak joonis) ja pärast renoveerimist FuranFlex lõõrisisuga (parem joonis), näidis

### 3.3.2 Õhuvooluhulgad hoones

Õhuvahetuse määramisel võetakse arvesse standard [6], arhitektuurilised piirangud ning šahtide/lõõride võimalused. Allpool on esitatud õhutarvituse arvestused, mida õnnestus projektiga antud hoones tagada. Õhuvahetus ruumides on arvatud inimeste arvu, kohtade järgi või põrandapinna kohta.

Tabel 7 Normatiivne õhuvahetus ruumides

Ruumi nimetus	l/s	l/s / ühik	Vastab lõõride jm arh. võimalustele
Elutoad	min. 10	6...8 / inimene või 0,5 / m <sup>2</sup>	jah
Magamistoad	min. 10	6...8 / inimene või 0,7 / m <sup>2</sup>	jah
Köögid korterites		6...15	jah
WC-d	10		jah
Pesuruumid	10...15		jah
Leiliruum keldrikorrusel		1,5 / m <sup>2</sup>	jah
Raamatukogu		8 / inimene või 1,5 / m <sup>2</sup>	jah
Saal, aula		8 / inimene või 5 / m <sup>2</sup>	ei
Köök		vastavalt tehnoloogiale	jah
Söögisaal		6 / inimene või 5 / m <sup>2</sup>	ei
Laod ja hoidlad		0,35...1 / m <sup>2</sup>	jah
Koridorid		0,5...1 / m <sup>2</sup>	jah
Garderoobid		0,5...1,5 / m <sup>2</sup>	jah
Majutusruumid		8 / inimene	jah

Järgnevat õhuvahetuse korraldust analüüsitakse ja korraldatakse hoone kasutamise perspektiivide ja selle eri osade kasutamise planeerimise seisukohast. Näiteks multifunktsionaalset saali ei kasutata pidevalt, majutusruume samuti kindlatel aegadel. Sellega seoses korraldatakse maja üldine õhuvahetus sellisel moel, et maja eri osade ventilatsiooni sisse ja välja lülitamise ei põhjustaks ebamugavust, tasakaalustamatust ega energiakulu suurenemist (nt. infiltratsiooni suurenemise tõttu).

### 3.3.3 Ruumides CO<sub>2</sub> taseme kontroll ja järeldused

Kahe eri tüüpi ruumi näitel vaadeldi süsihappegaasi taset. Teostati mõõtmised ja analüüs erinevate praktiliste stsenaariumide korral.

Eesmärk oli välja selgitada rekuperatiivse/regeneratiivse sundventilatsiooni väljaehitamise otstarbekus, võrrelda seda CO<sub>2</sub> taseme langetamise lihtsama meetodiga ruumide tuulutamise teel koos olemas oleva väljatõmbesüsteemi säilimisega. Teostati sisekliima ja majanduslike aspektide võrdlus.



CO<sub>2</sub> sisaldus toaõhus (saal 109 nagu õpperuum) ei tohiks tõusta üle 1000ppm – parts per million (0,1%) [6]. Süsihappegaasi kahjulikuks sisalduseks peetakse 0,5% ehk 5000ppm. Soome ehituseeskirjade kogumikus D2 on piirsisalduseks võetud 0,25%, millest inimese poolt tekitatud osa võib olla maksimaalselt 0,15%.

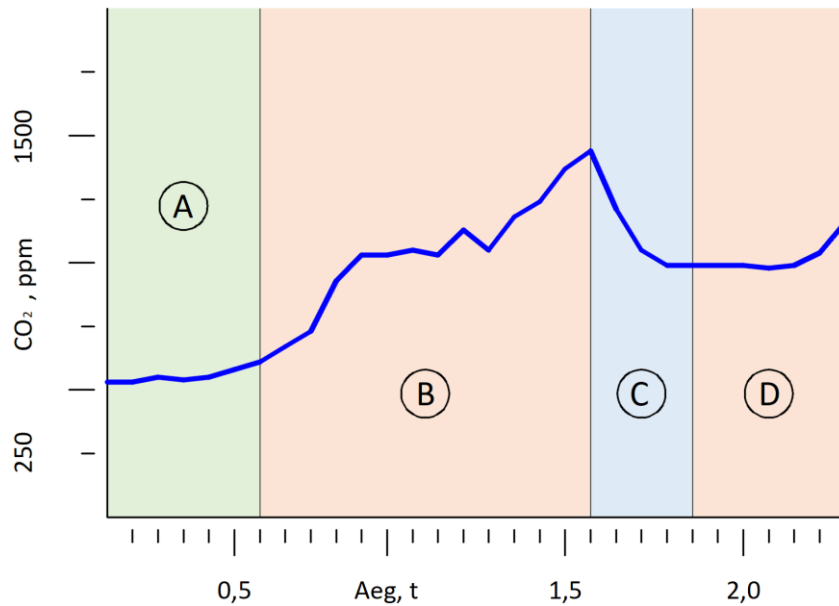
**Süsihappegaasi mõõtmise põhimõtted.** CO<sub>2</sub> mõõtmise eesmärk oli selle taseme ning kõikumiste kindlaks määramine testitavates ruumides teadud kindla ajaperioodi jooksul. Mõõtmisteks kasutati renditud kalibreeritud seadet HOBO MX1102A, Onset Comuter Corp. [35]. Seade registreeris näite intervalliga 5 minutit.

Mõõtmiste teostamise kohaks oli iga uuritava ruumi keskkoh, 1 meetri kõrgusel põrandapinnast, vastavalt "Tööruumide mikrokliima tervisekaitse normid ja eeskirjad" esitatud sisekliima mõõtmiste nõuetele. Süsihappegaasi taseme mõõtmise aeg oli 1 kuni 3 tundi, vastavalt reaalsele võimalusele. Mõõteseadet ei paigaldatud kunagi inimestele lähemale kui 1 meetri. Mõõtmiste tulemused saadi raport-failidena, mis laetakse seadmest alla ning töödeldakse hiljem arvutis.

**Mõõtmised.** Mõõtmiste hetkel toimus hoone rekonstrueerimisprotsess, st. puudus sihtauditoorium. Mõõtmise teostati projektikoosoleku päeval, mil kogunes ekvivalentne inimhulk – hoones viibivad ehitajad, juhtkond ning administratiivpersonal, kokku 18 inimest.

Esimene testitav ruum on multifunktsionaalne saal 109 (pidulikud sündmused, koosolekud, õppeprotsess). Tehnilise ülesandena eeldatakse 35 inimese kohalolu (prognoositav maksimaalne arv).

Mõõtmiste teostamise ajal töötas saalis olemas olev mehaaniline väljatõmbeventilatsioon lähedal asuvatest sansõlmedest, kompensatsiooniga läbi saali aknaklappide. Õhuvooluhulk ligi 70l/s. Välisõhu temperatuur +3°C. Maakoha välisõhu CO<sub>2</sub> kontsentratsioon on hinnanguliselt ~400ppm. Mõõtmistulemused on esitatud graafikuna joonisel 29a.



Joon. 29a CO<sub>2</sub> taseme muutmine ruumis 109 (andmed vt. lisa 3, tabel 9.1)

*Period A* – ruum on inimestest tühi (perioodiliselt ja lühiajalisel viibib üks töötaja). Süsihappegaasi tase on veidi kõrgem tänavatasemest.

*Period B* – projektikoosolek, ruumis viibib 18 inimest. Süsihappegaasi tase kasvab, kuid mitte intensiivselt, tänu olemas olevale (kuid ebapiisavale) ventilatsioonile ja ruumi ruumalale. Tunniga jõuab see tasemeni ~1500ppm. Ilmselt on CO<sub>2</sub> tase märkimisväärselt kõrgem, siis kui ruumis viibib arhitektuuri-tehnilise ülesande poolt ette nähtud maksimaalne inimeste hulk.

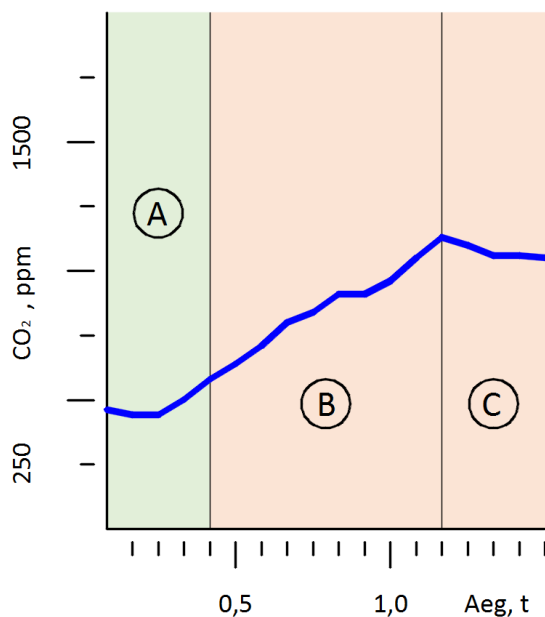
*Period C* – tuulutamine, kasutades määratud aknasektsioone (tuuletõmbuse ennetamiseks või minimeerimiseks), ruumis on 18 inimest, algtemperatuur 24°C (mõõtmispunktis), CO<sub>2</sub> tase langeb ~1000ppm-ni, millega kaasneb ka temperatuuri langemine 19°C-ni (mõõtmispunktis).

*Period D* – projektikoosolek jätkub, mõne aja pärast hakkab CO<sub>2</sub> tase jälle tõusma.

Eelneva järeldusena võib tõdeda, et ventilatsioon on ebapiisav, CO<sub>2</sub> taseme küsimust külmal aastaajal ei saa lahendada tuulutamise teel antud ruumi kasutamise ajal. Lisaks eeldab ruumi tüüp selle kasutamise järjepidevust mitme tunni jooksul.

Teine testitav ruum on tüüpiline laste külalistetuba 4-le inimesele. Loomulik ventilatsioon sissevooluga šahti kaudu läbi aknakonstruktsiooni (täpne kulu teadmata). Mõõtmiste ajal ~40 minuti jooksul viibis ruumis 4 täiskasvanut inimest ja ~20 minuti

jooksul viibis ruumis 2 täiskasvanut. Välisõhu temperatuur +3°C. Maakoha välisõhu CO<sub>2</sub> kontsentratsioon on hinnanguliselt ~400ppm. Mõõtmistulemused on esitatud graafikuna joonisel 29b.



Joon. 29b CO<sub>2</sub> taseme muutmine ruumis 116 (andmed vt. lisa 3, tabel 9.2)

*Period A* – ruum on inimtühi. Süsihappegaasi tase on tänavatasemega ligikaudu võrdne.

*Period B* – ruumis on 4 täiskasvanut. Süsihappegaasi tase tõuseb, 40 minuti jooksul jõuab see näiduni ~1170ppm ning jätkab mingil määral kasvu.

*Period C* – hiljem jäävad ruumi 2 täiskasvanut, CO<sub>2</sub> tase langeb veidi, tasemini ~1060ppm.

Perioodi B järgi võiks arvutada loomuliku õhuvoolu hulka ruumis, kasutades valemit (7.2), mis kehtib lühiajalise emissiooni korral [6], ja vähimruutude meetodi (ptk. 2.2.1, lisa 4, tabel 10). Süsihappegaasi emissioon ühe inimese poolt väljahingamise hetkel moodustab 20l/h [6], [15], mis osutab õhuvooluhulgale ruumis [6] (välise temperatuuritingimuste korral mõõtmise hetkel):  $L=34,8\text{m}^3/\text{h}=9,7\text{l/s}$ .

Tulemusena, ventilatsioon on ebapiisav (tabel 7 ja [15]) ja olukord varieerub välistingimustest (aastaaajast) sõltuvalt. Tuulutamist ei teostatud, võttes arvesse ruumi tüüpi, mis eeldab selle järjepidevat kasutamist kogu öö jooksul ja kauem.

Rekonstrueerimise käigus vähendab akende liigne hermeetimine samuti loomulikku õhuvahetust.

Kuigi mõõdetud valim (ainult 2 ruumi) oli väike, võib analoogset olukorda eeldada ka teistes ruumides. Kahe tüüpruumi näitel on ilmne vajadus normatiivse õhuringluse ja sellest tulenevalt ka mehaanilise ventilatsiooni järele.

Järgnevalt analüüsitakse süsteemide tüüpe (väljatõmbeõhu soojuse tagastusega ja ilma) majanduslikust perspektiivist, vastavalt ehituslik-arhitektuurilistele reaalsele võimalustele.

### **3.3.4 Majanduslikud aspektid KV süsteemide ehitamisel**

Vaatleme õhu kütmise kulusid erinevate lahenduste korral, arvutused tehakse kraadpäevade järgi. Kraadpäevade arvutamiseks võiks kasutada valemit (8.1) või võtta [www.kredex.ee](http://www.kredex.ee) andmebaasist – Valgamaa, 2017.a, 3925°Cd (vt. lisa 8). Vana renoveerimata hoonetes tasakaalutemperatuuri võtame 17°C [16].

Hoonet varustab soojaga pelletkatel, puitpelleti hinnaks arvestame ~200€/t, kütteväärtus 4,8MWh/t; seega energiahind on 0,042€/kWh.

**Saali 109 ventilatsioon.** Küttekoormus õhuvooluhulga 252l/s (KV projekt) soojendamiseks on 14,3kW, soojusvajaduse kütteks valemi (8) järgi saame, et õhu soojendamine saali 109 ventileerimiseks läheb:  $Q_k = (14,3 * 3925 * 24) / 47 = 28660 \text{ kWh}$ , mis maksab 1204€ aastas. Ventseadme rootori temperatuuri suhtarv 87%, sellisel moel on kulud saali õhu kütmiseks soojustagastusega mehaanilise sundventilatsiooni süsteemi kasutamisel 157€ aastas.

Kuna ventilatsiooniseadme soojusvaheti temperatuuri suhtarv on kõrge ning õhuvooluhulgad väikesed, siis omavad antud hoone puhul enamus seadmetest järelsoojenduse kalorifeere võimsusega 3kW ja vähem. Võttes arvesse ventilatsioonisüsteemide ebajärjepidevat tööd ning sageli ka pikka tasuvuse tähtaega, on otstarbekas mitte kasutada veekalorifeere, kuna see seotud ehituse kallidusega (elektrikalorifeeriga võrreldes), paigaldamise keerukusega range arhitektuuri suhtes ning potentsiaalsete leketega, mis võib tekitada olulist kahju paljude ajalooliste hoonete puhul. Elektrilise kalorifeeri kasutamise korral on multifunktsionaal saali 109 ventileerimiseks (252l/s, KV projekt) õhu kütmise koos väljatõmbeõhu soojuse utiliseerimise arvestamisega maksumus on  $28660 \text{ kWh} * 0,1 * (100 - 87) = 373 \text{ €}$  aastas (0,1€/kWh on elektrienergia hind ja 87% on rootori temperatuuri suhtarv).

Ruumi 109 näitel kujuneb ühe sundventilatsioonisüsteemi väljaehitamise hinnaks (ilma käibemaksuta) 12190€, millest ventilatsiooniseade Topvex SR03EL-CAV koos tarvikutega on 6140€ ja materjalid on 3480€ (hinnad: Systemair AS ja ETS Nord AS). Ruumi 109 soojustagastusega ventilatsioonisüsteemi (mehaaniline väljatõmme ja värskõhuklapid) väljaehitamise hinnaks 3830€ (millest materjalid sh. katuseventilaator on 2130€). Kokkuvõtteks võib ventilatsioonisüsteemi soojustagastusega tasuvusperiood olla orienteeruvalt 15 aastat, ilma hooldus kuludeta (võrreldes ainult mehaanilise väljatõmbega), sõltuvalt nt. analoog ventilatsiooniseadme ja materjalide maksumusest. Võttes arvesse mõningate ruumide kasutatavuse perioodilisust see aeg pikeneb.

Sel moel pole sundventilatsioonisüsteemi soojustagastusega väljaehitamine, mis tagaks täielikult normatiivse õhuringluse (või osaliselt, võttes arvesse vajaliku ristlõikega õhutorustike rajamise konstruktiivset mitteteostatavust), alati majanduslikult otstarbekas, kui ventilatsiooni saab korraldada loomulikul teel või loomuliku juurdevooluga mehaanilise väljatõmbe teel.

Sellegi poolest toimub loomulik õhuringlus kontrollimatult, sõltub mitmest faktorist ning kätkeb endas tuuletõmbuste ja temperatuuri langemise riske alla nõutud miinimumi. Loomuliku juurdevooluga mehaaniline väljatõmbe ei ole soovitatav ka suurte õhuhulkade puhul, kuna ruumi perioodilise kasutamise korral on keeruline kontrollida selle temperatuuri, eriti aga inertse põrandkütte kasutamise korral. Nii osutub sundventilatsioon vajalikuks kui on vajadus paindlikult juhitava kõrge tasemega sisekliima järele, kui interjööri säilivus tagatakse kindlate kliimaparameetriga või kui tasuvuse analüüs kinnitab nimetatud süsteemi rajamise otstarbekust.

**Keldrikorruse välisseinte soojustamise mõju kasutuskuludele.** Vastavalt ptk. 3.2.3 tehtud soojustusmaterjalide analüüsile, allpool tabelis 8 on esitatud kulude võrdlus keldrikorruse kütmiseks. Energiahind on 0,042€/kWh, kasutud tabel 5 ja valem (8):

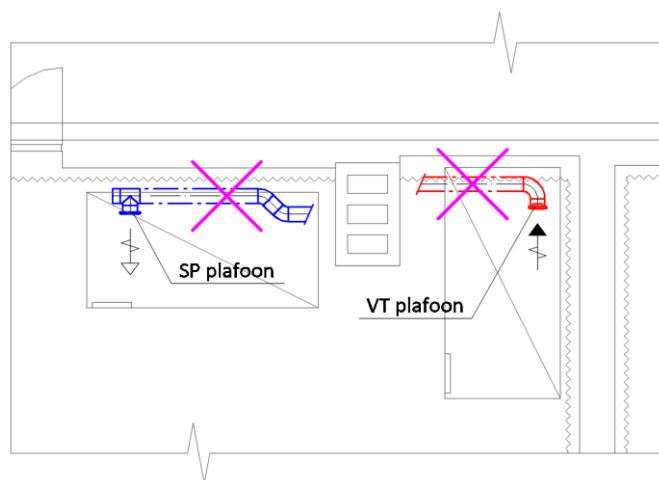
*Tabel 8* Rahaline kulu keldrikorruse kütmiseks, võrdlus

Sein	Isoleerimata	CaSi	IQ-T
Aastane kulu, €	1918	1633	1534

### 3.3.5 Ventilatsiooni lahendused hoones

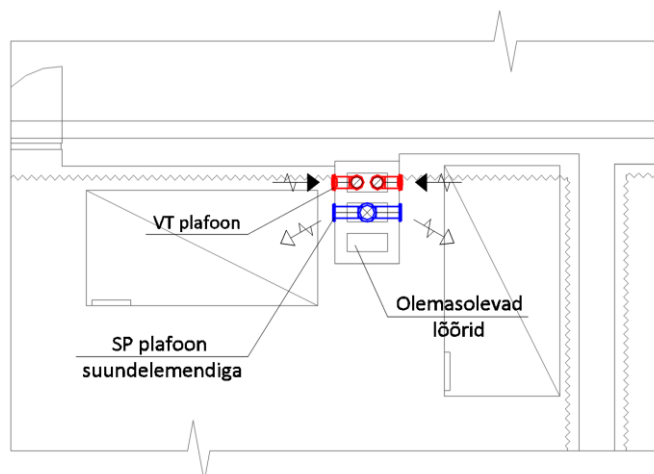
**Olemasoleva ventilatsiooni lahenduse muutmine.** Hoone ventilatsioonisüsteeme on korduvalt rekonstrueeritud. Hoone inventeerimise ning insenerisüsteemide

dokumenteerimise tulemusel on selgunud palju kohti ja sõlmi, mis ei vasta interjööri kujundaja nõuetele, vt. joonis 30a. Käesolevas projektis on esitatud lahendused nendele sõlmedele ning viidud need nõuetega kooskõlla, vt. joonis 30b.

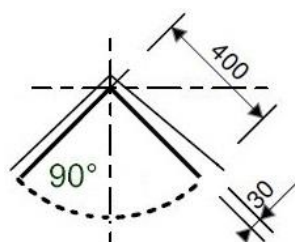


Joon. 30a Olemasolev ventilatsiooni lahendus. Üleliigsed ja ebavajalikud ventkanalite fragmendid, mis ei ole kokkusobivad võlvlagedega ja interjööri [14]

Joon. 30b Korrigeeritud ventilatsiooni lahendus. Ventilatsiooni plafoonid on maksimaalselt nähtamatud. VT plafoonid sissepuhke jugadele praktiliselt ei mõjuta

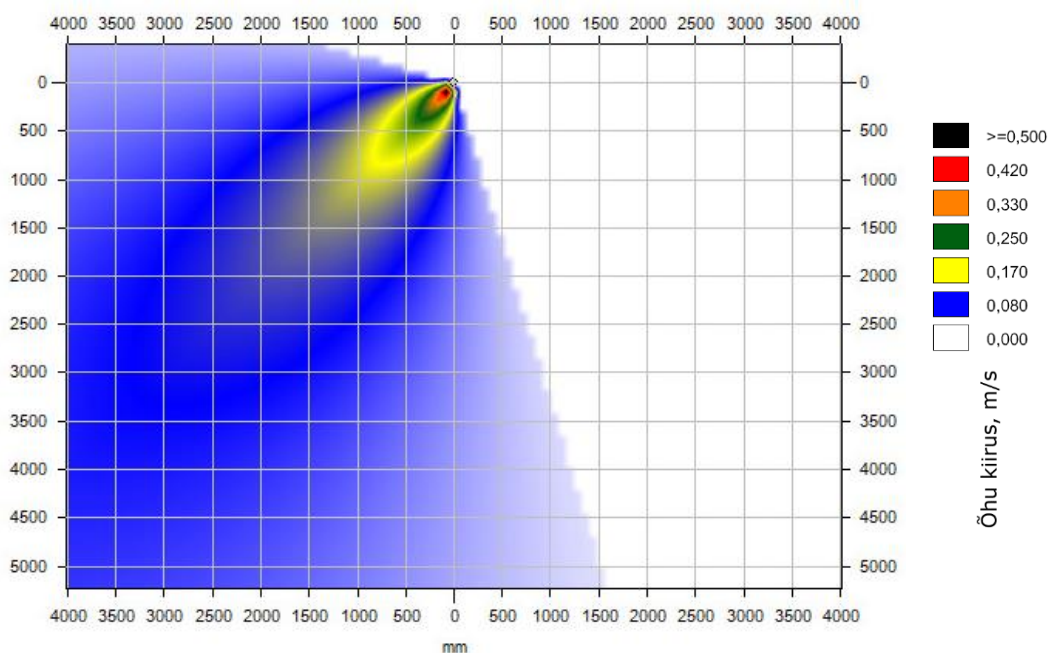


**Riidest õhukanalite ja õhujaotajate kasutamine.** Peasaalis kaaluti alternatiivina õhujaotusele restide kaudu lahendust kasutada ettevõtte Pihoda tekstiilist õhuhajutit (joonised 32 ja 33). Eelised – parem õhuvahetus ja täielik integreerumine (maskeerumine) interjööri kujundusega.

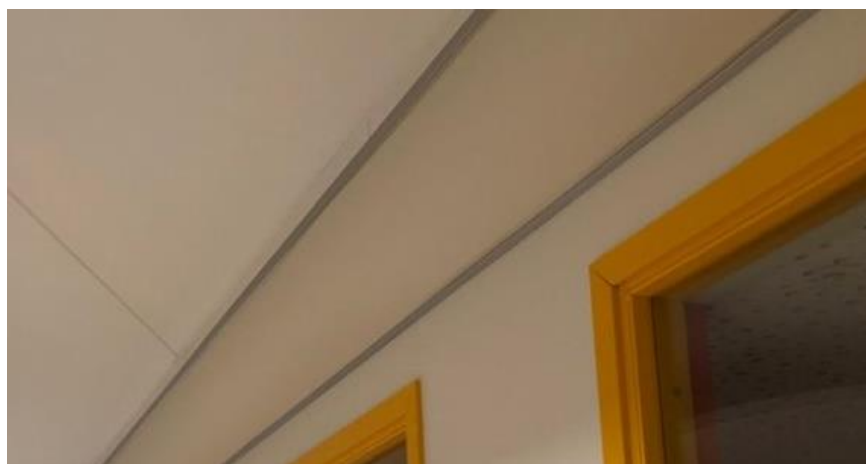


Joon. 31 Riidest õhukanal, alumiinium karkassiga

Kasutatakse ebastandardse lõikega õhuhajuti – ringi sektor 90° (kvadrant, joonis 31). Õhu jaotumist teostatakse läbi materjali, õhu jaotamiseks on ette nähtud väikesed avasused diameetriga 0,2...0,4mm (mikroperforatsioon). Materjali värvus – vastavalt kujundaja ettekirjutustele. Paigaldatud piki ruumi ülemist serva. Ventilatsiooni hajuti kogupikkus – 18m.

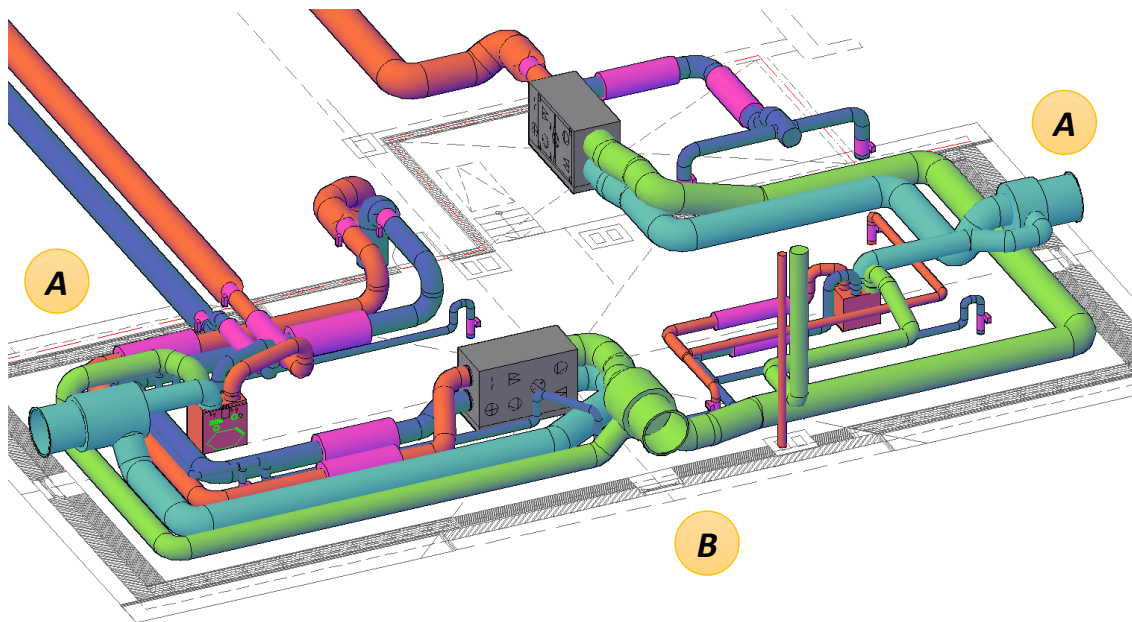


Joon. 32 Riidest hajuti joa skeem



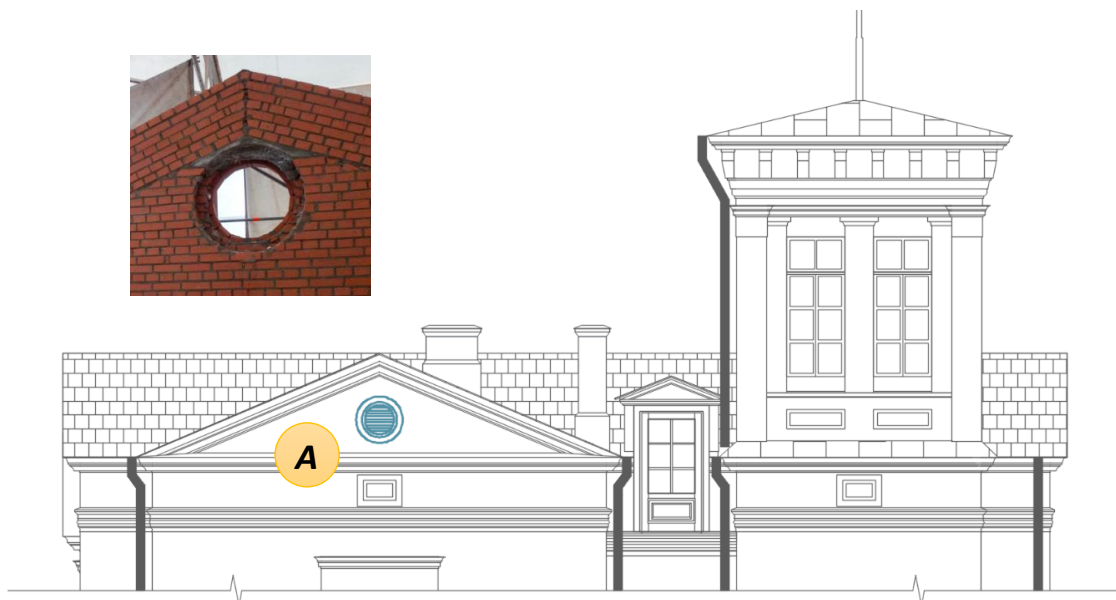
Joon. 33 Riidest õhukanal/hajuti ruumi nurgas, näidis

**Ventilatsiooniseadmed ja -kambrid.** Osa hoone ventilatsiooniseadmetest asuvad pööningul tehniliste vajaduste jaoks kohandatud ruumis, vt. joonis 34. Ruumi on soojustatud, seina sisekonstruktsioon on ümber ehitatud vastavalt tuleohutusnõuetele EI60.



Joon. 34 Pööningu ventkambri 3D vaade

Ventilatsiooni õhuvõtu ja väljavise korraldamisel tasub vältida arhitektuuriliste lahendustega mitteharmoneeruvaid lahendusi, nagu nt võõrad karbid ja šahtid katusel. Antud objekti puhul on optimaalne lahendus ümmarguste restide (A ja B) paigaldamine katuseakende asemele, vt. näidet joonisel 35. Kasutati Fläktwoods RISD reste.



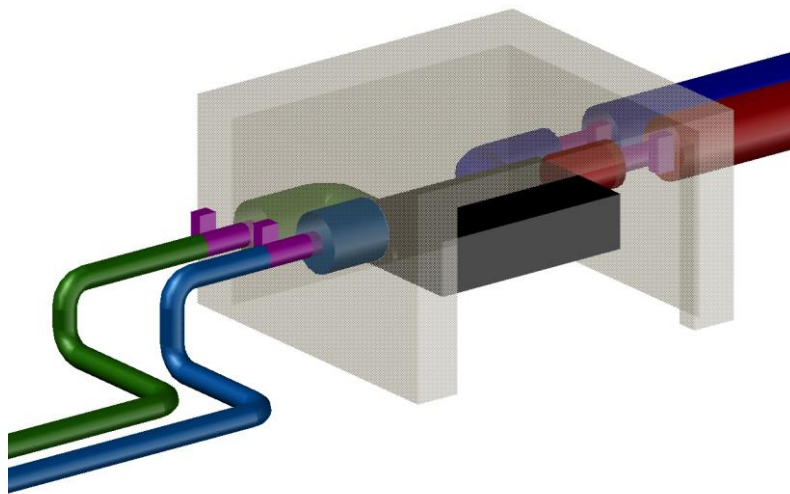
Joon. 35 Vaade W (läänest)

Vanade hoonete puhul pole pööninguruum sageli eraldi tuletõkketsoonideks, mistõttu kaasneb sellesse ventilatsiooniseadmete paigaldamisega raskusi. Antud hoones on vaid



väikene osa pööninguruumist tehnilisteks vajadusteks ümber ehitatud koos vastava konstruktsiooni ümber ehitusega, muu osa on jäänud muutmata, võttes arvesse majanduslikke kaalutlusi ning üldist otstarbekust.

Kuna osa ventilatsiooniseadmete paigaldamine tehnoruumi ebaõnnestus, võeti vastu otsus paigaldada need pööningu ültruumi. Vastavalt standardile [5] võib ventilatsiooniseade jääda tuletõkkekonstruktsiooni poolt piiramata, kui see asub samas tsoonis, mida see teenindab. Seetõttu võeti antud olukorras vastu otsus piirata pööningu ventilatsiooniseadmed kipsist isoleeritud tuletõkke karpidega tulekindlusega EI60 (joon. 36), millel on ligipääsuluugid.



*Joon. 36* Kipsist tuletõkke EI60 karpik horisontaalsele ventseadmele Vallox TSK multi 50, külgmise juurdepääsupaneeliga [27]. Tänu karbi isolatsioonile ning seadme soojaeraldusele pole karpis lubamatult madalaid temperatuure.

## **3.4 Akustika ja müra**

### **3.4.1 Müra kontroll multifunktsionaal saalis**

Saali mõõdud (m) on 18,7x6,0x3,8(h). Ventilatsioonisüsteemi poolt tekitatava mürataseme kontrollimiseks peasaalis on vajalik summeerida kõikide allikate müra. Kuna helirõhku mõõdetakse logaritmilises skaalas, siis tulemusi ei saa liita ja leida aritmeetilist keskmist.

Saalis 109 KV projekti järgi on 2 väljatõmbe resti ja 2 sissepuhke resti, sissepuhke jaotajate asemel kaalutakse ka riidest õhukanali kasutamine, mis asub akna kõrval ja mille üldine pikkus on 18m. Edaspidine müra kontroll teostatakse nii esialgse projekti lahendusele kui ka alternatiivile. Hajuti koos väljatõmbe restidega (koosmõju)

mürakontrolli detaililine müraarvutus on toodud lisa 9, tabelites 11.1 ja 11.2. KV projekti käigus oli ka teostatud MagiCAD-i müraarvutus, aga terviklikku pilti see ei anna (nt. ruumi sumbuvus läheb raamväärtusena, ventkambri müra ümritseva kesskkonda arvutuses puudub).

Ekvivalentne ruumi helineeldumispind (valem 13):

$$A=(2*18,7*6,0+2*18,7*3,8+2*6,0*3,8)*0,15=60,8\text{m}^2\text{-Sab}$$

Ruumisummutust arvutatakse valemi (13.1) järgi [17]:

$$D_{\text{ruum}}=10\log_{10}(60,8/4)=11,8\text{dB}$$

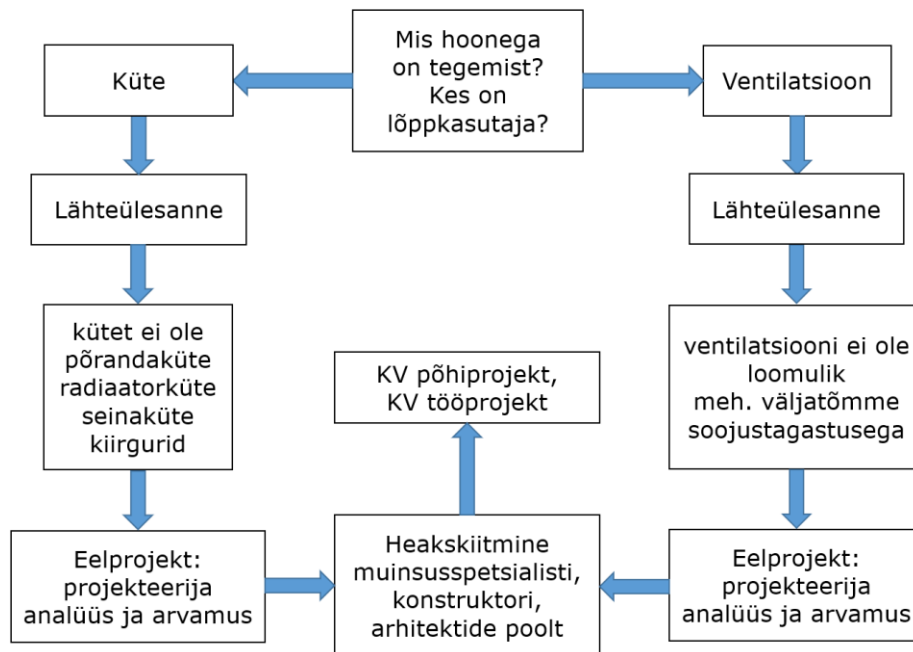
Müraarvutuse (lisa 9) järgi väljatõmbe restist tekkiv helirõhk saalis:  $L_pA=31,7\text{dB(A)}$ ; sissepuhke riidest õhukanalist tekkiv helirõhk saali keskel:  $L_pA=25,4\text{dB(A)}$

Vastavalt jooniele 15 ja valemile (12) kaks väljatõmberesti ja sissepuhke riidest hajuti (18m) helivõimsustase summa:  $31,7\text{dB(A)}$  ja  $31,7\text{dB(A)}$  summa:  $31,7+3,0=34,7\text{dB(A)}$  (joonis 15, vasak).  $34,7\text{dB(A)}$  ja  $25,4\text{dB(A)}$  summa (joonis 15, parem): müratasemete erinevus on  $34,7-25,4=9,3\text{dB(A)}$ . Summaarne helivõimsustase võrdub  $34,7+0,4=35,1\text{dB(A)}$ . Võrdluseks projektijärgne variant annab müra  $31,7+31,7+32,6+32,6=38,2\text{dB(A)}$ .

Kuna saal on munktifunktsionaalne, seda tuleb kaaluda erinevate rollide poolt. Saal-aula, sel juhul müratase natukene üle normi  $30\text{dB(A)}$  [6], põhjuseks on arhitektuursed piirangud ventilatsiooni elementide valimisel. Saal-auditoorium/klassiruum:  $35\text{dB(A)}$  [6], sel juhul normatiivne müratase ruumis on tagatud. 2 sissepuhke resti ja 2 väljatõmbe resti puhul, helitase ruumis on üle normi.

## SOOVITUSED PROJEKTEERIJATELE

Süsteemide planeerimist võib vaadelda joonisel 37 skeemi järgi:



Joon. 37 Hoone sisekliima tagamiseks vajalike KV lahenduste planeerimise juhised

Projekteerimise toimumise etapid:

- Tellija lähteülesande koostamine
  - KV projekteeijale vajalik info:
    - mis arhitektuursed eripärad, arhitektuursed ja konstruktiivsed piirangud hoonel on: info muinsuskaitse spetsialistidelt, arhitektidelt, sisearhitektidelt, konstruktoritelt;
    - mis KV süsteemide sõlmed ja elemendid võivad avaldada mõju hoone välis- ja sisearhitektuurile, nt. ventilatsiooni välisrestid, jahutusseadmete välisosad jne;
    - mis KV süsteemide sõlmed ja elemendid hoone sees ja väljas peavad saama arhitektide või muude vastutavate isikute heakskiidu;
    - mis on hoone planeeritav kasutusotstarve.
  - Enne projekteerimist kaalutakse uuringute ja ekspertiiside vajadust (nt. konstruktiivsed uuringud, geodeetilised uuringud, lõõriuuringud, termografeerimine jms). Vajaduse korral uuringud teostatakse sellises mahus, et oleks tagatud kvaliteetne lähtematerjal ökonoomsete ja

ratsionaalsete tehniliste lahenduste projekteerimiseks. Nt. lõõriuuring näitab, kas on võimalik kasutada lõõre ventilatsiooniks, kui jah, kas vajavad renoveerimist;

- Kas hoone vajab energiatõhususe tõstmist (nt. seoses kasutuse iseloomu ja ajagraafiku muutmisega);
- Erisoovid, nt. sisekliima spetsiifilised parameetrid määratud ruumides.

- Eelprojekti koostamine

- KV projekteerijale ülesanded:
  - projekteerija peab kontrollima projekteerimise aluseks antud lähteandmete piisavust;
  - kui lähteülesandes ei ole määratud, projekteerija peab analüüsima kas on võimalik ära kasutada olemasolevat soojusallika (nt. ahjud, kaminad, katlad) või on ratsionaalsem rajada uus;
  - KV süsteemi valikul tuleb teostada võrdlusanalüüs võimalike liikide kohta mis sisaldab lisaks investeringu maksumusele ka infot võimaliku eluea, hooldus- ja muutuvkulude kohta;
- Tuleb pöörata tähelepanu järgnevale:
  - kui tehniline ülesanne dikteerib hoone energiatõhususe tõstmise, siis tuleb selle ülesande lahendamise viise vaadelda nende keerukuse järgi kasvavas järjekorras. Näiteks välisseinte sisese täiendava soojustuse võimaluse analüüs, projekteerimine ja järgnev ehitamine on keerukas tegevus.

- Põhiprojekti koostamine

- KV projekteerijale ülesanded:
  - projekteerija täpsustab eelprojekti esitatud infot lähtuvalt projektlahenduste detailiseerimisest põhiprojekti;
- Tuleb pöörata tähelepanu järgnevale:
  - sisemine lisasoojusisolatsioon on aktsepteeritud lahendus, aga: iga vana maja on unikaalne ja konkreetse maja jaoks pakutud lahenduse toimivus peab olema pädeva projekteerija poolt dünaamilise simulatsiooniprogrammiga läbi arvatud ja selle toimivus tõestatud;
  - siseisolatsiooni paigaldamisel on olulised kasutatud materjalide omadused ja nende koostöö konstruktsiooniga. Kapillaaraktiivsed materjalid toimivad teatud piirides kindlamini ja ei riku seejuures

varem olulisena väljatoodud maja kui terviklikult difuusselt toimiva süsteemi põhimõtet;

- kuna keldri välisseinte soojus- ja niiskustehniline kontroll (ptk. 3.2.2) oli teostatud tarkvaras 1D situatsiooni kujul, siis enne materjalide konkreetseesse hoonesse sobivaks tunnistamist, on täiendavalt vajalik läbi analüüsida 2D sõlmed (välisseinte sõlmed lagedega, siseseintega, avatäidetega jms.), täpsustatud kliimatingimused (seina orientatsiooni mõju) ning kontrollida teiste võimalike seinakonstruktsioonide olemasolu (nende leidumisel ka mõju soojustuse toimivusele) [22];
  - on otstarbekas küttesüsteemidel kasutada tarku lahendusi. Märkatava energiakulude kokkuhoiu annab nii soojusallika (nt. katla) kui jaotussüsteemi automaatika kasutamine. Vajaduspõhise režiimiga kütmine õigustatud, temperatuuri ajutine alanemine annab kasutusest tuleneva küttekulude kokkuhoiu efekti. Alandades ruumides mitteviibimise ajaks temperatuuri näiteks 15°C-ni (madalamani ei tasu niiskuse kogunemise ja üleskütmiseks mineva aja tõttu);
  - mitte projekteerida ventilatsiooniseadet ilma summutuskastita tavaruumidesse (kui seadmete paigaldus on kooskõlastatud). Ette näha ventilatsiooniagregaadi ümber täiendav heliisolatsioon juhul, kui ruumisummutus < 4dB, kuna sellisel juhul võib masina poolt tekitatav tegelik A-korrigeeritud helitase olla isegi 5-10dB tootja poolt antust kõrgem [17].
- Tööprojekti koostamine
    - KV projekteerijale ülesanded:
      - Projekteerija täpsustab põhiprojektis esitatud infot lähtuvalt projektlahenduste detailiseerimisest tööprojektis;
    - Tuleb pöörata tähelepanu järgnevale:
      - kui paigaldaja asendab projekteeria poolt välja valitud seadmeid, peab ta enne paigaldustöid kontrollima uute valitud elementide vastavust projektis esitatud seadmete helitehnilistele omadustele ning erinevuse eiramisel vastutama valesti asendatulemendi poolt põhjustatud probleemide eest, kandes nende kõrvaldamiseks vajalikke kulusid.

## KOKKUVÕTE

Sisekliima on hoonete ruumi oluline komponent, kuna inimesed veedavad suure(ma) osa oma ajast siseruumides. Antud küsimuses pole erandiks ka vanad hooned, mida käesolevas töös käsitletakse. Erilist tähelepanu tuleb pöörata ajaloolistele objektidele, mis täidavad laste ja noorde haridusasutuste funktsioone.

Ajalooliste objektide rekonstrueerimine, nende kliima kontroll ja korraldamine on üsna spetsiifiline valdkond, mille puhul puuduvad garanteeritud õiged universaalsed lahendused ja iga objekti tuleb käsitleda individuaalselt. Sellegi poolest sisaldab töö mitmeid nõuandeid, mille järgimine on soovitatav.

Töö teoreetilises osas vaadeldakse ühe või teise kliimasüsteemi majanduslikke aspekte ning nende välja ehitamise otstarbekust Kaagjärve mõisahoone objektil. Vaadeldakse ebastandardset lahendust riidest torustike ja lõppelementide näol ning sellega kaasnevat aerodünaamilist ja akustilist kontrolli. Pakutakse välja lahendus niiskuse ja hallituse kõrvaldamiseks keldri osast.

Töö praktilises osas teostatakse hoone osaline inventuur, viiakse läbi probleemsete kohtade ja sõlmede analüüs. Teostatakse hoone kütte- ja ventilatsioonisüsteemi põhiprojekti staadiumile vajalikud arvutused. Teostati õhu kvaliteedi mõõtmised, sisekliima seisundi analüüs kuni enne praegust rekonstruktsiooni. Hoone visuaalne ülevaatus selgitas välja mitmed kohad, mis on kliimaatilisel ja majanduslikult ebaefektiivsed, vastuvõetamatud arhitektuurilisest vaatepunktist, kuid millel on mitmeid alternatiivseid lahendusi. Õhutemperatuur enne rekonstruktsiooni oli lubatud piirides, olukord säilib ka hoone renoveerimise pärast.

Keeruliste arhitektuuriliste nõudmiste tingimustes lahendatakse suhtelise niiskuse küsimus ainult silmnähtavate niiskuse ja hallituse probleemide olemasolu korral ning ka kindlat tüüpi ruumide puhul, nt raamatukogu ja arhiivi puhul.

Töö käigus selgus, et kasutades loomulikke meetodeid ja enne rekonstruktsiooni olemas olnud meetodeid pole võimalik tagada normidele vastava kvaliteediga sisekliimat suuremas osas hoones ning enamuses ruumidest. Mõningates ruumides, kus:

- nõuded sisekliimale ei ole kriitilised ja kus on lubatud mittesekumine uute KV süsteemide ehitamise seisukohast;
- ruumides, kus täiel määral tagatakse õhu kvaliteet ja vajalikud kliimaparameetrid;

- ruumides, kus pole võimalik uute KV süsteemide paigaldamine ilma kahjudeta konstruktsioonidele või sisearhitektuurile
- on vajalik detailse analüüsi läbi viimine, aga ka soovimatute kaasnevate nähtuste (nt. müra, tuuletõmbus) kontrollimine ja kõrvaldamine/vähendamine.

## SUMMARY

The indoor climate is an important component of the building space, since most of their time people spend indoors. In this matter, the old buildings that are considered in this work are no exception. Particular attention should be paid to historical sites that fulfil the function of educational institutions for children and youth.

The reconstruction of historical objects, the control and organization of the climate in them is a rather specific field in which there are no guaranteed correct universal solutions, and each facility should be considered individually. Nevertheless, the work contains a number of recommendations that should be followed.

In the theoretical part of the work, economic aspects and the feasibility of constructing a particular climate system at the Kaagjärve Mõisahoone facility were considered. A non-standard solution for air distribution in the form of fabric pipelines and finite elements as well as the associated aerodynamic and acoustic control has been considered. A solution is proposed to eliminate moistness and mould in the basement area.

In the practical part, a partial inventory of the building was carried out; the analysis of problem areas and nodes was conducted. Necessary calculations for the heating and ventilation design of the building has been completed. Measurements of air quality were taken, analysis of the state of the indoor climate before the current reconstruction has been conducted. A visual inspection of the building revealed several places that are climatically and economically ineffective, unacceptable in terms of architecture but for which there is a number of alternative solutions. The air temperature was within the required limits before the reconstruction, situation remains also after current renovation.

In conditions of complex architectural requirements, the issue of relative humidity is only solved if there are obvious problems with moistness and mould, as well as in certain types of premises, for example, in a library or archive.

As a result of the work, it was revealed that using natural measures and the methods existing prior to reconstruction, the indoor climate of proper normative quality cannot be provided in most of the building and in most types of premises. In some rooms, where:



- requirements for the indoor climate are not critical and where non-interference is allowed in terms of the construction of new HVAC systems,
- in rooms where air quality and the necessary climatic parameters are fully provided,
- in rooms where it is impossible to install new HVAC systems without affecting the design and internal architecture,

a detailed analysis is required, as well as monitoring and elimination/reduction of undesirable associated phenomena, such as noise and draughts, for example.

# KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

## ***Standardid ja seadusandlus***

- [1] EVS-EN 15757:2010 Conservation of Cultural Property - Specifications for temperature and relative humidity to limit climate-induced mechanical damage in organic hygroscopic materials
- [2] EVS-EN 15759-1:2011 Conservation of cultural property - Indoor climate - Part 1: Guidelines for heating churches, chapels and other places of worship
- [3] EVS-EN 15759-2:2018 Conservation of cultural heritage - Indoor climate - Part 2: Ventilation management for the protection of cultural heritage buildings and collections
- [4] Muinsuskaitse seadus. 01. aprill 2002, Riigi Teataja 2002. Kättesaadav: [www.riigiteataja.ee](http://www.riigiteataja.ee) (30.10.2019)
- [5] EVS 812-2:2014 Ehitiste tuleohutus. Osa 2: Ventilatsioonisüsteemid. Eesti Standardikeskus, 2019
- [6] EVS 16798-3:2017 Mitmeeluhoonete ventilatsioon. Üldnõuded ventilatsiooni- ja ruumiõhu konditsioneerimissüsteemidele, koos lisaga EVS 906:2018. Eesti Standardikeskus, 2019
- [7] EVS-EN 1264-2:2008 ja 1264-3:2009 Veepõhised piirdesised kütte- ja jahutussüsteemid, 2019
- [8] EVS-EN ISO 13788:2012 Hoone elementide ja piirdetarindite soojus- ja niiskustehniline toimivus. Kriitilise pinnaniiskuse ja elemendisese kondenseerumise vältimine. Arvutusmeetodid
- [9] DIN 4108-3: "Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz; Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung", Beuth-Verlag, Berlin, 07/2001

## ***Raamatud ja muud monograafiad***

- [10] Developments in climate control of historic buildings. Ralf Kilian, Tomaš Vyhlidal, Tor Broström, 2010
- [11] Sisekliima Tallinna Püha Neitsi Maarja Piiskoplikus Toomkirikus. Leila Malva, Targo Kalamees, Tallinn 2008
- [12] Church Heating: A Balance between Conservation and Thermal Comfort. Dario Camuffo and Antonio della Valle, 2007
- [13] Minimal invasive ventilations systems with heat recovery for historic buildings, K.Längle, R.Pfluger, 2013

- [14] Ülevaade mõisakoolide ventilatsiooni lahendustest. Ins. Ants Viilup, arh. Nele Rohtla, muinsuskaitaja Jaan Vali. 09.12.2011
- [15] Hoonete energiatarve ja sisekliima, E.Abel, H.Voll, 2011
- [16] Hoonete küte, T.-A.Kõiv, A.Rant, 2012
- [17] Mikko Kylliäinen. Hoonete akustiline projekteerimine: akustika alused. Tallinn, ET Infokeskus, 2009
- [18] Alpo Halme, Olli Seppänen. Ilmastoinnin äänitehnika, Suomen LVI-liitto, 2002
- [19] Teet Tark. Ventilatsiooni müra. TTÜ loengu materjal, 2018
- [20] Ehitusfüüsika I/II. Targo Kalamees, Tallinna Tehnikaülikool, 2009
- [21] Grunewald, J., Nicolai, A. Delphin 5 User manual and program reference. Technische Universität Dresden, 2005 – 2015
- [22] Muinsuskaitse all oleva koolimaja tellistest välisseina seespoolse lisasoojustuse soojus- ja niiskustehnilise toimivuse uuring. P.Klõšeiko, E.Arumägi, T.Kalamees, 2013
- [23] Kalamees, T., Vinha, J. 2004. Estonian climate analysis for selecting moisture reference years for hygrothermal calculations. Journal for Thermal Envelope & Building Science, 27(3).
- [24] Künzel, H. M. 2011. Bauphysik der Innendämmung und Bewertungsverfahren, Proc. Of the 1. Internationaler Innendämmkongress. 2011
- [25] Viitanen, H., Ojanen, T. 2007. Improved model to predict mold growth in building materials, Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings X, Florida

### **Internetiallikad**

- [26] Fasaadide hingamise arvutus, A. Piirfeld. Kättesaadav: <http://www.tarmatrade.ee/wp-content/uploads/2017/04/FASSAADIDE-HINGAMISE-ARVUTUS.pdf> (30.10.2019)
- [27] Vallox ventilatsiooniagregaatide tehnilised andmed, paigaldus- ja kasutusjuhendid. Kättesaadav: [www.vallox.com/en/products/vallox\\_ventilation\\_units.html](http://www.vallox.com/en/products/vallox_ventilation_units.html) (30.10.2019)
- [28] Fläktwoods ventilatsioonisüsteemide tooted. Lõpuelemendid, reguleer- ja tuletõkkeklapid, mürasummitid. Kättesaadav: [www.flaktgroup.com/en/productlist](http://www.flaktgroup.com/en/productlist) (30.10.2019)
- [29] Uponor põrandkütte- ja seinküttesüsteemide tehnilised andmed ja paigaldusjuhendid. Kättesaadav: <https://www.uponor.ee/tooted/porandakute-ja-jahutus> (30.10.2019)

- [30] System KAN-Therm seinküttesüsteemide tehnilised andmed ja paigaldusjuhendid. Kättesaadav: <http://ee.kan-therm.com/kan/upload/wall-guidebook-kan-therm-ee.pdf>
- [31] KALOR 3 malmradiaatorite ja tarvikute tehnilised andmed, paigaldus- ja kasutusjuhendid. Kättesaadav: [www.viadrus.cz](http://www.viadrus.cz) (30.10.2019)
- [32] Korstnate pühkimine ja renoveerimine. Kättesaadav: [www.korstenpuhtaks.ee/furanflex](http://www.korstenpuhtaks.ee/furanflex) (11.04.2019)
- [33] Korstnate sisehülssid. Kättesaadav: [www.cerbos.ee/et/korstnad/727-sisehulss-loorivooder-furanflex.html](http://www.cerbos.ee/et/korstnad/727-sisehulss-loorivooder-furanflex.html) (30.10.2019)
- [34] The Engineering ToolBox. Noise generation, adding decibels; humidifying air by adding water; human moisture and heat gain; CO<sub>2</sub> concentration calculator. Kättesaadav: <http://www.engineeringtoolbox.com> (30.10.2019)
- [35] Hobo MX CO<sub>2</sub> logger MX1102, tehnilised andmed ja kasutusjuhend. Kättesaadav: [www.onsetcomp.com](http://www.onsetcomp.com) (30.10.2019)

## **KASUTATUD TARKVARA LOETELU**

### ***Joonistamine ja arvutused***

- [1] Autodesk AutoCAD 2016
- [2] Progman MagiCAD 2016.11
- [3] Sankom KAN C.O. 6.0
- [4] Microsoft Excel ja VBA
- [5] Halton HIT design
- [6] Delphin 6.0 ja PostProc 2.2
- [7] HTflux 1.10

**LISAD**

## **Lisa 1. Mudeldamine ja sellega seotud probleemid**

Seoses ajalooliste hoonete keerulise arhitektuuriga on lisaks projektidokumentatsiooni koostamisele "põhiprojekti" või "tööprojekti" staadium äärmiselt kasulik ka BIM tehnoloogiate kasutamine – hoone kõikide oluliste elementide ja süsteemide täisväärtuslik kolmemõõtmeline visualiseerimine. Antud hetkel ei rakendata nimetatud tehnoloogiat just sageli ning see on aktuaalne kõikide hoonetüüpide projekteerimisel. Põhjustena võib välja tuua täieliku tehnilise ja juriidilise standardiseerimise puudumine modelleerimise sfääris ehitusvaldkonnas, erinev BIM juurutamise tase projekti kaasatud ettevõtetes, oluline väljatöötatud kogemuse puudumine ning finantspõhjused.

Antud hoone KV projekti väljatöötamisel teostati kütte- ja ventilatsioonisüsteemid 3Ds, mille aluseks oli 2D arhitektuur, kõik ülejäänud insenerisüsteemid teostati samuti 2Ds. Antud kombinatsioon soodustab vaid osaliselt keeruka arhitektuuri raames paljude insenerisõlmede realiseerimise ja kasutamise mõistmist ja visualiseerimist, arvestades seejuures ka hoone tegelikku tehnilist olukorda.

## Lisa 2. Lähteandmed objekti projekteerimiseks

- Arhitektuurne projekt, AB Katrin Etverk OÜ, **töö nr. 1R-2017**
- Tellija (Legatex OÜ) poolne lähteülesanne
- Pakkumise kutse dokument, hoone tehnilisega kirjeldusega (19.01.2017)
- Eskiisprojekt, ARC Projekt OÜ, **töö nr. 2016-020**
- Muinsuskaitse eritingimused Kaagjärve-Mäemõisa peahoone restaureerimiseks, OÜ Marksi Projekt **töö nr. T 025-06**, koostaja M.Kallaste
- Ventilatsioonisüsteemide Tellija ettepanek (eskiis)
- Ventilatsioonikanalite kaardistamine, Aero Grupp OÜ
- Inventariseerimine, Kultuurimälestiste RPI **töö nr. M-954, 4.IX 1984**
- Kaagjärve mõisa peahoone ja teenijatemaja ehitise ülevaatus aruanne, Ehitusagentuur OÜ, **töö nr. 13-06-EE/02**

### Lisa 3. CO<sub>2</sub> mõõdistuste tulemused ja arvutus

Tabel 9.1 Mõõdistused saalis 109

Olukord	Nr.	Date Time, GMT +0200	Temp., °C	Rh, %	CO <sub>2</sub> , ppm	DewPt, °C
Peaaegu tühi saal	1	2017-11-14, 10:26:15	24,67	26,37	520,00	4,07
	2	2017-11-14, 10:31:15	24,53	26,25	518,00	3,92
	3	2017-11-14, 10:36:15	24,44	26,20	539,00	3,81
	4	2017-11-14, 10:41:15	24,46	26,08	532,00	3,76
	5	2017-11-14, 10:46:15	24,51	26,71	542,00	4,15
	6	2017-11-14, 10:51:15	24,99	28,59	557,00	5,54
	7	2017-11-14, 10:56:15	24,33	27,80	596,00	4,54
Koosolek, saalis 18 inimest	8	2017-11-14, 11:01:15	24,19	26,42	670,00	3,72
	9	2017-11-14, 11:06:15	24,30	28,42	729,00	4,83
	10	2017-11-14, 11:11:15	24,53	28,13	931,00	4,88
	11	2017-11-14, 11:16:15	24,73	29,44	1022,00	5,71
	12	2017-11-14, 11:21:15	25,04	29,81	1030,00	6,15
	13	2017-11-14, 11:26:15	25,16	29,00	1047,00	5,86
	14	2017-11-14, 11:31:15	25,33	30,18	1024,00	6,58
	15	2017-11-14, 11:36:15	25,23	32,27	1115,00	7,47
	16	2017-11-14, 11:41:15	25,38	30,35	1040,00	6,71
	17	2017-11-14, 11:46:15	24,95	31,87	1137,00	7,04
	18	2017-11-14, 11:51:15	25,02	33,30	1246,00	7,75
	19	2017-11-14, 11:56:15	23,91	37,87	1363,00	8,69
	20	2017-11-14, 12:01:15	24,10	38,82	1421,00	9,23
Koosolek, tuulutus ca 15 min	21	2017-11-14, 12:06:15	23,16	37,82	1195,00	8,01
	22	2017-11-14, 12:11:15	22,92	35,89	1054,00	7,03
	23	2017-11-14, 12:16:15	20,73	31,72	997,00	3,30
	24	2017-11-14, 12:21:15	19,66	32,43	977,00	2,68
Koosolek, saalis 18 inimest	25	2017-11-14, 12:26:15	19,59	32,43	972,00	2,09
	26	2017-11-14, 12:31:15	19,60	31,13	970,00	2,09
	27	2017-11-14, 12:36:15	20,84	30,38	962,00	2,79
	28	2017-11-14, 12:41:15	20,82	30,77	989,00	2,95
	29	2017-11-14, 12:46:15	21,82	34,23	1050,00	5,37
	30	2017-11-14, 12:51:15	22,82	36,67	1130,00	7,26
Saali lisaks teenindab (läbi kõrval asuvate sanruumide) olemasolev mehaaniline väljatõmbe ventilatsioon, ca 70l/s.						



Tabel 9.2 Mõõdistused majutusruumis 116

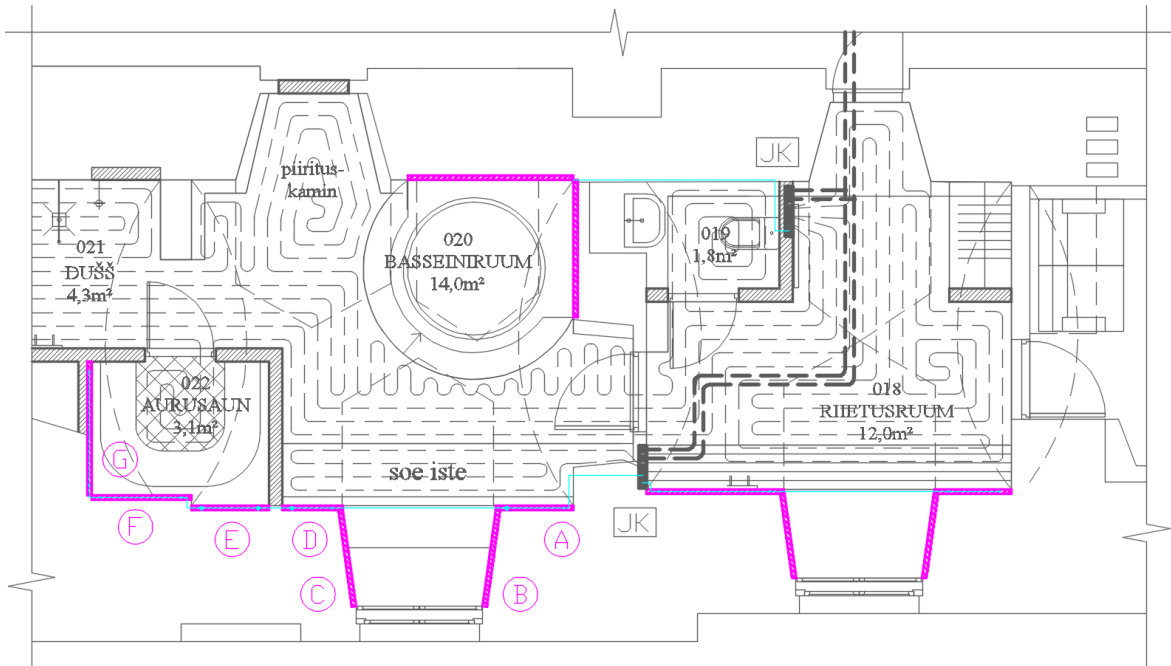
Olukord	Nr.	Date Time, GMT +0200	Temp., °C	Rh, %	CO <sub>2</sub> , ppm	DewPt, °C
Tühi ruum	1	2017-11-14, 13:31:15	23,57	35,04	484,00	7,23
	2	2017-11-14, 13:36:15	22,32	33,96	461,00	5,67
	3	2017-11-14, 13:41:15	22,11	36,38	465,00	6,48
	4	2017-11-14, 13:46:15	22,28	36,90	505,00	6,84
Ruumis 4 inimest	5	2017-11-14, 13:51:15	22,51	34,95	563,00	6,25
	6	2017-11-14, 13:56:15	22,75	33,84	638,00	6,00
	7	2017-11-14, 14:01:15	23,53	33,51	710,00	6,54
	8	2017-11-14, 14:06:15	23,60	34,24	794,00	6,91
	9	2017-11-14, 14:11:15	23,90	34,60	861,00	7,33
	10	2017-11-14, 14:16:15	23,65	34,04	937,00	6,87
	11	2017-11-14, 14:21:15	24,01	33,54	930,00	6,97
	12	2017-11-14, 14:26:15	23,99	34,20	983,00	7,24
	13	2017-11-14, 14:31:15	24,16	34,35	1061,00	7,45
	14	2017-11-14, 14:36:15	24,10	33,90	1170,00	7,21
Ruumis 2 inimest	15	2017-11-14, 14:41:15	23,82	33,14	1123,00	6,63
	16	2017-11-14, 14:46:15	23,92	33,61	1099,00	6,92
	17	2017-11-14, 14:51:15	23,06	33,72	1076,00	6,22
	18	2017-11-14, 14:56:15	23,10	33,89	1060,00	6,33
<i>Ruumis on loomulik ventilatsioon šahtilõõri kaudu, õhuhulk on teadmata</i>						

Tabel 10 Vähimruutude meetodi tulemused, ruum 116

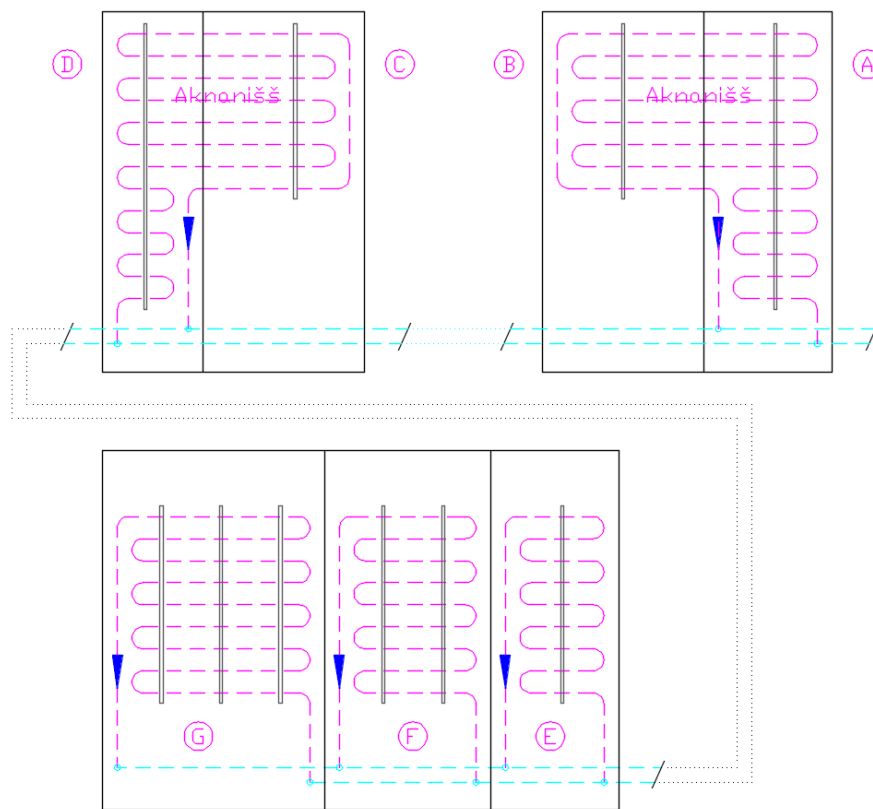
Kellaeg	Mõõdetud CO <sub>2</sub> tase, ppm	Aeg, h	Mudeli CO <sub>2</sub> tase, ppm	Standardhälbe ruut
13:46:15	505,00	0,000	505	0
13:51:15	563,00	0,083	577	208
13:56:15	638,00	0,167	647	89
14:01:15	710,00	0,250	715	27
14:06:15	794,00	0,333	781	178
14:11:15	861,00	0,417	844	290
14:16:15	937,00	0,500	905	1011
14:21:15	930,00	0,583	964	1184
14:26:15	983,00	0,667	1022	1496
14:31:15	1061,00	0,750	1077	257
14:36:15	1170,00	0,833	1131	1553

$$\sum(C_{\text{mõõdetud}} - C_{\text{mudel}})^2 = 6294$$

## Lisa 4. Seinkütte plaan ja skeem



Joon. 38 Kelder, seinkütte plaan



Joon. 39 Kelder, seinkütte torustik, lõige

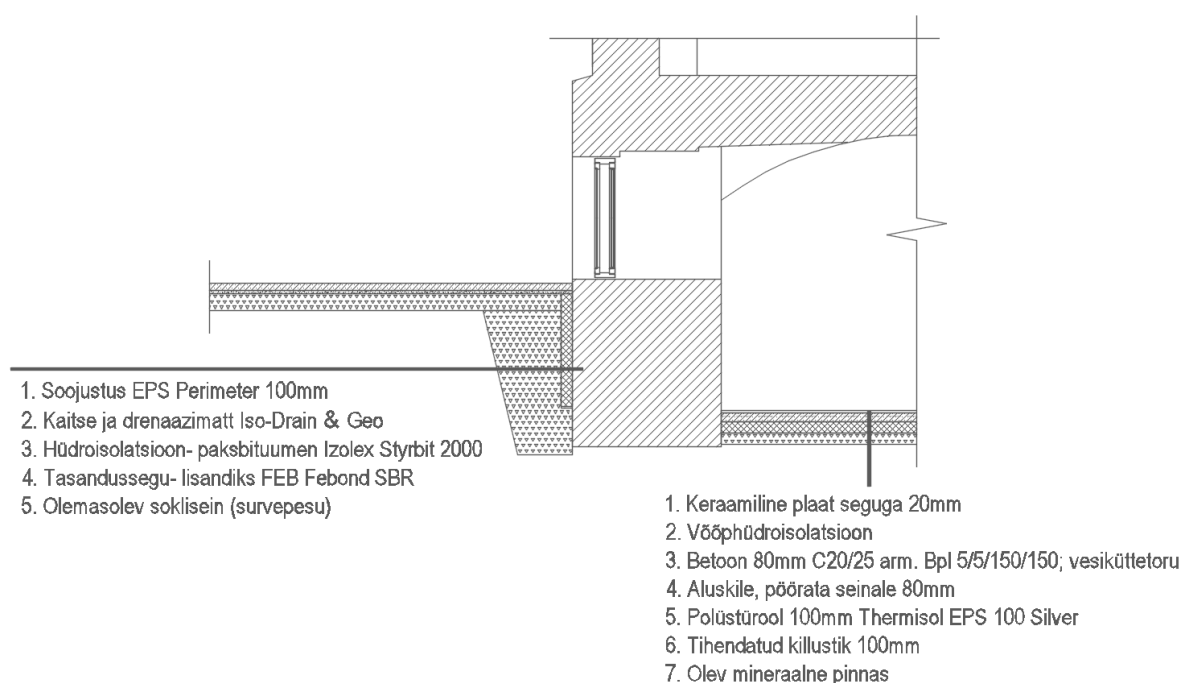
## Lisa 5. Seinkütte K<sub>H</sub> konstandi väärtused

$\phi$	R <sub>y,B</sub>	K <sub>H</sub>																								
		0,00					0,05					0,10					0,15									
		0,025	0,045	0,065	0,085	0,105	0,025	0,045	0,065	0,085	0,105	0,025	0,045	0,065	0,085	0,105	0,025	0,045	0,065	0,085	0,105					
	$s_u$																									
	B																									
<b>12×2,0</b>	0,10	8,03	7,10	6,29	5,56	5,67	5,14	4,66	4,23	4,35	4,03	3,73	3,46	3,52	3,30	3,09	2,89	2,73	2,58	2,43	2,29	2,92	2,76	2,62	2,47	2,33
	0,15	7,10	6,35	5,69	5,09	5,13	4,68	4,28	3,91	3,99	3,72	3,48	3,24	3,27	3,08	2,90	2,73	2,58	2,43	2,29	2,15	2,88	2,72	2,57	2,42	2,27
	0,20	6,20	5,62	5,08	4,60	4,59	4,24	3,91	3,61	3,65	3,43	3,22	3,03	3,03	2,87	2,72	2,58	2,43	2,29	2,15	2,01	2,76	2,60	2,45	2,30	2,15
	0,25	5,39	4,94	4,52	4,14	4,10	3,82	3,56	3,31	3,33	3,15	2,98	2,81	2,80	2,67	2,55	2,43	2,29	2,15	2,01	1,87	2,62	2,46	2,31	2,16	2,01
	0,30	4,68	4,33	4,01	3,71	3,66	3,44	3,24	3,05	3,03	2,89	2,75	2,63	2,59	2,48	2,38	2,29	2,15	2,01	1,87	1,73	2,51	2,35	2,20	2,05	1,91
	0,10	8,14	7,21	6,38	5,64	5,74	5,20	4,72	4,28	4,40	4,08	3,77	3,50	3,56	3,33	3,12	2,92	2,76	2,62	2,47	2,33	3,09	2,93	2,77	2,61	2,45
	0,15	7,24	6,48	5,80	5,19	5,21	4,76	4,35	3,98	4,05	3,78	3,53	3,29	3,31	3,12	2,93	2,76	2,62	2,47	2,33	2,19	2,94	2,78	2,62	2,46	2,30
<b>14×2,0</b>	0,20	6,34	5,74	5,20	4,71	4,68	4,32	3,99	3,68	3,71	3,49	3,28	3,08	3,08	2,92	2,76	2,62	2,47	2,33	2,19	2,05	2,81	2,65	2,49	2,33	2,17
	0,25	5,53	5,06	4,63	4,24	4,19	3,90	3,64	3,39	3,39	3,21	3,03	2,87	2,85	2,72	2,59	2,47	2,33	2,19	2,05	1,91	2,70	2,54	2,38	2,22	2,06
	0,30	4,80	4,45	4,11	3,81	3,75	3,52	3,32	3,12	3,09	2,95	2,81	2,68	2,64	2,53	2,43	2,33	2,23	2,13	2,03	1,93	2,60	2,44	2,28	2,12	1,96
	0,10	8,26	7,31	6,47	5,72	5,81	5,27	4,78	4,34	4,45	4,12	3,82	3,54	3,59	3,36	3,15	2,94	2,80	2,66	2,52	2,38	3,04	2,88	2,72	2,56	2,40
	0,15	7,38	6,61	5,92	5,29	5,30	4,84	4,43	4,05	4,10	3,83	3,58	3,34	3,35	3,15	2,97	2,80	2,66	2,52	2,38	2,24	2,99	2,83	2,67	2,51	2,35
<b>16×2,0</b>	0,20	6,49	5,81	5,32	4,81	4,78	4,41	4,07	3,75	3,78	3,55	3,34	3,14	3,12	2,96	2,80	2,66	2,52	2,38	2,24	2,10	2,86	2,70	2,54	2,38	2,22
	0,25	5,66	5,19	4,75	4,35	4,28	3,99	3,72	3,46	3,46	3,27	3,09	2,92	2,90	2,76	2,63	2,51	2,37	2,23	2,09	1,95	2,74	2,58	2,42	2,26	2,10
	0,30	4,93	4,56	4,22	3,91	3,84	3,61	3,40	3,19	3,16	3,02	2,88	2,74	2,69	2,58	2,48	2,37	2,27	2,17	2,07	1,97	2,63	2,47	2,31	2,15	1,99
	0,10	8,38	7,41	6,56	5,81	5,88	5,33	4,84	4,39	4,50	4,16	3,86	3,57	3,62	3,39	3,17	2,97	2,83	2,69	2,55	2,41	3,09	2,93	2,77	2,61	2,45
	0,15	7,53	6,74	6,03	5,40	5,39	4,93	4,50	4,11	4,16	3,89	3,63	3,39	3,39	3,19	3,01	2,83	2,69	2,55	2,41	2,27	2,94	2,78	2,62	2,46	2,30
<b>18×2,0</b>	0,20	6,64	6,01	5,44	4,92	4,87	4,49	4,15	3,83	3,84	3,61	3,39	3,19	3,17	3,00	2,85	2,70	2,56	2,42	2,28	2,14	2,81	2,65	2,49	2,33	2,17
	0,25	5,80	5,31	4,87	4,46	4,37	4,08	3,80	3,54	3,53	3,34	3,15	2,98	2,95	2,81	2,68	2,55	2,41	2,27	2,13	1,99	2,74	2,58	2,42	2,26	2,10
	0,30	5,06	4,68	4,33	4,01	3,93	3,70	3,48	3,27	3,23	3,08	2,94	2,80	2,74	2,63	2,52	2,42	2,32	2,22	2,12	2,02	2,63	2,47	2,31	2,15	1,99
	0,10	8,50	7,52	6,66	5,89	5,95	5,40	4,90	4,44	4,55	4,21	3,90	3,61	3,65	3,42	3,20	3,00	2,86	2,72	2,58	2,44	3,04	2,88	2,72	2,56	2,40
	0,15	7,68	6,87	6,15	5,51	5,48	5,01	4,58	4,18	4,22	3,94	3,68	3,43	3,43	3,23	3,04	2,86	2,72	2,58	2,44	2,30	2,99	2,83	2,67	2,51	2,35
<b>20×2,0</b>	0,20	6,79	6,14	5,56	5,04	4,97	4,58	4,23	3,90	3,91	3,67	3,45	3,24	3,22	3,05	2,89	2,74	2,60	2,46	2,32	2,18	2,86	2,70	2,54	2,38	2,22
	0,25	5,95	5,44	4,99	4,57	4,47	4,17	3,88	3,62	3,60	3,40	3,21	3,04	3,00	2,86	2,72	2,60	2,46	2,32	2,18	2,04	2,79	2,63	2,47	2,31	2,15
	0,30	5,19	4,80	4,45	4,11	4,02	3,79	3,56	3,35	3,30	3,15	3,00	2,86	2,79	2,68	2,57	2,47	2,37	2,27	2,17	2,07	2,68	2,52	2,36	2,20	2,04

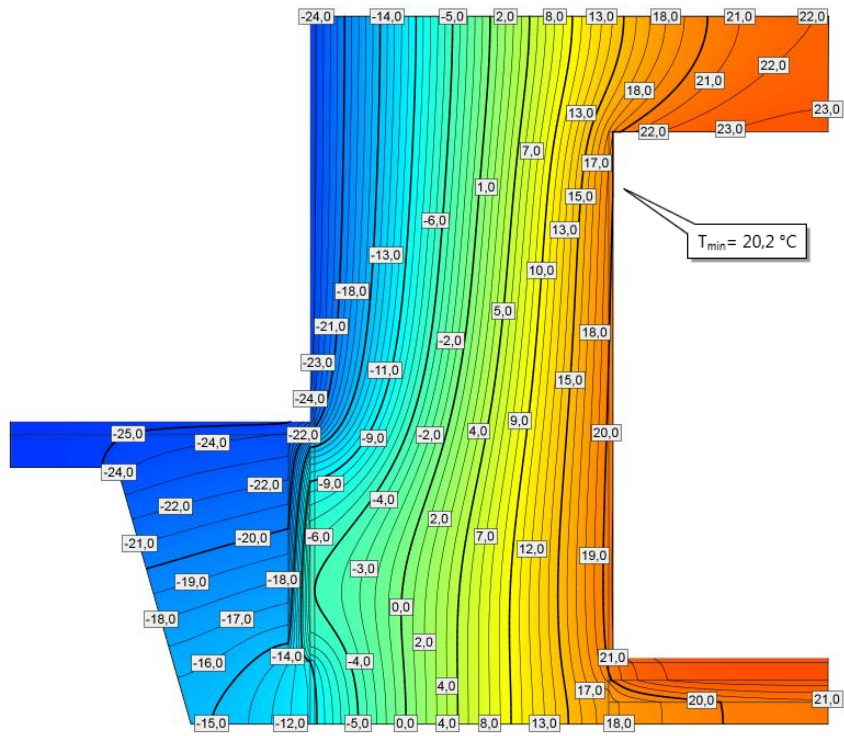
## Lisa 6. Keldrikorruse seinad. T simulatsioon

**Soojusvoogude simulatsioon ja temperatuurid.** Töö raames teostati simulatsioone (tarkvaraga HTflux), teoreetiliste tulemuste kontrollimiseks ja visualiseerimiseks. Simulatsioon oli tehtud keldrikorruse väliskonstruktsioonidele, niisketes ruumides, madala Rh ruumides, ruumides akendega ja ilma.

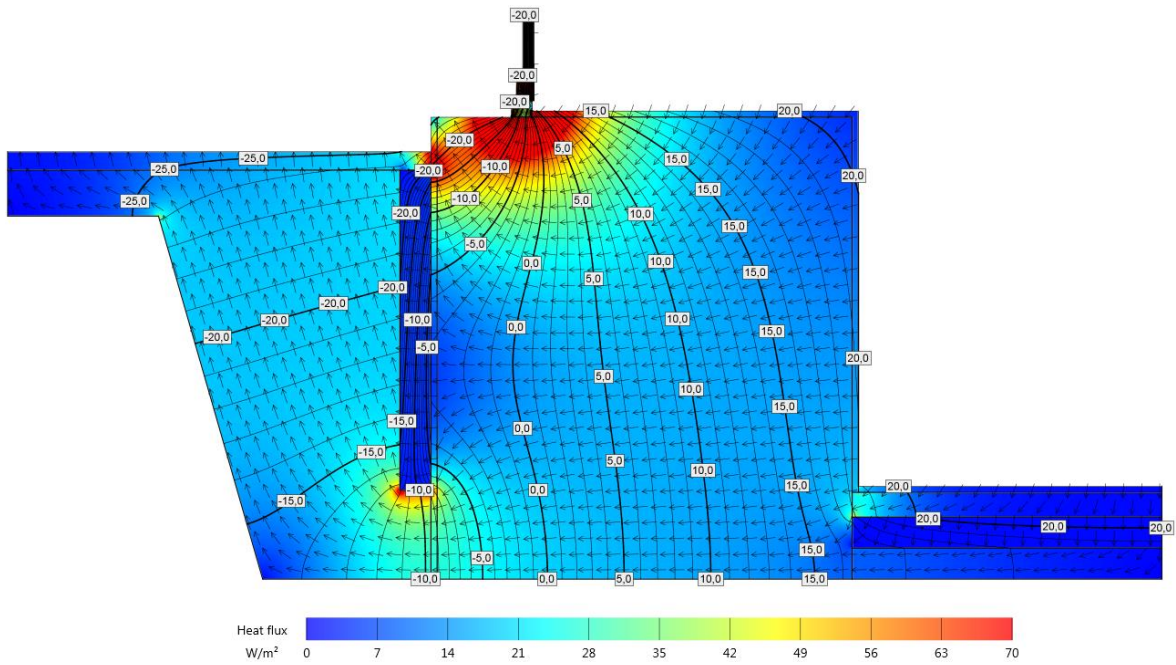
Õhu parameetrid simulatsioonis: niiske ruumi sees  $T=26^{\circ}\text{C}$ ;  $R_{si}=0,13\text{m}^2\text{K/W}$ ;  $R_h=80\%$ ; tavalise ruumi sees  $T=21^{\circ}\text{C}$ ;  $R_{si}=0,13\text{m}^2\text{K/W}$  [16];  $R_h=35\%$ ; hoone väljas  $T=-26^{\circ}\text{C}$ ;  $R_{se}=0,04\text{m}^2\text{K/W}$  [16];  $R_h=90\%$ .



Joon. 40 Kelder, seinakonstruktsioon aknaga, arh. projekt 1R-2017



Joon. 41a T simulatsioon ja pinna temperatuur keldriruumis ilma aknata.



Joon. 41b Kelder, seinakonstruktsioon aknaga, külmasildade visualiseerimine

## Lisa 7. Hoone tehnilised näitajad

Hoone funktsioon MKM määruse nr.10 "Ehitise kasutamise otstarvete loetelu" kohaselt	
12111	hotell, motell või külslistemaja
12121	puhkeküla või puhkelaagri majutushoone
12132	kohvik, baar või söökla
11212	kahe korteriga elamu

Gabariitmõõtmed ja pindalad	
Pikkus	51,7m
Laius	16,7m
Kõrgus	18,9m
Sügavus	0,7m
Hoone alune pindala	755m <sup>2</sup>

Hoone tuleohutusklass TP-2

Soojuskoormused ja soojuskandja parameetrid		
Radiaatorküte, kalorifeerküte	18kW	70/50°C
Põrand- ja seinküte	12kW	38/33°C
Soe tarbevesi	64kW	5/55°C
Kokku	160kW	

Hoone soojusallikas on katlamaja pelletkatelde baasil. Kahe katla soojusväljund on ca 160kW (olemasolevad katlad, 100kW + 60kW). Alternatiivsed soojusallikad puuduvad.

Välispiirete soojusläbivused	
Välissein soklikorrusel VS-1	0,58 W/m <sup>2</sup> K
Välissein soklikorrusel VS-2 (uus)	0,15 W/m <sup>2</sup> K
Välissein pealmaakorrustel VS-3	0,58 W/m <sup>2</sup> K
Välissein pealmaakorrustel VS-4 (uus)	0,15 W/m <sup>2</sup> K
Välissein katusekorrusel VS-5 (uus)	0,20 W/m <sup>2</sup> K
Põrand pinnasel	0,20 W/m <sup>2</sup> K
Katuslagi KL-1	0,12 W/m <sup>2</sup> K
Katuslagi KL-2	0,14 W/m <sup>2</sup> K
Aknad ja välisüksed	1,60 W/m <sup>2</sup> K
Uued aknad	1,10 W/m <sup>2</sup> K

## Lisa 8. Kraadpäevad Valgemaal, 2017.a

tasakaalu t <sub>B</sub>	jaanuar	veebr.	märts	aprill	mai	juuni	juuli	august	sept.	okt.	nov.	dets.	aasta
1	140	119	16	10	0	0	0	0	0	14	7	29	335
2	169	142	30	17	0	0	0	0	0	22	18	52	451
3	199	168	51	25	3	0	0	0	0	33	32	81	592
4	229	195	78	40	6	0	0	0	0	44	50	111	752
5	259	222	107	59	10	0	0	0	0	56	76	141	930
6	289	250	137	82	15	0	0	0	0	68	103	172	1117
7	320	278	168	109	22	0	0	0	1	83	132	203	1317
8	351	306	199	137	29	1	0	0	2	102	162	234	1524
9	382	334	230	165	39	3	0	0	5	125	192	265	1740
10	413	362	261	193	51	5	0	0	8	152	222	296	1963
11	444	390	292	222	65	10	0	0	15	181	252	327	2198
12	475	418	323	252	80	15	0	1	27	212	282	358	2443
13	506	446	354	282	99	22	1	4	46	243	312	389	2706
14	537	474	385	312	125	35	5	11	68	274	342	420	2990
15	568	502	416	342	151	53	11	20	94	305	372	451	3287
16	599	530	447	372	178	75	24	32	122	336	402	482	3599
17	630	558	478	402	206	100	42	47	150	367	432	513	3925
18	661	586	509	432	235	127	66	64	180	398	462	544	4265
19	692	614	540	462	265	156	95	88	210	429	492	575	4618
20	723	642	571	492	296	186	125	116	240	460	522	606	4980
21	754	670	602	522	327	216	156	146	270	491	552	637	5343

## Lisa 9. Multifunktsionaal saali akustiline arvutus

Tabel 11.1 Süsteemi 301SP müraarvutus

		Oktaavrea kesksagedused, Hz									
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
Nr.	Nimetus	dB								dB(A)	Viide
1	Sissepuhkeõhu ühendus	73	70	72	64	63	61	55	54	69	proj.
2	Müra ümbritsevasse keskkonda; seade 301SPVT	57	61	56	42	38	35	28	32	50	proj.
3	Müra ümbritsevasse keskkonda; seade 302SPVT	59	61	59	44	40	38	31	37	52	proj.
4	Müra ümbritsevasse keskkonda, kokku	61	64	61	46	42	40	33	38	54	(12)
5	S' - ruumis paikneva õhutoru, m2	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9		proj.
6	R' - kanali sein (0,5mm) müraisolatsioon	3	6	11	17	23	29	35			[18]
7	Ventkambrist õhukanalisse	52	69	60	40	30	21	8	49	56	[19]
8	Helivõimsuse tase kokku, peale tehnoruumi	73	72	72	64	63	61	55	55	69	(12)
9	Mürasummuti 1	helivõimsuse tase (omamüra)									proj.
10		sumbuvus									
11	Helivõimsuse tase kokku, peale summuti 1		70	69	65	44	37	31	35	38	
12	Mürasummuti 2	helivõimsuse tase (omamüra)									proj.
13		sumbuvus									proj.
14	Helivõimsuse tase kokku, peale summuti 2		67	66	58	24	12	4	15	21	53
15	Tuletõkke klapp 1	helivõimsuse tase									proj.
		sumbuvus									proj.
16	Helivõimsuse tase kokku, peale tuletõkkeklappi 1		67	66	58	25	19	19	16	21	
17	Sumbuvus õhukanalites		1	1	1	1	2	2	2	2	[19]
18	Sumbuvus põlvedes		0	0	0	5	10	15	15	15	[19]
19	Helivõimsuse tase kokku, enne tuletõkkeklappi 2		66	65	57	18	7	2	0	4	52
20	Tuletõkke klapp 2	helivõimsuse tase									proj.
		sumbuvus									proj.
21	Helivõimsuse tase kokku, enne lõppelemendi		66	65	57	21	18	19	10	6	
22	Õhujaotaja (kangast kanal)	helivõimsuse tase									proj.
		sumbuvus									proj.
23	Kokku		<b>62</b>	<b>44</b>	<b>32</b>	<b>19</b>	<b>17</b>	<b>8</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>37,2</b>
24	Sumbuvus ruumis		11,8	11,8	11,8	11,8	11,8	11,8	11,8		(13.1)
25	Ruumis		<b>51</b>	<b>33</b>	<b>21</b>	<b>7</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>25,4</b>
26	A-filter		26	16	9	3	0	1	1	1	[18]
27	Sumbuvus õhukanalites	d=315								[19]	
		dB/jm	0,06	0,10	0,10	0,15	0,20	0,20	0,20		0,20
		m	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9		9,9
		dB	0,6	1,0	1,0	1,5	2,0	2,0	2,0	2,0	
28	Sumbuvus põlvedes	d=315								[19]	
		dB/tk	0	0	0	1	2	3	3		3
		tk	5	5	5	5	5	5	5		5
		dB	0	0	0	5	10	15	15	15	



Tabel 11.2 Süsteemi 301VT müraarvutus

Oktaavrea kesksagedused, Hz							
63	125	250	500	1000	2000	4000	8000

Nr.	Nimetus	dB								dB(A)	Viide	
		70	74	61	53	48	40	35	28			
1	Väljatõmbeõhu ühendus	70	74	61	53	48	40	35	28	60	proj.	
2	Müra ümbritsevasse keskkonda; seade 301SPVT	57	61	56	42	38	35	28	32	50	proj.	
3	Müra ümbritsevasse keskkonda; seade 302SPVT	59	61	59	44	40	38	31	37	52	proj.	
4	Müra ümbritsevasse keskkonda, kokku	61	64	61	46	42	40	33	38	54	(12)	
5	S' - ruumis paikneva õhutoru, m2	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8		proj.	
6	R' - kanali sein (0,5mm) müraisolatsioon	3	6	11	17	23	29	35			[18]	
7	Ventkambrist õhukanalisse	51	68	60	39	29	21	8	48	55	[19]	
8	Tuletõkke klapp	helivõimsuse tase	27	24	19	17	18	19	10	0		proj.
		sumbuvus	0	0	0	0	0	0	0	0		proj.
9	Helivõimsuse tase kokku, peale tehno ruumi	70	75	63	53	48	40	35	48	61	(12)	
10	Müra summuti 1	helivõimsuse tase (omamüra)	12	4	0	2	3	0	0	0		proj.
		sumbuvus	3	3	7	20	26	30	20	17		proj.
11	Helivõimsuse tase kokku, peale summuti 1	67	72	56	33	22	10	15	31			
12	Müra summuti 2	helivõimsuse tase (omamüra)	12	4	0	2	3	0	0	0		proj.
		sumbuvus	3	3	7	20	26	30	20	17		proj.
13	Helivõimsuse tase kokku, peale summuti 2	64	69	49	13	3	0	1	14			
14	Sumbuvus õhukanalites	0	0	0	1	1	1	1	1		[19]	
15	Sumbuvus hargnemistes	5	5	6	7	7	7	7	7			
16	Sumbuvus põlvedes	0	0	0	2	4	6	6	6		[19]	
17	Helivõimsuse tase kokku, enne lõppelemendi	58	63	43	4	0	0	0	1	47		
18	Õhujaotaja (kangast kanal)	helivõimsuse tase	0	25	23	21	12	8	3	0		proj.
		sumbuvus	0	4	6	6	8	9	9	10		proj.
19	Kokku	58	59	37	21	12	8	3	0	43,5		
20	Sumbuvus ruumis	11,8	11,8	11,8	11,8	11,8	11,8	11,8	11,8		(13.1)	
21	Ruumis	47	47	25	9	0	0	0	0	31,7		
22	A-filter	26	16	9	3	0	1	1	1		[18]	

23	Sumbuvus õhukanalites	d=315									[19]
		dB/jm	0,06	0,10	0,10	0,15	0,20	0,20	0,20	0,20	
		m	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	
24	Sumbuvus õhukanalites	d=200									[19]
		dB/jm	0,06	0,10	0,10	0,15	0,20	0,20	0,20	0,20	
		m	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	
25	Sumbuvus hargnemistes (kõrvale)	d=315/200									[19]
		dB/tk	5,4	5,4	6,0	6,6	6,9	6,9	6,9	6,9	
		tk	1	1	1	1	1	1	1	1	
26	Sumbuvus põlvedes	d=315									[19]
		dB/tk	0	0	0	1	2	3	3	3	
		tk	2	2	2	2	2	2	2	2	
27	Sumbuvus põlvedes	d=200									[19]
		dB/tk	0	0	0	1	2	3	3	3	
		tk	4	4	4	4	4	4	4	4	