



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND  
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**PÕRANDJAHUTUSE KASUTAMINE  
SUVEPERIOODIL ELURUUMIDE  
ÜLEKUUMENEMISE VÄLTIMISEKS**

**THE USAGE OF RADIANT FLOOR COOLING TO PREVENT  
OVERHEATING DURING SUMMER IN RESIDENTIAL  
BUILDINGS**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Elisa Sein

Üliõpilaskood 122543EAKI

Juhendaja: Martin Kiil, 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.

"....." ..... 2020

Autor: .....  
/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

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

Juhendaja: .....  
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees .....  
/ nimi ja allkiri /

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

Mina, Elisa Sein (*autori nimi*) (sünnikuupäev: 15.12.1992)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

PÕRANDJAHUTUSE KASUTAMINE SUVEPERIOODIL ELURUUMIDE ÜLEKUUMENEMISE VÄLTIMISEKS,

mille juhendaja on Martin Kiil,

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

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

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

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

---

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

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

\_\_\_\_\_ (*kuupäev*)

# Ehituse ja arhitektuuri instituut

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Elisa Sein, 122543EAKI

Õppekava, peeriala: EAKI02/09, Hoonete sisekliima ja veetehnika

Juhendaja(d): Martin Kiil, nooremteadur, +3725189963

Konsultant:

### Lõputöö teema:

(eesti keeles) Põrandjahutuse kasutamine suveperioodil eluruumide ülekuumenemise vältimiseks

(inglise keeles) The usage of radiant floor cooling to prevent overheating during summer in residential buildings

### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Hinnata põrandjahutuse potentsiaali uutes kortermajades vältimaks suvist ülekuumenemist
2. Kontrollida näidisruumide päevavalgustegurit
3. Hinnata põrandjahutuse soojuslikku mugavust eri ilmakaartes
4. Hinnata põrandjahutuse toimivust süsteemi-, pinna- ja õhutamperatuuride abil vastavalt päikesekiirguse intensiivsusele

### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Töö põhieesmärkide sõnastamine	21.02
2.	Kirjanduse ja temaatiliste materjalide kogumine ja läbitöötamine	20.03
3.	Analüüsivate uurimisküsimuste ja metoodika valik	27.03
4.	Simulatsioonide lähteparameetrite (sh uurimisobjektide) valik	03.04
5.	Simulatsioonide teostamine ja analüüs	24.04
6.	Töö vormistamine eelkaitsmiseks	04.05
7.	Simulatsioonide, juhtumiuuringute ja analüüsi lõpetamine	15.05
8.	Töö viimistlemine ja esitamine	25.05
9.		

**Töö keel:** est      **Lõputöö esitamise tähtaeg:** ".....".....2020.a

**Üliõpilane:** Elisa Sein ..... ".....".....201....a  
/allkiri/

**Juhendaja:** Martin Kiil ..... ".....".....201....a  
/allkiri/

**Konsultant:** ..... ".....".....201....a  
/allkiri/

**Programmijuht:** ..... ".....".....201....a  
/allkiri/

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

# SISUKORD

EESSÕNA .....	7
Lühendite ja tähiste loetelu .....	8
1. SISSEJUHATUS.....	9
2. KIRJANDUSE ÜLEVAADE JA TEOREETILISED ALUSED .....	11
2.1 Seadusandlus .....	11
2.1.1 Ruumide ülekuumenemine ja soojuslik sisekliima .....	11
2.1.2 Päevavalgus .....	12
2.2 Päikesekiirgus ja päevavalgus.....	12
2.3 Soojuslik sisekliima ja ruumide ülekuumenemine .....	14
2.3.1 Soojuslik sisekliima ja mugavustunne .....	15
2.3.2 Ruumide ülekuumenemine .....	20
2.4 Põrandjahutus .....	22
2.4.1 Põrandjahutuse olemus.....	22
2.4.2 Põrandjahutuse kasutamine.....	25
2.4.3 Põrandjahutuse arvutuspõhimõtted .....	26
3. SIMULATSIOON JA METOODIKA.....	30
3.1 Dünaamilise energiasimulatsiooni tarkvara.....	30
3.2 Valitud eluruumid ja valimi ühtlustamine .....	31
3.2.1 Ruumide valim ja geomeetria kirjeldus.....	33
3.3 Suvise ruumitemperatuuri kontroll .....	40
3.4 Põrandjahutus .....	42
3.4.1 Põrandjahutuse modelleerimine IDA-ICE tarkvaras.....	42
3.5 Juhtumiuuringud.....	45
4. TULEMUSED JA ANALÜÜS.....	47
4.1 Põrandjahutuse mõju suvisele ruumitemperatuurile.....	47
4.2 Juhtumiuuringute analüüs.....	65
4.2.1 Sisekliimaklasside jaotus põrandjahutusega ruumides.....	67
4.2.2 Ruumitemperatuuride ja päikesekiirguse seos.....	69
5. KOKKUVÕTE JA JÄRELDUSED .....	73
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	77

## **EESSÕNA**

Eestis ja kogu maailmas on eluhoonete suvine ülekuumenemine üha suuremaks probleemiks. Põrandjahutuse kasutamist suvise ülekuumenemise ennetamiseks on Eestis veel võrdlemisi vähe uuritud. Käesoleva lõputöö teema pakkus välja ettevõtte O3 Technology.

Autor tänab lõputöö juhendajat doktorant Martin Kiili magistritöö valmimisele kaasa aitamise eest, doktorant Karl-Villem Võsa põrandjahutuse modelleerimise konsultatsiooni eest ja kolleege Henri Sareveti, Tomas Mändmetsa ja Egert-Ronald Partsi moraalse toetuse ning tehniliste probleemidega assisteerimise eest.

## Lühendite ja tähiste loetelu

DF –	Päevavalgustegur ( <i>Daylight factor</i> )
RHC –	Kiirgusküte ja -jahutus ( <i>Radiant Heating and Cooling</i> )
TABS –	Termiliselt aktiivse hoone süsteem ( <i>Thermally active building system</i> )
WWR –	Akna pindala ja välisfassaadi pindala suhe ( <i>Window to Wall Ratio</i> )
WFR –	Akna pindala ja põranda pindala suhe ( <i>Window to Floor Ratio</i> )
PD –	Rahulolematute osakaal ( <i>Percentage dissatisfied</i> )
PPD –	Soojuslikku ebamugavust tundvate inimeste osakaal ( <i>Predicted percentage of dissatisfied</i> )
PMV –	Tõenäosuslik soojusliku mugavustunde hinnang ( <i>Predicted mean vote</i> )
°Ch -	Kraadtund



# 1. SISSEJUHATUS

Eluhoonete suvine ülekuumenemine on järjest rohkem kõlapinda ja kajastust saav teema, seda ka põhjusega. Suvine elupindande ülekuumenemine on aktuaalne probleem juba praegu ning tuleviku kliimaprognoose arvestades ülekuumenemise probleem linnades aastakümnete möödudes ainult süveneb. Kuna eluhooneid ehitatakse pikaajalise kasutusperspektiiviga on oluline juba praegu mõelda ka tuleviku mastaabis.

Senised juhised ja soovitused näevad ette ülekuumenemise ennetamist passiivsete jahutusmeetmetega. Parim ülekuumenemise ennetamise meede on hoone varjestamine otsese päikesekiirguse eest. Teatud juhtudel pole see aga uute hoonete projekteerimisel kas arhitektuursetest või tehnilistest piirangutest tingituna võimalik. Ka olemasolevates probleemsetes hoonetes ei ole tihtilugu reaalne variant välisvarjestuse hilisem lisamine. Seega on oluline lisaks passiivsetele meetmetele olla teadlik ka aktiivsetest ülekuumenemise vastastest meetmetest ehk erinevatest aktiivjahutussüsteemidest.

Põrandjahutus on viimastel aastakümnetel populaarsust koguma hakanud lahendus, seda valdavalt Koreas, Hiinas ja Ameerika Ühendriikides. Eesti kirjanduses on põrandjahutuse kohta väga vähe viiteid ja töö autorile teadaolevalt on käesolev magistritöö esimene analoogne uurimus põrandjahutuse kohta. Antud tööst leiab kokkuvõtliku üldinfo põrandjahutuse olemuse kohta ja üldise analüüsi põrandjahutuse kasutamisest suvise ülekuumenemise ennetamiseks eluhoonetes. Lisaks on vaadeldud detailsema juhtumiuuringuna mõningate parameetrite mõju põrandjahutuse efektiivsusele ja soojuslikku sisekliimat põrandjahutusega ruumides.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on:

- Uurida põrandjahutuse kasutusevõtu mõju suvisele ülekuumenemisele tüüpsetes eluruumides;
- Kontrollida näidisruumide päevavalgustegurit ja lühidalt vaadelda päevavalgusteguri suurendamise võimalikkust tänu põrandjahutuse kasutuselevõtule;
- Hinnata soojuslikku mugavust põrandjahutusega eluruumides;
- Hinnata põrandjahutuse toimivust süsteemi-, pinna- ja õhutemperatuuride abil vastavalt päikesekiirguse intensiivsusele

Magistritöö teema on väga lai ja võttes arvesse erinevaid võimalikke uuritavaid aspekte või uurimisküsimusi, valgub töö veelgi rohkem laiali. Seetõttu on antud lõputöös kasutatud järgmisi limitatsioone ja lihtsustusi:

- Käesolevas töös hinnatakse meetme teoreetilist mõju ega optimeerita süsteemi otseselt reaalsele jahutuskooormusele vastavaks konkreetses ruumis;

- Süsteemi võimsuseks igas uuritavas ruumis on arvestatud kirjanduses pakutud soovitusliku jahutusvõimsusega;
- Simulatsioonides ei võeta põrandjahutuse toruringi paiknemise iseärasusi konstruktsioonis detailselt arvesse;
- Kuna hoonetes kasutatakse nii massiivseid kui ka mittemassiivseid tarindeid, vaadeldakse antud töös kahte äärejuhtumit, kus kõik hoone siseseinad on kas massiivsed või mittemassiivsed;
- Süsteemi juhtimine on lihtsustatud ja täpsemalt pole hüdraulikat ega automaatikat uuritud;
- Vaadeldud pole põrandjahutuse toimivust kombinatsioonid akna avanemise kaudu tuulutamisega;
- Ülekuumenemise simulatsioonides pole arvestatud haljastuse ja ümbritseva hoonestuse varjestuse mõjuga

Töö jaguneb neljaks peatükiks. Esimeses peatükis on antud ülevaade hetkel kehtivast seadusandlusest soojusliku sisekliima ning päevavalguse osas ja esitatud on kirjanduse lühikokkuvõtte päevavalguse, soojusliku sisekliima, ruumide ülekuumenemise ja põrandjahutuse kohta. Teises peatükis tutvustab autor töö koostamise meetodikat ja kolmandas peatükis on esitatud simulatsioonide tulemused ja analüüs. Neljandas peatükis esitatakse magistritöö järeldused ja kokkuvõtte koos edasiste uurimisküsimuste ja -teemade püstitamisega.

## **2. KIRJANDUSE ÜLEVAADE JA TEOREETILISED ALUSED**

Käesolevas peatükis kirjeldatakse, mis mahus on esitatud hetkel kehtivad nõuded suvisele ülekuumenemisele, loomulikule valgustusele ja soojuslikule sisekliimale. Teises alapeatükis annab autor ülevaate päevavalguse ja päikesekiirguse mõjust hoonetele. Kolmandas alapeatükis põhjendab autor elamu suvise ruumitemperatuuri kontrolli ja mugava soojusliku sisekliima tagamise vajalikkust. Lisaks on kirjeldatud põrandjahutuse olemust, kasutusvõimalusi ja -piiranguid ning lahatud süsteemi dimensioneerimise väljakutseid.

### **2.1 Seadusandlus**

Antud peatükk on jaotatud kaheks. Esimeses osas on esitatud suvise ruumitemperatuuri kontrolli nõuded ja soojusliku sisekliima nõuded, teises osas on esitatud hoonete päevavalgusele kehtivad nõuded. Antud valdkonda selle töö koostamise hetkel reguleerivad seadusaktid on:

- MKM määrus nr 58 (vastu võetud 05.06.2015; redaktsiooni jõustumine 25.08.2019)
- MKM määrus nr 63 (vastu võetud 11.12.2018; redaktsiooni jõustumine 25.08.2019)
- MKM määrus nr 85 (vastu võetud 02.07.2015; redaktsiooni jõustumine 27.08.2018)

#### **2.1.1 Ruumide ülekuumenemine ja soojuslik sisekliima**

Suvise ruumitemperatuuri nõue loetakse määrusejärgselt elamutes täidetuks, kui ruumitemperatuur ei ületa sätestatud piirtemperatuuri +27 °C ajavahemikul 1. juunist 31. augustini rohkem kui 150 kraadtundi [1]. Kraadtunde arvestatakse piirtemperatuuri ületavate kraadide ning ületamise aja (tundides) korrutisena.

Suvise ruumitemperatuuri kontroll sooritatakse sõltumata hoone asukohast Eesti energiaarvutuse baasaasta andmeid kasutades [2]. Eluhoonetes teostatakse suvise ruumitemperatuuri arvutus vähemalt ühele magamistoale ja ühele elutoale, kus on kõige rohkem vabasoojust või kus on ette näha kasutajate pidevat kohalolekut. Suvise ruumitemperatuuri nõude täitmist tõendatakse simulatsioonarvutustega. [1]

Energiaarvutuses kasutatakse korterelamute puhul järgnevaid seadeväärtuseid:

- välisõhu vooluhulk  $0,5 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$  hoone tsentraalse agregaaadi või  $0,42 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$  korteripõhise juhtimisega agregaatide puhul;
- kütmise seadeväärtus  $+21^\circ\text{C}$ ;
- jahutuse seadeväärtus  $+27^\circ\text{C}$  [1].

Ilma jahutussüsteemita hoones arvutatakse, kui palju suvine ruumitemperatuur ületab jahutuse seadeväärtust. Hoonetele, kuhu projekteeritakse jahutussüsteem, ei teostata suvise ruumitemperatuuri arvutust [2].

### **2.1.2 Päevavalgus**

Vabariigi valitsuse määrus nr 85 sätestab, et eluruumi igal elu-, töö- ja magamistoal ning köögil peab olema vähemalt üks lahtikäiv aken, mis annab võimaluse ruumi tuulutamiseks ning tagab ruumis piisava loomuliku valguse [3]. Nõuet „piisav loomulik valgustus“ ei ole valitsuse määrustega lahti selgitatud, kuid seda tehakse standardis EVS894:2008. [4]

## **2.2 Päikesekiirgus ja päevavalgus**

Päevavalgus koosneb otsese päikese- ja hajusa taevavalguse kombinatsioonist. Päikesevalgus on otsese päikesekiirguse nähtav osa, ehk otsene päikesekiirgus, millel on selge suund. Taevavalgus on taeva hajukiirguse nähtav osa, millel selge suund puudub [5]. Päikesevalgus annab ruumi kõrge valgustihedusega laigud ja tugeva kontrastsuse; piisav taevavalgus tagab, et ruumi eri piirkondade või siseruumi ja välisvaate vahel ei ole liiga suurt kontrasti [4]. Piisav päevavalgus on oluline inimeste tervise ja heaolu seisukohast, ebapiisav päevavalgus võib tekitada muuhulgas silmade väsimist, peavalu, tööviljakuse langust ja pikemaajaliselt ka biorütmide nihet ja (sessoonet) depressiooni. [4][6]

Standardis EVS894:2008 [4] on määratud minimaalsed väärtused otsese päikesevalguse ehk insolatsiooni ja hajusa taevavalguse jaoks. Hajusat taevavalgust iseloomustab päevavalgustegur  $DF$  (*daylight factor*), mille minimaalsed soovituslikud väärtused on toodud tabelis 1. Päevavalgustegur oma olemuselt on ruumisisesel ja välisel horisontaalse valgustiheduse suhe ning selle arvutamisel eeldatakse, et taeval on standardse pilvkattega taevale iseloomulik heledusjaotus, st taevas on pilvkattega täielikult kaetud ja otsese päikesekiirguse mõju sisesele ja välisele valgustihedusele on välistatud. [7]

Tabel 1 - minimaalne keskmine päevvalgustegur [4]

Ruumi rüüp	Minimaalne keskmine päevvalgustegur %
Magamistoad	1
Elutoad	1,5
Köögid	2
Bürooruumid	2

Kui ruum täidab rohkem kui ühte otstarvet, nt ühendatud köök-elutuba, peaks minimaalne päevvalgustegur vastama suurima väärtusega ruumi tüübile [4]. Käesoleva töö autor on arvamusel, et elamute magamistoad on tänapäeval tihti lisaks kasutuses bürooruumi/kodukontori funktsiooniga ja seetõttu peaks ka magamistubades püüdlema soovituslikult keskmise päevvalgusteguri > 2% poole.

Päevvalgustegurit arvutatakse valemiga (1) [4]:

$$D = \frac{T \cdot A_w \cdot \Theta}{A \cdot (1 - R^2)} \quad (1)$$

kus:

- D on keskmine päevvalgustegur (%);
- T on klaaside valguse läbivustegur, mis sisaldab määrdumise mõju (-);
- $A_w$  on akna klaasitud pindala, mis asub töötasapinnast kõrgemal ( $m^2$ );
- $\Theta$  on nähtava taeva nurk (°);
- A on lae, põranda ja seinte kogupindala koos akendega ( $m^2$ );
- R on sisepindade peegeldustegurite kaalutud keskmine (-)

Klaaside valguse läbivustegur T arvutatakse omakorda valemiga (2):

$$T = T_{vis} \cdot m, \quad (2)$$

kus:

- $T_{vis}$  on klaasi haj valguse läbivustegur (-);
- m on hooldetegur (-)

Akende alumisest osast tulev valgus peab enne tööpinnale jõudmist peegelduma vähemalt kahel ruumipinnal ning tavaliselt on allpool tööpinda ka nt mööblit, mis valguse ruumis liikumist takistab [4]. Päevavalgusteguri arvutamisel võetakse seega arvesse ainult töötasapinnast kõrgemal olev akna osa [7]. Töötasapinnaks on käesolevas töös arvestatud 0,9 m analoogselt eluruumide ülekuumenemist põhjalikult käsitleva uurimusega [8].

Päevavalgustegurit ei saa hinnata ilma päevavalguse ühtlust arvestamata, kuna viletsa ühtlusega ruumides tunduvad akendest kaugemal olevad piirkonnad pimedad. Päevavalguse ühtlus elu- ja tööruumides loetakse mitterahuldavaks, kui ainult ühes seinas olevatest akendest valgustatava ruumi sügavus on liiga suur võrreldes akende kõrguse ja laiusega [4]. Selliste ruumide sügavuse sobivuse hindamiseks kasutatakse võrratust:

$$a_{D,max} \leq 2,5 (h_{Li} - h_{Ta}), \quad (3)$$

kus:

- $a_{D,max}$  on ruumi sügavus aknaseina sisepinnast tagumise seinani (m);
- $h_{Li}$  on aknaava ülemise ääre kõrgus põrandast (m);
- $h_{Ta}$  on tööpinna kõrgus (m)

Võiks eeldada, et suuremad klaaspinnad tähendavad automaatselt päevavalgusküllaseid ruume. Kui aga päikesekiirgusest tingitud ülekuumenemine on lahendamata, võib suurte klaaspindadega büroohonetes näha, et sisemised aknakatted on ööpäev läbi ette tõmmatud ja ruume valgustab tehisvalgus [7]. Sama võib juhtuda ka eluhoonetes.

## 2.3 Soojuslik sisekliima ja ruumide ülekuumenemine

Eesti kliimavöötmes viibivad inimesed ligikaudu 90% oma eluajast siseruumis, mille sisekliima mõjutab oluliselt enesetunnet, tervist ja töövõimet. Seetõttu on oluline pöörata ruumide sisekliimale kavandamisele suurt tähelepanu. [9]

Sisekliima põhikomponendid on:

- soojuslik mugavus;
- õhu kvaliteet;
- valgustus;
- akustika;
- elektromagnetlained;

- ionisatsioon [5]

Käesoleva töö raames on sisekliima kontekstis uuritud ennekõike soojuslikku mugavust suveperioodil.

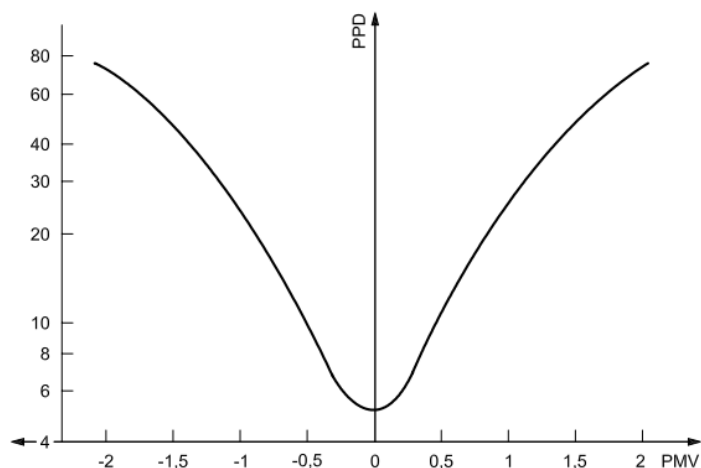
Kõrge siseõhutemperatuuri korral langeb füüsilise ja eriti vaimse töö võime. Kõrge temperatuur tekitab ka tervisehäireid, näiteks riskigruppi kuulujatele südameatakke kuumalainete ajal. [9]

### 2.3.1 Soojuslik sisekliima ja mugavustunne

Soojusliku mugavuse hindamine arvestades ainult õhutemperatuuri võib anda ebatäpse tulemuse [9], kuna õhutemperatuuri mõõdetakse termomeetriga, mida ei mõjuta ümbritsevate pindade soojuskiirus [5]. Lisaks ei kirjelda õhutemperatuur üksi õhuniiskust ega õhu liikumise kiirust. Seetõttu kasutatakse soojusliku mugavuse hindamiseks kuut parameetrit, milleks on:

- siseõhu temperatuur
- õhu liikumiskiirus
- ümbritsevate pindade keskmine kiirgustemperatuur
- õhu suhteline niiskus
- inimese aktiivsus
- inimese riietus. [9]

Nende soojusliku mugavuse hindamise parameetrite kombinatsioon määrab matemaatilise funktsioonina soojusliku mugavuse indeksi, nn PMV indeksi (*predicted mean vote*). PMV indeks näitab, kuidas rühm inimesi tõenäoliselt hindab soojuslikku sisekliimat. Tegurit väljendatakse 7-punktsel skaalal, alates -3 (külm) kuni +3 (kuum). [5] Kuna inimesed võivad identsetes olukordades hinnata sisekliimat erinevalt, esitatakse igale soojusliku mugavuse indeksile vastav tõenäosuslik soojuslikku ebamugavust tundvate inimeste osakaal PPD (*predicted percentage of dissatisfied*) [9]. PMV ja PPD omavahelist seost iseloomustab joonis 1. Kui PMV indeks on +2 või -2, siis PPD on 80%, ehk tõenäoliselt vaid 20% inimestest tunneb end mugavalt. Kui PMV indeks on 0, siis PPD on 5% ning tõenäoliselt 95% inimestest tunneb end mugavalt.



Joonis 1 - PPD ja PMV sõltuvuse graafik [10]

Hindamaks hoonete sobivust inimeste töö- ja elukeskkonnana on kasutusele võetud hoone sisekliima kategoriseerimine nelja klassi erinevate sisekliima parameetrite järgi. Sisekliima klasside jaotused on toodud standardis EVS-EN 16798-1:2019 [11], tabel 2 esitab sisekliimale esitatavate nõuete jaotumise ning sisekliimaklasside rakendamise põhimõtted.

Tabel 2 - Sisekliimale esitatavate nõuete jaotus [9]

Kategooria	Selgitus	Rakendumine
I	Kõrgendatud ootused sisekliimale	Soovitav kasutada kõrgendatud tundlikkusega või erinõuetega inimeste korral (nt haiged, eakad ja lapsed)
II	Normaalsed ootused sisekliimale	Rakendub uutele või renoveeritavatele hoonetele
III	Mõõdukad ootused sisekliimale	Rakendub olemasolevatele nüüdisaja nõuetele mittevastavatele hoonetele
IV	Nõudmistele mittevastav sisekliimale	Sobib vaid hooajalise kasutusega hoonetele

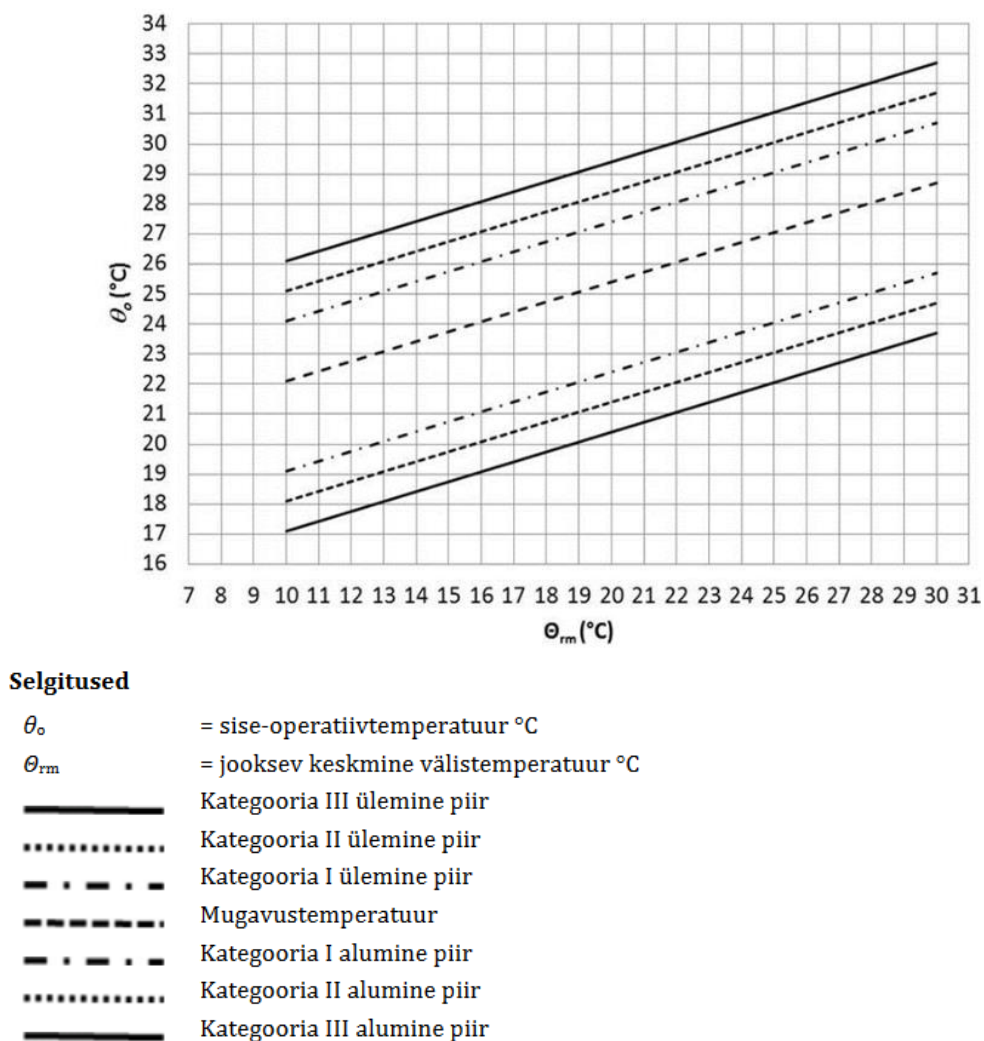
Tabel 3 esitab sisekliima klasside kategooriate jagunemise mehaaniliselt köetavate ja jahutavate hoonete puhul soojusliku mugavustunde järgi.



Tabel 3 - soovituslikud kategooriad mehaaniliselt köetavate ja jahutatavate hoonete projekteerimiseks [11]

Kategooria	Keha kui terviku termiline seisund	
	PPD (proгноositud rahulolematute protsent), %	PMV (proгноositud keskmine soojustunnetus)
I	< 6	-0,2 < PMV < +0,2
II	< 10	-0,5 < PMV < +0,5
III	< 15	-0,7 < PMV < +0,7
IV	< 25	- 1,0 < PMV < +1,0

Joonis 2 esitab sisekliima klasside jagunemise hoonetele ilma mehaaniliste jahutussüsteemideta.



Joonis 2 - Sise-operatiivtemperatuuri vaikumisi projekteerimisväärtused hoonetele ilma mehaaniliste jahutussüsteemideta, funktsioonina eksponentsiaalsest kaalutud jooksvast keskmisest välistemperatuurist

Kuna soojus eraldub inimeselt tavaolukorras eeskätt kiirguse ja konvektsiooni teel, siis mõjutavad soojustunnetust nii õhu kui ka ruumi pindade temperatuurid. Ruumi õhu- ja keskmise kiirgustemperatuuri koosmõju hindamiseks kasutatakse operatiivse temperatuuri mõistet [9]. Operatiivset temperatuuri saab arvutada valemiga (4):

$$t_{op} = \frac{\alpha_{konv} \cdot t_{\delta} + \alpha_{kiirg} \cdot \tau_r}{\alpha_{konv} + \alpha_{kiirg}}, \quad (4)$$

kus:

- $\alpha_{konv}$  on konvektiivse soojusülekanne tegur inimese keha ja ümbritseva õhu vahel (-);
- $\alpha_{kiirg}$  on kiirgusliku soojusülekanne tegur inimese keha ja ümbritseva õhu vahel (-);
- $t_{\delta}$  on õhutemperatuur (°);
- $\tau_r$  on ümbritsevate pindade absoluutsetst kiirgustemperatuuridest tuletatud keskmine kiirgustemperatuur (°)

Erinevatele sisekliima klassidele on antud ka maksimaalsed ning minimaalsed operatiivse temperatuuri väärtused (tabel 4).

Tabel 4 - sise-operatiivtemperatuuri vaikumisi projekteerimisväärtused mehaaniliste jahutussüsteemidega hoonete jaoks [11]

Hoone/ruumi rüüp	Kategooria	Operatiivtemperatuur °C	
		Minimaalne kütte jaoks (talveperiood), umbes 1,0 clo	Maksimaalne jahutuse jaoks (suveperiood), umbes 0,5 clo
Eluhooned, eluruumid (magamistoad, elutoad, köögid jne) Istuv aktiivsus ~1,2 met	I	21,0	25,5
	II	20,0	26,0
	III	18,0	27,0
	IV	16,0	28,0

PMV ja PPD indeksid iseloomustavad külma ja sooja ebamugavustunnet kehale tervikuna. Kuid soojuslikku ebamugavustunnet võib põhjustada ka mõne üksiku kehaosa ebasoovitav soojenemine või jahenemine. Seda nähtust kutsutakse lokaalseks soojuslikuks ebamugavuseks ning selle levinuim põhjus on tuuletõmbus.

Lokaalset soojuslikku ebamugavust võib aga põhjustada ka liiga suur vertikaalne temperatuurigradient pea ja pahklude vahel, liiga soe või liiga jahe pörand, või liiga suur kiirusliku temperatuuri asümmeetria [10]. On leitud, et alakeha osade soojusliku mugavuse tunnetus on inimese tervikliku soojusliku mugavuse tunnetusega tihedamalt seotud, kui ülakeha osade soojusliku mugavuse tunnetus. Terviklikku soojusliku mugavuse hinnangut domineerib kõige ebamugavama lokaalse soojusliku (eba)mugavuse hinnang. [12]

Tabel 5 - lokaalse soojusliku ebamugavuse kriteeriumid [11]

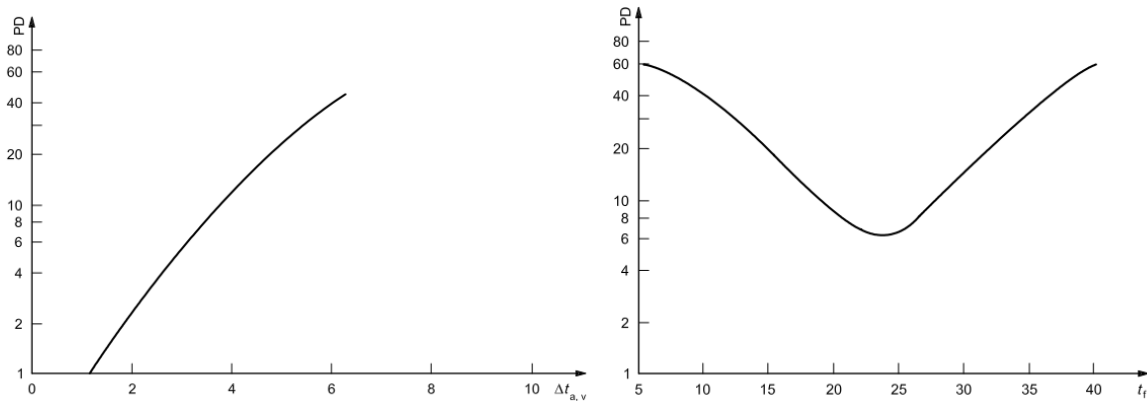
		Tuuletõmbus		Vertikaalne õhu-temperatuuri erinevus (peast pahkluni)		Põranda temperatuuri vahemik	
Kategooria	DR (tõmbusindeks) [%]	Maksimaalne õhu kiirus <sup>a</sup>		PD [%]	Temperatuuri erinevus <sup>b</sup> [K]	PD [%]	Põranda pinna temperatuuri vahemik [°C]
		Talv [m/s]	Suvi [m/s]				
I	10	0,10	0,12 <sup>c</sup>	3	2	10	19 kuni 29
II	20	0,16	0,19 <sup>c</sup>	5	3	10	19 kuni 29
III	30	0,21	0,24 <sup>c</sup>	10	4	15	17 kuni 31
IV	-	-	-	-	-	-	-

<sup>a</sup> Eeldades aktiivsustaset 1,2 met, turbulentsi intensiivsust 40 % ja et õhutemperatuur on võrdne operatiivtemperatuuriga ca 20°C talvel ja 23°C suvel.

<sup>b</sup> Erinevus 1,1 ja 0,1 m vahel pörandi kohal.

<sup>c</sup> Kui õhutemperatuur on üle 25°C, on lubatud ja tihti isegi eelistatud kõrgemad maksimaalsed õhu kiirused, kuid ainult juhul, kui asukatel on otsene kontroll õhu kiiruse üle.

Vertikaalsest õhutemperatuuri erinevusest pea ja pahklude vahel tingitud ebamugavuse hinnang *PD* (*percentage dissatisfied*) on kuvatud joonisel 3. Seos kehtib, kui temperatuurigradient on tõusev ja õhutemperatuur pörandipinna lähedal on jahedam kui õhutemperatuur pea piirkonnas. Langeva temperatuurigradiendiga olukord põhjustab vähesemat soojuslikku ebamugavuse tunnet. [10]



Joonis 3 - soojusliku ebamugavustunde ja vertikaalse temperatuurigradiendi ning soojusliku ebamugavustunde ja põrandapinna temperatuuri seosed [10]

Kui põranda pinnatemperatuur on liiga soe või liiga jahe siis põhjustab see ruumis viibijates soojuslikku ebamugavustunnet. Ruumides, kus viibitakse sisejalanõudes, on põrandapinna temperatuur ruumi kasutusmugavuse seisukohast olulisem, kui põranda pinnakate [10]. Põrandapinna minimaalseks temperatuuriks loetakse soojusliku mugavustunde seisukohast enamasti 19 °C [11][12][13], selle hinnangu probleemiks on aga, et vähesed soojusliku mugavustunde uuringud on kestnud kauem kui paar tundi, ning nõnda lühike ajavahemik ei pruugi piisavalt täpselt imiteerida töökeskkonda, rääkimata elukeskkonnast. Hiinas läbiviidud kaheksatunnise uuringu tulemusel [12] on soovituslikuks minimaalseks põrandapinna temperatuuriks pikema viibimisajaga ruumides 20,5 °C, mille puhul ei teki suurt soojuslikku ebamugavustunnet tekitavat temperatuurigradiendi. Sarnasele või suuremale soovituslikule põrandapinna temperatuurile viitab ka standard SFS-EN ISO 7730 (joonis 3). [10]

### 2.3.2 Ruumide ülekuumenemine

Lisaks soojuslikule mugavustundele on kõrgel ruumitemperatuuril ka otsesemaid mõjusid inimese tervisele ja heaolule. Langevad õpitulemus ja tööviljakus ning suureneb tervisehäirete risk [9].

Eestis on leitud seos suremuse tõusu ja suvise kõrge õhutemperatuuri vahel [14], aastal 2010 oli suvekuude suremus kuumalaine tõttu 30% tavapärasest kõrgem [15]. Aastaks 2100 prognoositakse keskmise õhutemperatuuri tõusu Eestis 2,3 - 4,5 °C võrra ja kuumalainete järjest tihedamat esinemist. [16]

Prognoositud kliimamuutuste stsenaariumite järgi tõuseb hoonete ülekuumenemise risk käesoleval sajandil tugevalt [17][18]. Hoone projekteeritud kasutuseaks arvestatakse

minimaalselt 50 aastat [19] ning seetõttu tuleb juba praegu hoonete projekteerimisel arvestada ka kaugema tulevikuga.

Eestis on eluhoonete, eriti uute eluhoonete [20], ülekuumenemine suureks probleemiks. Mitmetes hiljuti ehitatud eluhoonetes on mõõtmistega tuvastatud et suvine ülekuumenemine kraadtundides ületab vähemalt ühes elu- või magamistoas 150 °C·h piiri, mis tähendab, et need hooned ei vasta kehtestatud nõuetele [8]. Arvestades, et hoone projekteerimise staadiumis tehtavates simulatsioonarvutustes on sisemised vabasoojused ja ventilatsiooni õhuvooluhulk määrusepõhised, siis võib öelda, et suured erinevused ruumide ülekuumenemisel tulenevad põhiliselt päikesekiirgusest [21]. Viimase aja arhitektuurised trendid soosivad suuri klaaspindu, energiatõhususe nõuded aga õhu- ja soojapidavaid hoonekarpe. Suurte klaaspindade korral on tulemuseks on suur päikesekiirgusest tingitud vabasoojusliisa, mis hoonest välja ei pääse. Suurimaks ülekuumenemise põhjustajaks võib pidada suurte varjestamata aknapindade kasutamist ning liiga väikest avatava akna tuulutust. [8][22]

Akende suurust kavandades tuleb leida kompromiss vaate, päevavalguse, madala soojuskao ja jahutuskoormuse vahel [7]. Siia nimekirja lisanduvad tihtipeale ka arhitektuurne visioon, arendaja nägemus ja turunõudlus, mis võib tähendada aga konfliktikohta. Tagamaks päevavalgust ja vaate kvaliteeti on vajadus kasutada kirkaid klaase [4], see tähendab passiivse meetmena ülekuumenemise vältimiseks aga väikeseid aknaid või välist varjestust. Kriitilistes olukordades ei pruugi aga isegi ka nendest meetmetest ülekuumenemise vältimiseks piisata. Üldine tendents eluhoonetes liigub järjest suuremate klaaspindade poole, mida on keerulisem ja kallim varjestada, samuti võib välisvarjestus suurte akende puhul tähendada suuremat hoone küttekulu varjestatud päikesekiirguse kompenseerimiseks hoone kütteperioodil [23]. Leidub nii eluhooneid tervikuna, kui üksikuid kriitilisi ruume hoonetes, kus tulenevalt arhitektuursetest lahendustest või piirangutest ruumi akende avamisele on tarvilik mehhaanilise jahutuse kasutamine, kuid ajas edasi ülekuumenemise probleem vaid süveneb. On leitud, et pikaajalisi kliimamuutuseid arvesse võttes ei pruugi mõnekümne dekaadi pärast enam kõigis Ameerika [24], Suurbritannia [22] ning Rootsi [18] linnades passiivsed jahutusmeetmed ülekuumenemise vältimiseks olla piisavad.

## 2.4 Põrandjahutus

Olukorras, kus passiivsetest jahutusmeetmetest ülekuumenemise vältimiseks ei piisa, on tarvilik kasutusele võtta aktiivsed jahutusmeetmed. Käesolevas töös ei ole asjakohane anda ülevaadet kõigi võimalike jahutussüsteemide kohta ning töö autor räägib põrandjahutusest.

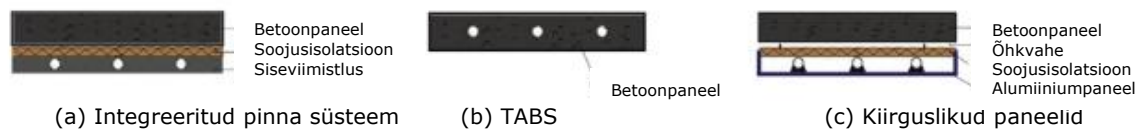
Põrandjahutus leidis esmalt kasutuselevõtu Euroopas, kus väliskliima on jahutusperioodi jooksul sobivalt kuiv. Esimesed tähelepanuväärsemad põrandjahutusega objektid olid muuhulgas mitteeluhooned nagu Kopenhaageni ooperimaja, Viborgi linnahall, BMW World muuseumihoone Münchenis ja Berliini Branderburgi lennujaam [25]. Üldjoontes on põrandjahutust kasutatud pigem parasvöötme kliimapiirkondades, ehk Euroopas ja Põhja-Ameerikas. Mitmed uurimused on aga näidanud, et kombineerituna õhu konditsioneerimiseseadmetega varjatud soojuse eemaldamiseks õhust on põrandjahutus edukalt kasutatav ka niiskemates ja soojemates kliimades. [13]

Töö autor ei tuvastanud magistritöö koostamise käigus Eestis põrandjahutuse kasutust kortermajades. Üsikut näiteid võib leida eramute või luksusvillade osas, kuid nendele projektidele ja tarbimisandmetele hindamaks süsteemide efektiivsust puudub magistritöö autoril ligipääs.

### 2.4.1 Põrandjahutuse olemus

Põrandjahutus on üks kiirgusliku ruumiõhu temperatuuri reguleerimise tehnosüsteemi variante. RHC süsteem (*Radiant heating and cooling system*) ehk kiirguslik kütte- ja jahutusüsteem on defineeritud kui süsteem, mille puhul kiirguslik soojusülekanne moodustab rohkem kui 50% soojusvahetusest tagatud sisekliimaga ruumis [13]. Kütte- ja jahutussüsteemid koosnevad soojus- või külmaallikast, soojuse edasikandjast, pumbast või ventilaatorist ning torustikust, milles soojuse edasikandja liigub. Sõltuvalt torustiku paigaldusest hoones saab kiirguslikke kütte- ja jahutussüsteeme jagada kolmeks:

- A) tarindisisesed süsteemid, mille puhul torustik on integreeritud tarindisse kandvast konstruktsioonist erineva kihi koosseisus;
- B) termiliselt aktiivse hoone süsteemid (TABS), mille puhul torustik on integreeritud hoone tarindi põhilise kandva kihi koosseisus;
- C) kiirguslike paneelide süsteem, mille puhul torustikku sisaldavad paneelid on kinnitatud tarindi külge. (joonis 4) [13]

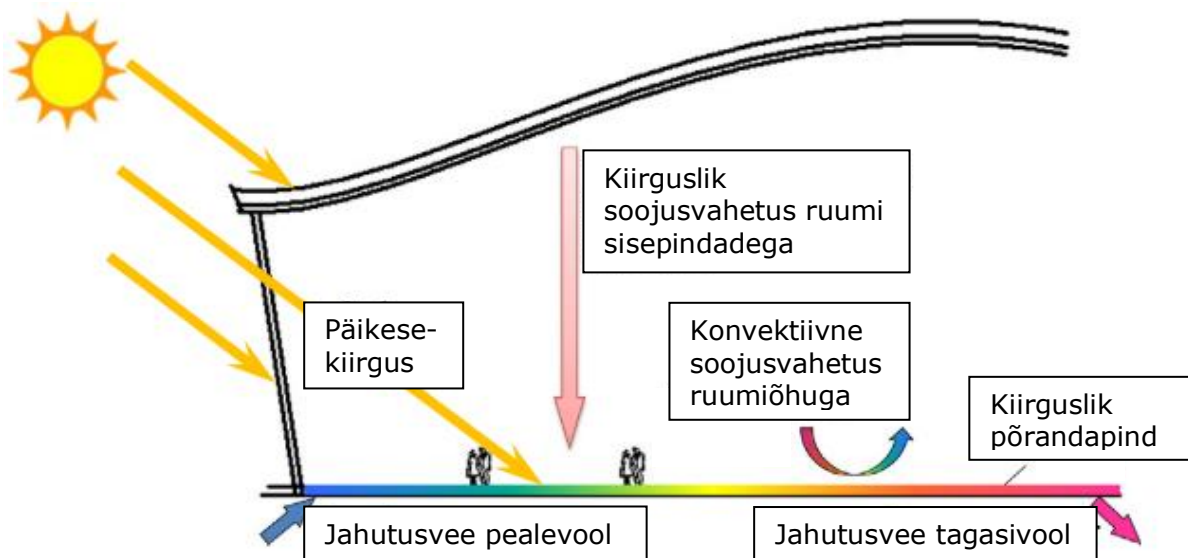


Joonis 4 - kiirguslike kütte- ja jahutussüsteemide jaotus – a) integreeritud süsteemid, b) TABS süsteemid, c) kiirguslike paneelide süsteemid

Põrandkütte ning -jahutuse korral on tegu kas variandiga (a) või (b); kiirguslike paneelidega kütte- ning jahutussüsteemid on kasutatavad vaid lagi- või seinasüsteemide korral.

Käesoleva magistritöö kontekstis on vaadeldud põrandjahutuse süsteemi integreerituna tarindi koosseisu (variant a).

Üldise tööpõhimõttena toimib põrandjahutus kiirgusjahutuse põhimõttel. Soojuseraldised ruumi koosnevad (lisaks otsesele soojusülekandele, kui seda esineb) konvektiivsest ja kiirguslikust komponendist. Konvektiivsete jahutussüsteemide korral on konvektiivne soojusülekanne otsene ja kohene jahutuskoormuse lisa, kiirguslik soojusülekanne aga neeldub esmalt ruumi pindades, ruumis asuvad objektid ja pinnad soojenevad ning mõne aja möödudes mõjutavad omakorda ruumiõhu temperatuuri konvektiivselt. Kiirguslike jahutussüsteemide puhul toimub liigsoojuse eraldamine ruumist teisel põhimõttel – kiirguslik soojusülekanne komponent on otsene ja praktiliselt momentaalne jahutuskoormuse osa ning konvektiivne soojusülekanne komponent on teisejärguline [26]. Kiirguslik soojusvahetus jahutava pinna ning mitteaktiivse (jahutatava) pinna vahel vähendab lisaks ka soojuse akumulatsiooni hoone massiivsetes tarindites, mõjutades sellega tippkoormust. [13]



Joonis 5 - ruumi jahutamine põrandjahutusega

Soojuse ülekande protsesse põrandjahutuse puhul iseloomustab joonis 5 [25].

Lihtsustatult öeldes koosneb soojusülekanne siseruumist põrandjahutusega pinnale konvektiivsest ülekandest õhu ja põrandapinna kokkupuutel, kiirguslikust soojusvahetusest ruumi lagede ja seintega ning otsesest põrandale langevast päikesekiirgusest. Sealjuures just otsese päikesekiirguse komponent eristab põrandjahutust kiirguslikust lagi- ja laepaneeljahutusest – kõik kiirguslikud jahutussüsteemid on efektiivsed ilmse soojuse eemaldajad tänu vahetule kiirguslikule soojusvahetusele ruumi pindadega, kuid põrandjahutuse puhul lisandub ka päikesekiirguse otsene neeldumine. Üldiselt peetakse teaduskirjanduses põrandjahutuse maksimaalseks jahutusvõimsuseks 30-40 W/m<sup>2</sup> kuid otsese põrandale langeva päikesekiirguse korral võib põrandjahutuse võimsus küündida ajutiselt üle 100 W/m<sup>2</sup> [25][26][27]. Standardiseeritud põrandjahutuse projekteerimise meetodikates pole otsest päikesekiirgust enamasti arvesse võetud ja seega on põrandjahutuse võimalik mõju otsese päikesekiirgusega kaetud põrandate puhul enamasti alahinnatud. [27][28]



## 2.4.2 Põrandjahutuse kasutamine

Põrandjahutus kui kiirguslik jahutussüsteem tagab konvektiivsete jahutussüsteemiga võrreldes samasuguse soojusliku mugavustunde kõrgema ruumiõhu temperatuuri puhul [13]. Lisaks püsivad ruumiõhu temperatuur ja suhteline õhuniiskus stabiilsematena [25] ja temperatuurigradiend ruumis on ühtlasem [12]. Üks olulisemaid soojusliku mugavuse mõjutajaid on tuuletõmbus [11] mis on põrandjahutuse puhul minimaalne võrreldes näiteks ventilatsiooni sissepuhkeõhu jahutamisega olukordades.

Hoolimata sellest, et RHC süsteemiga kaasneb mitmeid soojuslikku sisekliimat parendavaid aspekte, leidub siiski ka potentsiaalseid negatiivseid kõrvalmõjusid, mida süsteemi kasutuselevõtu planeerimisel arvestada tuleb. Samuti on RHC süsteemide puhul probleemiks rikete eemaldamise kulukus ja keerukus ning keerukam hilisem ruumijaotuse ümberkorraldamine. [7]

Nagu ka teiste kiirguslike kütte- ja jahutuselementidega kaasneb põrandjahutusega soojuskiirguse asümmeetria, mis on tunnetatav vertikaalse temperatuurigradiendina [12][13]. Põrandjahutusel on soojusliku mugavuse tundele teistsugune mõju, kui traditsioonilisel lagijahutusel, kuna põrandjahutus mõjutab enim alumisi kehapiirkondi (jalalaba, pahklud, sääred), lagijahutus aga ülemisi (kukal, õlad). Erinevalt inimesest kaugemale jäävast laepinnast on põrandapind inimesega kas otse- või väga lähedases kontaktis, suurendades sellega lisaks ka soojusvahetuse intensiivsust. [12]

Lisaks soojusliku mugavuse tagamisele on põrandapinna temperatuuri hoidmine oluline ka kondensatsiooni tekke seisukohast – pinna temperatuur ei tohi kordagi langeda allapoole ruumi kastepunkti temperatuuri [13]. Õhuniiskuse kondenseerumine toimub, kui niiske õhk puutub kokku jaheda pinnaga ning jahtub temperatuurile, kus õhu niiskussisaldus on küllastunud.

Seega põrandjahutuse süsteemi dimensioneerimisel tuleb võrrelda mugavuspiiri temperatuuri ja ruumiõhu kastepunkti temperatuuri ning valida kontrollparameetrik nendest kõrgem. Samuti on soovituslik süsteemi dimensioneerimisel arvestada põrandapinna temperatuuri juures varuga 1 - 2 °C et vältida olukordi kus jahutuskoormuse järsust suurenemisest tingituna põrandapinna temperatuur allapoole kontrollparameetrit laskub [29].

Simulatsioonide ja eksperimentide tulemusena on leitud, et ruumiõhu temperatuuri mõjutamiseks on pealevoolu temperatuuri reguleerimine efektiivsem meetod kui pealevoolu vooluhulga reguleerimine. Võib järeldada, et niiskuse kondenseerumise ärahoidmiseks tuleks pealevoolutemperatuur valida hoone kõige kõrgema suhtelise niiskusega ruumi järgi ja eraldiseisvates ruumides seejärel süsteemi reguleerida läbi

vooluhulga kontrollimise [29][30]. Jahutussüsteemiga pörandapind jaguneb tinglikult piirkondadeks, millele langeb otsene päikesekiirgus, ja piirkondadeks, mis on päikesekiirguse eest varjatud. Et tagada soojuslikku mugavust mõlemat tüüpi aladel on vajalik süsteemi andurite korrektne jaotus ruumi eri tsoonides. [26]

Ka hoone kui terviku energiatarbele on pörandjahutusel võrreldes alternatiividega positiivne mõju. Võrreldes mittelehoonetes näiteks jahutuspalkidega on kiirguslikuks ülekandeks kasutatav pindala pörandjahutuse korral suhteliselt suur, mis tähendab, et vajaliku jahutusvõimsuse tagamise jaoks võib jahutusvee temperatuur olla märgatavalt kõrgem ning energiakulu jahutusvee tootmiseks seega väiksem. Ka konvektiivsete süsteemidega võrreldes vajavad kiirguslikud süsteemid vähem energiat, kuna konvektiivsete süsteemide puhul on tarvilik kogu ruumiõhu kütmine või jahutamine. Kombineerituna asjaoluga, et enamasti on RHC süsteemide puhul soojuskandjaks vesi, mitte õhk, ning tänu vee märgatavalt suuremale soojusmahtuvusele on sama soojushulga transport vesisüsteemi pumpadega märgatavalt väiksema elektrienergiakuluga kui õhksüsteemi korral ventilaatoritele kuluks, on RHC süsteem hoone energiakulu seisukohast konvektiivsest süsteemist otstarbekam [25][13]. Väheoluline ei ole ka tarindite soojusmahtuvuse ära kasutamine. Olukorras, kus RHC süsteem on dimensioneeritud ning projekteeritud nõnda, et hoone tarindite soojusmahtuvust ja -inertsit maksimaalselt ära kasutada, võib olla võimalik ka olukord, kus süsteem töötab ainult öötundidel [31]. Seeläbi on süsteemi kasutamiseks kuluv energia veelgi madalam. Süsteemi töö ajastamine aitab ka ära hoida hoone suurest soojusinertsist tingitud ülekütmise ja alajahutamise olukordi. [13][30][31]

### **2.4.3 Pörandjahutuse arvutuspõhimõtted**

RHC süsteemide tööpõhimõtete ja soojusliku toimivuse analüüsimeetodite kohta on teostatud mitmeid põhjalikke uuringuid [25][26][27][28][32]. Tänapäeval on RHC süsteemid modelleeritavad kõigis enamlevinud dünaamilistes simulatsioonitarkvarades millega saab analüüsida hoone energiakäitumist või sisekliimat [13]. Süsteemi korrektne modelleerimine eeldab aga teadlikkust süsteemi tööd mõjutavatest teguritest. RHC süsteemi võimekus sõltub soojusülekandest igas RHC-süsteemi elemendis. Soojusülekanne omakorda sõltub aga:

- soojusvahetusest kiirgusliku pinna, ruumiõhu ja teiste kiirgusallikate vahel, kus määravateks teguriteks on konvektiivse ja kiirgusliku soojusülekanne koefitsendid;

- soojusvahetusest (kiirgava) pinna ja jahutusvedeliku torude vahel, kus määravateks teguriteks on näiteks tarindi materjalid ja nende soojuslikud tegurid, toru materjal ja paksus ning toru samm;
- soojusenergia transpordist soojuskandja abil, kus määravateks teguriteks on soojuskandja vooluhulk ja temperatuurigraafik. [13][32]

Soojusülekanne koefitsent on parameeter mis iseloomustab pinna ja ruumi vahelise soojusvahetuse hulka. Üldjoontes on RHC süsteemide arvutamise puhul kasutusel kiirgusliku ülekande koefitsendiks  $5,5 \text{ W/m}^2\text{K}$  [13][32][33]. Konvektiivse ülekande koefitsent võib aga olla vahemikus  $0,3$  kuni  $6,5 \text{ W/m}^2\text{K}$  sõltuvalt pinna temperatuurist ning asukohast ruumis. Põrandjahutuse puhul on väiksema pindalaga ruumides koefitsendiks pakutud ka  $0,1-0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ . [25][13][34]

Tüüpisel TABS hoone vahelael on neli kihti, mida iseloomustab joonis 6 [32] – põranda pinnakate, pinnakatte alusmaterjal, kandev tarind ja soojusisolatsioonikiht. Kihte võib olla sõltuvalt konstruktsioonitüübist ka vähem, rohkem, või teistsuguses järjestuses. Iga tarindikihi paksus on vastavalt  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$  ning soojusjuhtivus  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ . Soojuse ülekande toimub põranda pinnalt jahutusvee torudeni temperatuuride erinevuse tõttu ning kogu soojuse ülekande protsessi tarindis saab iseloomustada soojustakistuse jadana (5)

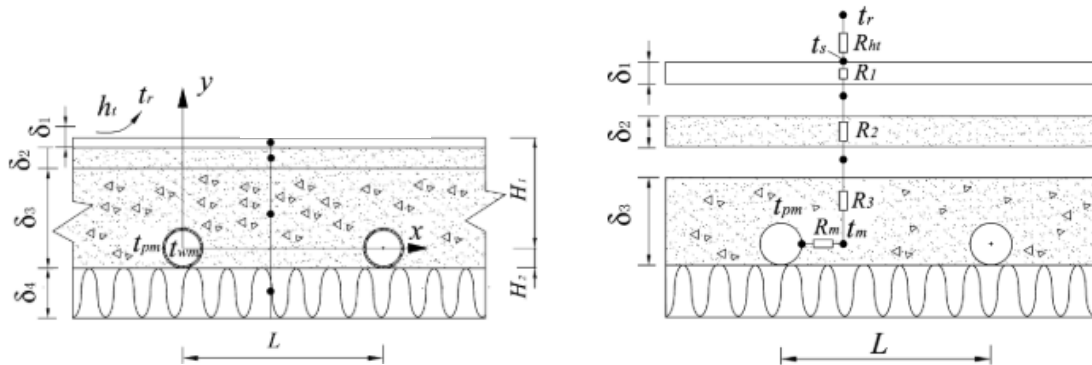
$$R_f = R_1 + R_2 + \dots + R_n, \quad (5)$$

kus soojustakistus R:

$$R = \frac{\delta}{\lambda}, \quad (6)$$

Sealjuures tuleb tähele panna, et jahutusvedeliku ja tarindi vahele jääb ka torustiku materjali kiht. Silindrilise seina välispindala oleneb välisläbimõõdust ja konstantse siseläbimõõdu korral seina paksusest. Järelikult toob välisläbimõõdu suurendamine küll kaasa soojustakistuse suurenemise, kuid samal ajal suureneb ka välispind, ja väheneb takistus soojusvoolu üleminekul väliskeskkonda (antud juhul tarindikihti). [9]

Lisaks tuleb pörandjahutuse puhul arvestada, et jahutav kiht ei asu tarindis mitte homogeenne tasapinnana, vaid mittehomoogensete lõikudena. Jahutava mittehomoogene kihi saab taandada homogeenseks kihiks [27][32] kuid sealjuures tuleb arvesse võtta toru soojustehnilisi parameetreid ning temperatuuri ühtluse tagamiseks vajalikku torustiku sammu. [9][32]



Joonis 6 - jahutusega pörandi soojustehniline toimimine TABS hoone puhul [32]

Pörandjahutusega hoonetes tuleb tähelepanu pöörata ka vaipkatte kasutamisele – vaipkate on soojuse ülekande seisukohast lisatakistus ning võib pörandjahutuse jahutusvõimsust vähendada. [26]

Tarindi soojustakistus on pörandjahutuse projekteerimisel üks olulisemaid parameetreid ning süsteemi efektiivsuse tagamiseks peaks kasutama võimalikult väikest torustiku sammu ja võimalikult õhukest torustiku materjali [32]. Enamasti piisab insenertehnilistes arvutustes siiski torustiku sammu, diameetri ja toru materjali soojustehnilise toimivuse iseloomustamiseks ühtse soojusjuhtivuse koefitsendi kasutamisest [13][35]. Äärmiselt oluline on aga korrektselt hinnata torustiku paiknemist tarindis ning tarindikihtide soojuslikke parameetreid.

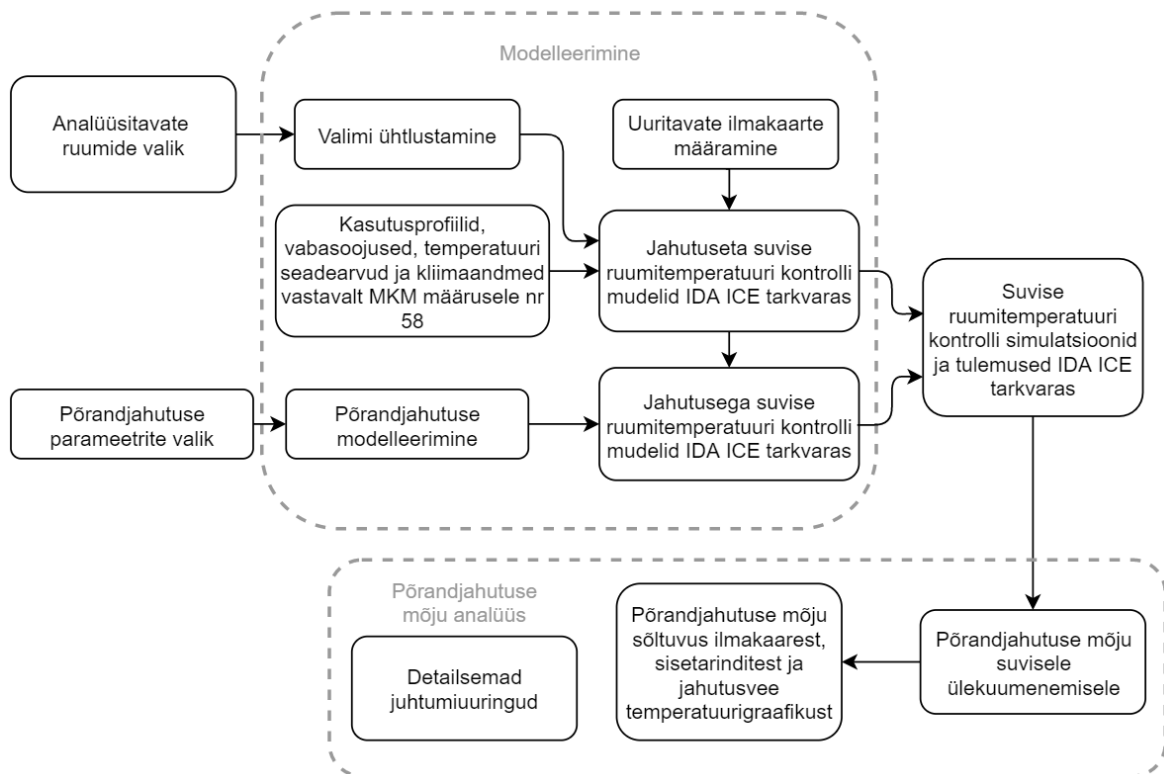
Euroopas on üheks levinumaiks pörandjahutuse temperatuurigraafikuks +15/+18 kraadi, millest üldiselt piisab päikesekiirgusest tingitud soojusliku eemaldamiseks [25]. Põhjalikus kontrollitud tingimustega uuringus [26] uuriti temperatuuri pealevoolusid +18, +15 ja +12 °C. Otsese päikesekiirgusega pörandapindadel langes jahutusvõimsus pealevoolu kuuekraadisel tõstmisel 25 %, 40W/m<sup>2</sup>-lt 30 W/m<sup>2</sup>-le; otsese päikesekiirgusega pörandapindadel aga 18 %, 115 W/m<sup>2</sup>-lt 95 W/m<sup>2</sup>-le.

Päikesekiirguse otsene neeldumine jahutavas pinnas suurendab märgatavalt süsteemi jahutusvõimsust [13] ning selle nähtuse kohta on teostatud mitmeid teoreetilisi ja mõõtmistel baseeruvaid uuringuid. Suurimaks probleemiks päikesekiirguse mõjuga arvestamisel on päikesekiirguse dünaamiline olemus – ajas varieeruvad nii päikesekiirguse intensiivsus kui ka konkreetne piirkond, millele päikesekiirgus langeb. Päikesekiirguse mõju arvestamiseks on välja töötatud erinevaid matemaatilisi

lähenedisi ning on leitud, et päikesekiirguse matemaatiline homogeenne jaotamine põrandjahutusega ruumi pinnale on insenertehniliste arvutuste jaoks piisava täpsusega ning lihtsustab jahutussüsteemi dimensioneerimist märgatavalt [26][27][28][32]. Seda lähenedist kasutavad ka hoone energiasimulatsiooni tarkvarad. [28]

### 3. SIMULATSIOON JA METOODIKA

Peatükk on jaotatud viieks. Esimeses punktis on lühidalt tuvustatud antud töös kasutatud simulatsioonitarkvara ning selle baasseadeid. Teises punktis on esitatud analüüsiks valitud hoonete ja ruumide kirjeldus ning põhjendatud nende valikut. Kolmandas punktis on selgitatud lühidalt suvise ruumitemperatuuri simulatsiooni metoodikat, simulatsioonides kasutatud vaikeväärtuseid ja seadistusi. Neljandas punktis on kirjeldatud pörandjahutuse modelleerimiskäiku ning simulatsiooni parameetrite valimist. Viiendas punktis on kirjeldatud pörandjahutuse mõju paremaks analüüsimiseks läbi viidud juhtumiuuringute sisu ja põhimõtteid.



Joonis 7 - Uuringumetoodika põhimõtte skeem

#### 3.1 Dünaamilise energiasimulatsiooni tarkvara

Käesolevas töös on dünaamilisteks simulatsioonideks kasutatud tarkvara IDA Indoor Climate and Energy (ICE) [36]. IDA-ICE võimaldab teha dünaamilisi hoone sisekliima, energiakasutuse ja tehnosüsteemide toimivuse simulatsioone. [37]

Simulatsioonide läbiviimise parameetrid tarkvaras on järgnevad:

- Lokatsioon – Tallinn (EST 2019)
- Kliimafail – Estonian TRY

- Tolerants – 0,02
- Dünaamilise simulatsiooni päevade arv enne simulatsiooniperioodi – 14

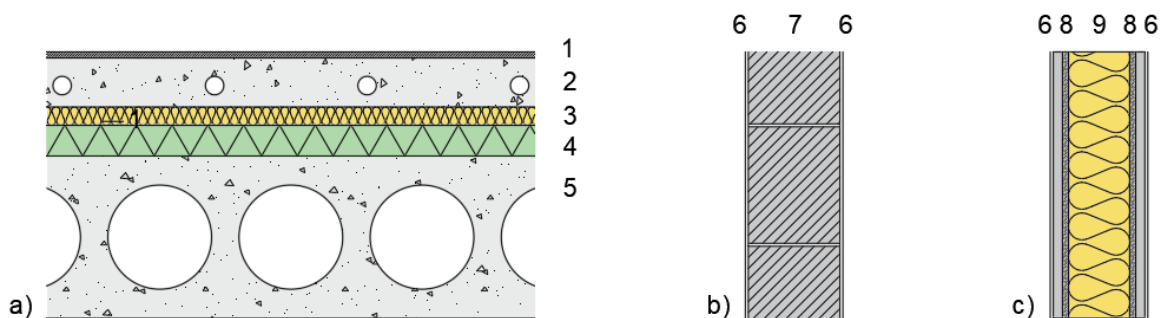
Valdavalt on simulatsioonide läbiviimiseks kasutatud IDA ICE *Parametric runs* tööriista.

### 3.2 Valitud eluruumid ja valimi ühtlustamine

Antud töös on ülesandepüstitusest lähtuvalt vaadeldud eluruumid korterelamutes millele rakenduvad suvise ruumitemperatuuri kontrolli nõuded [1], so. elutoad ja magamistoad. Valitud on ruumid realselt projekteeritud või projekteeritavatest eluhoonetest eelprojekti koostamise ajavahemikuga aastatel 2018-2020. Konkreetset toad hoonetes on valitud juhuslikult, võttes aga arvesse järgnevaid parameetreid:

- ruumi fassaadile ei lange hoone enda kujust tulenevat varjestust (nt hoone sisenurga lähedus);
- ruumil ei ole rõdu;
- ruum ei asu hoone esimesel ega viimasel korrusel;
- ruumiplaneering ei ole ebamõistlik või -korrapärane, sh ei esine väga sügavale maja sisenusse ulatuvat avatud koridori;
- ruum ei ole kasutusotstarbe kohta keskmisest oluliselt väiksema pindalaga.

Ruumide omavaheliseks võrdluseks antud magistritöös on tehtud lihtsustus, kus kõikide hoonete sisemised piirdetarindid on võetud ühesugusteks tüüpseteks vahelagedeks ja -seinteks. Teisisõnu, uuritud ruumidel erinevates majades on analüüsid kasutatud samu sisemisi tarindeid. Analüüsimaks paremini suvist ülekuumenemist massiivsete ja mittemassiivsete hoonete puhul on lisaks igat hoonet uuritud kahes variandis – esimesel puhul massiivse hoonena, kus kõik sisesseinad on laotud plokkidest ning teisel puhul mittemassiivse hoonena, kus kõik sisesseinad on soojustatud kergvaheseinad. (Joonis 8)

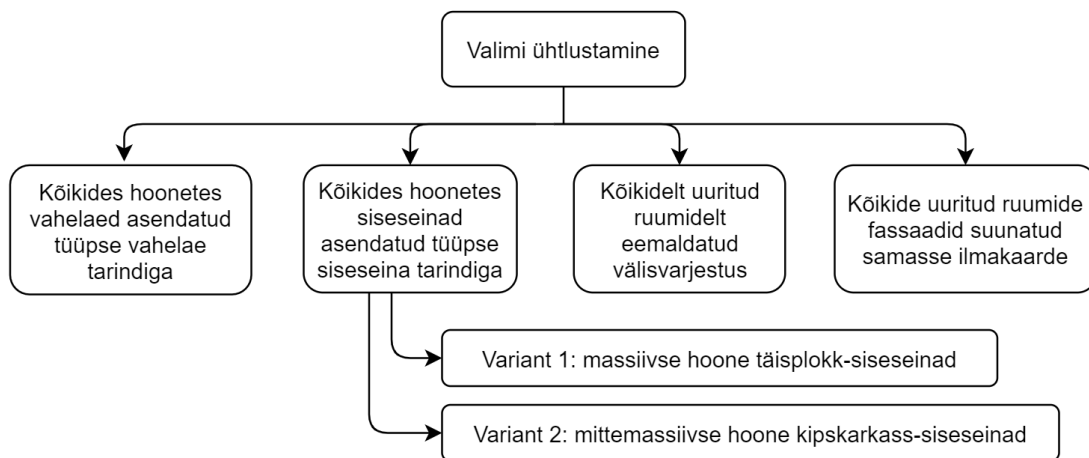


Joonis 8 - a) tüüpne vahelagi; b) tüüpne massiivne sisessein; c) tüüpne mittemassiivne sisessein

Tabel 6 - sisetarindite soojustehnilised andmed

Kihi number	Nimetus	Paksus, mm	Tihedus, kg/m <sup>3</sup>	Soojuseri-mahtuvus, J/(kg*K)	Soojuseri-juhtivus, W/(m*K)
1	Põrandakate (parkett) [36]	10	500	1600	0,13
2	Valubeton koos jahutustorustikuga [36]	80	2200	920	1,6
3	Mineraalvill [38]	30	40	1600	0,035
4	EPS 60 vahtpolüstüreen [39]	50	14	1450	0,039
5	Õõnesbetoonpaneel [36]	265	500	1000	0,135
6	Viimistluskiht (krohv)	-	-	-	-
7	FIBO plokkmüüritis [40]	150	740	900	0,19
8	Kipsplaat vineerpõhjal [36]	25	700	1000	0,21
9	Mineraalvill (teraskarkassis) [38]	100	50	1030	0,045

Välisseinte soojustehnilised andmed on esitatud iga ruumi kohta eraldi peatükis 3.2.1. Kõikidele valitud hoonetele on juba eelnevalt energiaarvutuste jaoks koostatud O3 Technology poolt energiatõhususe mudel tarkvaras IDA-ICE. Antud töö raames on hoonete geomeetria ja arhitektuur jäetud samaks, muudetud on hoone paiknemist ilmakaarte suhtes ning teatud ruumide passiivseid jahutusmeetmeid. Ülejäänud ruumid hoones on jäetud samaks. Kõiki uuritud ruume on simuleeritud fassaadiga üheksas ilmakaares (idast lääneni, 22,5-kraadiste sammudega), hoides aknaid suletuna ning ilma välisvarjestuse, haljastuse ja ümbritevate hoonete mõju arvestamata.



Joonis 9 - Valitud ruumide ühtlustamise meetoodika

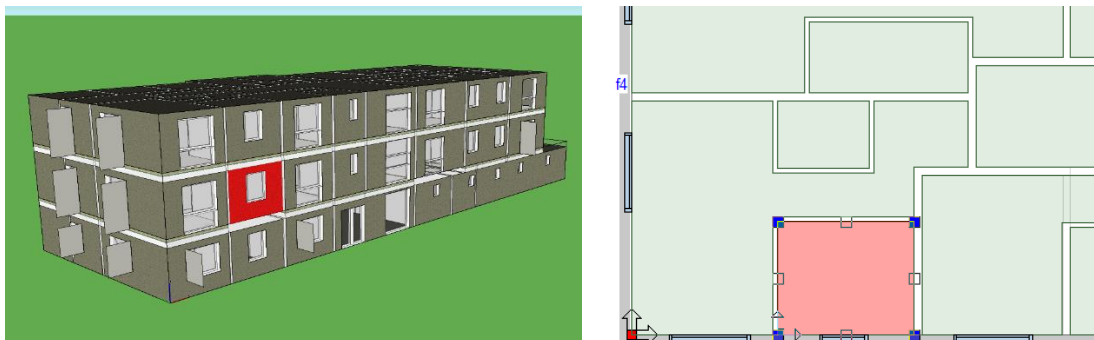


Simulatsioonide tulemuseks on suvise ruumitemperatuuri piirmäära ületamine kraadtundides, mis on lähtekohaks edasiste simulatsioonide tulemustele rakendatavas analüüsis. Kuna mudeli detailsusastme vähenedes tulemuse veaprotsent suureneb, eriti suurte klaaspindadega väikeste ruumide puhul, [8] on simulatsioonides rakendatud mitmetsoonilist mudelit kus kõik hoone ruumid on eraldi tsoonidena modelleeritud, tagamaks võimalikult realistlikke simulatsioonitulemusi. Tulenevalt ilmakaare muudatusest võrreldes originaalse hoone lahendusega on mõningate ruumide puhul teostatud täiendavaid muudatusi.

### 3.2.1 Ruumide valim ja geometria kirjeldus

Käesolevalt on välja toodud kõik uurimisobjektiks olevad erinevate viie hoone ruumid ning nende kirjeldused. Valimisse kuuluvad viis magamistuba keskmise pindalaga 11,3 m<sup>2</sup> ja viis köök-elutuba keskmise pindalaga 31,0 m<sup>2</sup>. Ruumid on esitatud juhuslikus järjekorras.

#### Ruum 1



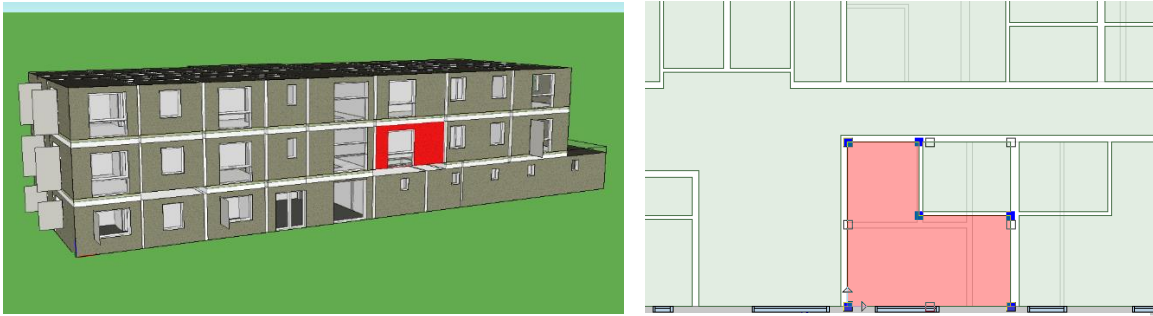
Joonis 10 – ruumi paiknemine hoones, 3D-vaade ja põrandaplaan, IDA-ICE mudel

Ruumi otstarve: magamistuba

Ruum asub kolmekorruselise hoone teisel korrusel. Ruumi välisseinaks on vastavalt arhitektuurse eelprojekti andmetele laotud õõnesplokkeseinad soojusjuhtivusega  $U = 0,10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Korruse kõrgus on 3,16 meetrit ning ruumi puhaskõrguseks on 2,7 meetrit. Ruumi sügavuseks on 2,89 meetrit. Ruumi WWR on võrdlemisi madal, vaid 0,19.

Kõrvalasetsevate ruumide muudatused on järgnevad: eemaldatud on välisvarjestus mis võiks uuritavale ruumile varju heita, selle kompenseerimiseks on veidi suurendatud akende avatavust.

## Ruum 2



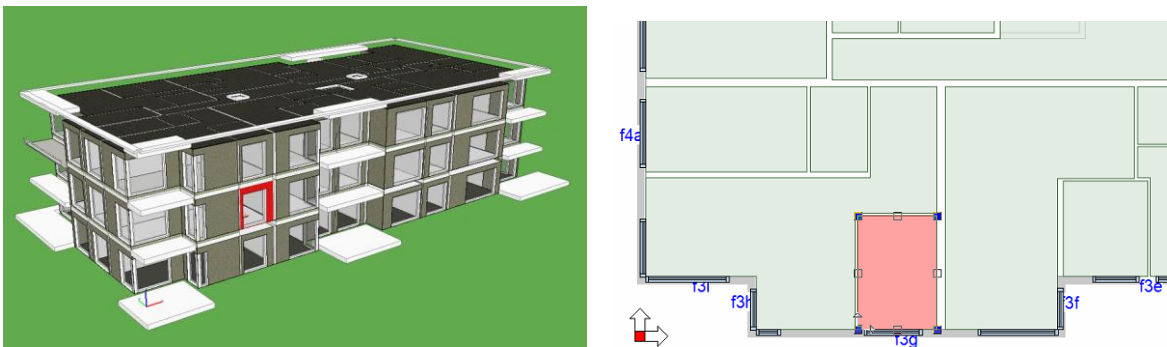
Joonis 11 - ruumi paiknemine hoones, 3D-vaade ja põrandaplaan, IDA-ICE mudel

Ruumi otstarve: köök-elutuba

Ruum asub kolmekorruselise hoone teisel korrusel. Ruumi välisseinad on vastavalt arhitektuurse eelprojekti andmetele laotud õõnesplokkseinad soojusjuhtivusega  $U = 0,10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Korruse kõrgus on 3,135 meetrit ning ruumi puhaskõrgus on 2,7 meetrit. Ruumi kogusügavuseks (arvestades esikuosaga) on 5,15 meetrit ja elufunktsiooniga ruumiosa sügavuseks on 2,84 meetrit. Ruumi kõrval asub ülekuumenev suure klaasfassaadiga trepikoda.

Kõrvalasetsevate ruumide muudatused on järgnevad: eemaldatud on välisvarjestus mis võiks uuritavale ruumile varju heita.

## Ruum 3



Joonis 12 - ruumi paiknemine hoones, 3D-vaade ja põrandaplaan; IDA-ICE mudel

Ruumi otstarve: magamistuba

Ruum asub kolmekorruselise hoone teisel korrusel. Ruumi välisseinad on vastavalt arhitektuurse eelprojekti andmetele laotud õõnesplokkseinad soojusjuhtivusega  $U = 0,14 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Korruse kõrgus on 3,135 meetrit ning ruumi puhaskõrgus on 2,7 meetrit. Ruumi sügavuseks on 3,6 meetrit. Ruum on võrdlemisi väike ja ruumi WFR on 0,46.

Kõrvalasetsevate ruumide muudatusi pole tehtud.

## Ruum 4



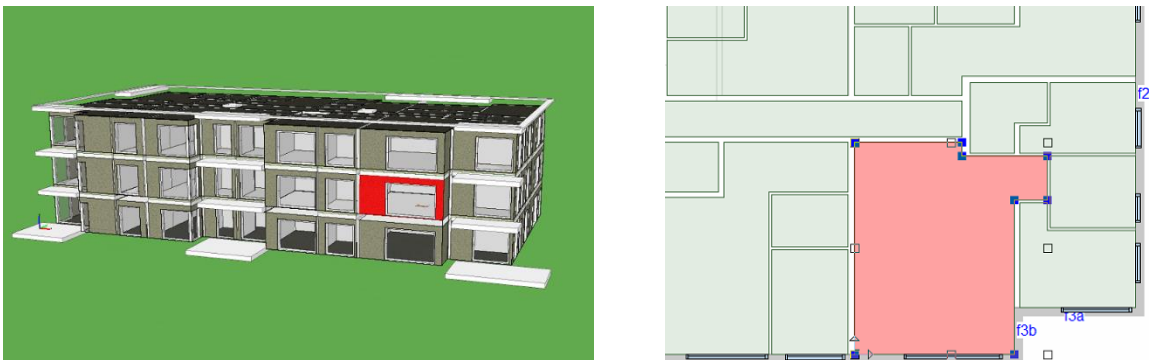
Joonis 13 - ruumi paiknemine hoones, 3D vaade ja põrandaplaan, IDA-ICE mudel

Ruumi otstarve: köök-elutuba

Ruum asub kolmekorruselise hoone teisel korrusel. Ruumi välisseinad on vastavalt arhitektuurse eelprojekti andmetele laotud õõnesplokksseinad soojusjuhtivusega  $U = 0,14 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Korruse kõrgus on 3,135 meetrit ning ruumi puhaskõrgus on 2,7 meetrit. Ruumi kogusügavuseks (arvestades esikuosaga) on 7,7 meetrit ja elufunktsiooniga ruumiosa sügavuseks on 5,69 meetrit. Ruumil on hoone sisesse ulatuv otsese päikesekiirguse eest varjatud koridor.

Kõrvalasetsevate ruumide muudatused on järgnevad: suurendatud on akende avatavust.

## Ruum 5



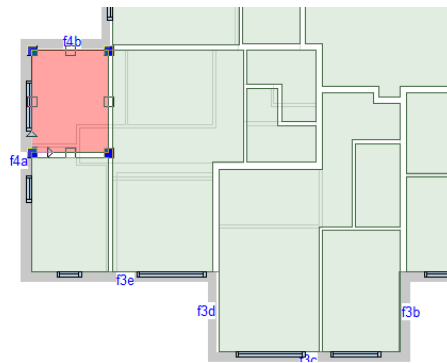
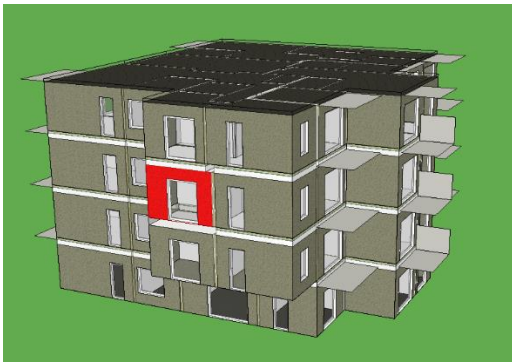
Joonis 14 - ruumi paiknemine hoones, 3D vaade ja põrandaplaan, IDA-ICE mudel

Ruumi otstarve: köök-elutuba

Ruum asub kolmekorruselise hoone teisel korrusel. Ruumi välisseinad on vastavalt arhitektuurse eelprojekti andmetele laotud õõnesplokksseinad soojusjuhtivusega  $U = 0,14 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Korruse kõrgus on 3,135 meetrit ning ruumi puhaskõrgus on 2,7 meetrit. Ruumi sügavuseks on 7,7 meetrit.

Kõrvalasetsevate ruumide muudatused on järgnevad: suurendatud on akende avatavust.

## Ruum 6



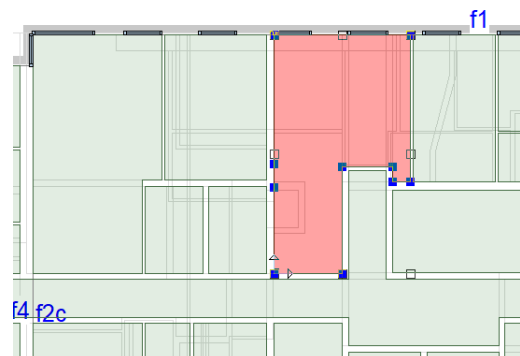
Joonis 15 -ruumi paiknemine hoones, 3D vaade ja põrandaplaan, IDA-ICE mudel

Ruumi otstarve: magamistuba

Ruum asub neljakorruselise hoone kolmandal korrusel. Ruumi välisseinad on vastavalt arhitektuurse eelprojekti andmetele betoonplokkseinad soojusjuhtivusega  $U= 0,18$   $W/(m^2 \cdot K)$ . Korruse kõrgus on 3,265 meetrit ning ruumi puhaskõrgus on 2,83 meetrit. Ruumi sügavuseks on 2,85 meetrit.

Kõrvalasetsevate ruumide muudatusi pole tehtud.

## Ruum 7



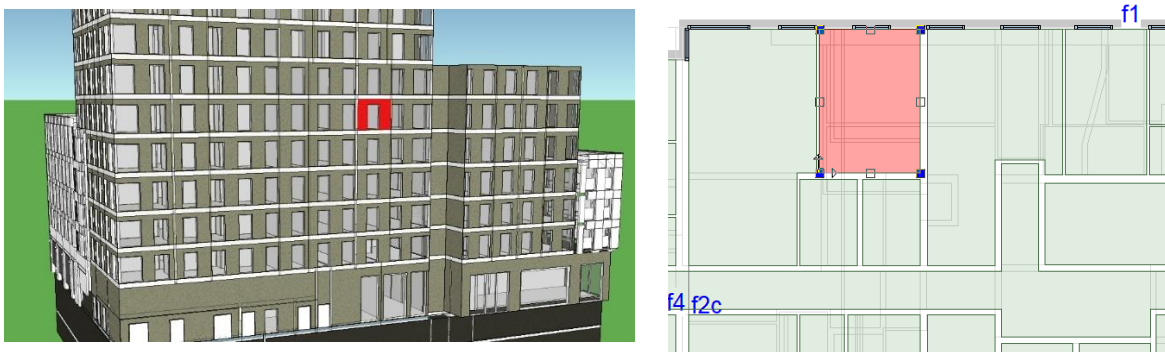
Joonis 16 - ruumi paiknemine hoones, 3D vaade ja põrandaplaan, IDA-ICE mudel

Ruumi otstarve: köök-elutuba

Ruum asub kahekümnekorruselise hoone kolmandal kuni üheksandal tüüpkorrusel. Ruumi välisseinad on vastavalt arhitektuurse eelprojekti andmetele soojusjuhtivusega  $U= 0,21$   $W/(m^2 \cdot K)$ . Korruse kõrgus on 3,085 meetrit ning ruumi puhaskõrgus on 2,65 meetrit. Ruumi kogusügavuseks (arvestades esikuosaga) on 7,64 meetrit ja elufunktsiooniga ruumiosa sügavuseks on 4,23 meetrit.

Kõrvalasetsevate ruumide muudatusi pole tehtud.

## Ruum 8



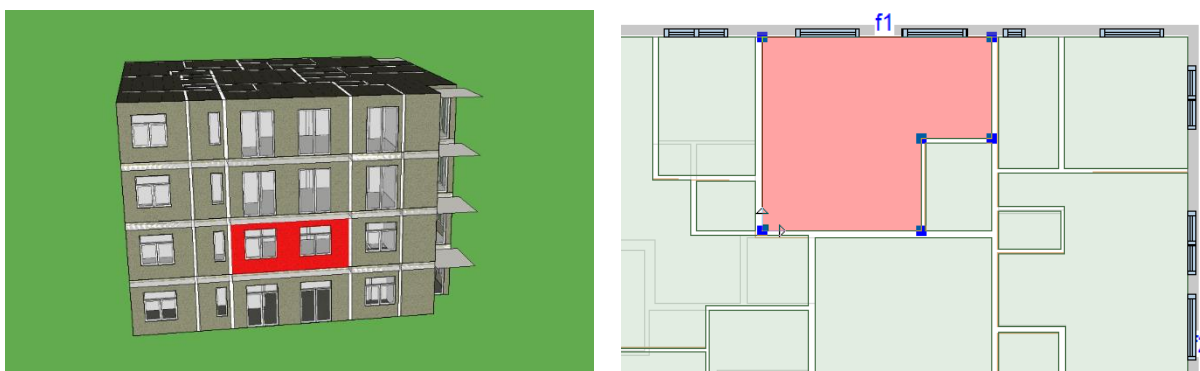
Joonis 17 - ruumi paiknemine hoones, 3D vaade ja põrandaplaan, IDA-ICE mudel

Ruumi otstarve: magamistuba garderoobiga

Ruum asub kahekümnekorruselise hoone kolmandal kuni üheksandal tüüpkorrusel. Ruumi välisseinad on vastavalt arhitektuurse eelprojekti andmetele betoonpaneelseinad soojusjuhtivusega  $U= 0,21 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Korruse kõrgus on 3,085 meetrit ning ruumi puhaskõrgus on 2,65 meetrit. Ruumi sügavuseks koos garderoobiosaga on 4,65 meetrit.

Kõrvalasetsevate ruumide muudatusi pole tehtud.

## Ruum 9



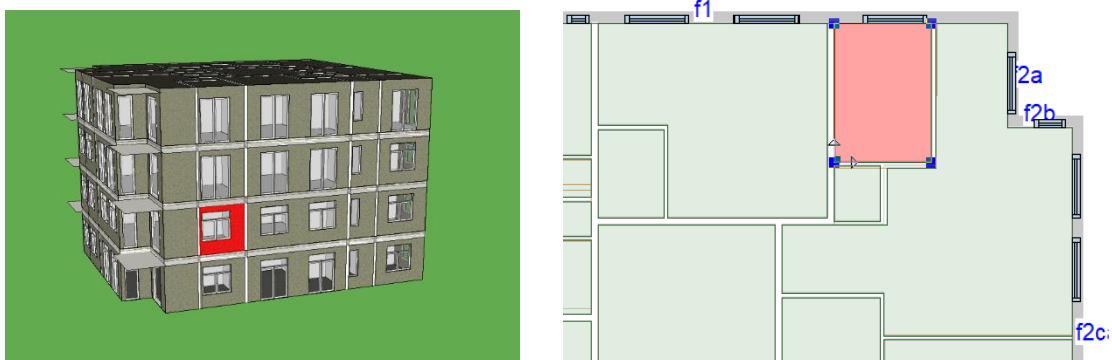
Joonis 18 - ruumi paiknemine hoones, 3D vaade ja põrandaplaan, IDA-ICE mudel

Ruumi otstarve: köök-elutuba

Ruum asub neljakorruselise hoone teisel korrusel. Ruumi välisseinad on vastavalt arhitektuurse eelprojekti andmetele laotud õõnesplokksseinad soojusjuhtivusega  $U= 0,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Korruse kõrgus on 3,135 meetrit ning ruumi puhaskõrgus on 2,88 meetrit. Ruumi sügavuseks on 5,6 meetrit.

Kõrvalasetsevate ruumide muudatusi pole tehtud.

## Ruum 10



Joonis 19 - ruumi paiknemine hoones, 3D vaade ja põrandaplaan, IDA-ICE mudel

Ruumi otstarve: magamistuba

Ruum asub neljakorruselise hoone teisel korrusel. Ruumi välisseinad on vastavalt arhitektuurse eelprojekti andmetele laotud õõnesplakkseinad soojusjuhtivusega  $U = 0,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Korruse kõrgus on 3,135 meetrit ning ruumi puhaskõrgus on 2,88 meetrit. Ruumi sügavuseks on 4,0 meetrit.

Kõrvalasetsevate ruumide muudatused on järgnevad: suurendatud on akende avatavust.

Tabelis 7 on esitatud vaadeldud ruumide geomeetriselised parameetrid. Kõik ruumide andmed on päris O3 Technology kasutuses olevatest arhitektuursetest eelprojektidest.

Tabel 7 – ruumide geomeetriselised parameetrid

Ruumi number	Põranda-pind, m <sup>2</sup>	Akna pind, m <sup>2</sup>	Klaasi pind, m <sup>2</sup>	Fassaadi pind, m <sup>2</sup>	WWR	WWR*g	WFR	WFR*g
1	10,1	1,80	1,42	9,4	0,19	0,08	0,18	0,07
2	19,9	4,72	4,09	13,9	0,34	0,14	0,24	0,09
3	9,0	4,14	3,31	6,8	0,61	0,23	0,46	0,17
4	30,6	6,67	5,40	10,5	0,63	0,24	0,22	0,08
5	45,6	8,05	6,84	15,7	0,51	0,20	0,18	0,07
6	10,9	4,05	3,28	10,9	0,37	0,13	0,37	0,13
7	26,1	5,40	4,75	11,6	0,47	0,19	0,21	0,08
8	15,2	2,70	2,38	8,7	0,31	0,12	0,18	0,07
9	32,8	6,30	4,79	19,1	0,33	0,13	0,19	0,08
10	11,2	3,15	2,39	8,1	0,39	0,16	0,28	0,11

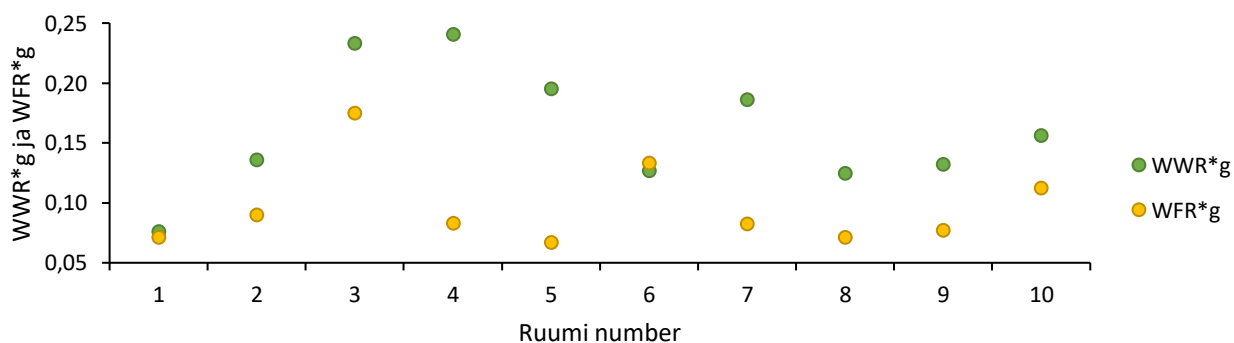
Järgnevalt on esitatud valitud ruumide ja ruumide akende parameetrid. Kõrguseks põrandapinnast on loetud aknaraami alumise serva kõrgust. Raami osakaalu arvutamisel on raami laiuseks arvestatud arhitektuurse eelprojekti andmetega. Klaaspaketi g-arvu,  $t_{vis}$  ja U-arvu allikateks on samuti O3 kasutuses olevad hoone arhitektuursed eelprojekt ning U-arv on antud aknale tervikuna.

Kõrgete maast laeni akende laialdast levikut uuemates eluhoonetes illustreerib ka antud töö ruumide valim – vaid kolmes ruumis ei alga aknad põrandapinnalt või selle lähedalt. Akende g-arvud jäävad antud valimi puhul vahemikku 0,36 kuni 0,40.

Tabel 8 - ruumide akende parameetrid

Ruumi number	Laius x kõrgus, m	Kõrgus põrandapinnast, m	Raami osakaal, %	g-arv	$t_{vis}$	U-arv, W/(m <sup>2</sup> K)
1	1,2 x 1,5	0,86	21	0,40	0,65	0,80
2	2,0 x 2,36	0,0	13	0,40	0,65	0,80
3	1,8 x 2,3	0,0	20	0,38	0,60	0,71
4	2,9 x 2,3	0,0	19	0,38	0,60	0,71
5	3,5 x 2,3	0,0	15	0,38	0,60	0,71
6	1,8 x 2,25	0,10	22	0,36	0,60	0,90
7	2,4 x 2,25	0,0	12	0,40	0,65	1,00
8	1,2 x 2,25	0,0	12	0,40	0,65	1,00
9	3,6 x 1,75	0,80	24	0,40	0,65	0,90
10	1,8 x 1,75	0,80	24	0,40	0,65	0,90

Ruumide akna pindala suhe põrandapindalasse on vaadeldud ruumidel võrdlemisi sarnane, varieerudes vahemikus 0,18 kuni 0,28. Erandiks on väikese põrandapinna ja suure akna pindalaga ruumid 3 ja 6. Akna pindala suhe välisseina pindalasse on vaadeldud ruumidel võrdlemisi varieeruv.



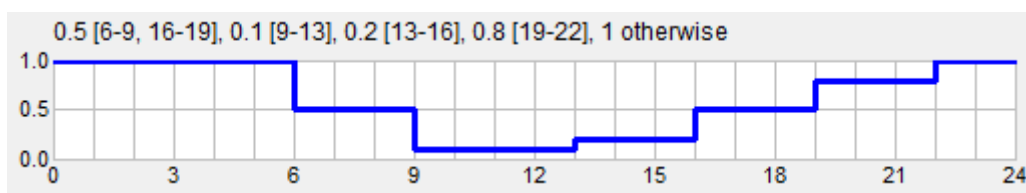
Joonis 20 - valitud ruumide WWR\*g ja WFR\*g väärtused

### 3.3 Suvise ruumitemperatuuri kontroll

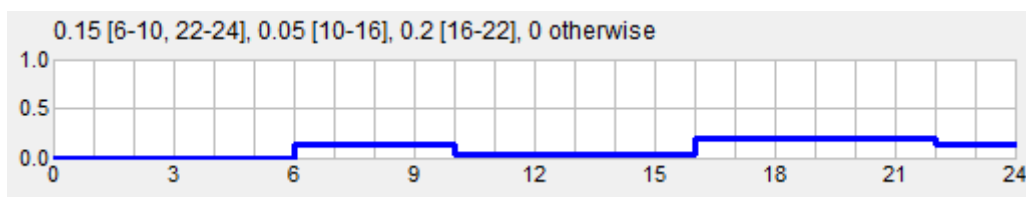
Suvise ruumitemperatuuri kontrolli simulatsioonides on vabasoojuse määramisel lähtutud Vabariigi Valitsuse määruses nr 58 [2] sätestatud parameetritest:

- 28,3 m<sup>2</sup> põrandapinda elaniku kohta ehk 0,0353 inimest/m<sup>2</sup>;
- inimese soojuseralduseks 125 W millest ilmne soojus moodustab 85 W;
- valgustuse maksimaalseks eraldatavaks vabasoojuseks 8 W/m<sup>2</sup>;
- elektriseadmete maksimaalseks eraldatavaks vabasoojuseks 3 W/m<sup>2</sup>.

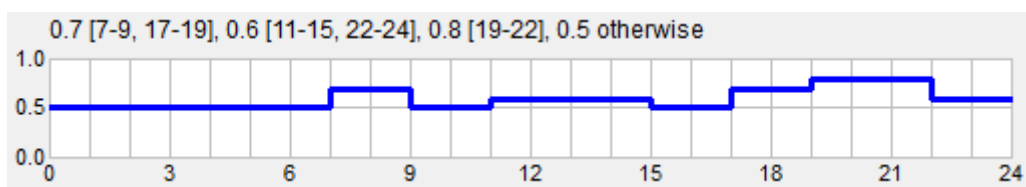
Elamu inimeste, valgustuse ja seadmete kasutusprofiilid on kuvatud joonistel 21-23.



Joonis 21 - elamu inimeste kasutusprofiil (IDA-ICE)



Joonis 22 - elamu valgustuse kasutusprofiil (IDA-ICE)



Joonis 23 - elamu seadmete kasutusprofiil (IDA-ICE)

Kõigis vaadeldud hoonetes on korteripõhise juhtimisega ventilatsioon. Vastavalt määrusele nr 63 [1] on välisõhu vooluhulga väärtuseks arvestatud 0,42 liitrit sekundis põrandapinna ruutmeetri kohta.

Kõik vaadeldud hooned on uusehitised. Vastavalt määrusele nr 58 [2] on hoone õhulekkaarvu baasväärtuseks arvestatud 2,5 m<sup>3</sup>/(h·m<sup>2</sup>). Hoonete infiltratsiooni õhuvooluhulk on arvutatud vastavalt määruses [2] esitatud valemile (7):

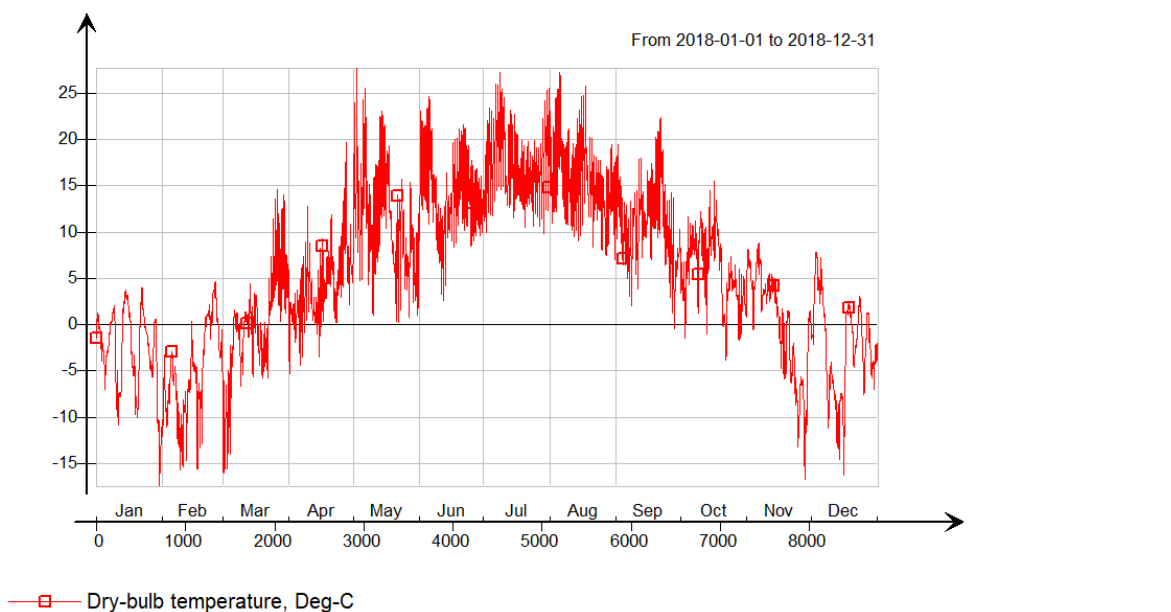
$$q_i = \frac{q_{50}}{3,6 \cdot x} A, \quad (7)$$



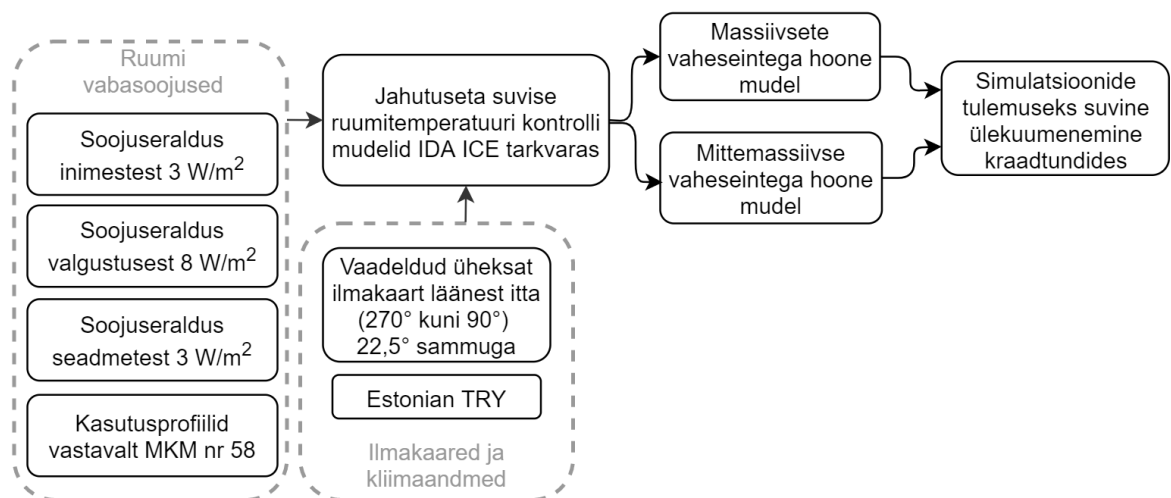
kus

- $q_{50}$  on hoone õhulekkearvu baasväärtus ( $m^3/(h \cdot m^2)$ );
- $A$  on hoone välispiirde sisepindala ( $m^2$ );
- $x$  on hoone kõrguselisuse tegur, kolme- ja neljakorruseliste hoonete puhul  $x = 20$ ; viie- ja enamakorruseliste hoonete puhul  $x = 15$

Vastavalt määrusele nr 58 [2] teostatakse sisekliima- ja energiaarvutused kasutades Eesti energiaarvutuse baasaastat, ehk kliimafaili „Estonian TRY“, mis sisaldab Eesti kliima andmeid 31 aasta kohta perioodil 1970 kuni 2000. [41]



Joonis 24 - Estonian TRY välisõhutemperatuur

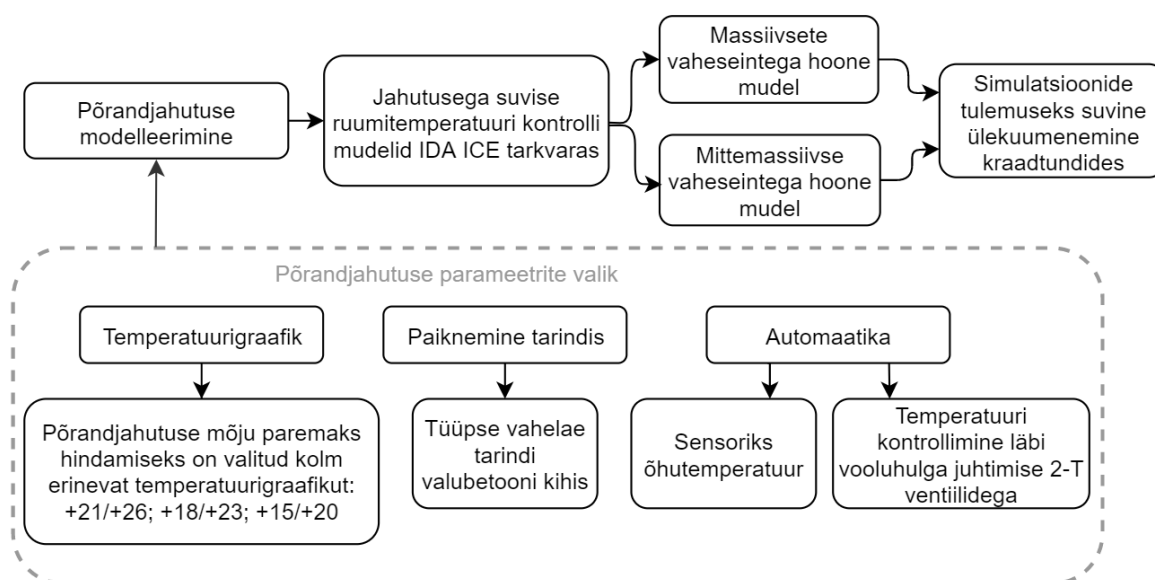


Joonis 25 - Analüüsi võrdlusbaasi koostamise meetodika

### 3.4 Põrandjahutus

Põrandjahutuse kui suvise ruumitemperatuuri kontrolli all hoidmise meetme hindamiseks on järgnevalt kõikidesse uuritud ruumidesse modelleeritud põrandjahutuse süsteem ning teostatud kordussimulatsioonid. Saadud tulemuste võrdlemisel esialgsete simulatsioonide tulemustega on võimalik hinnata, kas põrandjahutus võiks teoreetiliselt olla Eesti tüüpsetes korterelamutes üks ülekuumenemise ennetamise vahend.

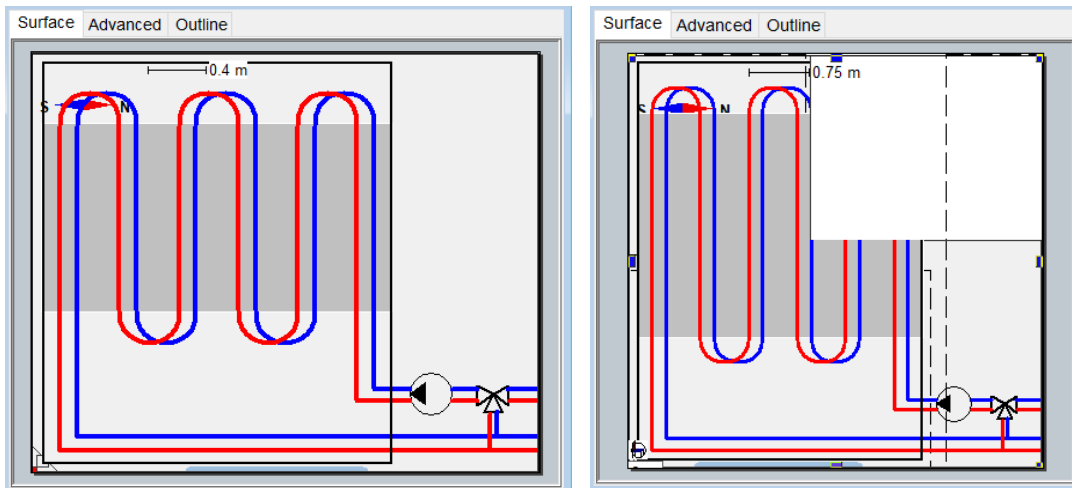
Käesolevas töös hinnatakse meetme teoreetilist mõju või selle puudumist ning seega ei optimeerita süsteemi otseselt reaalsele jahutuskoormusele vastavaks vaid analüüsitakse üldistatud piiripealseid olukordi.



Joonis 26 - Põrandjahutuse mõju uurimise meetodika

#### 3.4.1 Põrandjahutuse modelleerimine IDA-ICE tarkvaras

Tarkvaras IDA-ICE on põrandjahutus mudelisse määratud tsoonipõhiselt, avades esmalt tsooni põrandavaate ja seejärel on uuritavate ruumide põrandatele lisatud ruumielement „hc-floor“. Element on määratud katma kogu põrandapinda, ruumide parema omavahelise võrdluse jaoks mitte arvestades potentsiaalse kohtkindla mööbli paigutusega.



Joonis 27 - põrandkütte- ja jahutuse skeem IDA-ICEs ruumide 1 (ristkülik) ja 2 (ebakorrapärane) näitel

Avades topeltklikiga „hc-floor“ objekti kerkib esile hüpikaken lihtsamate süsteemi dimensioneerimise valikutega koos eeltäidetud vaikeväärtustega (joonis 28). Antud menüüst on võimalik määrata süsteemi kütte- ja jahutusvõimsust, jahutusvedeliku pealevoolu ja tagasivoolu temperatuuri vahet, kontrollimehhanismi ning -sensorit ja segamissõlme tüüpi. Torustiku füüsiliste parameetritena saab siinkohal määrata asukohta (sügavust) tarindikihis ning lihtsustatud soojusülekanne koefitsenti.

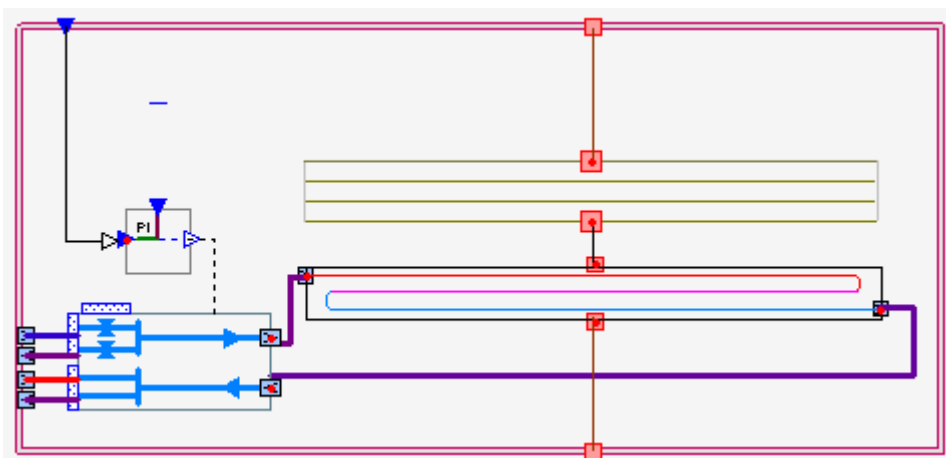
Floor heating and cooling (temperature control)										
Hüdrauliline võimsus	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Cooling</th> <th>Heating</th> <th>W/m<sup>2</sup></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>40.0</td> <td>40.0</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Cooling	Heating	W/m <sup>2</sup>	40.0	40.0				
Cooling	Heating	W/m <sup>2</sup>								
40.0	40.0									
Pv ja Tv temperatuuride vahe	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Cooling</th> <th>Heating</th> <th>W</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>794.0</td> <td>794.0</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Cooling	Heating	W	794.0	794.0				
Cooling	Heating	W								
794.0	794.0									
Kontroller ja sensor	<table border="1"> <tbody> <tr> <td>5.0</td> <td>5.0</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td colspan="2">PI</td> <td>▼</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Air temperature</td> <td>▼</td> </tr> </tbody> </table>	5.0	5.0	°C	PI		▼	Air temperature		▼
5.0	5.0	°C								
PI		▼								
Air temperature		▼								
Coil massflow										
<input type="radio"/> Flow control (2 way valve)	Reguleerventili valik									
<input checked="" type="radio"/> Temperature control (3 way valve). Flow given by Design power and this DeltaT:	3 °C									
Location in slab										
Sügavus põrandatarindis	0.02 m									
Heat transfer coefficient										
H-water-pipe-fin*	10 W/(m <sup>2</sup> ·K)									

Joonis 28 - põrandkütte ja -jahutuse dimensioneerimise vaikeväärtused IDA-ICEs

Kuna käesoleva töö eesmärgiks ei ole süsteemi täpne dimensioneerimine ruumides esineva suurima jahutusvajaduse tarbeks, vaid üldise hinnangu andmine põrandjahutuse kasutusvõimalustele, on süsteemi hüdrauliliseks jahutusvõimsuseks jäetud  $40 \text{ W/m}^2$  mis ühtib kirjanduses [13][25][26] pakutud põrandjahutuse süsteemide jahutusvõimsustega. Arvestades, et samal süsteemil on talvel ka põrandkütte funktsioon, on pealevoolu ja tagasivoolu temperatuuride vaheks valitud  $5^\circ\text{C}$  tulenevalt enimlevinud põrandkütte temperatuuriprofiilidest [9]. Süsteemi kontrolleriiks on PI-kontroller, süsteemi regulaatoriiks on ruumiõhu temperatuur ja vooluhulga kontrolli meetodiks on määratud 2-tee ventiilid. Siinkohal on lihtsustusena eeldatud, et süsteem töötab kui tavaline põrandküttesüsteem ja täpsemalt pole süsteemi juhtimist uuritud.

Valitud põrandal on parketikihi paksuseks 10 mm ning selle all 80mm valubeton, arvestades, et soovituslik betoonikihi paksus põrandkütte- ja jahutuse süsteemide kohal on temperatuuri ühtlustumise jaoks vähemalt 30 mm [9] on toru sügavuseks mõõdetuna toru välispinnalt määratud 0,04 m. Soojusjuhtivuse koefitsent iseloomustab siinkohal torustiku sammu ning soojuse ülekannet jahutusveelt homogeensetesse tarindikihtidesse, selleks on määratud 30, mis vastab standardi EN-13577 [42] järgi tüüpsele valubetonkihis olevale plastiktorule.

Põrandkütte- ja jahutuse toimimist IDA-ICEs saab lähemalt vaadelda ja seadistada ruumielemendi skemaatilise plaani järgi. Joonisel 29 on esitatud väljavõtte skemaatilisest plaanist millelt on eemaldatud põrandkütte PI-kontroller, muutes valitud ruumielemendi seeläbi vaid põrandjahutuse funktsiooni tagavaks. Detailsemaid muudatusi põrandjahutuse süsteemi töösse ei ole siinkohal tehtud.



Joonis 29 - Põrandjahutuse skemaatiline plaan IDA-ICEs

### 3.5 Juhtumiuuringud

Hindamaks akna suuruse ja jahutuse seadevalu mõju ruumide ülekuumenemisele, kui ülekuumenemise vastaseks meetmeks on põrandjahutus, viiakse läbi juhtumiuuringud. Juhtumiuuringute subjektiks on valitud kaks ruumi, mille päevavalgustegur on alla soovituslikku normi. Päevavalgustegur on arvatud vastavalt standardi EVS-894 [4] juhiste.

Juhtumiuuringute raames suurendatakse valitud ruumide akna pindala piisavalt, et uueks päevavalgusteguriks oleks  $DF > 2$ . Valitud ruume simuleeritakse ülekuumenemise suhtes kõige kriitilisemas ilmakaares kolme jahutusvee temperatuurigraafiku ja kolme jahutuse seadevaluuga. Ilmakaare ja jahutuse seadevalu valikud on esitatud peatükis 4.2.

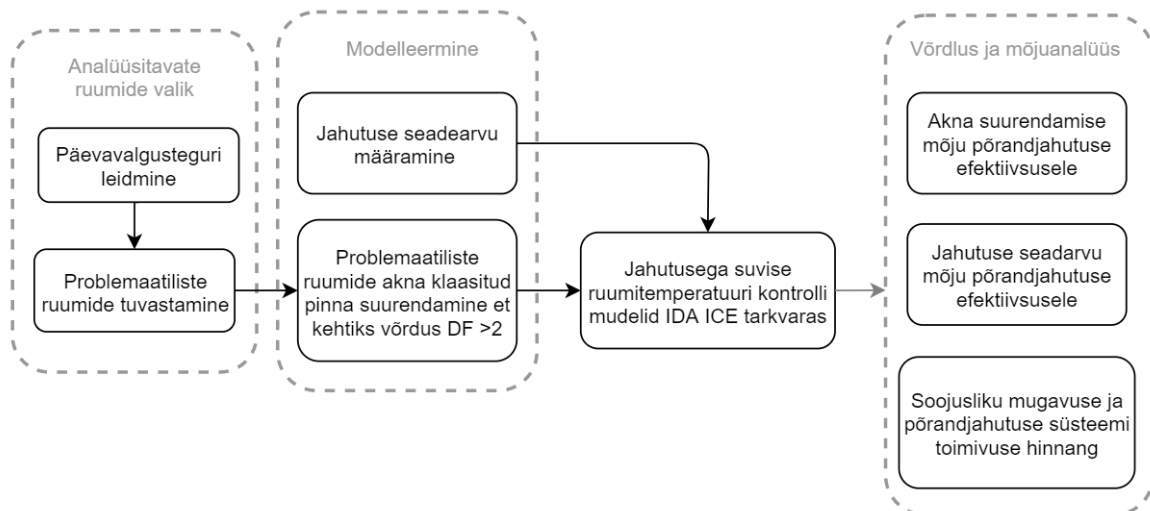
Ruumide valikuks on teostatud päevavalgusteguri arvutus. Arvutuse jaoks vajalikud parameetrid on ruumide kaupa toodud tabelis 9. Klaasi hooldetegur  $m$  on leitud vastavalt standardile [4]. Arvestatud on, et tegu on korterelamutega linna elurajoonides ja aknapinnad on avatud tugevale vihmale, kuna puudub horisontaalne varjestus. Hooldetegur  $m$  on kõigile ruumidele seega  $1 - (0,08 \times 0,5) = 0,96$ . Sisepindade peegeldustegurite kaalutud keskmine  $R$  on siseruumide täpsemate andmete puudumise tõttu võetud vastavalt standardi [4] juhendile väärtuseks 0,5. Taeva nähtava nurga  $\Theta$  leidmisel on arvestatud akna välisseinas paiknemise sügavusega.

Tabel 9 - Valitud ruumide arvutusparameetrid ja DF algolukorras

Ruumi nr	Hajuvalguse läbivustegur $T_{vis}$ , -	Hooldetegur $m$ , -	Töötasapinnast kõrgemal olev klaasitud pindala $A_w$ , m <sup>2</sup>	Nähtava taeva nurk $\Theta$ , °	Ruumi sisepindade kogusumma $A$ , m <sup>2</sup>	Peegeldustegur $R$ , -	DF	$a_{D,max}$
1	0,65	0,96	1,38	83,7	52,9	0,5	1,82	3,65
2	0,65	0,96	2,54	83,7	90,6	0,5	1,95	3,65
3	0,60	0,96	2,02	82,7	46,8	0,5	2,73	3,5
4	0,60	0,96	3,29	82,7	132,6	0,5	1,57	3,5
5	0,60	0,96	4,17	82,7	162,6	0,5	1,63	3,5
6	0,60	0,96	2,04	83,7	55,9	0,5	2,34	3,38
7	0,65	0,96	3,06	82,7	113,2	0,5	1,86	3,38
8	0,65	0,96	1,53	82,7	69,7	0,5	1,51	3,38
9	0,65	0,96	4,51	86,5	127,7	0,5	2,55	4,13
10	0,65	0,96	2,26	86,5	58,4	0,5	2,78	4,13

Päevavalgusteguri seisukohast on probleemsed mitmed ruumid, nii päevavalgusteguri suuruse kui ka ruumi sügavusest tuleneva päevavalgusteguri ühtluse osas. Päevavalgustegur on liiga madal ruumides 1, 4, 5, 7 ja 8. Ruumi 1 aken on märgatavalt väiksem, kui teistes ruumides, ruumid 4, 5 ja 7 on suure põrandapinna ja madala WFR väärtusega. Ruumis 8 on võrreldes teiste sarnase põrandapindalaga ruumidega (2, 10) aknaklaasi pindala töötasapinna kohal ligi poolteist korda väiksem. Ruumi maksimaalne sügavus on soovituslikust suurem ruumides 3, 4, 5, 7, 8 ja 9; seda köök-elutubade puhul ilma hoone sisemusse ulatuvate koridoriosadega arvestamata. Kui mitte arvestada välisfassaadi suhtes nurga all olevat esiku osa (joonis 13), on ruumi 4 sisepindala 97,9 m<sup>2</sup> ning DF 2,13.

Juhtumiuuringuteks on valitud ruumid 1 ja 8. Mõlema ruumi akna laius on originaalolukorras 1,2 m. Ruumis 1 tuleb päevavalgusteguri tõstmiseks väärtusele >2 laiendada akent 0,1 m võrra, 1,3 meetrile. Ruumis 8 tuleb päevavalgusteguri tõstmiseks väärtusele >2 laiendada akent 0,4 m võrra, 1,6 meetrile.



Joonis 30 - Juhtumiuuringute meetodika

## 4. TULEMUSED JA ANALÜÜS

Tulemuste peatükk on jaotatud kaheks. Esimeses osas on esitatud suvise ruumitemperatuuri kontrolli tulemused koos põrandjahutuse kasutuselevõttuga ja võrdlus, kui suurt efekti põrandjahutuse kasutuselevõtt annab. Lisaks on hinnatud põrandjahutuse mõju sõltuvust ilmakaarest ja temperatuurigraafikust. Antud on hinnang põrandjahutusele kui suvise ülekuumenemise ennetamise meetmele üldiselt.

Teises osas esitatakse juhtumiuuring kahe ruumi kohta. Valitud on ruumid mille DF on alla soovitusliku normi, ning ruumide aknaid on suurendatud, et  $DF > 2$ . Juhtumiuuringu raames vaadeldakse akna suurendamise mõju ülekuumenemisele põrandjahutusega ruumides ning jahutuse temperatuuri seadearvu alandamise mõju põrandkütte efektiivsusele. Lisaks analüüsitakse põgusalt sisekliima klasse põrandjahutusega ruumides ning põrandjahutuse toimivust süsteemi-, pinna- ja õhutemperatuuride abil vastavalt päikesekiirguse intensiivsusele.

### 4.1 Põrandjahutuse mõju suvisele ruumitemperatuurile

Põrandjahutuse mõju suvisele ruumitemperatuurile on eraldi hinnatud massiivsete ja mittemassiivsete hoonete kategooriates. Järgnevalt on esitatud valitud ruumide suvise ruumikontrolli tulemused kraadtundides antud lähteandmete korral. Tulemused on info parema loetavuse nimel ümardatud kümnelisteni ja tähistatud värvikoodiga, kus madalaimad väärtused (tabeli lõikes) on tähistatud helekollasega ning kõrgeimad väärtused on tähistatud tumeroosaga.

Tabel 10 - suvine ülekuumenemine kraadtundides massiivse hoone korral, algolukord

Ruum	W	W-SW	SW	S-SW	S	S-SE	SE	E-SE	E
1	530	690	710	650	650	760	920	950	750
2	2050	2450	2400	2090	1960	2190	2610	2750	2400
3	2510	3040	3100	2860	2800	3140	3660	3800	3310
4	1910	2290	2260	1990	1910	2190	2610	2750	2390
5	2320	2730	2730	2440	2330	2590	2990	3090	2700
6	1470	1880	2010	1890	1880	2110	2430	2390	1870
7	1590	1910	1900	1690	1610	1820	2160	2280	1960
8	1320	1610	1610	1430	1370	1530	1800	1870	1570
9	1840	2250	2290	2080	1990	2190	2550	2630	2240
10	1440	1830	1920	1790	1840	2090	2380	2450	2110

Tabel 11 - suvine ülekuumenemine kraadtundides mittemassiivse hoone korral, algolukord

Ruum	W	W-SW	SW	S-SW	S	S-SE	SE	E-SE	E
1	1418	1750	1773	1594	1561	1809	2175	2286	1921
2	3702	4300	4290	3870	3692	4090	4743	4958	4402
3	5168	6025	6106	5667	5545	6110	6967	7219	6433
4	3432	4009	4023	3664	3557	3968	4587	4781	4247
5	3717	4302	4335	3985	3866	4244	4807	4950	4405
6	1568	2046	2114	1877	1829	2149	2670	2838	2320
7	3103	3635	3647	3303	3181	3542	4113	4302	3798
8	2486	2946	2958	2662	2559	2853	3324	3454	3001
9	3260	3829	3859	3520	3375	3722	4298	4469	3924
10	3543	4199	4302	3991	3954	4376	4963	5134	4554

Mittemassiivsete vaheseintega hoones on ülekuumenemise algväärtused märgatavalt kõrgemad kui massiivsete vaheseintega hoones, erandina ruumis 6. Ruumides 1 ja 10 on ülekuumenemine 2,1 – 2,5 korda kõrgem, kui mittemassiivsete vaheseinte puhul. Ruumides 2-5 ja 7-9 on ülekuumenemine 1,6 – 2,1 korda kõrgem, kui mittemassiivsete vaheseinte puhul. Käesolevas töös on mittemassiivsete ruumide vaheseinteks arvestatud soojustusega kipskarkass-kerghahesein, ning ruumide omavaheliste ühendustega uste näol ei ole arvestatud. Seega on mittemassiivsete vaheseintega hoonete puhul antud juhtumis tegemist olukorraga, kus vabasoojus ei pääse ruumist välja ja tekitab kõrgemat ülekuumenemist.

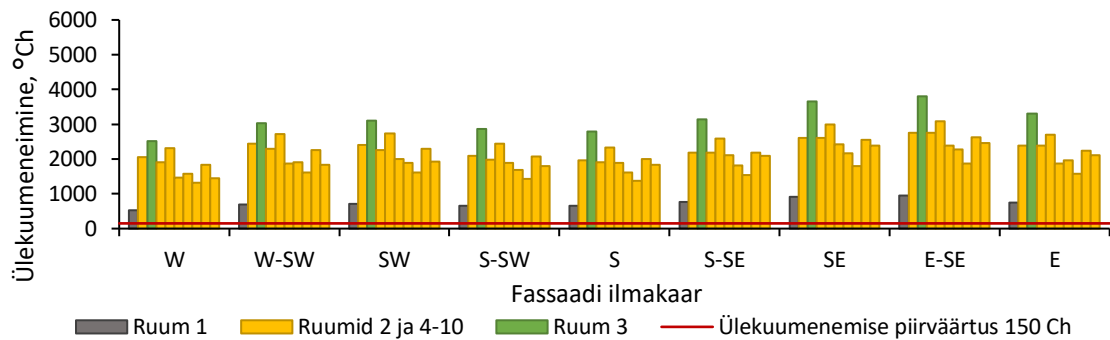
Üldiselt on tulemused hoonetüüpide lõikes enamvähem omavahel võrreldavad, välja arvatud ruumid 1 ja 3. Massiivse hoonetüübi puhul on ruumise 1 ja 3 ülekuumenemise tulemused on valimi keskmisest vastavalt 62 – 68 % väiksemad ja 47 – 55 % suuremad. Ülejäänud kaheksa ruumi kogukeskmise ülekuumenemise väärtus kraadtundides on 2110 °Ch ning ilmakaarte lõikes kõigub keskmine väärtus 1740 °Ch-st läänesuunal 2530 °Ch-ni E-SE suunal.

Mittemassiivse hoonetüübi puhul on ruumi 3 ülekuumenemine valimi keskmisest 62,6 – 67,4 % suurem ja ruumi 1 ülekuumenemine 48,5 – 54,8 % väiksem. Ülejäänud kaheksa ruumi kogukeskmise ülekuumenemise väärtus kraadtundides on 3670 °Ch ning ilmakaarte lõikes kõigub keskmine väärtus 3100 °Ch-st läänesuunal 4360 °Ch-ni E-SE suunal. Tähelepanuväärne on ruum 6, mille ülekuumenemine on 36,1 – 50,1 % valimi keskmisest väiksem. Kuna ruum 6 on nurgaruum, siis on selle ruumi välisseina osakaal kogu ruumi piirdetarinditest märgatavalt suurem. Selletõttu on suurem ka ruumi soojusvahetus jaheda öise välisõhuga suurem.

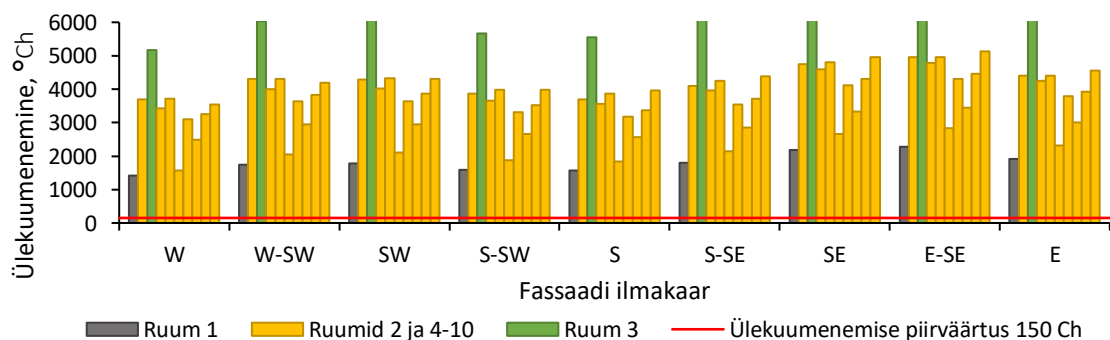


Ruumide ülekuumenemises ilma põrandjahutusega ei ole kogu valimile rakendatavat korrelatsiooni ruumide kasutusotstarbe, põrandapinna, WWR või WFR vahel. Edaspidises analüüsis on eraldi vaadeldud ruumi 1, ruumi 3 ning ülejäänud ruumide keskmisi väärtuseid. Ruumide jagunemist vaadeldavatesse kategooriatesse esialgse ülekuumenemise järgi ning ülekuumenemise suurusjärke iseloomustavad joonised 31-32.

Mittemassiivse hoone puhul on ruum 6 samuti arvestatud valimi keskmise koosseisu, kuna põrandjahutuse kasutusele võttes ebakorrapära kraadtundides kaob. Autori hüpotees on, et põrandjahutusega situatsioonides on antud töös vaadeldud mittemassiivsete vaheseintega ruumide soojusvahetus läbi välisfassaadi olulise mõjuga. Kui aga ruumi lisada jahutussüsteem, siis väheneb sise- ja välisõhu temperatuuride vahe ning välisseina osakaal ruumi piirdetarinditest ei ole enam nii suure mõjuga.



Joonis 31 - Ülekuumenemine massiivsete hoonete ruumides ilma põrandjahutusega



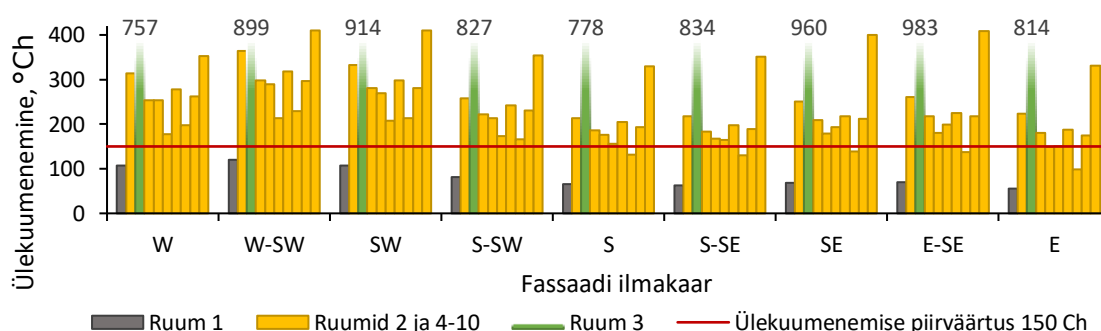
Joonis 32 - Ülekuumenemine mittemassiivsete hoonete ruumides ilma põrandjahutusega

Võttes kasutusele pörandjahutuse jahutusvee temperatuurigraafikuuga 21/26 °C väheneb suvine ülekuumenemine vaadeldud ruumides märgatavalt.

Ruum 1 on väikese pöranda pindalaga, madala WFR ja WWR-ga ning (suhteliselt) vähese algse ülekuumenemisega ruum. Massiivsete vaheseintega analüüsiolukorras piisab juba valitud +21/+26 temperatuurigraafikust, et suvine ülekuumenemine jääks igas ilmakaares alla 150 °Ch piiri. Ruumis 3, mis on väikese pindala, kõrge WFR ja WWR-ga ning (suhteliselt) kõrge algse ülekuumenemisega ruum ulatub ülekuumenemine massiivsete vaheseintega variandis 5-6,5 korda üle normi piiri.

Ülejäänud ruumidest on massiivsete vaheseintega variandis problemaatilisem ruum 10, kus ülekuumenemine ilmakaarte lõikes on keskmiselt 2,5 korda üle normi piiri. Ruum 10 on sarnaselt ruumile 3 pigem väikese pörandapinna ja üle keskmise WFR ja WWR-ga, keskmine päikesekiirgusest tingitud vabasoojus on aga ruumis 10 ligikaudu 36% madalam kui ruumis 3. Seetõttu on ülekuumenemine ruumis 10 nii jahutusega kui jahutuseta olukorras siiski märgatavalt väiksem, kui ruumis 3.

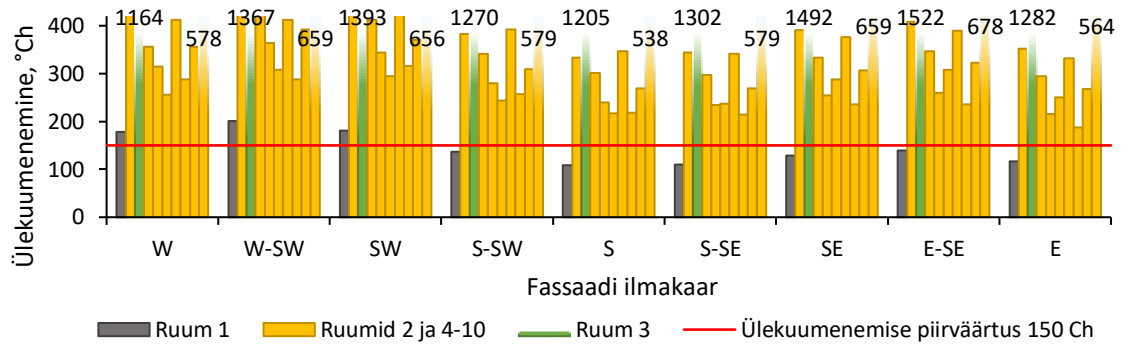
Ruumide 2 ja 4-9 keskmine ülekuumenemine kõigi ilmakaarte lõikes on 212 °Ch, mis on 1,4 korda üle normi piiri. Detailne ruumide ülekuumenemine kraadtundides on esitatud tabelis 12. Tabelis 12 ja analoogselt edaspidi on väärtuste visuaalseks eristamiseks kasutatud värvikoodi. Alla normipiiri jäävad ülekuumenemise väärtused on tähistatud tumerohelisest heleroheliseni tõusvas järjekorras ning üle normipiiri jäävad ülekuumenemise väärtused on tähistatud helekollasest oranžini tõusvas järjekorras.



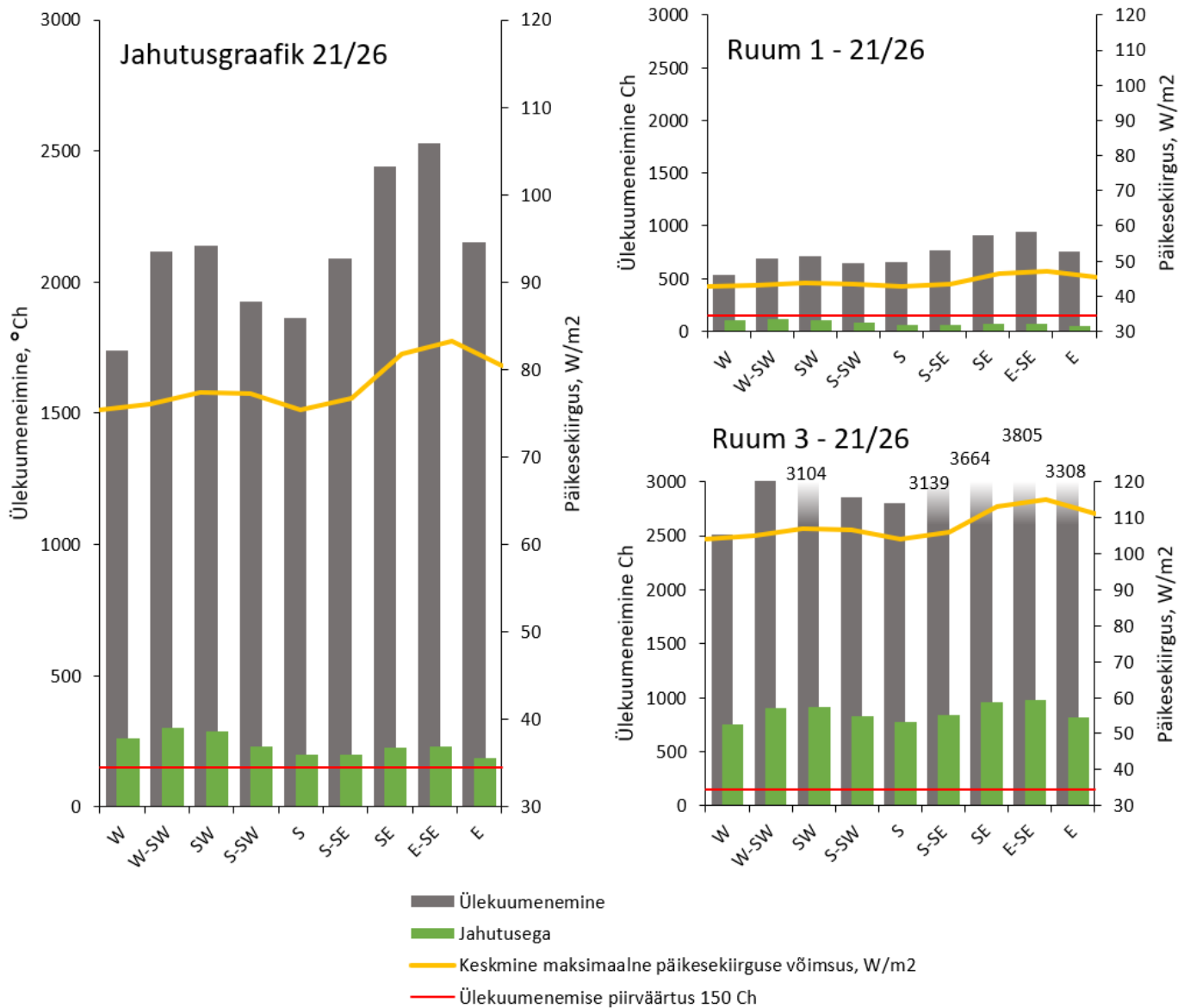
Joonis 33 - Ülekuumenemine massiivsete hoonete ruumides pörandjahutuse 21/26 graafiku korral

Mittemassiivsete vaheseintega hoones on ruum 1 ainus, kus jahutusvee temperatuurigraafikust +21/+26 piisab ülekuumenemise hoidmiseks normi piires. Ruumis 3 ulatub ülekuumenemine mittemassiivsete vaheseintega variandis 7,7-10 korda üle normi piiri. Ruumis 10 ulatub ülekuumenemine mittemassiivsete vaheseintega variandis 3,6-4,4 korda üle normi piiri.

Ruumide 2 ja 4-9 keskmine ülekuumenemine kõigi ilmakaarte lõikes on 321 °Ch, mis on 2,2 korda üle normi piiri. Detailne ruumide ülekuumenemine kraadtundides on esitatud tabelis 13.



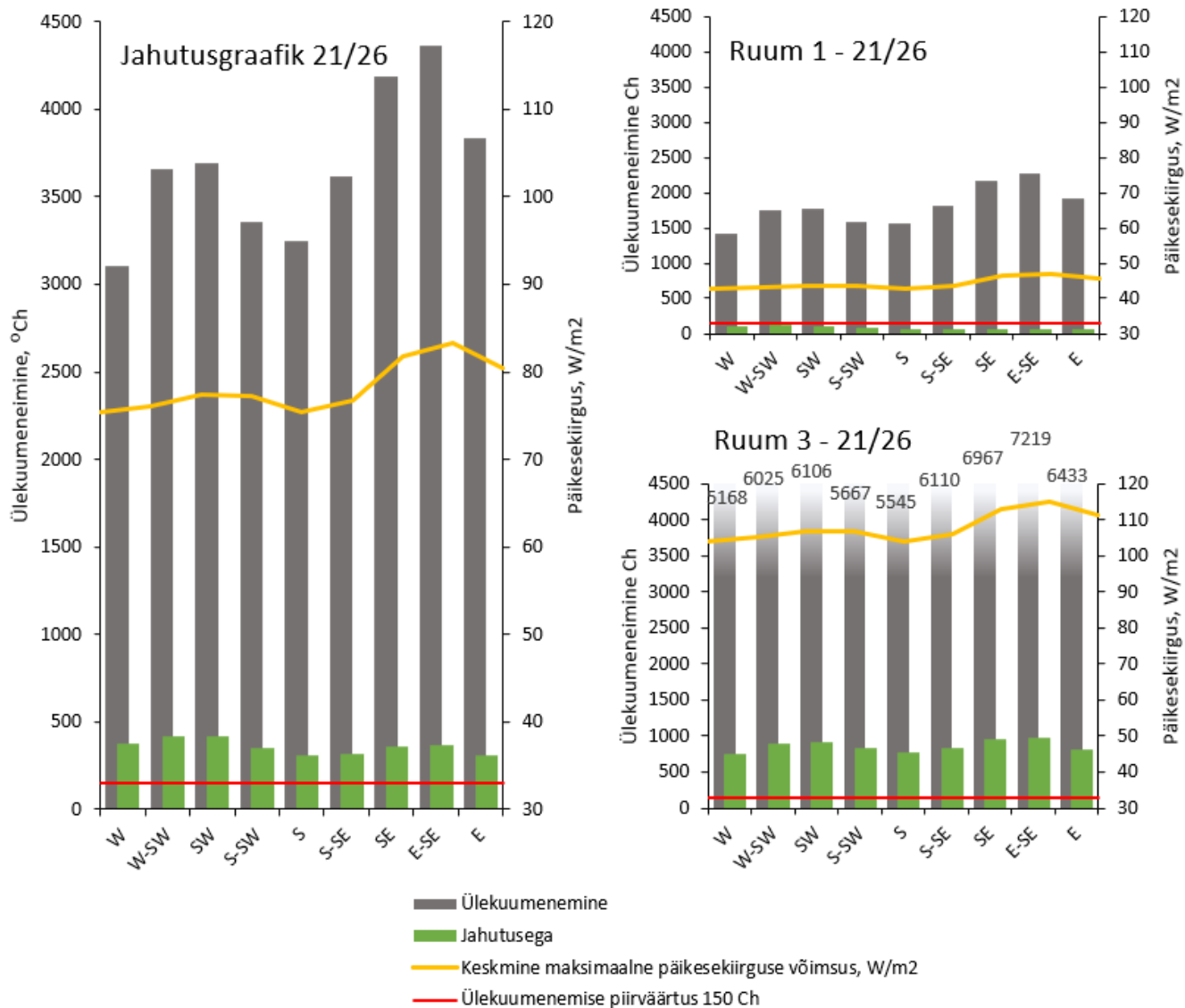
Joonis 34 - Ülekuumenemine mittemassiivsete hoonete ruumides põrandjahutuse 21/26 graafiku korral



Joonis 35 – Ülekuumenemine jahutuseta ja jahutusega olukorras massiivses hoones temperatuurigaafikuga 21/26

Tabel 12 - Ülekuumenemine kraadtundides põrandjahutuse 21/26 temperatuurigaafiku korral (massiivne)

Ruum	W	W-SW	SW	S-SW	S	S-SE	SE	E-SE	E
1	107	120	107	82	65	63	69	70	55
2	313	364	333	258	213	218	251	261	223
3	757	899	914	827	778	834	960	983	814
4	254	298	281	222	186	183	209	218	181
5	253	289	269	214	176	168	179	181	148
6	177	214	207	174	156	165	194	199	151
7	257	295	276	222	186	181	201	207	173
8	178	208	193	149	118	116	126	123	89
9	263	296	282	230	193	189	212	218	175
10	353	410	410	354	330	351	400	409	331



Joonis 36 - Ülekuumenemine jahutuseta ja jahutusega olukorras mittemassiivses hoones temperatuurigaafikuga 21/26

Tabel 13 - Ülekuumenemine kraadtundides põrandjahutuse 21/26 temperatuurigaafiku korral (mittemassiivne)

Ruum	W	W-SW	SW	S-SW	S	S-SE	SE	E-SE	E
1	179	201	180	136	109	111	128	140	116
2	436	505	470	383	333	344	391	409	352
3	1164	1367	1393	1270	1205	1302	1492	1522	1282
4	356	425	412	341	301	297	333	347	295
5	314	364	344	279	240	234	255	260	216
6	256	308	295	243	217	238	288	308	250
7	413	413	461	392	347	342	376	390	332
8	288	288	316	258	219	215	236	236	188
9	356	393	371	310	270	269	306	322	267
10	578	659	656	579	538	579	659	678	564

Keskmiselt vaadatuna saab öelda, et põrandjahutus temperatuurigraafikuga +21/+26 vähendab ülekuumenemist analüüsitud ruumides küll tugevalt, kuid mitte piisavalt. Põrandjahutuse efektiivsus (efektiivsuse mõõteks on siin ja edaspidi kasutatud kraadtundide vähenemist protsentuaalselt võrreldes algolukorraga) jääb massiivsete seintega hoonetes vahemikku 75,5 - 94,5% (tabel 14), arvestamata ruumi 3. Mittemassiivsete seintega hoonetes jääb efektiivsus vahemikku 83,7 - 95,1% (tabel 15). Tabelite 14-15 ja analoogselt edaspidi puhul on kasutatud värvikoodi, kus madalaimad efektiivsuse väärtused on tähistatud punasega ja kõrgeimad helesinisega.

Märgata on, et põrandjahutuse efektiivsus on suurem hoone idasuunalistel fassaadidel, ning idasuunalistel fassaadidel ületab ülekuumenemine piirnormi vähem, kui läänesuunalistel, hoolimata algsetest kõrgematest ülekuumenemise näitajatest. Töö autori hüpotees on, et selle nähtuse põhjustab otsese päikesekiirguse hilisem jõudmine läänefassaadi ruumideni. Läänefassaadi ruumid soojenevad päeva jooksul ka ilma otsese päikesekiirguseta (õhutemperatuuri tõusust, kaudselt läbi hoone teiste ruumide). Käesoleva töö peatükis 2.4 on toodud viited kirjandusele, mis toob välja põrandjahutuse jahutusvõimsuse järsu suurenemise otsese päikesekiirguse käes. Seda omadust arvesse võttes saab järeldada, et idafassaadi ruumides on põrandjahutus päeva esimeses pooles efektiivsem, kui päeva teises pooles, mis aga vähendab liigsoojuse akumulatsiooni ruumis. Läänesuuna ruumides on põrandjahutus päeva esimeses pooles vähemefektiivne, kui päeva teises pooles, ning liigsoojus akumuleerub.

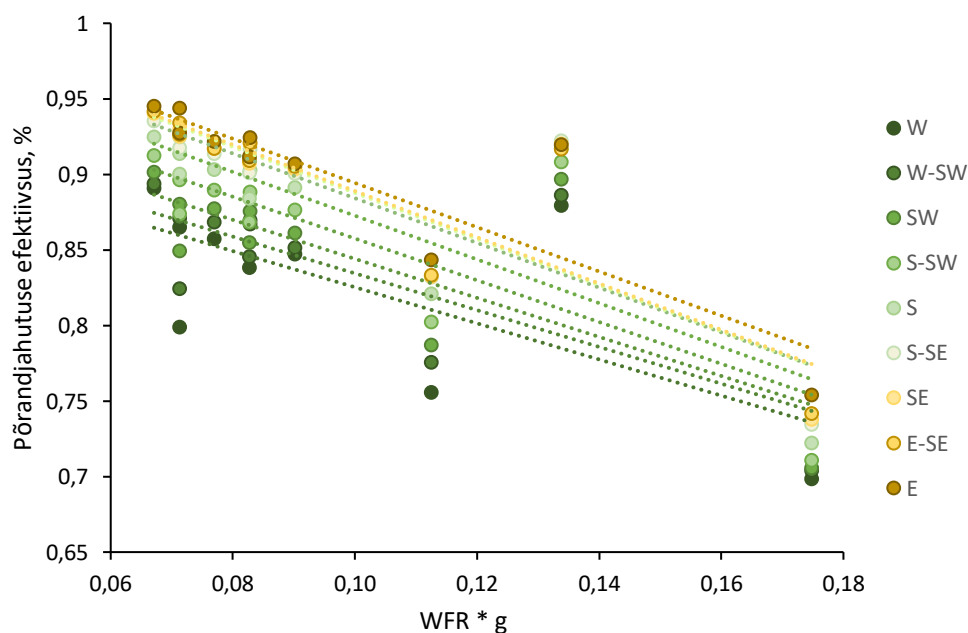
Tabel 14 - Põrandjahutuse efektiivsus 21/26 temperatuurigraafiku korral (massiivne)

Ruum	W	W-SW	SW	S-SW	S	S-SE	SE	E-SE	E
1	79,9%	82,4%	84,9%	87,4%	90,0%	91,7%	92,5%	92,7%	92,7%
2	84,7%	85,1%	86,1%	87,6%	89,1%	90,0%	90,4%	90,5%	90,7%
3	69,8%	70,4%	70,6%	71,1%	72,2%	73,4%	73,8%	74,2%	75,4%
4	86,7%	87,0%	87,6%	88,8%	90,3%	91,6%	92,0%	92,1%	92,4%
5	89,1%	89,4%	90,1%	91,2%	92,5%	93,5%	94,0%	94,2%	94,5%
6	87,9%	88,6%	89,7%	90,8%	91,7%	92,2%	92,0%	91,7%	91,9%
7	83,8%	84,5%	85,5%	86,8%	88,4%	90,1%	90,7%	90,9%	91,2%
8	86,5%	87,1%	88,0%	89,6%	91,4%	92,4%	93,0%	93,4%	94,4%
9	85,7%	86,8%	87,7%	88,9%	90,3%	91,4%	91,7%	91,7%	92,2%
10	75,5%	77,5%	78,7%	80,2%	82,1%	83,2%	83,2%	83,3%	84,3%

Tabel 15 - Põrandjahutuse efektiivsus 21/26 temperatuurigraafiku korral (mittemassiivne)

Ruum	W	W-SW	SW	S-SW	S	S-SE	SE	E-SE	E
1	85,0%	86,8%	88,6%	90,2%	92,3%	93,7%	94,1%	93,9%	93,7%
2	87,5%	87,7%	88,6%	89,8%	90,8%	91,6%	91,9%	91,9%	92,1%
3	77,5%	77,3%	77,2%	77,6%	78,3%	78,7%	78,6%	78,9%	80,1%
4	89,6%	89,4%	89,8%	90,7%	91,5%	92,5%	92,7%	92,7%	93,0%
5	91,5%	91,6%	92,1%	93,0%	93,8%	94,5%	94,7%	94,8%	95,1%
6	83,7%	84,9%	86,1%	87,0%	88,1%	88,9%	89,2%	89,1%	89,2%
7	86,7%	88,7%	87,4%	88,1%	89,1%	90,4%	90,9%	90,9%	91,3%
8	88,4%	90,2%	89,3%	90,3%	91,5%	92,5%	92,9%	93,2%	93,7%
9	89,1%	89,7%	90,4%	91,2%	92,0%	92,8%	92,9%	92,8%	93,2%
10	83,7%	84,3%	84,8%	85,5%	86,4%	86,8%	86,7%	86,8%	87,6%

Põrandjahutuse efektiivsuse ning WWR vahel töö autor korrelatsiooni ei tuvastanud, küll aga on omavahel mingil määral seotud põrandjahutuse efektiivsus ja WFR – üldjoontes võib antud valimi põhjal väita, et mida suurem on WFR, seda vähemefektiivne on põrandjahutuse kasutuselevõtt, kusjuures valdavalt mida läänepoolsema fassaadiga tegu, seda väiksem on WFR suurenemise suhteline mõju (trendijoon on laugem).

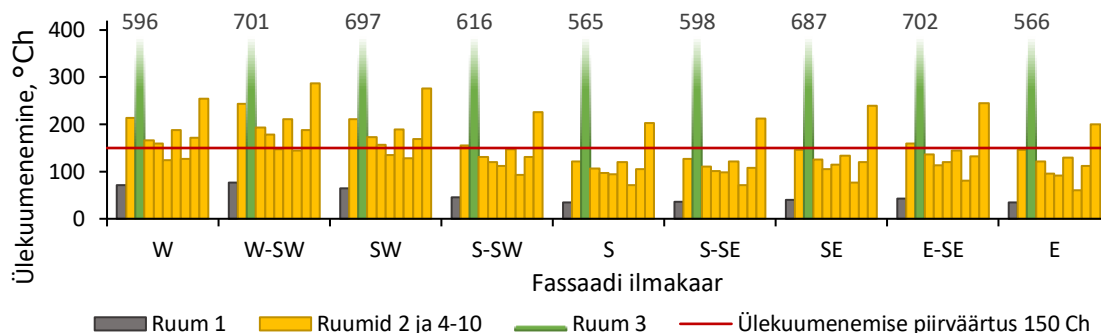


Joonis 37 - põrandjahutuse efektiivsuse ja WFR\**g* vaheline seos temperatuurigraafiku 21/26 korral

Võttes massiivsete siseseintega hoonetes kasutusele põrandjahutuse jahutusvee temperatuurigraafikuga +18/+23 °C jääb suvine ülekuumenemine kraadtundides normi piiresse enamikes ruumides, väljaarvatud mõndades läänefassaadides. Ruumis 1 väheneb ülekuumenemine veelgi, efektiivsus tõuseb vahemikust 79,9 - 92,7%

vahemikku 86,7 - 95,4%. Ruumis 3 on ülekuumenemine 3,7–4,6 korda üle normi ja ruumis 10 on ülekuumenemine 2,2 - 2,7 korda üle normi.

Ruumide 2 ja 4-9 keskmine ülekuumenemine kõigi ilmakaarte lõikes on 144 °Ch, mis on alla normi piiri. Detailne ruumide ülekuumenemine kraadtundides on esitatud tabelis 16.

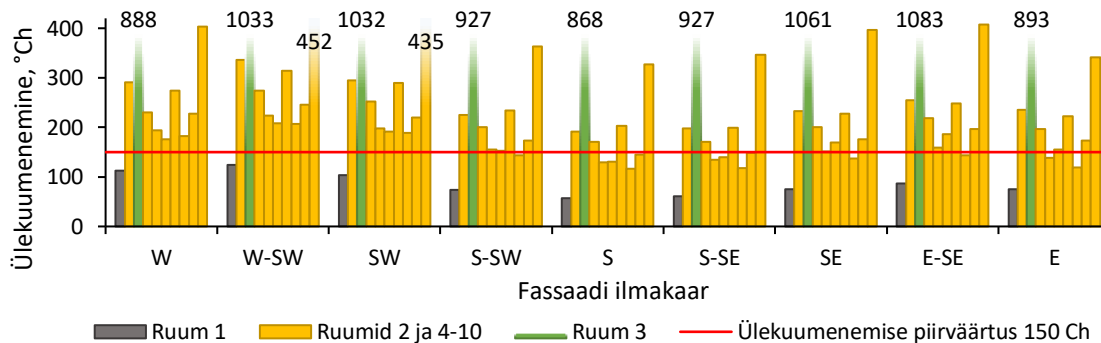


Joonis 38 - Ülekuumenemine massiivsete hoonete ruumides põrandjahutuse 18/23 graafiku korral

Ka mittemassiivsete vaheseintega hoones väheneb ülekuumenemine ruumis 1 veelgi. Efektiivsus tõuseb vahemikust 85,0 - 93,7% vahemikku 90,4 - 96,1%, efektiivsuse tõus on väiksem, kui massiivsete siseseintega olukorras. Sama kehtib ka teiste ruumide puhul.

Ruumis 3 ulatub ülekuumenemine mittemassiivsete vaheseintega variandis 5,7-7,2 korda üle normi piiri. Ruumis 10 ulatub ülekuumenemine mittemassiivsete vaheseintega variandis 2,2 - 3 korda üle normi piiri.

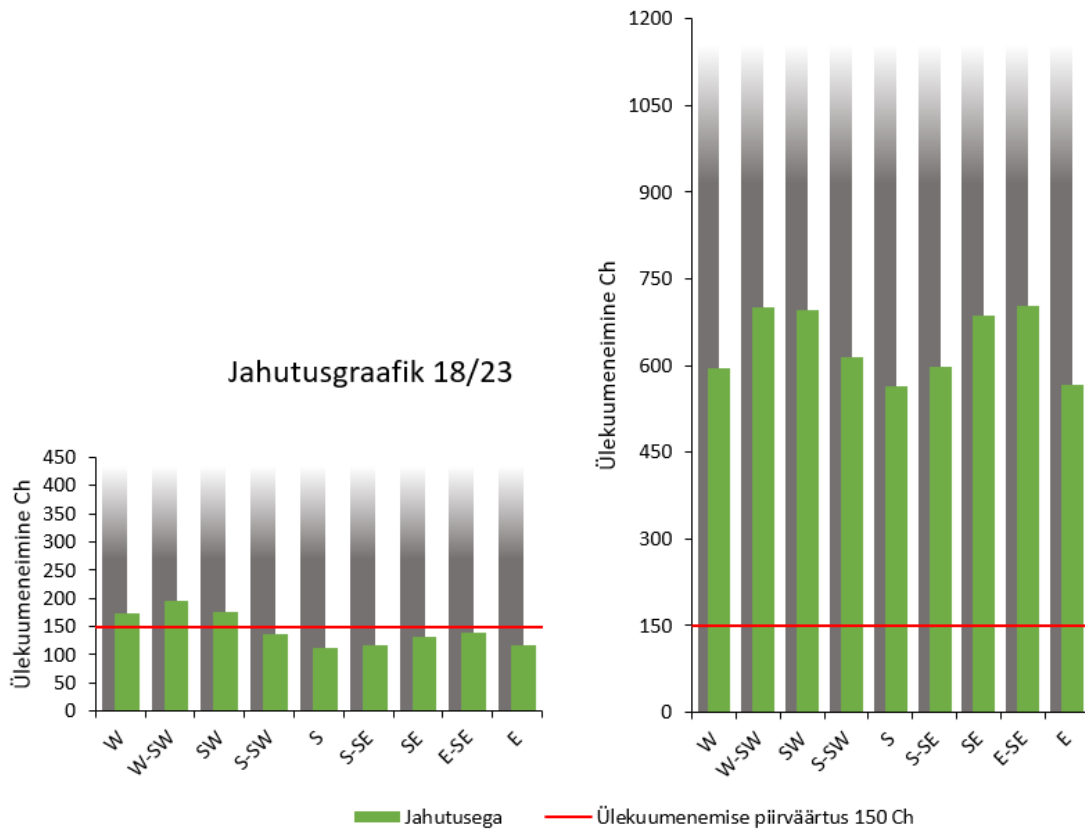
Ruumide 2 ja 4-9 keskmine ülekuumenemine kõigi ilmakaarte lõikes on 197 °Ch, mis on 1,3 korda üle normi piiri. Detailne ruumide ülekuumenemine kraadtundides on esitatud tabelis 17.



Joonis 39 - Ülekuumenemine mittemassiivsete hoonete ruumides põrandjahutuse 18/23 graafiku korral



Ruum 3 - 18/23

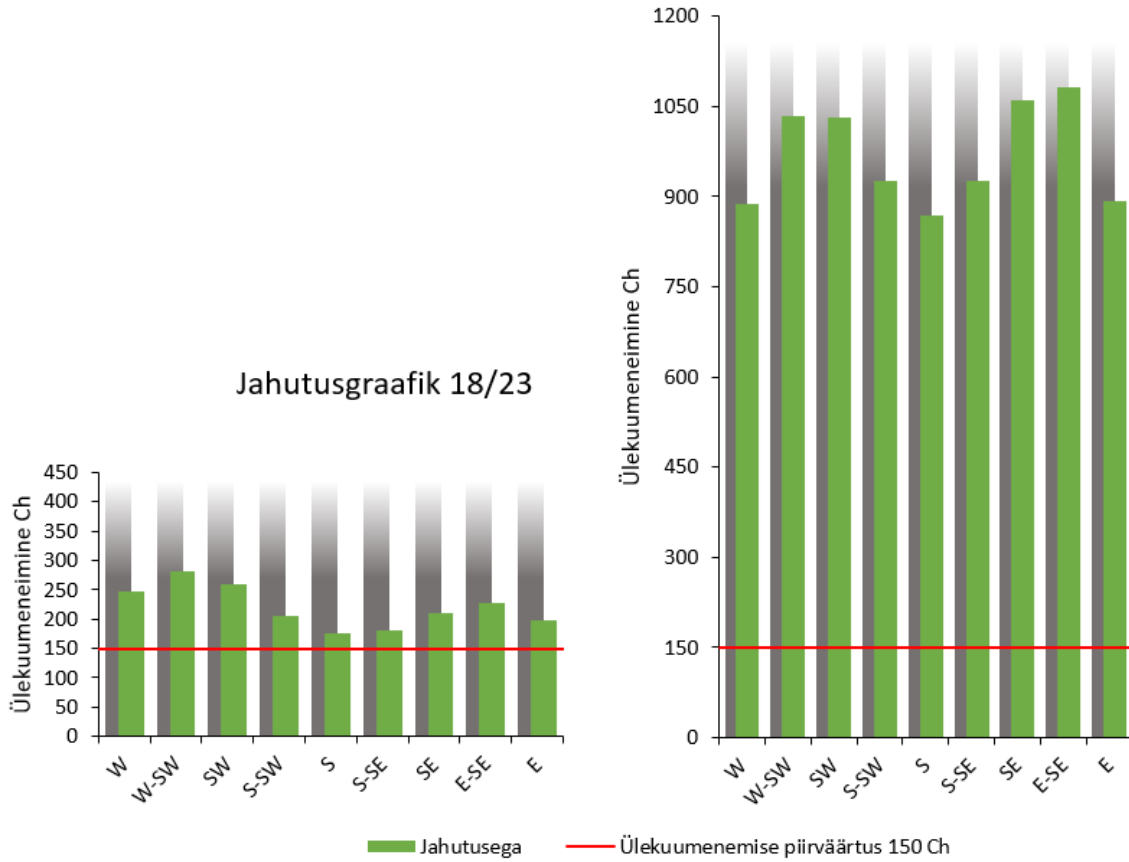


Joonis 40 - Ülekuumenemine jahutusega olukorras massiivses hoones temperatuurigaafikuga 18/23

Tabel 16 - Ülekuumenemine kraadtundides põrandjahutuse 18/23 temperatuurigaafiku korral (massiivne)

Ruum	W	W-SW	SW	S-SW	S	S-SE	SE	E-SE	E
1	71	76	64	45	35	37	40	42	35
2	214	243	211	155	122	127	146	160	147
3	596	701	697	616	565	598	687	702	566
4	167	193	173	131	106	111	126	137	121
5	160	179	157	120	97	101	106	113	95
6	124	147	136	112	95	99	115	120	92
7	173	196	175	136	109	112	124	135	119
8	114	132	116	83	64	65	72	74	55
9	172	188	169	130	105	108	120	132	112
10	255	287	277	227	203	212	239	245	200

Ruum 3 - 18/23



Joonis 41 - Ülekuumenemine jahutusega olukorras mittemassiivses hoones temperatuurigaafikuga 18/23

Tabel 17 - Ülekuumenemine kraadtundides põrandjahutuse 18/23 temperatuurigaafiku korral (mittemassiivne)

Ruum	W	W-SW	SW	S-SW	S	S-SE	SE	E-SE	E
1	113	124	104	73	57	61	75	87	76
2	292	336	294	225	191	198	232	254	235
3	888	1033	1032	927	868	927	1061	1083	893
4	230	274	252	200	171	171	201	219	197
5	195	223	199	155	129	134	151	159	139
6	176	208	192	152	131	140	169	186	155
7	274	314	290	234	204	199	227	248	223
8	182	207	188	144	116	118	137	144	119
9	228	246	220	174	145	148	176	196	173
10	403	452	435	363	327	346	397	408	341

Keskmiselt vaadatuna saab öelda, et pörandjahutus temperatuurigraafikuga +18/+23°C vähendab ülekuumenemist massiivse hoone puhul enamikes ilmakaartes piisavalt. Pörandjahutuse efektiivsus (tabelid 18 ja 19) jääb massiivse hoone ruumides vahemikku 82,3 - 96,5% ja mittemassiivse hoone ruumides vahemikku 86,7 - 96,9%, arvestamata ruumi 3. Jahutusvee pealevoolu temperatuuri vähenedes pörandjahutuse efektiivsus tõuseb.

Tabel 18 - Pörandjahutuse efektiivsus 18/23 temperatuurigraafiku korral (massiivne)

Ruum	W	W-SW	SW	S-SW	S	S-SE	SE	E-SE	E
1	86,7%	88,9%	91,0%	93,1%	94,7%	95,2%	95,6%	95,5%	95,4%
2	89,6%	90,1%	91,2%	92,6%	93,8%	94,2%	94,4%	94,2%	93,9%
3	76,3%	76,9%	77,6%	78,5%	79,8%	81,0%	81,3%	81,5%	82,9%
4	91,3%	91,6%	92,4%	93,4%	94,5%	95,0%	95,2%	95,0%	94,9%
5	93,1%	93,4%	94,3%	95,1%	95,9%	96,1%	96,5%	96,4%	96,5%
6	90,0%	92,8%	94,4%	95,0%	94,8%	94,6%	95,0%	96,1%	95,0%
7	89,1%	89,7%	90,8%	92,0%	93,2%	93,9%	94,3%	94,1%	93,9%
8	91,3%	91,8%	92,8%	94,2%	95,3%	95,8%	96,0%	96,1%	96,5%
9	90,6%	91,7%	92,6%	93,7%	94,7%	95,1%	95,3%	95,0%	95,0%
10	82,3%	84,3%	85,6%	87,3%	89,0%	89,9%	89,9%	90,0%	90,5%

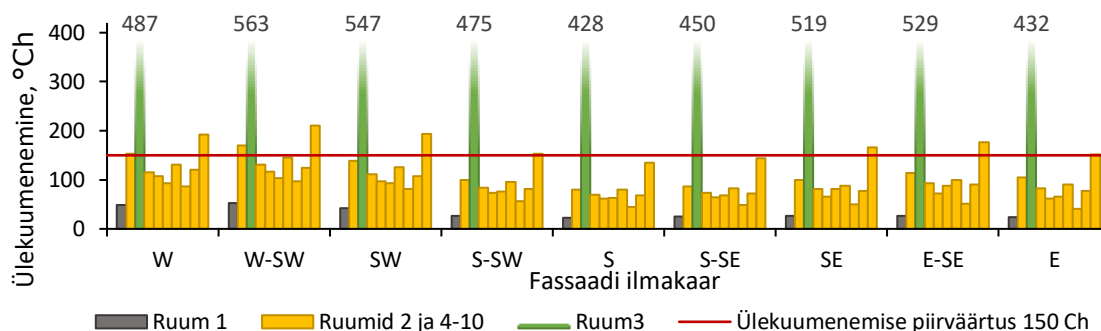
Tabel 19 - Pörandjahutuse efektiivsus 18/23 temperatuurigraafiku korral (mittemassiivne)

Ruum	W	W-SW	SW	S-SW	S	S-SE	SE	E-SE	E
1	90,4%	91,8%	93,3%	94,7%	96,0%	96,4%	96,4%	96,3%	96,1%
2	91,6%	91,9%	92,9%	94,0%	94,9%	95,2%	95,2%	95,0%	94,7%
3	82,8%	82,9%	83,1%	83,6%	84,3%	84,8%	84,8%	85,0%	86,1%
4	93,3%	93,2%	93,7%	94,5%	95,2%	95,7%	95,6%	95,4%	95,4%
5	94,8%	94,8%	95,4%	96,1%	96,7%	96,8%	96,9%	96,8%	96,9%
6	86,7%	90,6%	92,8%	93,0%	92,4%	92,1%	93,0%	94,5%	94,5%
7	91,2%	91,4%	92,1%	92,9%	93,6%	94,4%	94,5%	94,2%	94,1%
8	92,7%	93,0%	93,6%	94,6%	95,5%	95,9%	95,9%	95,8%	96,1%
9	93,0%	93,6%	94,3%	95,1%	95,7%	96,0%	95,9%	95,6%	95,6%
10	88,6%	89,2%	89,9%	90,9%	91,7%	92,1%	92,0%	92,1%	92,5%

Võttes kasutusele pörandjahutuse jahutusvee temperatuurigraafikuga +15/+20 °C saavutatakse suurel enamusel juhtudest olukord, kus suvine ülekuumenemine kraadtundides jääb normi piiresse. Ruumis 3 on ülekuumenemine 2,9 – 3,7 korda üle normi. Ruumis 10 ulatub ülekuumenemine ilmakaarte lõikes keskmiselt 1,1 korda üle normi piiri, jäädes vahemikku 134 – 210 °Ch. Ainus teine ruum, kus mõnes situatsioonis

põrandjahutus ei suuda tagada ülekuumenemise vältimist on ruum 2 W-SW ja W ilmakaartes, ülekuumenemise väärtusteks vastavalt 170 ja 153 °Ch.

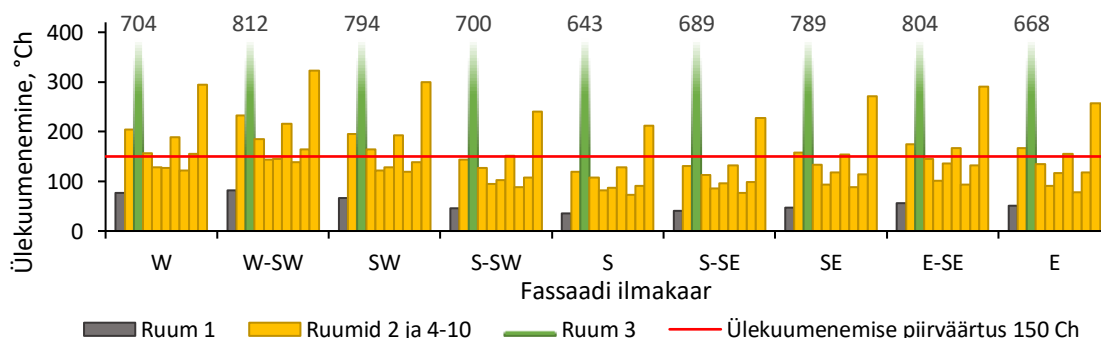
Ruumide 2 ja 4-9 keskmine ülekuumenemine kõigi ilmakaarte lõikes on 88 °Ch, mis on ligi 40% alla normi piiri. Detailne ruumide ülekuumenemine kraadtundides on esitatud tabelis 20.



Joonis 42 - Ülekuumenemine massiivsete hoonete ruumides põrandjahutuse 15/20 graafiku korral

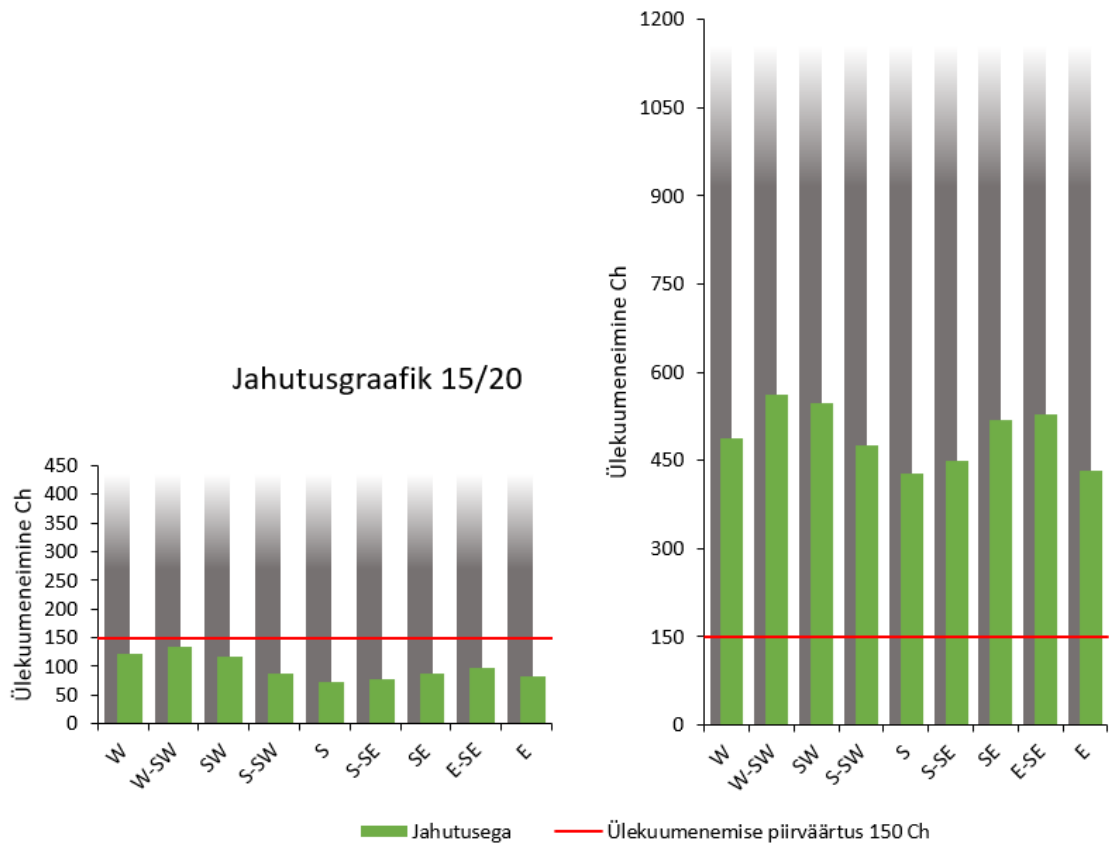
Ka mittemassiivsete vaheseintega hoones on temperatuurigraafik +15/+20 °C enamustel vaadeldavatest juhtidest piisav ülekuumenemise ennetamiseks. Ruumis 3 ulatub ülekuumenemine mittemassiivsete vaheseintega variandis 4,3 - 5,4 korda üle normi piiri. Ruumis 10 ulatub ülekuumenemine mittemassiivsete vaheseintega variandis 1,4 - 2,1 korda üle normi piiri.

Ruumide 2 ja 4-9 keskmine ülekuumenemine kõigi ilmakaarte lõikes on 131 °Ch, mis on alla normi piiri. Detailne ruumide ülekuumenemine kraadtundides on esitatud tabelis 21.



Joonis 43 - Ülekuumenemine mittemassiivsete hoonete ruumides põrandjahutuse 15/20 graafiku korral

Ruum 3 - 15/20

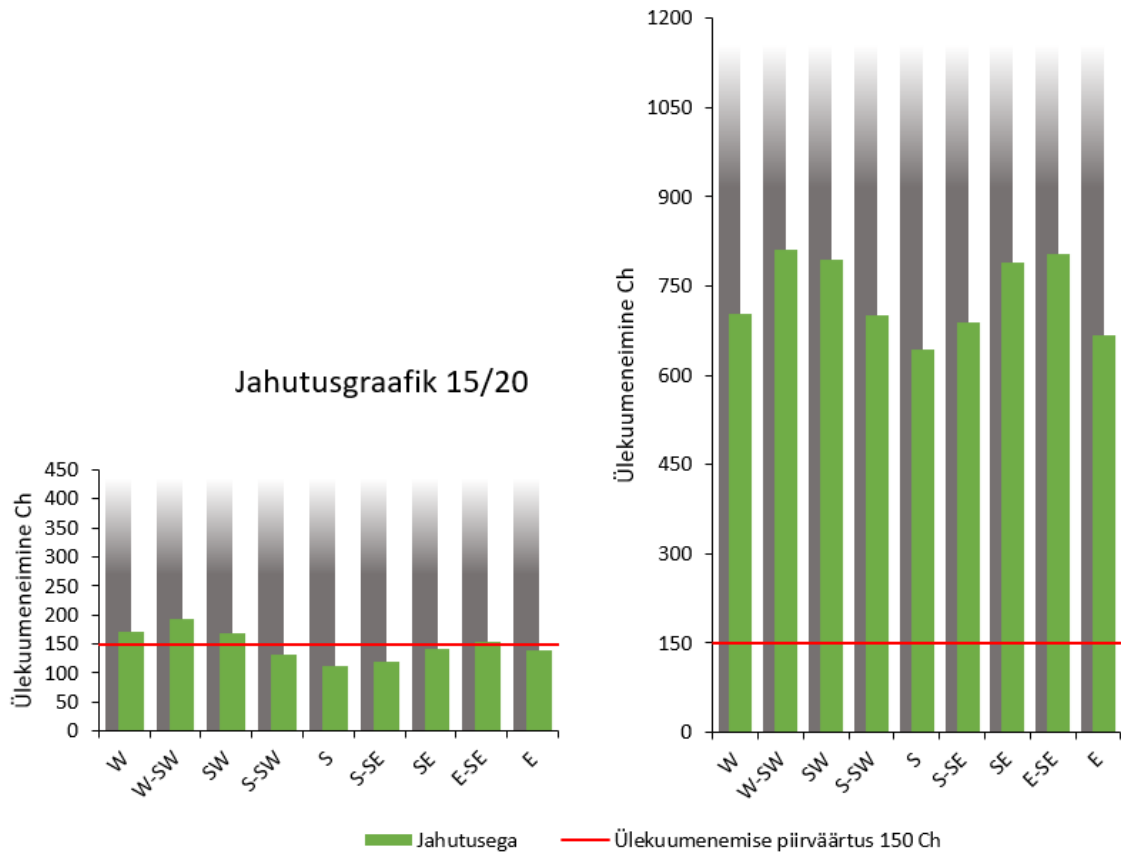


Joonis 44 - Ülekuumenemine jahutusega olukorras massiivses hoones temperatuurigaafikuga 15/20

Tabel 20 - Ülekuumenemine kraadtundides põrandjahutuse 15/20 temperatuurigaafiku korral (massiivne)

Ruum	W	W-SW	SW	S-SW	S	S-SE	SE	E-SE	E
1	48	52	42	27	22	25	26	27	24
2	153	170	139	100	79	86	99	114	105
3	487	563	547	475	428	450	519	529	432
4	115	131	112	83	69	74	82	93	83
5	107	117	96	73	62	64	65	72	62
6	93	104	93	75	63	68	82	88	66
7	121	135	116	88	73	76	82	91	83
8	77	88	73	50	41	44	47	46	37
9	120	125	108	81	69	72	78	90	78
10	192	210	194	153	134	145	166	176	152

Ruum 3 - 15/20



Joonis 45 - Ülekuumenemine jahutusega olukorras mittemassiivses hoones temperatuurigaafikuga 15/20

Tabel 21 - Ülekuumenemine kraadtundides põrandjahutuse 15/20 temperatuurigaafiku korral (mittemassiivne)

Ruum	W	W-SW	SW	S-SW	S	S-SE	SE	E-SE	E
1	76	82	67	45	35	40	47	56	51
2	204	232	195	143	119	131	157	175	167
3	704	812	794	700	643	689	789	804	668
4	156	185	164	127	108	113	133	145	134
5	128	144	122	94	81	86	94	102	91
6	127	146	129	103	86	96	118	135	116
7	189	216	192	151	129	132	154	168	155
8	122	138	120	88	73	77	89	93	78
9	155	164	138	108	91	98	114	132	118
10	295	323	299	240	212	227	271	291	257

Keskmiselt vaadatuna saab öelda, et pörandjahutus temperatuurigraafikuga +15/+20°C vähendab ülekuumenemist kõigis ilmakaartes piisavalt. Pörandjahutuse efektiivsus (tabelid 22 ja 23) jääb massiivse hoone ruumides vahemikku 86,7 - 97,7% ja mittemassiivse hoone ruumides vahemikku 91,7 - 97,9%, arvestamata ruumi 3. Jahutusvoo pealevoolu temperatuuri vähenedes pörandjahutuse efektiivsuse tõus aeglustub.

Tabel 22 - Pörandjahutuse efektiivsus 15/20 temperatuurigraafiku korral (massiivne)

Ruum	W	W-SW	SW	S-SW	S	S-SE	SE	E-SE	E
1	90,9%	92,4%	94,1%	95,9%	96,6%	96,7%	97,2%	97,2%	96,8%
2	92,6%	93,0%	94,2%	95,2%	95,9%	96,1%	96,2%	95,9%	95,6%
3	80,6%	81,5%	82,4%	83,4%	84,7%	85,7%	85,8%	86,1%	87,0%
4	94,0%	94,3%	95,1%	95,8%	96,4%	96,6%	96,9%	96,6%	96,5%
5	95,4%	95,7%	96,5%	97,0%	97,4%	97,5%	97,8%	97,7%	97,7%
6	93,7%	94,5%	95,4%	96,0%	96,7%	96,8%	96,6%	96,3%	96,5%
7	92,3%	92,9%	93,9%	94,8%	95,5%	95,8%	96,2%	96,0%	95,8%
8	94,1%	94,5%	95,4%	96,5%	97,0%	97,1%	97,4%	97,5%	97,7%
9	93,5%	94,4%	95,3%	96,1%	96,6%	96,7%	97,0%	96,6%	96,5%
10	86,7%	88,5%	89,9%	91,4%	92,7%	93,1%	93,0%	92,8%	92,8%

Tabel 23 - Pörandjahutuse efektiivsus 15/20 temperatuurigraafiku korral (mittemassiivne)

Ruum	W	W-SW	SW	S-SW	S	S-SE	SE	E-SE	E
1	93,6%	94,6%	95,7%	96,8%	97,6%	97,6%	97,8%	97,6%	97,5%
2	94,1%	94,4%	95,3%	96,2%	96,7%	96,8%	96,8%	96,5%	96,3%
3	86,4%	86,5%	87,0%	87,6%	88,4%	88,7%	88,7%	88,9%	89,6%
4	95,4%	95,4%	95,9%	96,5%	97,0%	97,2%	97,1%	97,0%	96,8%
5	96,6%	96,6%	97,2%	97,6%	97,9%	98,0%	98,0%	97,9%	97,9%
6	91,9%	92,9%	93,9%	94,5%	95,3%	95,5%	95,6%	95,2%	95,0%
7	93,9%	94,1%	94,7%	95,4%	96,0%	96,3%	96,3%	96,1%	95,9%
8	95,1%	95,3%	96,0%	96,7%	97,2%	97,3%	97,3%	97,3%	97,4%
9	95,2%	95,7%	96,4%	96,9%	97,3%	97,4%	97,3%	97,1%	97,0%
10	91,7%	92,3%	93,0%	94,0%	94,6%	94,8%	94,5%	94,3%	94,4%

Pörandjahutuse kasutamise võimalikkuse üks piirparameetreid tulenevalt kondenseerumise ohust ja mõjust soojuslikule mugavusele on pörandi pinna temperatuur. Pörandi pinna temperatuur sõltub otseselt pörandjahutuse jahutusvee pealevoolu temperatuurist. Temperatuurigraafikuga +15/+20 °C jäävad minimaalsed pörandi pinna temperatuurid (tabelid 24 ja 25) vaadeldud massiivsete siseseintega ruumides vahemikku 21,97 – 23,36 °C ja mittemassiivsete siseseintega ruumides vahemikku 22,04 – 23,21 °C. Antud temperatuurivahemikes ei toimu õhuniiskuse kondenseerumist pörandi pinnal. Pörandi pinnatemperatuur on kõige jahedam vahetult

pealevoolutoru alguses ning pinna temperatuuri andurite kasutamisel tuleb just sinna andur paigaldada.

Põranda pinna miinimumtemperatuurid on kõrgemad, kui soojusliku mugavuse seisukohast soovituslik miinimumtemperatuur. Seega saab väita, et antud töös vaadeldud olukordades ei põhjusta põrandjahutus soojuslikku ebamugavustunnet ruumis viibijatele.

Tabel 24 - Minimaalsed põrandapinna temperatuurid massiivses hoones põrandjahutuse 15/20 temperatuurigraafiku korral

Ruum	E	E-SE	SE	S-SE	S	S-SW	SW	W-SW	W
1	23,36	23,16	23,18	23,07	22,85	22,77	22,86	22,82	22,88
2	22,97	22,85	22,89	22,65	22,57	22,48	22,49	22,51	22,66
3	21,97	21,88	21,98	22,07	22,19	22,29	22,37	22,46	22,57
4	23,04	22,90	22,92	22,85	22,61	22,55	22,49	22,56	22,70
5	23,29	23,05	23,00	22,95	22,65	22,59	22,50	22,61	22,69
6	23,36	23,29	22,94	22,97	22,91	22,95	22,96	23,06	23,19
7	23,01	22,91	22,93	22,74	22,58	22,51	22,49	22,57	22,72
8	23,26	23,04	23,04	22,79	22,68	22,58	22,55	22,66	22,78
9	23,15	23,02	23,03	22,93	22,81	22,68	22,68	22,75	22,83
10	22,82	22,53	22,45	22,42	22,52	22,57	22,60	22,70	22,82

Tabel 25 - Minimaalsed põrandapinna temperatuurid mittemassiivses hoones põrandjahutuse 15/20 temperatuurigraafiku korral

Ruum	E	E-SE	SE	S-SE	S	S-SW	SW	W-SW	W
1	23,16	23,04	23,13	22,99	22,79	22,69	22,81	22,77	22,82
2	22,86	22,80	22,83	22,59	22,47	22,46	22,43	22,52	22,62
3	22,04	21,94	22,04	22,11	22,22	22,31	22,32	22,43	22,56
4	22,89	22,78	22,85	22,66	22,52	22,49	22,44	22,55	22,68
5	23,13	22,96	22,96	22,83	22,59	22,52	22,48	22,56	22,66
6	23,21	23,14	22,87	22,87	22,87	22,93	22,89	23,01	23,14
7	22,83	22,75	22,83	22,58	22,46	22,44	22,45	22,56	22,74
8	23,09	22,97	22,98	22,74	22,64	22,56	22,6	22,67	22,77
9	23,08	22,93	22,98	22,88	22,76	22,67	22,67	22,75	22,79
10	22,76	22,56	22,53	22,50	22,52	22,52	22,59	22,68	22,76

Antud töös ei arvestata ruumide omavahelise ühendusega uste kaudu, ja valitud mittemassiivne tarind on võrdlemisi soojustpidav. Seega tekib mittemassiivsetes ruumides arvutuslik olukord, kus soojus jääb ruumi „lõksu“ ning ülekuumenemise tulemused on suuremad, kui reaalses hoonetes analoogsete sisetarindite puhul. Sellest hoolimata võib kokkuvõtvalt öelda, et põrandjahutus on efektiivne



ülekuumenemise ennetamise meede enamikes vaadeldud eluruumides, vähendades ülekuumenemist kraadtundides 75,5 – 97,9 % sõltuvalt valitud jahutusvee temperatuurigraafikust ja ilmakaarest. Simulatsioonide tulemustest võib järeldada, et põrandjahutus ei pruugi olla sobiv ülekuumenemise ennetamiseks väikese pindalaga ruumides millel on kõrge WWR. Käesolevas töös on sellisteks ruumideks ruumid 3 ja 10 (põranda pindala ja WWR vastavalt 9,0 m<sup>2</sup> ja 0,61 ; 11,2 m<sup>2</sup> ja 0,39).

## 4.2 Juhtumiuuringute analüüs

Juhtumiuuringutena on vaadeldud ruume 1 ja 8 massiivses hoones. Vaatluse aluseks on valitud ilmakaar W-SW kus ülekuumenemine koos põrandjahutuse kasutamisega oli kõige kõrgem. Analoogselt üldvalimi analüüsiga on ka siinkohal võrreldud jahutusvee temperatuurigraafikuid +21/+26 °C, +18/+23 °C ja +15/+20 °C.

Mõlema ruumi akna laius originaalolukorras on 1,2 meetrit. Ruumi 1 DF algolukorras on 1,82 ja ruumi 8 DF on 1,51. Et saavutada ruumides olukord  $DF > 2$  on ruumi 1 akna uueks laiuseks määratud 1,3 m ( $DF = 2,02$ ) ning ruumi 8 uueks laiuseks määratud 1,6 m ( $DF = 2,03$ )

Hindamaks jahutuse seadearu mõju põrandjahutusele on vaadeldud jahutuse seadearu kolmes variandis, määrusejärgne 27 °C ning 26,5 °C ja 26 °C.

Juhtumiuuringute simulatsioonitulemused on esitatud tabelis 26.

Tabel 26 - Ruumid 1 ja 8 massiivses hoones W-SW ilmakaares

Ruum 1				Ruum 8			
Jahutusvee temperatuurigrافیك	Jahutuse seadeար	Akna laius	°Ch	Jahutusvee temperatuurigrافیك	Jahutuse seadeար	Akna laius	°Ch
+ 21 / + 26	27	1,2	120	+ 21 / + 26	27	1,2	210
		1,3	147			1,6	385
	26,5	1,2	79		26,5	1,2	147
		1,3	102			1,6	303
	26	1,2	50		26	1,2	102
		1,3	68			1,6	242
+ 18 / + 23	27	1,2	76	+ 18 / + 23	27	1,2	132
		1,3	95			1,6	260
	26,5	1,2	38		26,5	1,2	76
		1,3	53			1,6	189
	26	1,2	17		26	1,2	42
		1,3	26			1,6	136
+ 15 / + 20	27	1,2	52	+ 15 / + 20	27	1,2	88
		1,3	66			1,6	183
	26,5	1,2	18		26,5	1,2	38
		1,3	27			1,6	117
	26	1,2	3		26	1,2	14
		1,3	8			1,6	73

Ruumi 1 puhul ei põhjusta vaadeldavas olukorras akna pindala suurendamine ülekuumenemise tõusu üle normi piiri. Saab öelda, et põrandjahutuse kasutuselevõtt võimaldaks antud ruumis suurendada päevavalgustegurit piisavalt, et oleks täidetud norm  $DF > 2$ . Tasub märkida, et ruumi 1 akna klaasipind on peaaegu täielikult ülalpool töötasapinna kõrgust, seega akna laiuse suurendamisel on kogu lisandunud klaasi osa päevavalgusteguri seisukohast „kasulik“ pindala.

Ruumi 8 puhul, kus akna kõrgus põrandapinnast on 0,0 m, toob akna pindala suurendamine kaasa ülekuumenemise tõusu üle normi piiri. Simulatsioon on teostatud ülekuumenemise seisukohalt kõige kriitilisemas ilmakaares ja käesolevaga ei saa anda hinnangut ülekuumenemise muudule ida- ja lõunasuuna ilmakaartes.

Et leevendada akna pindala suurenemisest tulenevat ülekuumenemise suurenemist on võimalus meetmena kasutada jahutuse seadeարu alandamist. On näha, et mida madalam on jahutusvee temperatuurigrافیك, seda suurem on jahutuse seadeարu alandamise mõju. Samuti on ühe temperatuurigrافیku löikes seadeարu alandamise mõju seda suurem, mida madalama väärtusega seadeարu on.

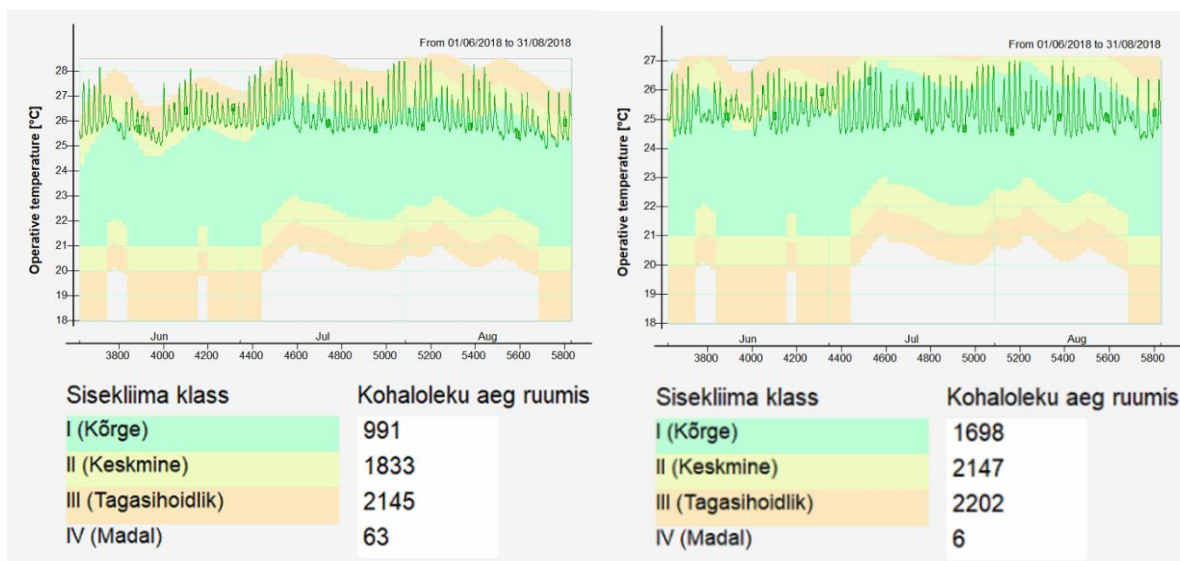
## 4.2.1 Sisekliimaklasside jaotus pörandjahutusega ruumides

Mehaanilise jahutusega sisekliimaklasside jaotust on mõlema ruumi puhul vaadeldud minimaalse ülekuumenemise olukorras ning maksimaalse normi piiresse jääva ülekuumenemise olukorras, kus  $DF > 2$ . Ruumi 1 puhul on nendeks vastavalt situatsioonid parameetritega:

- temperatuurigraafik +15 / +20 °C, jahutuse seade arv 26 °C ning akna laius 1,2m (ülekuumenemine 3 °Ch);
- temperatuurigraafik +21 / +26 °C, jahutuse seade arv 27 °C ning akna laius 1,3m (ülekuumenemine 147 °Ch).

Ruumi 8 puhul on nendeks vastavalt situatsioonid parameetritega

- temperatuurigraafik +15 / +20 °C, jahutuse seade arv 26 °C ning akna laius 1,2m (ülekuumenemine 14 °Ch);
- temperatuurigraafik +18 / +23 °C, jahutuse seade arv 26,5 °C ning akna laius 1,6m (ülekuumenemine 136 °Ch).



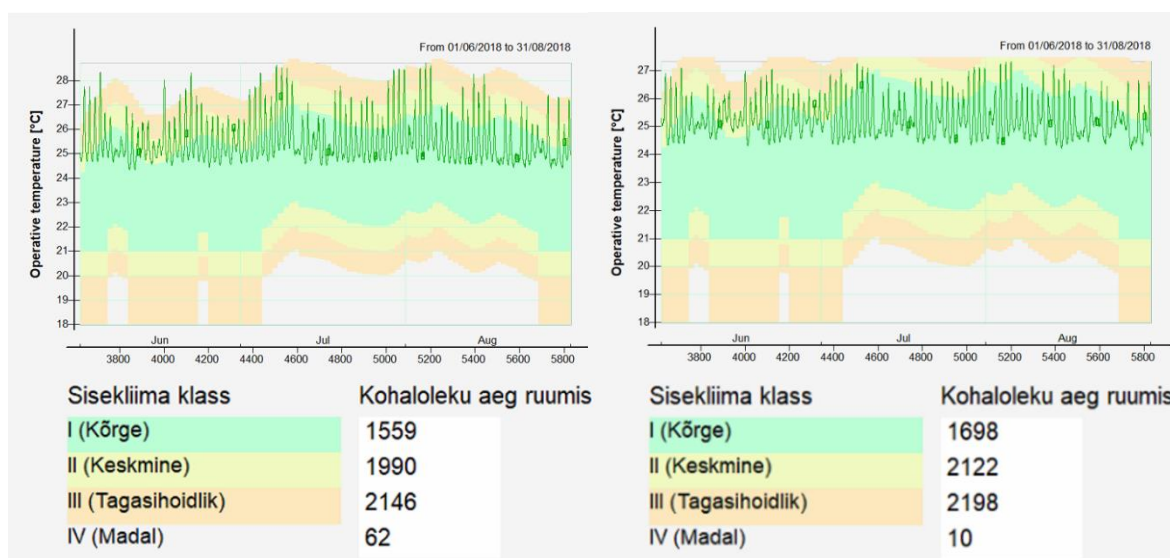
Joonis 46 - Sisekliima klasside ajaline jaotus ruumis 1 massiivse hoone korral – vasakul temperatuurigraafik 21/26, seade arv 27 °C, akna laius 1,3 m; paremal temperatuurigraafik 15/20, seade arv 26 °C, akna laius 1,2 m

Ruumi 1 puhul on maksimaalse normi piiresse jääva ülekuumenemise olukorras sisekliima II klass tagatud 83 % ruumi kasutamise ajast. Sisekliima klass I aga on tagatud 45 % ajast. IV ehk ebasobiva klassi sisekliima on 3 % ruumi kasutamise ajast ning ootuspäraselt on kõik tagasihoidliku ja madala sisekliima klassi juhtumid seotud ajutise kõrge ruumitemperatuuriga.

Minimaalse ülekuumenemise olukorras on sisekliima II klass tagatud 97 % ruumi kasutamise ajast ja I klass 77% ajast. Ebasobivat sisekliimat esineb ainult 0,2% ajast.

Antud väljavõtted on tehtud ilmakaares, kus ülekuumenemise probleem oli suurim. Seega võib järeldada, et tegu on sisekliima klasside seisukohalt kõige ebasobivama olukorraga.

Võib anda hinnangu, et ruum 1-ga analoogsete ruumide puhul saab pörandjahutusega ruumides saavutada sobiliku sisekliima klassi.



Joonis 47 - Sisekliima klasside ajaline jaotus ruumis 8 massiivse hoone korral – vasakul temperatuurigraafik 18/23, seade arv 26,5 °C, akna laius 1,6 m; paremal temperatuurigraafik 15/20, seade arv 26 °C, akna laius 1,2 m

Ruumi 8 puhul on maksimaalse normi piiresse jääva ülekuumenemise olukorras sisekliima II klass tagatud 90 % ruumi kasutamise ajast. Sisekliima klass I aga on tagatud 71 % ajast. IV ehk ebasobiva klassi sisekliima on 3 % ruumi kasutamise ajast.

Minimaalse ülekuumenemise olukorras on sisekliima II klass tagatud 96 % ruumi kasutamise ajast ja I klass 77% ajast. Ebasobivat sisekliimat esineb ainult 0,5% ajast.

Antud väljavõtted on tehtud ilmakaares, kus ülekuumenemise probleem oli suurim. Seega võib järeldada, et tegu on sisekliima klasside seisukohalt kõige ebasobivama olukorraga.

Võib anda hinnangu, et ruum 8-ga analoogsete ruumide puhul saab pörandjahutusega ruumides saavutada sobiliku sisekliima klassi.

Töö autor pöörab tähelepanu asjaolule, et siinkohal on soojuslikku mugavust võrreldud erinevates pörandjahutuse kasutamise olukorades. Soojusliku mugavuse võrdlust ja hinnangut ei ole esitatud vabajahutusega olukorras (so ruumide tuulutamisega akna kaudu), kuna akna avamise tingimuste määramine ei kuulu käesoleva töö mahtu. Akna

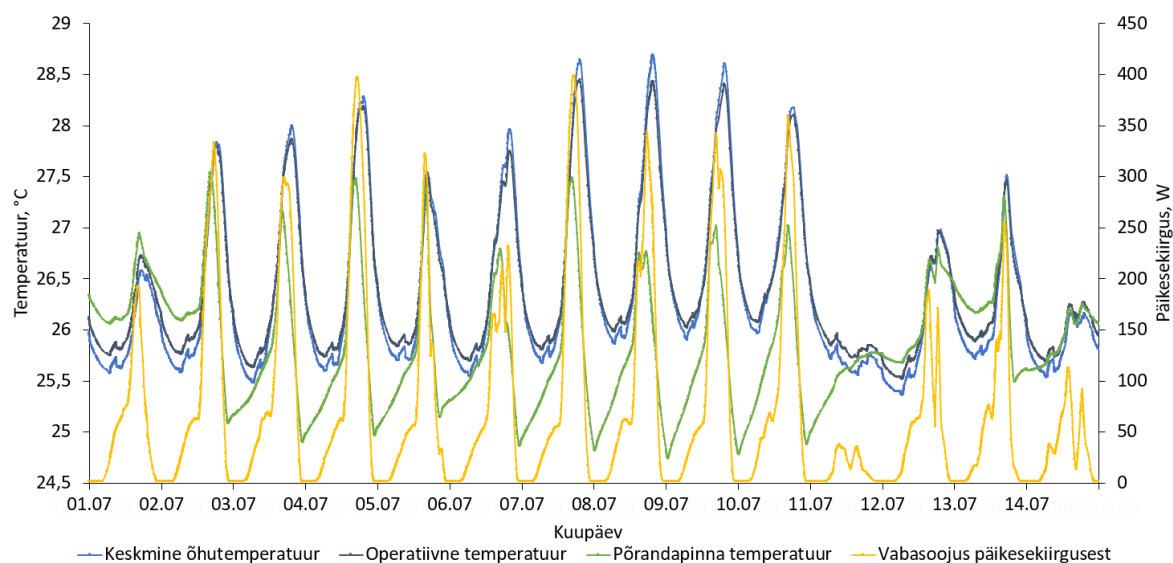
avanemise parameetrikts energiaarvutustes määratakse enamasti ruumi siseõhu temperatuur, kuid uuringud [43][44][45] on näidanud, et reaalse kasutusolukorra modelleerimiseks sellest ei piisa.

Samuti on simulatsiooni- ja modelleerimismetoodika lihtsustuseks IDA ICE tarkvaras ruumi tsooni parameetrite lihtsustus – ruumide sisepindade pinnatemperatuurid on arvestatud ühtlase jaotusega ja sellest tulenevalt on operatiivse temperatuuri arvutus lihtsustunud. Lisaks ei ole arvesse võetud „occupant“ ruumiobjekti füüsilist asetust tsoonis.

#### 4.2.2 Ruumitemperatuuride ja päikesekiirguse seos

Käesolevalt on esitatud väljavõtte juuli esimese kahe nädala kohta (joonis 48). Väljavõttel on kuvatud ruumi keskmine õhutemperatuur, ruumi operatiivne temperatuur, ruumi põrandapinna temperatuur ja vabasoojus päikesekiirgusest.

Väljavõtte on tehtud ruumi 1 simulatsioonist W-SW ilmakaares jahutusvee temperatuurigraafikuga +21 / +26 °C, jahutuse seadearvuga 27 °C ning akna laiusega 1,3m. Valitud ajavahemikku jääb nii suvise ruumitemperatuuri tipp hetk kui ka üks madala päikesekiirgusega päev.



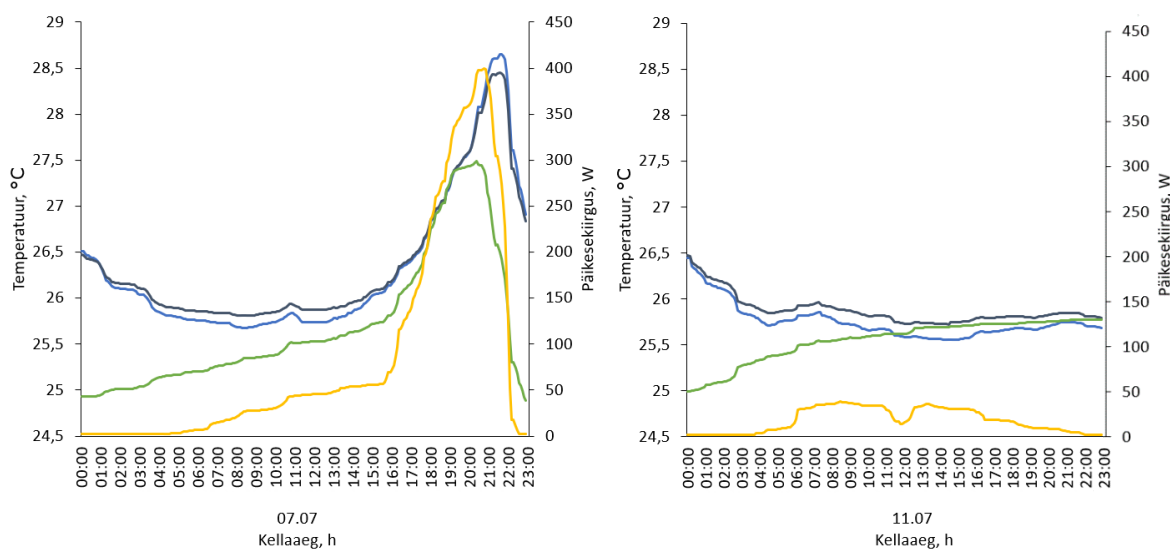
Joonis 48 - Keskmise ruumi õhu- ja operatiivse temperatuuri, põrandapinna temperatuuri ja päikesekiirguse seos juuli esimesel kahel nädalal ilmakaares W-SW

Temperatuuri tipp hetkedel on operatiivne temperatuur madalam, kui ruumi õhu temperatuur, seda tulenevalt jahedamate pindade kiirgustemperatuuri mõjust. Kuna ruumis viibijad tunnetavad operatiivset temperatuuri, mitte õhutemperatuuri, siis soojusliku mugavuse kontekstis on see hea. Põrandjahutuse mõju operatiivsele

temperatuurile iseloomustab asjaolu, et enamuse päevast on keskmine õhutemperatuur kõrgem, kui operatiivne õhutemperatuur (ruumi pindade keskmine kiirgustemperatuur on kõrgem, kui ruumiõhu temperatuur). Operatiivse temperatuuri langusesse panustab põrandapinna jahutumine põrandjahutuse süsteemi aktiveerudes. Käesolevalt graafikult see ei kajastu, kuid töö autori hüpotees on, et operatiivse temperatuuri tõusu päeva keskaigas põhjustab ruumi siseseinte soojenemine. Kuna tegu on massiivse hoonega ja läänesuuna ilmakaarega, siis on siseseinte soojenemise põhjuseks soojuse ülekanne hoone idaküljelt. Hoone idakülg soojeneb päikesekiirguse tõttu juba varahommikul ning idasuuna fassaadide ruumides oleks operatiivse temperatuuri tõusu põhjustajaks päikesekiirguse otsene langemine ruumi siseseintele.

Graafikult on näha, et põrandjahutus ei aktiveeru (st põranda pind ei jahtu) koheselt kui õhutemperatuur jõuab seadevalu 27 °C-ni. Põranda pinnatemperatuur jätkab veidi aega tõusmist samas tempos ruumitemperatuuriga, seejärel saavutab lühiajalise platoo ning hakkab seejärel langema – põrandjahutus töötab.

Joonistel 49 on esitatud detailsem väljavõtte 24h kohta kuupäevadel 7.07 ja 11.07.



Joonis 49 - Keskmise ruumi õhu- ja operatiivse temperatuuri, põrandapinna temperatuuri ja päikesekiirguse seos kuupäevadel 07.07 ja 11.07 ilmakaares W-SW

Kuupäeval 11.07 päikesekiirguse mõju praktiliselt puudub ning on näha, et ruumi õhutemperatuur ei kerki jahutuse seadevalu. Põrandjahutuse süsteem seetõttu ei aktiveeru ning põranda pind soojeneb aeglaselt kuni saavutab stabiilse temperatuuri. Vaadates, et nii põranda pinna temperatuur kui ka keskmine operatiivne temperatuur on kõrgemad, kui ruumiõhu temperatuur, saab järeldada, et ruumi ülejäänud sisepindade keskmine kiirgustemperatuur on veelgi kõrgem.

Kokkuvõtvalt saab temperatuuride muudu analüüsi kohta öelda, et IDA-ICE tarkvara arvestab põrandjahutuse mõju ajalise viitega korrektselt ning põrandjahutuse simulatsioon ei proovi jahutusvajadust tõenäoliselt nõ „ennetada“.

### 4.2.3 Edasised uurimisküsimused

Antud magistritöös on kasutatud mitmeid lihtsustusi ning töö mahus on kajastatud piiratud arv uurimisküsimusi. Töö autor pakub käesolevast tööst lähtuvalt välja järgmised põrandjahutusega seotud küsimused edaspidisteks uuringuteks:

- Milline on põrandjahutuse mõju hoone energiatõhususele, sealhulgas:
  - Kas põrandjahutus on energiatõhususe seisukohast mõistlikum kui tavapäraselt kasutatavad jahutussüsteemid;
- Kuidas mõjutab jahutuse seade arv põrandjahutuse toimivust eri ilmakaartes;
- Millist mõju avaldab põrandjahutusega ruumide ülekuumenemise ennetamisele:
  - Põrandjahutuse voluhulga määramine ja muutmine
  - Põrandjahutuse temperatuurigraafiku  $\Delta T$  muutmine
  - Otsese päikesekiirguse tõkestamine välisvarjestusega;
- Põrandjahutuse süsteemi dimensioneerimine reaalsele jahutuskoormusele vastavaks;
- IDA – ICE põrandjahutuse parameetrite määramatus;
- Põrandjahutuse ja põrandkütte toimuvuse võimalikkus ja kitsaskohad ühe süsteemi lõikes;
- Põrandjahutuse kombineerimine vabajahutusega, mõju soojuslikule mugavustundele ja ülekuumenemisele;
- Põrandjahutuse kasutamine büroohoonetes, sh ööjahutuse kasutamise mõju;
- Soojuslik mugavustunne põrandjahutuse kasutamisel mittemassiivsete tarinditega hoones;
- Massiivsete tarindite soojussalvestuse ära kasutamine põrandjahutuse puhul;
- Põrandjahutuse arvutamine ja soojustehniline toimivus puitkonstruktsiooniga vahelagede puhul.

Ning lisaks pakub töö autor käesolevast tööst inspireerituna välja ka uurimisküsimused:

- Päevavalgusteguri normi täitmine eluhoonetes ja g-arvu suurendamine eluhoonete valgustingimuste parandamiseks

- Eluhoonetesse projekteeritud jahutussüsteemide vastavus reaalsele jahutusvajadusele ja ülekuumenemisele
- Soojuslik mugavustunne ja sisekliima klassidele vastavus vabajahutusega eluhoonetes



## 5. KOKKUVÕTE JA JÄRELDUSED

Käesolevas magistritöös uuriti pörandjahutuse mõju eluhoonete suvisele ülekuumenemisele. Töö käigus valiti välja analüüsitavad ruumid, teostati valimi ühtlustus ning teostati suvise ülekuumenemise simulatsioonid tarkvaraga IDA ICE. Seejärel modelleeriti ruumidesse pörandjahutuse süsteem ning korrati suvise ülekuumenemise simulatsioone, et hinnata pörandjahutuse mõju. Simulatsioone korrati iga ruumi puhul üheksas ilmakaares ning kahe erineva siseseinte tüübiga. Lisaks sellele analüüsiti eluruumide päevavalgustegurite vastavust soovituslikele normidele ja jahutuse temperatuurigraafiku muutmise mõju pörandjahutuse efektiivsusele. Kahe ruumi põhjal, kus päevavalgustegur jäi alla soovitusliku normi, teostati juhtumiuuring. Juhtumiuuringus vaadeldi akna pindala suurendamise võimalikkust ja mõju ülekuumenemisele kombineerituna pörandjahutusega. Lisaks vaadeldi jahutuse seadearvu alandamise mõju pörandjahutuse toimimisele ning analüüsiti soojuslikku mugavust.

Kokkuvõtvalt leiti, et pörandjahutus võib eluruumides olla efektiivne ülekuumenemise vastane meede. Probleemsemateks osutusid väikese pörandapinna ja suure aknapindala ning välisfassaadi pindala suhtega ruumid. Pörandjahutuse efektiivsus leiti olevat suurem hoone idasuunalistel fassaadidel, mis on tingitud otsese päikesekiirguse varajasemast mõjust. Töö autor leidis ka korrelatsiooni aknda pindala ja ruumi pörandapindala suhte ning pörandjahutuse efektiivsuse vahel. Samuti on pörandjahutuse efektiivsus seotud pörandjahutuse temperatuurigraafiku alandamisega.

Üheks pörandjahutuse kasutuselevõttu takistavaks teguriks on õhuniiskuse kondenseerumine. Antud töös ei tuvastatud olukorda, kus pörandapinna temperatuur langeks piisavalt madalale, et Eestile tüüpne suvine välisõhu niiskussisaldus kondenseeruks. Antud küsimus vajab täiendavat analüüsi, kuna pörandapinna temperatuur on vahetult pörandjahutuse toruringi pealevoolu alguses kõige madalam. Seega tuleks töösse kaasata ka akna-, pörandapinna temperatuuri- ja suhtelise õhuniiskuse andurite valik või kombinatsioonid koos tasuvusanalüüsiga kondensaadi vältimiseks.

Juhtumiuuringutest on näha, et jahutuse seadearvu alandamine suurendab pörandjahutuse efektiivsust mittelineaarselt. Lisaks saab juhtumiuuringutes vaadeldud olukordade põhjal väita, et vähemalt vaadeldud tüüpruumidega analoogsetes ruumides on pörandjahutuse kasutamise võimalik saavutada sobilik sisekliima klass. Küll aga peab autor tõdema, et teoreetilisele akna pindala suurendamise võimalikkusele pörandjahutuse kasutuselevõtu arvelt ei ole käesoleva analüüsi põhjal võimalik anda universaalset hinnangut ehk tuleb lähtuda konkreetsest juhtumist.

Kokkuvõttes leiab magistritöö autor, et:

- Läbimõeldud fassaadilahendusega elumajades on Eesti tingimustes põrandjahutusel kõrge potentsiaal täiendava meetmena suvise ruumiõhutemperatuuri tingimuste tagamiseks;
- Valitud eluruumides ei vasta vaikumisi kõik ruumid minimaalse päevavalgusteguri nõudele. Reaalse suvise ruumiõhutemperatuuri kontrollarvutuste korral projekteerimise faasis peaks see nõue olema esmalt tagatud;
- Lihtsustatud soojusliku mugavuse hinnang näitab, et 45 kuni 77 % ajast püsib ruumiõhu operatiivne temperatuur I klassi vahemikus, 83 kuni 97 % ajast II klassis ja ülejäänud aja III klassis. IV klassis on ruumiõhu operatiivne temperatuur 0,2 - 3 % ajast.
- Lihtsustatud põrandjahutuse toimivuse hinnang süsteemi-, pinna- ja õhutemperatuuride abil näitab tugevat sõltuvust päikesekiirgusest ning annab aluse süsteemi automaatika täpsemaks juhtimiseks

## SUMMARY

This thesis focuses on the impact of radiant floor cooling on summer overheating in residential buildings. A selection of bedrooms and living rooms was chosen and summer overheating simulations were done in software IDA ICE. For the next step a radiant floor cooling unit was modelled into the rooms and the overheating simulations were repeated, to assess the effect of floor cooling. The simulations were repeated in nine orientations from west to east and with two different types of inner walls. In addition the effect of lowering supply and return water temperature was analysed and the daylight factor was calculated for all the rooms.

In two cases where the mean daylight factor was under the recommended value a case study was conducted. The case studies focused on the possibility of increasing the glazed window area and its impact on overheating combined with floor cooling. In addition the cooling setpoint was lowered and the effect on radiant floor cooling was analysed, along with summer thermal comfort in rooms with radiant floor cooling.

In conclusion it was found that radiant floor cooling might be an effective method of preventing summer overheating. The most problematic situations involved rooms with both small floor area and large glazing area to outer wall ratio. Floor cooling was found to be the most effective in east-oriented facades, which is caused by relatively early impact of solar radiation in the morning. The author also found a correlation between the ratio of glazing area to floor area and the effectiveness of floor cooling. The effectiveness of floor cooling is also tied to the supply water temperature.

One of the limiting factors in using radiant floor cooling is the possibility of condensation. In this analysis no situation where the floor surface temperature would drop low enough for condensation to happen was detected. This topic needs more research, since floor surface temperature in rooms with floor cooling are not uniform. Also a control strategy involving window opening, floor surface temperature and relative humidity sensors should be analysed.

From case study results can be seen that lowering the cooling setpoint increases the effectiveness of floor cooling. In addition it can be said, based on the case studies, that in rooms with radiant floor cooling it is possible to achieve suitable thermal comfort conditions. The author has to admit that on the base of this analysis the possibility of increasing window size in combination with floor cooling cannot be evaluated and each case would still have to be viewed separately.

The author concludes that:

- Radiant floor cooling has high potential to be used as an additional measure against summer overheating in Estonian residential buildings
- In the chosen selection of bed- and living rooms not all of them fulfil the daylight factor criteria. During the building design phase more attention should be given to the daylight factor.
- A simplified thermal comfort evaluation shows that 45 to 77 % of the time the operative room air temperature fits the first category of indoor environment quality and 83 to 97 % of the time fits second category. Indoor environment is in the fourth category approximately 0,2 to 3 % of the time.
- A simplified assessment of radiant floor cooling performance based on room and floor surface temperatures show strong correlation with solar radiation and can be used as a basis for predictive control systems

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] MKM nr 63, "Hoone energiatõhususe miinimumnõuded," no. 6, pp. 1–8, 2019.
- [2] MKM nr 58, "Hoone energiatõhususe arvutamise meetodika," pp. 1–27, 2019.
- [3] MKM nr 85, "Eluruumile esitatavad nõuded," no. 3, pp. 2018–2019, 2018.
- [4] "Loomulik valgustus elu- ja bürooruumides. EVS 894:2008+A2:2015." .
- [5] H. Abel, E; Voll, *Hoonete energiatarve ja sisekliima*. 2010.
- [6] S. Altomonte, "Daylight for Energy Savings and Psycho-Physiological Well-Being in Sustainable Built Environments," *J. Sustain. Dev.*, vol. 1, no. 3, pp. 3–16, 2009, doi: 10.5539/jsd.v1n3p3.
- [7] J. Kurnitski, *Madal- ja liginullenergiahooned*.
- [8] R. Simson, *Overheating Prevention and Daylighting in Buildings without Mechanical Cooling*. 2019.
- [9] T.-A. Kõiv and A. Rant, "Hoonete küte." 2013.
- [10] S. S. Sfs, "Sfs-En Iso 7730 Lämpöolojen Ergonomia . Lämpömukavuuden Analyttinen Määrittäminen Ja Tulkinta Käyttäen Laskettuja Pmv- Ja Ppd-Indeksejä Sekä Paikallista Lämpömukavuutta," 2006.
- [11] "EVS-EN 16798-1:2019 : Hoonete energiatõhusus. Hoonete ventilatsioon. Osa 1: Sisekeskkonna lähteandmed hoonete energiatõhususe projekteerimiseks ja hindamiseks, lähtudes siseõhu kvaliteedist, soojuslikust keskkonnast, valgustusest ja akustikast. Moodul M1-," 2019.
- [12] X. Zhou, Y. Liu, M. Luo, L. Zhang, Q. Zhang, and X. Zhang, "Thermal comfort under radiant asymmetries of floor cooling system in 2 h and 8 h exposure durations," *Energy Build.*, vol. 188–189, pp. 98–110, 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.02.009.
- [13] K. N. Rhee, B. W. Olesen, and K. W. Kim, "Ten questions about radiant heating and cooling systems," *Build. Environ.*, vol. 112, pp. 367–381, 2017, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.11.030.
- [14] D. O. Åström, C. Åström, K. Rekker, E. Indermitte, and H. Orru, "High summer temperatures and mortality in Estonia," *PLoS One*, vol. 11, no. 5, pp. 1–10, 2016, doi: 10.1371/journal.pone.0155045.
- [15] K. Rekker, "Tartu Ülikool Tervishoiu instituut 2010 . AASTA ERAKORDSELT KUUM SUVI EESTIS JA SELLE MÕJU RAHVASTIKU SUREMUSELE Magistritöö rahvatervishoius Kaidi Rekker Juhendajad : Astrid Saava , PhD , TÜ

- emeriitprofessor," pp. 1–52, 2013.
- [16] A. Kont, J. Jaagus, and R. Aunap, "Climate change scenarios and the effect of sea-level rise for Estonia," *Glob. Planet. Change*, vol. 36, no. 1–2, pp. 1–15, 2003, doi: 10.1016/S0921-8181(02)00149-2.
- [17] A. Dadoo, L. Gustavsson, and F. Bonakdar, "Effects of future climate change scenarios on overheating risk and primary energy use for Swedish residential buildings," *Energy Procedia*, vol. 61, pp. 1179–1182, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.11.1048.
- [18] A. Dadoo and L. Gustavsson, "Energy use and overheating risk of Swedish multi-storey residential buildings under different climate scenarios," *Energy*, vol. 97, pp. 534–548, 2016, doi: 10.1016/j.energy.2015.12.086.
- [19] Standard, "EVS - EN 1990 : 2002 Ehituskonstruksioonide projekteerimise alused," pp. 1–2, 2008.
- [20] M. Maivel, J. Kurnitski, and T. Kalamees, "Field survey of overheating problems in Estonian apartment buildings," *Archit. Sci. Rev.*, vol. 58, no. 1, pp. 1–10, 2015, doi: 10.1080/00038628.2014.970610.
- [21] R. Simson, J. Kurnitski, and M. Maivel, "Summer thermal comfort: compliance assessment and overheating prevention in new apartment buildings in Estonia," *J. Build. Perform. Simul.*, vol. 10, no. 4, pp. 378–391, 2017, doi: 10.1080/19401493.2016.1248488.
- [22] R. S. McLeod, C. J. Hopfe, and A. Kwan, "An investigation into future performance and overheating risks in Passivhaus dwellings," *Build. Environ.*, vol. 70, pp. 189–209, 2013, doi: 10.1016/j.buildenv.2013.08.024.
- [23] M. Thalfeldt, E. Pikas, J. Kurnitski, and H. Voll, "Facade design principles for nearly zero energy buildings in a cold climate," *Energy Build.*, vol. 67, pp. 309–321, 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.08.027.
- [24] H. Wang and Q. Chen, "Impact of climate change heating and cooling energy use in buildings in the United States," *Energy Build.*, vol. 82, no. 2014, pp. 428–436, 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.07.034.
- [25] K. Zhao, X. H. Liu, and Y. Jiang, "Application of radiant floor cooling in large space buildings - A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, pp. 1083–1096, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.11.028.
- [26] J. Pantelic, S. Schiavon, B. Ning, E. Burdak, P. Raftery, and F. Bauman, "Full scale laboratory experiment on the cooling capacity of a radiant floor system," *Energy Build.*, vol. 170, pp. 134–144, 2018, doi:

- 10.1016/j.enbuild.2018.03.002.
- [27] J. Feng, S. Schiavon, and F. Bauman, "New method for the design of radiant floor cooling systems with solar radiation," *Energy Build.*, vol. 125, pp. 9–18, 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.04.048.
- [28] H. Tang, T. Zhang, X. Liu, and Y. Jiang, "Novel method for the design of radiant floor cooling systems through homogenizing spatial solar radiation distribution," *Sol. Energy*, vol. 170, no. June, pp. 885–895, 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.06.039.
- [29] J. H. Lim, J. H. Jo, Y. Y. Kim, M. S. Yeo, and K. W. Kim, "Application of the control methods for radiant floor cooling system in residential buildings," *Build. Environ.*, vol. 41, no. 1, pp. 60–73, 2006, doi: 10.1016/j.buildenv.2005.01.019.
- [30] J. Romani, A. De Gracia, and L. F. Cabeza, "Simulation and control of thermally activated building systems (TABS)," *Energy Build.*, vol. 127, pp. 22–42, 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.05.057.
- [31] B. W. Olesen, "Thermo Active Building Systems: Using Building Mass To Heat and Cool," *ASHRAE J.*, vol. 54, no. 2, pp. 44–52, 2012.
- [32] Q. Li, C. Chen, Y. Zhang, J. Lin, and H. Ling, "Simplified Calculation Method for Floor Temperature in Radiant Floor Cooling System," *Taiyangneng Xuebao/Acta Energetica Solaris Sin.*, vol. 36, no. 2, pp. 496–501, 2015.
- [33] J. Shinoda, O. B. Kazanci, S. ichi Tanabe, and B. W. Olesen, "A review of the surface heat transfer coefficients of radiant heating and cooling systems," *Build. Environ.*, vol. 159, no. March, p. 106156, 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.05.034.
- [34] T. Cholewa, M. Rosiński, Z. Spik, M. R. Dudzińska, and A. Siuta-Olcha, "On the heat transfer coefficients between heated/cooled radiant floor and room," *Energy Build.*, vol. 66, pp. 599–606, 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.07.065.
- [35] "EVS-EN ISO 11855-1:2015 Building environment design - Design, dimensioning, installation and control of embedded radiant heating and cooling systems - Part 1: Definition, symbols, and comfort criteria." .
- [36] "EQUA, IDA Indoor Climate and Energy, in, Equa Simulations AB," no. January, 2002.
- [37] S. Kropf and G. Zweifel, "Validation of the Building Simulation Program IDA-ICE According to CEN 13791 "Thermal Performance of Buildings - Calculation of Internal Temperatures of a Room in Summer Without Mechanical Cooling - General Criteria and Validation Procedures "," *Hochschule Tech. Archit. Luzern*.

- HLK Eng.*, p. 24, 2001.
- [38] "Isover kl 35 tootekirjeldus," pp. 3–5, 2020.
- [39] "Toimivusdeklaratsioon ja tehnilised andmed EPS 60 / 2018 Reideni EPS plaat AS," 2018.
- [40] "FIBO plokitooted ja lahendused - tootekataloog; Weber Saint-Gobain," 2016.
- [41] T. Kalamees and J. Kurnitski, "Estonian test reference year for energy calculations.," *Proc. Est. Acad. Sci. Eng.*, vol. 12, no. 1, pp. 40–58, 2006.
- [42] "EVS-EN 15377-2:2008 Hoonete küttesüsteemid. Kaetud vesi-pindkütte- ja jahutussüsteemide projekteerimine. Osa 2: Projekteerimine, dimensioneerimine ja paigaldus," doi: 10.1016/j.exer.2013.08.011.
- [43] J. Park and C. S. Choi, "Modeling occupant behavior of the manual control of windows in residential buildings," *Indoor Air*, vol. 29, no. 2, pp. 242–251, 2019, doi: 10.1111/ina.12522.
- [44] A. Mavrogianni *et al.*, "The impact of occupancy patterns, occupant-controlled ventilation and shading on indoor overheating risk in domestic environments," *Build. Environ.*, vol. 78, pp. 183–198, 2014, doi: 10.1016/j.buildenv.2014.04.008.
- [45] H. B. Rijal, P. Tuohy, F. Nicol, M. A. Humphreys, A. Samuel, and J. Clarke, "Development of an adaptive window-opening algorithm to predict the thermal comfort, energy use and overheating in buildings," *J. Build. Perform. Simul.*, vol. 1, no. 1, pp. 17–30, 2008, doi: 10.1080/19401490701868448.