



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Instituudi nimetus

ÜLEKUUMENEMISE VÄLTIMINE JA SISEKLIIMA NÕUETE SAMAAEGNE TAGAMINE KATUSEKORRUSE RUUMIDES SUVEL

AVOIDING OVERHEATING AND SIMULTANEOUSLY ENSURING INDOOR CLIMATE REQUIREMENTS IN ATTIC ROOMS IN SUMMER

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Anette Pöldsepp

Üliõpilaskood 204108EAXM

Juhendaja: Martin Kiil, doktorant
Raimo Simson, vanemteadur

(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.

22.05.2024

Autor: Anette Põldsepp

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

22.05.2024

Juhendaja: Martin Kiil

/ allkirjastatud digitaalselt /

22.05.2024

Juhendaja: Raimo Simson

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

".....".....20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Anette Põldsepp

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Ülekuumenemise vältimine ja sisekliima nõuete samaaegne tagamine katusekorruse ruumides suvel,

mille juhendajad on Martin Kiil ja Raimo Simson,

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.

22.05.2024

/ allkirjastatud digitaalselt /

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Anette Põldsepp, 204108EAXM
Õppekava, peeriala: EAXM15/18 - Hooned ja rajatised, energiatõhususe peeriala
Juhendaja(d): Doktorant, Martin Kiil, +3725189963
Vanemteadur, Raimo Simson, +37253463404

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Ülekuumenemise vältimine ja sisekliima nõuete samaaegne tagamine katusekorruse ruumides suvel.

(inglise keeles) Avoiding overheating and simultaneously ensuring indoor climate requirements in attic rooms in summer.

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Uurida ülekuumenemise riski ja sisekliima tagamist katusekorruse ruumides toetudes referentsobjekti mõõtmisandmetele, erinevatele ehitusfüüsikaliste, konstruktiivsete ning arhitektuursete insenerilahendustele.
2. Analüüsida tulemusi ja hinnata ülekuumenemise ning sisekliima nõuete vastavust standarditele/määrustele.
3. Töötada välja lahendused ülekuumenemise ja sisekliima komponentide, sh soojusliku mugavuse ning päevavalguse, nõuete samaaegseks tagamiseks.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjanduse ülevaade ja läbitöötamine ning meetodika valik.	05.09.2023
2.	Töö uurimisküsimuste ja põhieesmärkide sõnastamine.	12.09.2023
3.	Dünaamilise simulatsioonimudeli koostamine.	19.09.2023
4.	Teoreetiliste aluste kirjutamine.	03.10.2023
5.	Hoone soojuslähivusarvutused.	24.10.2023
6.	Hoone joonkülmasilla väärtuste arvutused.	31.10.2023
7.	Lähteandmete sisestamine simulatsioonimudelisse.	07.11.2023
8.	Varasemalt teostatud sisekliima mõõtmistulemuste analüüs.	20.02.2023
9.	Simulatsioonimudeli kalibreerimine (Co-heating test jaanuaris ning veebruaris, suvised siseõhu temperatuurid, erinevate katusekonstruktsiooni kihtide temperatuurid ning suhteline niiskus)	05.03.2024
10.	Parameetriliste simulatsioonide ja juhtskeemide koostamine	12.03.2024

11.	Simulatsioonide esmased arvutused.	19.03.2024
12.	Simulatsiooniarvutuste analüüs.	02.04.2024
13.	Kordusimulatsioonide läbiviimine lahenduste välja töötamiseks.	09.04.2024
14.	Kordusimulatsioonide analüüs.	16.04.2024
15.	Lõputöö 75% ulatuses esitamine.	25.04.2024
16.	Täiendavad simulatsioonid ja analüüs	07.05.2024
17.	Lõputöö viimistlemine.	14.05.2024
18.	Lõputöö esitamine.	22.05.2024

Töö keel: eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: 22.05.2024

Üliõpilane: Anette Pöldsepp / allkirjastatud digitaalselt / 22.05.2024

Juhendaja: Martin Kiil / allkirjastatud digitaalselt / 22.05.2024

Juhendaja: Raimo Simson / allkirjastatud digitaalselt / 22.05.2024

Programmijuht: ".....".....20.....a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA	8
Lühendite ja tähiste loetelu	9
SISSEJUHATUS	10
1 TEOREETILISED ALUSED	12
1.1 Väliskliima	12
1.1.1 Päikesekiirgus.....	12
1.1.2 Tuleviku kliimastsenaarium.....	13
1.2 Sisekliima	14
1.2.1 Katuseruumide ülekuumenemine	14
1.2.2 Soojuslik mugavus	15
1.2.3 Sisekliima tagamine tehnosüsteemidega	18
1.2.4 Päevavalgus	20
2 METOODIKA.....	22
2.1 Referentsobjekti kirjeldus.....	22
2.1.1 Ehitusfüüsikalised näitajad.....	23
2.1.2 Sisekliima mõõtmised	25
2.2 Dünaamilise simulatsiooni mudeli koostamine	27
2.2.1 Kliimafail.....	27
2.2.2 Vabasoojused ja kasutusprofiilid	30
2.2.3 Simulatsioonimudeli kalibreerimine	31
2.2.4 HAMWall mudel.....	33
2.2.5 Co-heating test	33
2.3 Analüüsi komponendid	36
2.3.1 Sisekliima	37
2.3.2 Ruumi jahutus	38
2.3.3 Päevavalgus	45
3 TULEMUSED JA ANALÜÜS	46
3.1 Referentsruumi olemasolev olukord	46
3.2 Ruumi ülekuumenemist mõjutavate tegurite analüüs	48
3.2.1 Akende parameetrite analüüs.....	48
3.2.2 Katuseakende asend.....	54
3.2.3 Ehitusfüüsikaliste omaduste mõju hindamine.....	55
3.3 Ülekuumenemise vältimine jahutuse abil	58
3.3.1 Tuulutusmeetodid	58
3.3.2 Ventilatsiooni sissepuhkeõhu jahutamine	59
3.3.3 Ruumi jahutus	60

3.4 Ruumi päevavalgust mõjutavate tegurite analüüs	64
3.5 Sisekliima tulemuste optimeerimine.....	66
3.6 Tuleviku kliimastenaariumite mõju	77
3.7 Aktiivjahutuse lahendused eluruumidele.....	80
3.7.1 Ruumide jahutus.....	80
3.7.2 Ventilatsiooniõhu jahutus	84
JÄRELDUSED	85
KOKKUVÕTE	88
SUMMARY	90
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	92
LISAD.....	94
Lisa 1 Välispiirete soojusläbivuse arvutused	94
L1.1 Välisseina VS-1 soojusläbivus.....	94
L1.2 Katuslae KL-1 soojusläbivus.....	95
L1.3 Põranda soojusläbivus.....	97
Lisa 2 Joonkülmasilla väärtuste arvutused.....	98
Lisa 3 Katusekonstruktsiooni KL1 kalibreerimistulemused	101
Lisa 4 Katusekonstruktsiooni KL2 kalibreerimistulemused	103
Lisa 5 Katusekonstruktsiooni KL3 kalibreerimistulemused	105
Lisa 6 Co-heating test tulemused juhtimisskeemita	107

EESSÕNA

Järgnevate aastakümnete jooksul liiguvad aastased keskmised temperatuurid tõusu trendis ning see toob endaga kaasa väljakutseid eramute eluruumide sisekliima tagamisel suvel. Kriitiliseks muutub suvise temperatuuri nõude tagamine eriti katuseruumides, mis on pidevas kontaktis päikesekiirgusega. Antud töös uuritakse erinevate riskitegurite mõju ulatust ning ülekuumenemise vältimise meetmeid nende mõjude minimeerimiseks. Tulemusi optimeeritakse kombineerides energiatõhususe määrase suvise ruumitemperatuuri, päevavalgusteguri ning soojusliku mugavuse nõudeid. Lisaks hinnatakse erinevate kliimastenaariumitega kaasnevaid probleeme.

Uurimistöö teema pakkus välja professor Targo Kalamees, kes koostas eramu rekonstrueerimisprojekti (sh arhitektuursed ning konstruktiivsed joonised), mis oli aluseks dünaamilise simulatsiooni mudeli modelleerimisel ning viis läbi sisekliima mõõtmised, mille andmete põhjal mudel kalibreeriti. Autor tänab magistritöö juhendajaid Martin Kiili ja Raimo Simsonit ning töö algatajat professor Targo Kalameest, kes võtsid aega konsulteerimiseks ning andsid edasi uusi erialaseid teadmisi, mida autor vajab ka edaspidiselt igapäevases praktikas. Samuti tänab autor õppejõude Tuule Mall Partsi ning Karl-Villem Võsa abi eest dünaamilise simulatsiooni tarkvara IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE) tarkvara kasutamisel.

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

clo – riietuse soojustakistus (*clothing*)

DF – päevavalgustegur (*daylight factor*)

g – päikese läbilaskvustegur

IDA ICE – dünaamilise simultasiooni tarkvara (*IDA Indoor Climate and Energy*)

IPCC - Valitsustevaheline kliimamuutuste paneel (*Intergovernmental Panel on Climate Change*)

lx – valgustustiheduse ühik luks (*lux*)

met – kehaline aktiivsus (*metabolism*)

PMV – tõenäosuslik soojusliku mugavustunde hinnang (*Predicted Mean Vote*)

PPD - tõenäosuslik soojuslikku ebamugavust tundvate inimeste osakaal (*Predicted Percentage Dissatisfied*)

RCP – kiirgusliku mõju stsenaariumid (*Representative Concentration Pathway*)

TRY – energiaarvutuse baasaasta (*Test Reference Year*)

VRF – muutuva külmaaine vooluhulgaga (*Variable Refrigerant Flow*)

VRV – muutuva külmaaine mahuga (*Variable Refrigerant Volume*)

WWR – akna pindala osakaal välisfassaadi (*Window-to-Wall ratio*)

°Ch - kraadtund

SISSEJUHATUS

Pööninguruumi rekonstrueerimine ning laiendamine eluruumideks on kujunenud laialt levinud praktikaks, eesmärgiga suurendada hoone kasulikku pinda [1]. Katuseruumide ümberehitamine on keeruline protsess ning vajab asjatundlikku lähenemist, seda eelkõige soojuslikku sisekliimat mõjutavate tegurite aspektist. Soojusliku sisekliima tagamine katusealustes ruumides pakub väljakutset katusekonstruktsiooni materjalide ning akende valikul, kuna Eesti kliimas, kus on esindatud neli erinevat aastaega, tuleb leida kuldne kesktee, kuidas külmemal perioodil vähendada soojuskadusid läbi välispiirete ja soojemal perioodil vältida liigsoojuse sissepääsemist ning tagada ruumidest liigse soojuse väljajuhtimise.

Mitmed uuringud näitavad, et kliimamuutused toovad pikemas perspektiivis kaasa kõrgemaid temperatuure ning ekstreemsemaid ilmastikutingimusi. IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) on koostanud mitu võimalikku tuleviku kliimastsenaariumit, mida ka antud töös käsitletakse [2]. Käesolev magistritöö keskendub suuremas osas uuest aastast (redaktsioon jõustub 01.03.2025) kehtima hakkava energitõhususe määruse ruumi suvise ülekuumenemise nõuetele, hinnates sellega kaasnevat väljakutset [3].

Katuseruumi soojusliku sisekliima analüüsid viiakse läbi dünaamilise simulatsiooni tarkvaras IDA ICE (*Indoor Climate and Energy*), kus analüüsitakse järgmisi parameetreid ning nende mõju ruumi ülekuumenemisele:

- väliskliima: kliima mõju analüüs ruumi ülekuumenemisele (EstonianTRY (*Test Reference Year*) [3] (1970-2000), EstonianTRY [3] (1990-2020), tuleviku kliimastsenaariumid [2] (2030, 2050, 2080);
- välispiirete erinevad konstruktsioonilahendused: erinevat tüüpi materjalid ja nende võime salvestada ning vabastada soojusenergiat;
- katusekatte materjalid: materjalide tüüp ning värvus;
- akende tehnilised näitajad: klaaspakettide omadus (päikeseläbivustegur g);
- akende asetsemine erinevate ilmakaarte suhtes;
- akende suurus: akna pindala suhe välisfassaadi pindalasse, nt WWR (*Window-to-Wall ratio*);
- mehaaniline jahutus (ruumi jahutuskoormused).

Katuseruumi sisekliima analüüsid viiakse läbi energiatõhususe määruse [3], soojusliku mugavuse [4] ning päevavalguse [5] standardite alusel. Vastavalt nendele kombineeritakse ruumi ülekuumenemise, elanike soojusliku mugavuse ning

päevavalguse nõuete täitmine. Eesmärk on optimeerida tulemusi eelnimetatud nõuete põhjal ning täita need samaaegselt.

Sarnaseid uurimistöid, mis käsitlevad ruumi ülekuumenemise mõjutegureid ning neist tingitud riske, on varasemalt nii väliskirjanduses [1] kui ka kohalikul tasandil [6] kirjutatud. Väliskirjanduse analüüsi tulemuste põhiliseks puuduseks on asjaolu, et arvutusi ei tehta Eesti kliimafaili (EstonianTRY) ega ka kohaliku määruse [3] kohaste lähteandmetega. Küll aga on uurimistöö käigus analüüsitud ruumi suvise ülekuumenemise riski avalikes hoonetes, kuid mitte katuseruumis ning seda veel kehtiva määruse järgi.

1 TEOREETILISED ALUSED

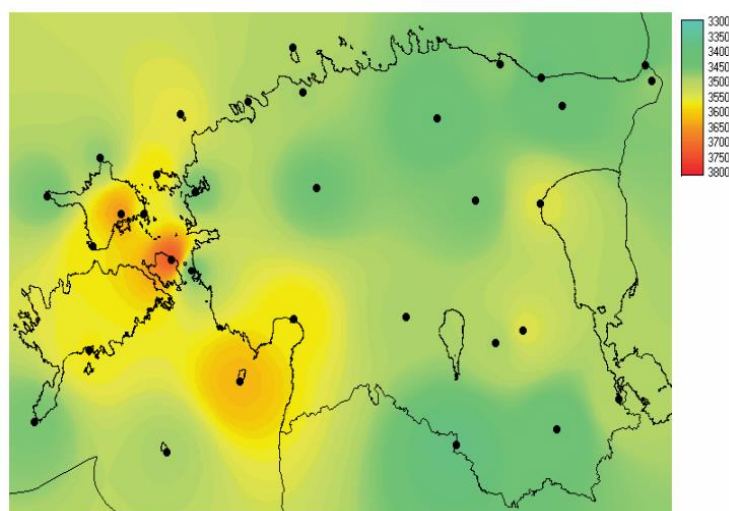
1.1 Väliskliima

Eesti kliima on peamiselt mõjutatud oma geograafilisest asendist, asudes parasvöötme kliimavööndis. Riik asub merelise ja mandrilise kliima vahelises üleminekuvööndis, mille järgi kuulub Köppeni kliimaklassifikatsiooni kohaselt Eesti kahte erinevasse kliimatüüpi. Enamus osa Eestist kuulub *Dfb* ehk külma talvega niiske mandrilise kliimatüübi alla ja Saare- ning Hiiumaa äärmised lääneosad kuuluvad *Cfb* ehk maheda talvega merelise kliima alla [7].

1.1.1 Päikesekiirgus

Keskmine päikesekiirguse hulgad Eestis jäävad vahemikku 3300-3600 MJ/m². Kõige päikesepaistelised kuud Eestis on suvekuud juuni ja juuli ning kõige vähem päikesekiirgust esineb talvel detsembrikuus. Päikesepaiste kestus varieerub 1650 tunnist sisemaal kuni 1950 tunnini saartel. 29 aasta (1981-2010) keskmine päikesepaiste kestus oli 1766 tundi [7]. Päikesekestuse arvutamisel arvestatakse ainult otsese päikesekiirguse jõudmist aluspinnale, kui seda ei varjuta pilved, udu jms [8].

Arvestades eelnimetatud tegureid on Eesti suved mõõdukalt soojad (keskmine õhutemperatuur juulis +16°C...+17°C) ja talved mõõdukalt külmad (keskmine õhutemperatuur veebruaris -2,5°C...-7,0°C) [7]. Alloleval joonisel Joonis 1.1 on kujutatud Eesti territooriumil jaguneva päikesekiirguse koguhulga aastasummade keskmine jaotust, mis on arvatud pilvisuse ja albeedo keskmistest väärtustest [8]:



Joonis 1.1. Eesti territooriumil jaguneva päikesekiirguse koguhulga aastasummade keskmine jaotus.

Jooniselt on näha, et mõned piirkonnad saavad rohkem päikesekiirgust kui teised. Saartel ning läänepiirkonnas on selgelt näha suuremat päikesekiirguse aastast hulka, mis on põhjustatud albeedost ehk kiirguse peegeldumisest tagasi atmosfääri hajusvalguse näol. Sellist peegeldust tekitab antud piirkonna puhul ilmselgelt ümbritseva mere ning läände loojuva päikese koosmõju. Samuti on suuremad päikesekiirguse hulgad märgata ka sisemaal Lõuna-Eestis ning Peipsi ääres, mis on tingitud vastavalt puhtale lumikattele talvel ning peegeldumisele veekogult [8].

1.1.2 Tuleviku kliimastenaarium

Aastakümnete jooksul kogutud ilmastikuandmed on näidanud, et kliima on soojemaks muutunud ja jätkab samas suunas. Andmed näitavad, et aastatel 1966-2010 on tõusnud aastane keskmine temperatuur 1,6°C...2,0°C. Keskkonnaagentuur on koostanud arvutusmudelid, Rootsi, Hollandi ja Taani uurimuste abil, mille põhjal ennustatakse ette tuleviku kliimastenaariume. Esimene stsenaarium näeb ette leevendavaid meetmeid, mida rakendatakse riikide majanduslikes tegevustes. Teine stsenaarium kujutab ette kehvemat olukorda, mis kirjeldab kehvat riikidevahelist koostööd [7].

Mõlemat stsenaariumi võrreldakse kontrollperioodiga aastatel 1971-2000. Esimese stsenaariumi ehk realistlikuma olukorra puhul ennustatakse, et Eesti keskmine aastane õhutemperatuur aastatel 2041-2070 võrreldes kontrollperioodiga soojeneb 2,0°C. Kõige kehvemas olukorras tõuseb aastane keskmine temperatuur aastatel 2071-2100 kuni 4,3°C. Erinevate kliimastenaariumite kirjeldused on toodud tabelis Tabel 1.1 [7].

Tabel 1.1. Aastase keskmise õhutemperatuuri muutus erinevate kliimastenaariumite korral võrreldes kontrollperioodiga.

Period	2041–2070	2041–2070	2071–2100	2071–2100
Stsenaarium	realistlik	pessimistlik	realistlik	pessimistlik
Talv (DJV)	2,3 °C	2,9 °C	3,1 °C	4,9 °C
Kevad (MAM)	2,4 °C	3,1 °C	3,4 °C	4,9 °C
Suvi (JJA)	1,6 °C	2,2 °C	2,2 °C	3,8 °C
Sügis (SON)	1,7 °C	2,2 °C	2,2 °C	3,6 °C
Aasta keskmine	2,0 °C	2,6 °C	2,7 °C	4,3 °C

Mudelarvutustes võeti arvesse erinevate majandusharude tegevused – energeetika, ehitus, metsandus, turismindus, meditsiin jms. Õhutemperatuuri soojenemisele lisaks muutuvad ilmastikuolud ekstreemsemaks ning sagedasemaks. Sajuhulgad suurenevad (ligikaudu 15%), lund jääb vähemaks ning tormide arvukus suureneb [7].

1.2 Sisekliima

1.2.1 Katuseruumide ülekuumenemine

Tänapäeval on populaarsemaks kujunenud pööningute ümberehitamine eluruumideks, luues hoonele juurde kasulikku elupinda (nt muinsuskaitse all olevate eluhoonete puhul, kui hoone laiendamine pole võimalik) [1]. Pööninguruumid, olles hoonest suuremas kokkupuutes päikesekiirgusega kui vertikaalpinnad, toovad endaga kaasa väljakutseid sisekliima tagamisel peamiselt suvisel hooajal, mil päikesekiirguse ööpäevane kestus on pikem ning langemisnurk kõrgem [9].

Uute hoonete projekteerimisel külmas kliimas lähtutakse väga headest ehitusfüüsikalistest näitajatest, et vähendada hoone energiakasutust. Seetõttu on kaasaja hoonete disain pigem keskendunud ainult kütteperioodile ehk energiavajaduse vähendamise toimub vaid küttelt [10]. Pööninguruumi projekteerimisel tuleb arvestada, et oleks tagatud piisav välistarindite soojustamine nii, et soojustuse paksused ei läheks liialt suureks, vähendades siseruumi kõrgust ega tekitades liigset koormust kandekonstruktsioonide kandevõimele [9].

Hästi soojustatud välispiirded ja õhutihedad konstruktsioonid suurendavad vajadust jahutusenergia järele, kuna ruumi tekkinud liigse soojus ehk vabasoojuse liikumine loomulikult teel ruumist välja on soojuslikult takistatud. Vabasoojuse ruumist eemaldamiseks on vajalik rakendada aktiivseid või passiivseid lisameetmeid, nt mehaaniline jahutus, kehvemad klaaspakettide g-väärtused [10].

Katuseruumide projekteerimisel on uuritud aastate jooksul tehnoloogiaid ülekuumenemise vältimiseks, mis hõlmavad endas katseid erinevate ehitusfüüsikaliste omadustega [9]:

- väga väikse soojuserijuhtivusega soojustusmaterjalide kasutamine, võimaldamaks paigaldada õhukesi soojustuskihte ning säilitades rohkem ruumi kõrgusest;
- õhuõõnsuste kasutamine piirdetarindis, tagamaks liigsoojuse liikumise loomulikult konvektiivsel teel ruumist välja;
- katuse konstruktsiooni väliskihi valikul suuremast päikesepeegeldumistegurist lähtumine;
- suurema soojusmahtuvusega soojustuse valik, nt puitkiudtüüpi soojustus, aja jooksul konstruktsiooni kogunenud soojuse aeglaseks ruumi liikumiseks;

- katuselae konstruktsioonide projekteerimine faasimuutusmaterjalidega (PCM – *phase-change material*), mis absorbeerivad endasse päeval ajal soojust ning vabastavad selle öisel ajal.

Varasemalt on analüüsitud külmas kliimas asuva katuseruumi konstruktsioonide niiskustehnilist toimivust ventileeritud ning ventileerimata olukorras. Uuringus selgus, et ventileerimata pööninguruumis on niiskuse tekke oht väga suur, mis tähendab, et ventilatsiooni olemasolu ruumis on sama suure tähtsusega kui soojusliku sisekliima tagamine, kaitstes nii hoone enda kui ka elanike tervist [1].

1.2.2 Soojuslik mugavus

Keskkonnas, milles inimene pidevalt viibib on aluseks tema elukvaliteedile, mõjutades igapäevaselt tervist ning üleüldist heaolu (produktiivsus, mugavustunne). Hoone sisekliima ja selle tajumine sõltub mitme teguri kombinatsioonist – inimest ümbritsev füüsiline keskkond, inimese füsioloogilised protsessid, käitumuslikud ning psühholoogilised tegurid. See tähendab, et iga indiviid tajub ümbritsevat keskkonda erinevalt ning on võimatu tagada keskkonda, mis kõiki rahuldaks [11].

Hoone projekteerimisel (eelkõige kütte-, ventilatsiooni- ja jahutussüsteemide puhul) lähtutakse hoone kasutusotstarbest, mis määrab vajalikud nõuded sisekliima tagamiseks inimgruupile, kes hoonetes viibima hakkavad. Vastavalt inimese tundlikkusele keskkonna suhtes on koostatud nõuded neljale sisekliima klassile, mis on iseloomustatud alljärgnevas tabelis Tabel 1.2 [6]:

Tabel 1.2. Sisekliima klasside kirjeldus.

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

Antud töös uuritakse sisekliima komponentidest soojuslikku sisekliimat. Soojusliku sisekliima analüüsimisel lähtutakse seosest kuue sisekliima parameetri vahel [12]:

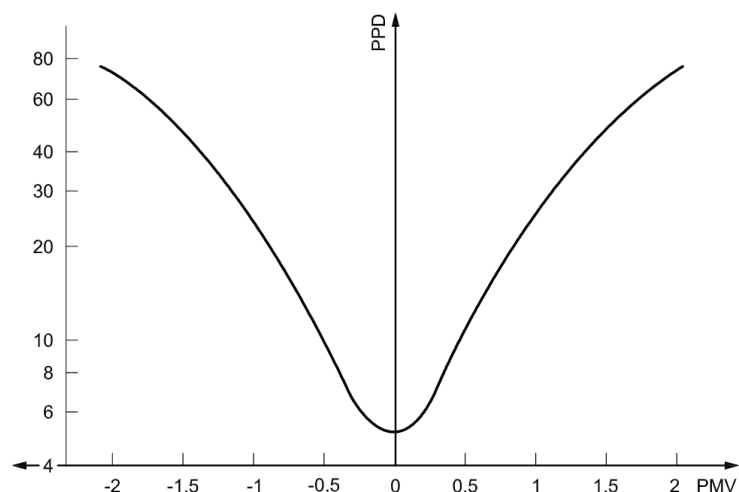
- riietus (clo);
- kehaline aktiivsus (met);
- õhutemperatuur (t_{δ});
- pindade keskmine kiirgustemperatuur (\bar{t}_r);
- õhukiirus (v);
- õhuniiskus (φ).

1960ndatel viis professor Fanger läbi katsed inimrühmades, uurides omavahelist seost inimese taju ja sisekliima parameetrite vahel. Uuringus kasutati 7-punktilist skaalat, mis iseloomustas katses osalenute taju ümbritseva keskkonna suhtes, alates -3 (külm) kuni +3 (kuum) [6]. Antud hindamissüsteem kannab nime PMV (*Predicted Mean Vote*) indeks, mille skaala on kirjeldatud alltoodud tabelis Tabel 1.3 [12]:

Tabel 1.3. PMV indeksi 7-punktiline hindamisskaala.

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

Paralleelselt PMV indeksile tuletati ka PPD (*Predicted Percentage Dissatisfied*) indeks, mis näitab täpsemalt rahulolematute inimeste arvu, samal ajal kui PMV indeks kirjeldab vaid mugavustunde keskmist hinnangut. Seos PMV ja PPD indeksi vahel on illustreeritud joonisel Joonis 1.2 [4]:



Joonis 1.2. PMV ja PPD indeksi omavaheline sõltuvus.

Graafik näitab, et olukorras, kus PMV indeks on näiteks vahemikus -0,5 kuni +0,5, on rahulolematute arv ruumis 10%. See tähendab, et rahulolevate inimeste osakaal on 90%. Mida kaugemale PMV skaalal nullist liikuda, seda suurem on rahulolematute arv ruumis [6]. Nõuded PMV ja PPD indeksi vahemikele on detailsemalt kirjeldatud allolevas tabelis Tabel 1.4 [12]:

Tabel 1.4. PMV ja PPD indeksi nõuded sisekliima klassidele.

Sisekliima klass	Keha soojuslik seisund tervikuna	
	PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), %	PMV (Predicted Mean Vote)
I	<6	-0,2 < PMV < + 0,2
II	<10	- 0,5 < PMV < + 0,5
III	<15	-0,7 < PMV < + 0,7
IV	<25	-1,0 < PMV < + 1,0

Lisaks PMV ja PPD indeksile kirjeldab inimesete tunnetust soojuslikule sisekliimale väga hästi ka operatiivne temperatuur. Ruumiõhu temperatuuri ja operatiivse temperatuuri erinevus seisneb selles, et teisel juhul arvestatakse ka ümbritsevate pindade temperatuure ning õhu liikumise kiirust. Operatiivset temperatuuri arvutatakse järgneva valemiga (1.1) [6]:

$$t_{op} = \frac{\alpha_k * t_0 + \alpha_r * t_r}{\alpha_k + \alpha_r}, \text{ kus} \quad (1.1)$$

a_k on konvektiivne soojusülekanneegur nahapinna ja õhu vahel;

a_r on kiirguslik soojusülekanneegur ümbritsevate pindade ja nahapinna vahel;

t_{δ} on õhutemperatuur;

t_r on keskmine kiirgustemperatuur ümbritsevatele pindadele, tuletatud absoluutsetest kiirgustemperatuuridest.

Operatiivsele temperatuurile on vastavalt hoone kasutusotstarbele ja sisekliima klassidele määratud minimaalsed ning maksimaalsed temperatuuride [12]:

Tabel 1.5. Nõuded operatiivse temperatuurile elamutes.

Hoone või ruumi tüüp	Sisekliima klass	Operatiivne temperatuur, °C	
Eluhooned, elamisruumid (magamistoad, elutoad, jne) Istuv kehaline aktiivsus ~ 1,2 met	I	21,0	25,5
	II	20,0	26,0
	III	18,0	27,0
	IV	16,0	28,0

1.2.3 Sisekliima tagamine tehnosüsteemidega

Ruumide sisekliima tagamine sõltub suuresti hoone arhitektuursetest ning insenerilahendusest. Kujundades ruumide aknad piiratud mõõtmete, päikesekaitse ja avatavusega kaob vajadus lisameetmete rakendamiseks, seda just elamuhoonete puhul, kus sisemised vabasoojused omavad marginaalset mõju ning suurem vabasoojuste hulk tuleb päikesest. Hoone projekteerimisel on vajalik analüüsida tarindi ja vabasoojuste koostoimimist, kasutades ära tarindi võimet salvestada ja vabastada soojust [6].

Liigsoojust ruumist eemaldatakse kaudselt õhuga (ventilatsioon, tuulutus) või otseselt jahutatud veega (jahutatud pindadega nagu jahutuspalgid, ventilaatorikonvektorid jms), mille külmakandjaks on vesi või külmaaine, nt freoon. Jahutusvõimsuse vajaduse määrab ruumi tekkinud liigsoojus. Hoones on kaks peamist vabasoojuse allikat – sisemised ja välimised vabasoojused. Sisemised vabasoojused tekivad ruumis endas inimestelt, valgustusest ja seadmetelt ning välimine liigsoojus tekib päikesekiirgusest. Liigsoojuse teke päikesekiirgusest on otseselt seotud ruumi akende geomeetria ja tehniliste parameetritega, nagu akende suurus, päikese läbivustegur, varjestuselemendid [6].

Õhuga jahutamisel on jahutuskoormuste tagamiseks vajalik määrata sissepuhkeõhule väiksem temperatuur kui ruumi enda siseõhutemperatuur või süsteemi väljatõmbeõhu temperatuur. See tähendab, et jahutusvõimsuse suurus sõltub ruumi õhutemperatuuri ja ventilatsiooni sissepuhkeõhu temperatuuri vahest. Sissepuhkeõhu temperatuuri valimisel tuleb võtta arvesse inimeste soojuslikku mugavustunnet ning temperatuur võib minimaalselt olla +17°C, et ei tekiks tuuletõmmet. Teiseks määravaks parameetrik on ventilatsioonisüsteemi õhuvooluhulk - mida suurem on õhuvooluhulk, seda suurem on jahutusvõimsus. Sissepuhkeõhuga saavutatav jahutusvõimsus arvutatakse valemiga (1.2) [6]:

$$\Phi_{jsp} = L * c_p * \rho * (t_{\bar{o}} - t_{sp}), \text{ kus} \quad (1.2)$$

L - sissepuhkeõhu vooluhulk, m³/s;

c_p - õhu erisoojus, J/kg*K;

ρ - õhu tihedus, kg/m³;

$t_{\bar{o}}$ - ruumi temperatuur, °C;

t_{sp} - sissepuhkeõhu temperatuur, °C.

Eluruumis, kus on õhuvooluhulk nt 15 l/s, tagatakse järgnevad jahutusvõimsused vastavalt siseõhu ja sissepuhkeõhu temperatuuride erinevustele, mis on esitatud allolevas tabelis Tabel 1.6 [6].

Tabel 1.6. Siseõhu ja sissepuhkeõhu temperatuuride vahest saadav jahutusvõimsus näidisõhuvooluhulgaga 15 l/s.

Siseõhu ja sissepuhkeõhu temperatuuride vahe Δt , °C	Jahutusvõimsus, W
1	18
2	36
3	54
4	72
5	90
6	109
7	127
8	145
9	163
10	181

Ruumide jahutamisel vesisüsteemidega ühendatakse ruumiseade tsentraalse jahutusveesüsteemiga. Jahutusvõimsusi ja soojusväljastust vesisüsteemide puhul võimalik reguleerida termostaatventiilidega ning seda ruumipõhiselt. Vesisüsteemidel põhinevad jahutusseadmed töötavad vaikselt. Ruumiseadmetena kasutatakse nt passiivseid jahutuspalke, fan-coile (ventilaatorkonvektoreid), aktiivseid jahutuspalke jms [6].

Eelnevalt mainitud süsteemid projekteeritakse tavapraktikas suurte jahutuskoormustega hoonetele. Hoonetes, kus ruumide jahutuskoormused on väikesed ning vajalikud vaid üksikutes ruumides, pole vesijahutusega süsteemide kasutamine mõistlik. Selle asemel tuleb eelistada esmalt passiivseid jahutusmeetmeid või äärmisel juhul võtta suvise ülekuumenemise vältimiseks kasutusele autonoomsed multisplit- või VRV/VRF (*Variable Refrigerant Volume/Variable Refrigerant Flow*) jahutussüsteemid. Süsteemi valikul tuleks jälgida kasutatavat külmutusgaasi, valides keskkonnasõbralikuma variandi ning veenduda, et külmutusgaasi kasutamist lähiaastatel ei keelustata [13].

1.2.4 Päevalgus

Naturaalne valgus on rohkem eelistatud valgusallikas kui tehisvalgus, tagades kõrgetasemelise värviesituse ja ühenduse sise- ning väliskeskkonna vahel läbi valgusavade [5]. Päevalgus koosneb otsesest kiirgusest ning hajuskiirgusest. Otsese kiirguse allikas on päike, mis kiirgab kindla suunaga, jättes esemetele varju. Hajuskiirgus tekib taevavalgusest ja vastupidiselt otsesele kiirgusele ei oma hajuskiirgus selget suunda [6].

Päevalguse tagamine on äärmiselt tähtis, kuid akende tehniliste näitajate ning suuruse valikul tuleb olla ettevaatlik, avaldades suurt mõju hoone sisekliimale (nt räguse teke, soojuslik ebamugavus) ning energiatõhususele (nt liiga palju vabasoojuse teket või suured soojuskadod läbi akende). Järelikult tuleb hoonete projekteerimisel vältida vastuolulisi lahendusi ning leida tasakaal päevalguse, energiatarbe ning sisekliima vahel [15].

Otsese kiirguse ja hajuskiirguse nõudeid analüüsitakse erinevate päevalgus parameetritega. Otsese kiirguse nõuet iseloomustab insolatsioon ja selle kestus. Hajuskiirguse nõuet kirjeldatakse päevalgusteguriga, kus analüüsitakse hajusvalguse jõudmist ruumi, võttes arvesse sisemist ja välimist valgustustihedust, kui taevast on täielikult pilvkattega kaetud. Mõlemad päevalguse parameetrid on tugevalt seotud hoone asukoha ning orientatsiooniga. Antud töös on päevalguse analüüsiv parameeter päevalgustegur DF (*daylight factor*), mida arvutatakse järgneva valemiga (1.3) [6]:

$$DF = \frac{\text{Ruumisisene valgustihedus}}{\text{Välise horisontaalne valgustihedus}} * 100 \quad (1.3)$$

Nõuded loomuliku päevavalguse tagamiseks ruumides on kirjeldatud standardis EVS-EN 17037:2019+A1:2021. Standardis on esmalt sätestatud kriteeriumid kolmele valgustustiheduse sihtväärtusele – madal, keskmine ja kõrge [5]. Valgustustiheduse arvutamisel valitakse ruumisiseselt pinnaelement, millele langeva valgusvoo suurus ning pinnaelemendi pindala jagatakse. Valgustustiheduse ühik on luks (lx). Eesti kliimas on suvisel ajal väline horisontaalne valgustustihedus vahemikus 15 000 – 20 000 lx ning ruumisiseselt on vajalik tagada valgustustihedus 100-2000 lx [4]. Vastavalt päevavalgusava asendile on määratud vertikaal-/kaldasendis olevatele avadele päevavalgustustiheduse sihtväärtused ning minimaalsed sihtväärtused. Valgustustiheduse sihtväärtused vertikaal- ja kaldasendis valgusavadele on kirjeldatud allolevates tabelis Tabel 1.7 [5]:

Tabel 1.7. Päevavalguse tagamise soovituselised vertikaal- ja kaldasendis päevavalgusavadega.

Soovitav tase ja vertikaal- ja kaldasendis päevavalgusavale	Valgustustiheduse sihtväärtus E_T lx	Ruumi osakaal sihtväärtuse hindamiseks $F_{plane, \%}$	Valgustustiheduse minimaalne sihtväärtus E_{TM} lx	Ruumi osakaal minimaalse sihtväärtuse hindamiseks $F_{plane, \%}$	Päevavalgustundide osakaal $F_{time, \%}$
Minimaalne	300	50%	100	95%	50%
Keskmine	500	50%	300	95%	50%
Kõrge	750	50%	500	95%	50%

Tabelis Tabel 1.8 on esitatud soovituslike valgustustiheduse sihtväärtuste ning minimaalsete sihtväärtuste vastavad päevavalgustegurid päevavalgusavadele [5]:

Tabel 1.8. D väärtused päevavalgusavadele ületamiseks valgustustiheduse taset 100, 300, 500 või 750 lx päevavalgustundide osakaalu $F_{time, \%} = 50\%$ jooksul Tallinnas.

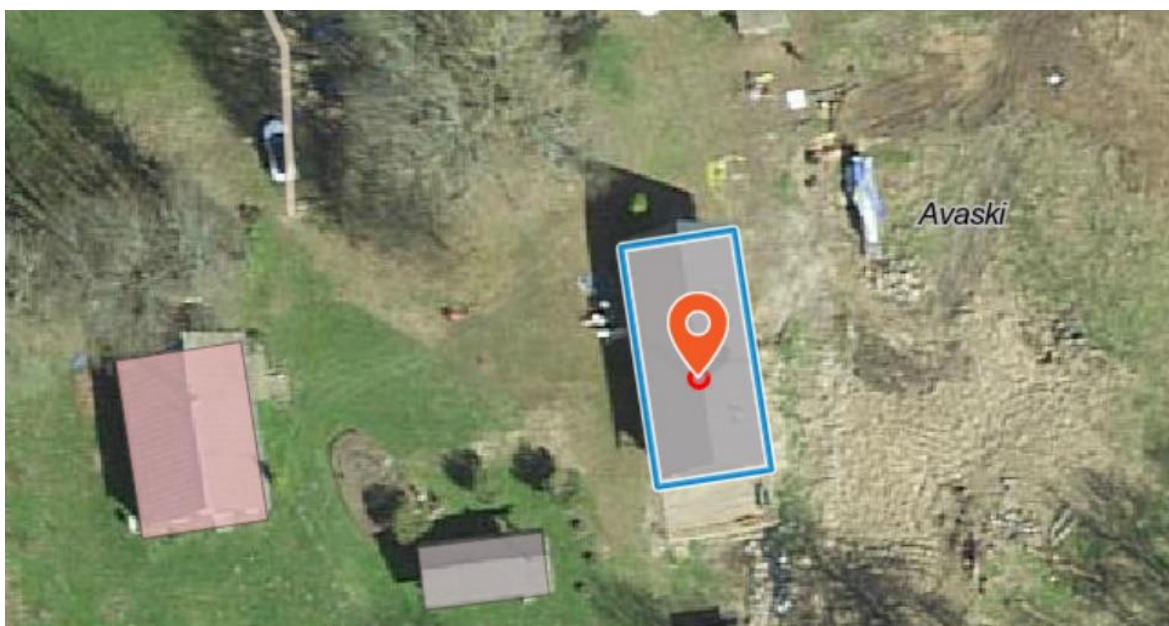
Riik	Pealinn	Geograafiline laius φ [°]	Päevavalguse mediaan horisontaalne üldvalgustustihedus $E_{v.g.med}$	DF väärtus ületamiseks 100 lx	DF väärtus ületamiseks 300 lx	DF väärtus ületamiseks 500 lx	DF väärtus ületamiseks 750 lx
Eesti	Tallinn	59,25	13 600	0,7%	2,2%	3,7%	5,5%

Päevavalgusteguri kehvad tulemused loovad vajaduse kompenseerida puuduliku valguse tehisvalgustusega. Nt keskmise päevavalgusteguri 5% tagamisel, kui ruumis on tagatud ühtlus, ei teki vajadust päevasel ajal kasutada täiendavat elektrivalgustust. Küll aga vahemikus 2% kuni 5% ei ole võimalik tehisvalgustuse kasutust vältida [16].

2 METOODIKA

2.1 Referentsobjekti kirjeldus

Uurimisobjekt asub Avaski külas, Valga maakonnas (katastriüksus: 72402:001:0560). Hoonet käsitletakse abihoonena, mida on rekonstrueeritud ning laiendatud. Abihoone koosneb kahest korrusest, millest esimesel korrusel asuvad töötuba, elutuba ja muud üldpinnad ning teisel korrusel magamistoad. Hoone köetav pind on 133,0 m². Hoone asend on kujutatud alloleval joonisel Joonis 2.1.



Joonis 2.1. Hoone asend Maa-ameti kaardirakenduses.

Antud töö käigus analüüsitakse teisel korrusel (katusekorrusel) asuvat Põhjaruumi pindalaga 26,5 m² (neljakohaline magamistuba), mille välisseina aknad on orientatsiooniga põhja ning katuseaknad ida suunas. Hoone on viilkatusega, millel on üleulatuv osa, toimides varjestava elemendina. Samuti analüüsitakse töös läänepoolset katuslage, mis on koosneb kolmest erinevast soojustuse tüübist, hinnates erinevate soojustuste mõju temperatuuri ning niiskuse liikumisele läbi konstruktsiooni.

2.1.1 Ehitusfüüsikalised näitajad

Hoone välispiirete ja avatäidete kirjeldused ning soojusläbivuste väärtused on näidatud allolevas tabelis Tabel 2.1 [17]:

Tabel 2.1. Hoone välispiirete ehitusfüüsikalised omadused.

Välistarindi/ avatäite tüüp	Kiht	Paksus, mm	Soojus-erijuhtivus λ , W/(m*K)	Soojusläbivus U , W/(m ² *K)
Välissein VS-1	Tuuletõkkeplaat	50	0,031	0,184
	Tuuletõkke kipsplaat	9	0,25	
	Karkassipost, soojustus	245	0,13	
	Hor. roov, soojustus	45	0,035	
	Siseviimistlus	19	0,13	
Katuslagi KL-1	Puitkiudplaat	35	0,13	0,124
	Sarikas, soojustus	245	0,13	
	Hor. roov, soojustus	70	0,035	
	Hor. roov, soojustus	45	0,13	
	Siseviimistlus	20	0,035	
			20	
Põrand pinnasel PP-1	Betoon	100	2,1	0,080
	Soojustus XPS	400	0,036	
Aknad			g= 0,50	0,82
Katuseaknad (3x klaaspakett)			g= 0,47	1,10

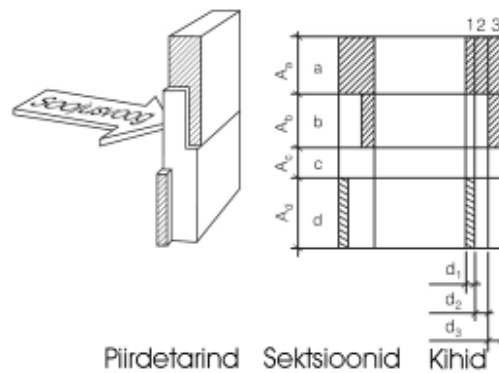
Välispiirete ja avatäidete soojusläbivuste arvutamisel lähtutakse Kredexi liginullenergiahoonete juhendmaterjalist. Antud töös käsitlevate välispiirete puhul on tegemist mittehomoogeenset tüüpi piirdetarinditega, mille arvutamisel lähtutakse lihtsustatud arvutusmetoodikast. Mittehomoogeense piirdetarindi kogusoojustakistus arvutatakse alloleva valemiga (2.1) [18]:

$$R_{tot} = \frac{R_{tot;upper} + R_{tot;lower}}{2}, \text{ kus} \quad (2.1)$$

$R_{tot;upper}$ - mittehomoogeensete kihtidega piirdetarindi kogusoojustakistuse ülemine piirväärtus (vaadeldakse piirde pinnaga risti olevaid seksioone), $(m^2 \cdot K)/W$;

$R_{tot;lower}$ - mittehomoogeensete kihtidega piirdetarindi kogusoojustakistuse alumine piirväärtus (vaadeldakse piirde pinnaga paralleelselt olevaid kihte), $(m^2 \cdot K)/W$.

Mittehomoogeense piirdetarindi kogusoojustakistuse ülemise ja alumise piirväärtuse arvutamisel tükeldatakse piirdetarind homogeenseteks seksioonideks, mida iseloomustab ühemõõtmeline soojuslevi. Mittehomoogeense tarindi seksioonideks jaotamine on illustreeritud alloleval joonisel Joonis 2.2 [18]:



Joonis 2.2. Mittehomoogeense piirdetarindid jaotamine homogeenseteks seksioonideks.

Ülemise piirväärtuse puhul arvutatakse tarindi pinnaga risti olevate seksioonide soojusvoogude kaalutud keskmise summa valemiga (2.2) [18]:

$$R_{tot;upper} = \frac{\sum A}{\frac{A_a}{R_{tot;a}} + \frac{A_b}{R_{tot;b}} + \dots + \frac{A_n}{R_{tot;n}}}, \text{ kus} \quad (2.2)$$

A_a, \dots, A_n - piirde üksikute seksioonide osapindalad (osakaalud), m^2 ;

$R_{tot;a}, \dots, R_{tot;n}$ - piirde üksikute seksioonide soojustakistused, $(m^2 \cdot K)/W$.

Alumise piirväärtuse arvutamisel arvestatakse soojuslevi liikumist paralleelselt tarindi kihtidega ning arvutatakse sarnaselt ülemisele piirväärtusele soojusvoogude kaalutud keskmise summa valemiga (2.3) [18]:

$$R_{tot;lower} = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se}, \text{ kus} \quad (2.3)$$

R_{si} - piirde sisepinna soojustakistus, $(m^2 \cdot K)/W$;

R_1, R_x, R_n - iga kihi soojustakistus, $(m^2 \cdot K)/W$;

R_{se} - piirde välispinna soojustakistus, $(m^2 \cdot K)/W$.

Välispiirde soojusläbivus arvutatakse valemiga (2.4) [18]:

$$U = \frac{1}{R_{tot}}, \frac{W}{(m^2 \cdot K)} \quad (2.4)$$

Soojusläbivuste arvutuskäigud on näidatud lisas Lisa 1 .

Joonkülmasillega väärtused arvutatakse modelleerides kahemõõtmelised soojuslevi mudelid tarkvaras Therm. Arvutusmeetodid vastavad standardile EVS-EN ISO 10211. Sõlmede mudelid koostatakse toetudes Kredex juhendamaterjalile „Piirdetarindite liitekohtade joonsoojusläbivuse arvutus“. Joonkülmasildegade tulemused leiab lisast Lisa 2 .

Elamu õhulekkearvu fikseerimiseks viidi läbi mõõtmised vastavalt standardile EVS-NE ISO 9972:2015. Hoone mõõdetud õhulekkearv on $q_{50} = \sim 2,0 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$ [19].

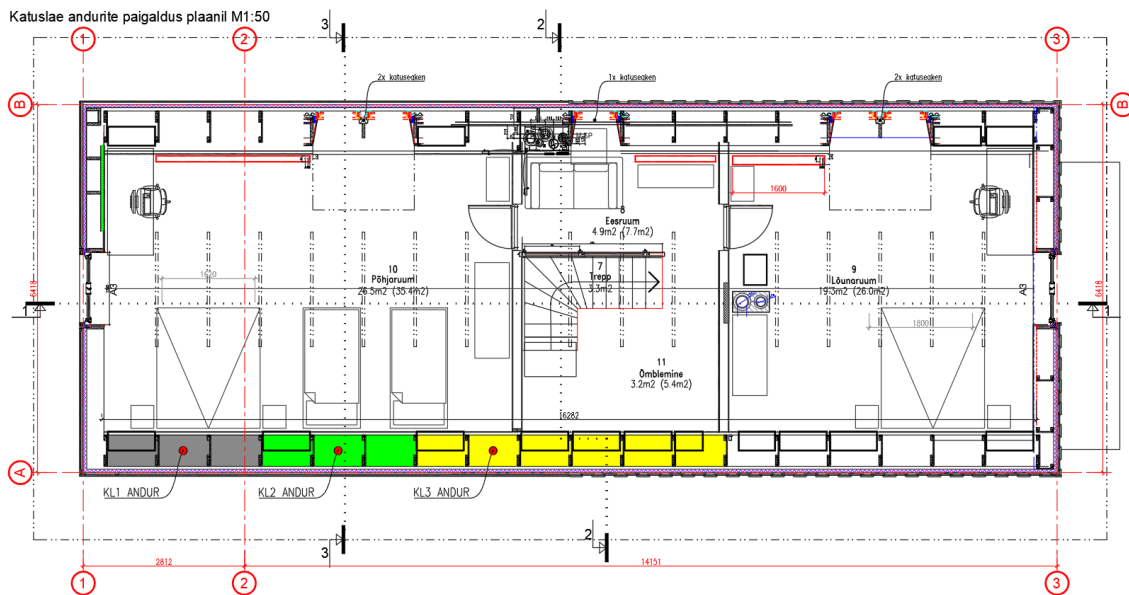
2.1.2 Sisekliima mõõtmised

Erinevate omadustega soojustuste kasutamist katuslaes ja selle mõju sisekliimale mõõdetakse konstruktsiooni ning ruumi paigaldatud anduritega. Uurimistöös analüüsitud soojustusmaterjalid ja nende omadused on kirjeldatud detailselt allolevas tabelis Tabel 2.2 [17]:

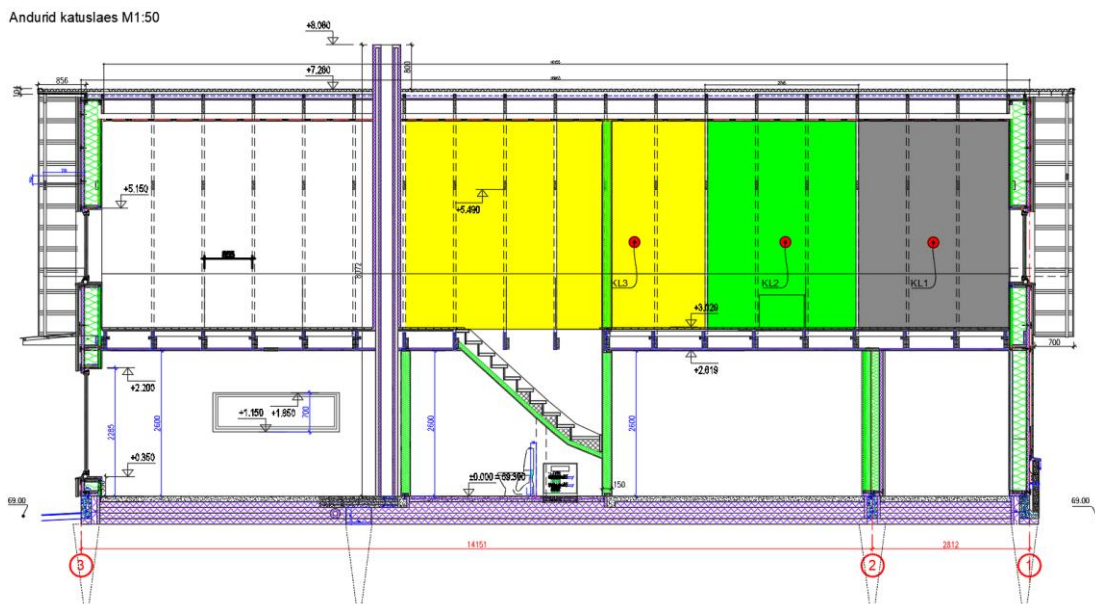
Tabel 2.2. Projekteeritud katusekonstruktsioonide tüübid koos ehitusfüüsikaliste omadustega.

Katusekonstruktsiooni tüüp	Soojustus	Kihi paksus, mm	Materjali omadused	
			Soojuseri juhtivus λ , $W/(m \cdot K)$	Tihedus ρ , kg/m^3
KL-1	Tselluvillast puistevill	315	0,041	55,0
KL-2	Puistevillast puistevill		0,041	70,0
KL-3	Klaasvillast puistevill		0,040	30,0

Uurimisobjekti analüüsitava ruumi on Põhjaruum, mille läänepoolsesse katusekonstruktsiooni paigaldatud andurid on illustreeritud allolevatel joonistel Joonis 2.3 ning Joonis 2.4 [17]:

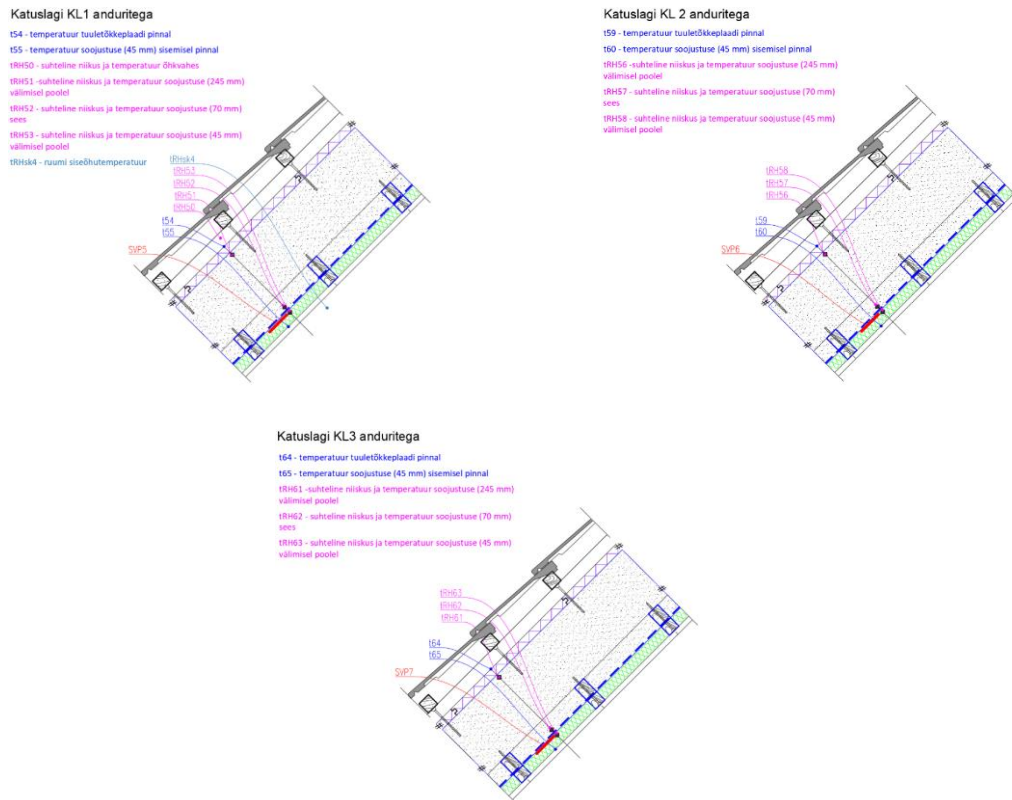


Joonis 2.3. Andurite asukohad kujutatud arhitektuursel plaanil.



Joonis 2.4. Andurite paiknemine katuslaes.

Analüüsi käigus mõõdetakse uuritavas pööninguruumis ja erinevates konstruktsiooni kihtides temperatuure ning suhtelist niiskust. Olulisemad konstruktsioonikihid on muutuvate omadustega soojustusmaterjalid, kuhu on andurid paigaldatud välisse, sisse kui ka keskossa. Eelnimetatud mõõtmistulemused on aluseks dünaamilise mudeli kalibreerimisel. Katusekonstruktsiooni paigaldatud andurite mõõtepunktid on kujutatud allolevatel joonisel Joonis 2.5 [19]:



Joonis 2.5. Andurite paiknemine katusekonstruktsioonides KL1, KL2 ja KL3.

2.2 Dünaamilise simulatsiooni mudeli koostamine

Katuseruumi sisekliima arvutused viiakse läbi dünaamilise simulatsiooni tarkvaras IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE 4.8). Mudeli sisendite väärtused võetakse vastavalt energiatõhususe määrustele nr 58 „Hoone energiatõhususe arvutamise meetodika“ (seisuga 08.07.2023), nr 63 „Hoone energiatõhususe miinimumnõuded“ (seisuga 08.07.2023), tegelikele mõõtmistele (õhulekkearv) ning ehitusfüüsikalistele arvutustele (soojuslähivused/joonkülmasillad vastavalt konstruktiivsele projektile). Mudel ehitatakse arhitektuurse plaani põhjale, mis imporditakse tarkvarasse.

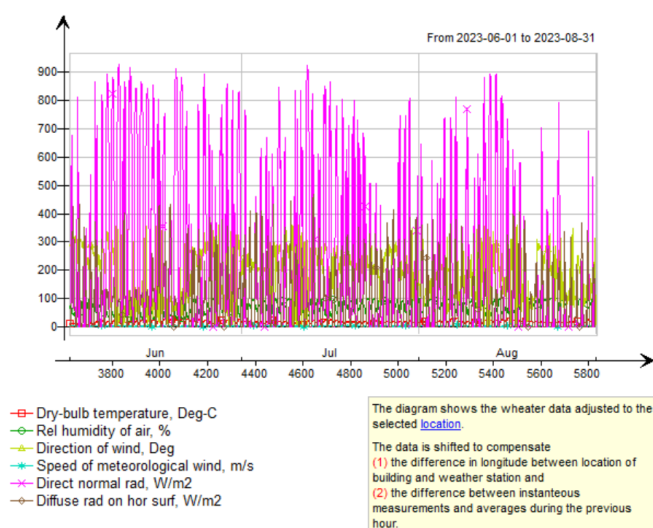
Simulatsioonid arvutatakse detailselt tunnipõhiselt. Tarkvara võimaldab lisaks simulatsiooni vaikeväärtustele muuta ka matemaatilist modelleerimiskeelt, mis annab eelise mudeli täpsemaks seadistamiseks. Analüüsiks vajalike arvutustulemuste väljavõtteid on võimalik valida manuaalselt enne simulatsioonide läbiviimist.

2.2.1 Kliimafail

Arvutuste tegemisel on määravaks osaks hoone asukoht ning selle väliskliima. Hoonele lähim ilmajaam on Tartu-Tõravere meteoroloogiajaam, mille andmed võetakse aluseks geograafilise asukoha defineerimisel. Majandus- ja taristuministri määrus nr 58 „Hoone

energiatõhususe arvutamise meetodika" näeb ette, et energiaarvutused tuleb läbi viia Eesti energiaarvutuse baasaastaga (EstonianTRY), mis kirjeldab Eesti keskmist 30 aasta väliskliimat terve territooriumi ulatuses. Antud töös võrreldakse ruumi ülekuumenemise arvutusi vana (redaktsioon seisuga 08.07.2023) ning uue (redaktsioon seisuga 01.03.2025) määruse järgse kliimafailiga. Vana EstonianTRY fail põhineb ilmaandmetel ajavahemikus 1970-2000 ning uus kliimafail ajavahemikus 1990-2020.

Antud töös kogutakse simulatsioonimudeli kalibreerimiseks ilmaandmed Keskkonnaagentuurilt ajavahemikus 01.01.2023-01.04.2024. Väliskliima arvutamisel võetakse arvesse välisõhu temperatuur, suhteline niiskus, tuule kiirus, tuule suund, päikese normaalisuunaline otsekiirgus ning päikese hajuskiirgus. Kogutud andmete põhjal koostatud suvine kliimafail on kujutatud alloleval joonisel Joonis 2.6 [20]:



Joonis 2.6. Keskkonnaagentuuri andmete põhjal koostatud suvine kliimafail.

Kliimaanalüüsid on kinnitanud, et aastased õhutemperatuurid liiguvad tõusvas trendis ning kliima soojenemine on kinnitust saanud. Kasvuhoonegaaside ja aerosoolide heitkogused suurenevad järk-järgult inimtekkeliste protsesside tulemusena ning raske on ette ennustada, kuidas kliima sellele reageerib. IPCC on modelleerinud kliimamudelid iseloomustamaks erineva ulatusega kliimastenaariume, mida kirjeldatakse RCP (*Representative Concentration Pathway*) väärtuste abil [2]:

- RCP4.5: realistlik stsenaarium, kus on rakendatud meetmeid kliimamuutuste leevendamiseks;
- RCP8.5 : ekstreemne stsenaarium, mis kirjeldab olukorda, kus riigid ei tee kliimamuutuste leevendamiseks omavahelist koostööd.

RCP väärtuse arvutamisel lähtutakse inimtegevusest atmosfääri paisatud emissioonidest ning nende kontsentratsioonidest [2]. Antud töös analüüsitakse

erinevate kliimatsenaariumite mõju katuseruumi ülekuumenemisele ning sisekliimale. Tallinna Tehnikaülikooli uurimisrühm on koostanud kliimafailid aastateks 2030, 2050 ning 2080, kirjeldamaks kliimamuutuste mõju kohalikul tasandil. Tuleviku kliimafailide võrdlus uue ning vana Eesti baasaasta kliimafailiga on illustreeritud allolevates tabelites Tabel 2.3 ja Tabel 2.4:

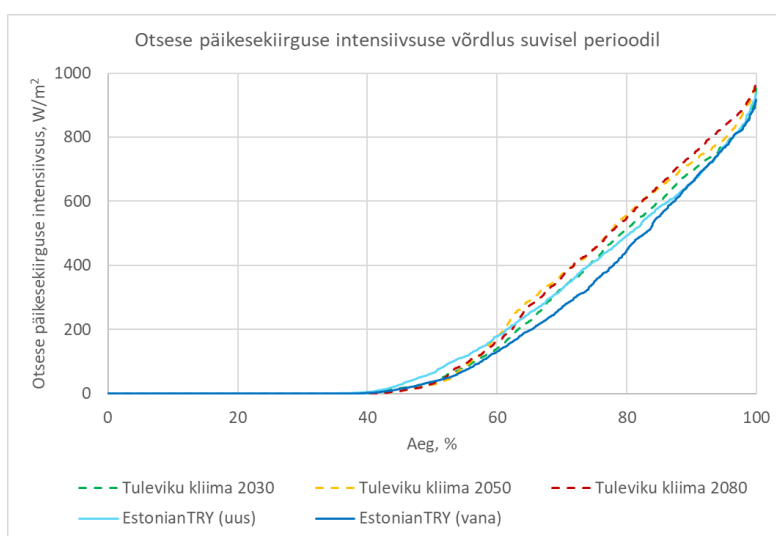
Tabel 2.3. Eesti baasaasta kliimafaili võrdlus tulevikustsenaariumitega (RCP4.5).

	KESKMINE					MIINIMUM					MAKSIMUM				
	TRY (vana)	TRY (uus)	2030	2050	2080	TRY (vana)	TRY (uus)	2030	2050	2080	TRY (vana)	TRY (uus)	2030	2050	2080
Jaan	-3,1	-4,3	-2,7	-1,5	-0,7	-17,4	-22,1	-13,9	-12,6	-11,8	3,9	4,9	5,7	6,6	7,8
Veebr	-5,4	-3,5	-2,6	-1,4	-1,2	-16,1	-21,2	-12,8	-11,7	-11,2	4,6	7,4	6,4	7,1	6,7
Märts	0,0	0,3	0,5	1,4	2,0	-15,6	-12,1	-7,6	-6,6	-6,0	14,6	10,7	7,5	9,1	10,2
Apr	4,5	7,5	6,5	7,3	7,9	-4,4	-2,6	-0,5	0,2	0,9	23,2	22,7	16,8	17,6	17,9
Mai	11,4	11,8	12,6	13,4	13,9	0,2	-0,9	2,7	3,7	4,2	27,7	26,2	23,6	24,9	25,8
Juuni	13,9	15,2	15,6	16,4	17,2	2,6	4,1	8,3	8,8	10,0	24,7	25,3	26,4	27,2	28,7
Juuli	17,4	18,2	19,0	19,7	20,9	9,8	8,6	12,1	12,9	13,5	27,3	30,7	28,6	29,5	30,1
Aug	15,7	17,1	17,5	18,2	19,3	7,5	5,6	11,7	11,8	12,4	27,2	31,5	27,8	27,2	29,6
Sept	10,6	10,7	12,6	13,3	14,5	-0,5	-1,7	2,7	3,5	7,8	22,4	22,9	19,1	20,3	21,1
Okt	5,9	5,4	7,3	8,2	9,0	-3,8	-7,7	-0,5	0,3	2,0	15,5	14,9	14,2	15,9	16,6
Nov	-0,3	1,4	3,1	4,0	4,9	-16,7	-10,6	-4,5	-4,1	-3,5	8,8	11,4	10,1	11,2	11,4
Dets	-2,5	-1,9	0,7	1,7	2,9	-16,3	-17,5	-7,7	-6,8	-5,4	7,8	6,9	7,8	8,9	9,6

Tabel 2.4. Eesti baasaasta kliimafaili võrdlus tulevikustsenaariumitega (RCP8.5).

	KESKMINE					MIINIMUM					MAKSIMUM				
	TRY (vana)	TRY (uus)	2030	2050	2080	TRY (vana)	TRY (uus)	2030	2050	2080	TRY (vana)	TRY (uus)	2030	2050	2080
Jaan	-3,1	-4,3	-1,7	0,0	2,3	-17,4	-22,1	-12,8	-11,1	-8,7	3,9	4,9	5,8	8,4	10,7
Veebr	-5,4	-3,5	-1,7	0,0	1,6	-16,1	-21,2	-11,7	-10,2	-7,9	4,6	7,4	5,8	7,9	9,5
Märts	0,0	0,3	1,2	2,5	4,2	-15,6	-12,1	-6,8	-5,6	-3,8	14,6	10,7	9,6	10,3	12,2
Apr	4,5	7,5	6,6	7,9	9,4	-4,4	-2,6	-1,1	1,0	2,2	23,2	22,7	16,5	17,8	19,6
Mai	11,4	11,8	12,5	13,7	15,3	0,2	-0,9	3,0	4,0	5,8	27,7	26,2	23,8	25,9	27,6
Juuni	13,9	15,2	15,7	16,8	19,2	2,6	4,1	8,5	10,0	11,9	24,7	25,3	26,1	27,6	30,6
Juuli	17,4	18,2	19,5	20,2	23,1	9,8	8,6	12,5	13,6	15,8	27,3	30,7	29,0	30,1	32,3
Aug	15,7	17,1	17,6	18,9	21,6	7,5	5,6	12,3	12,5	14,9	27,2	31,5	24,5	27,7	30,6
Sept	10,6	10,7	13,1	14,3	16,6	-0,5	-1,7	6,8	2,3	10,7	22,4	22,9	19,6	21,0	23,2
Okt	5,9	5,4	7,6	8,9	10,9	-3,8	-7,7	1,0	1,1	4,0	15,5	14,9	14,2	16,4	18,1
Nov	-0,3	1,4	3,9	5,0	6,9	-16,7	-10,6	-4,5	-3,2	-1,2	8,8	11,4	10,0	12,5	13,8
Dets	-2,5	-1,9	0,9	2,5	4,8	-16,3	-17,5	-7,7	-6,0	-3,2	7,8	6,9	8,0	9,6	11,9

Samuti on võrreldud suvise perioodi otsese päikesekiirguse intensiivsust erinevate kliimafailide vahel. Tulemused on illustreeritud alloleval joonisel Joonis 2.7:



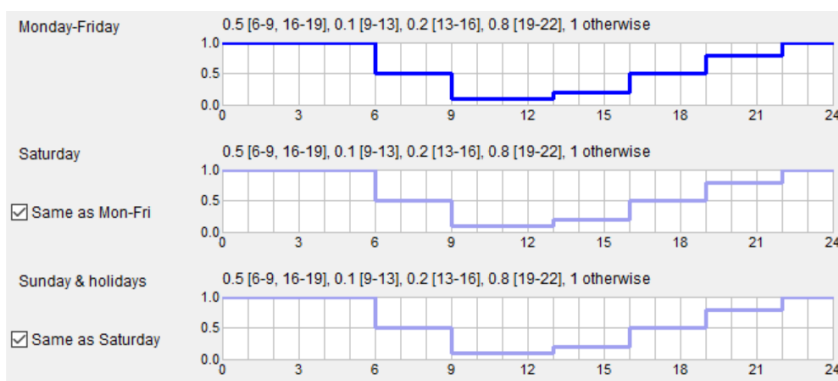
Joonis 2.7. Otsese päikesekiirguse intensiivsus erinevate kliimatsenaariumite korral.

2.2.2 Vabasoojused ja kasutusprofiilid

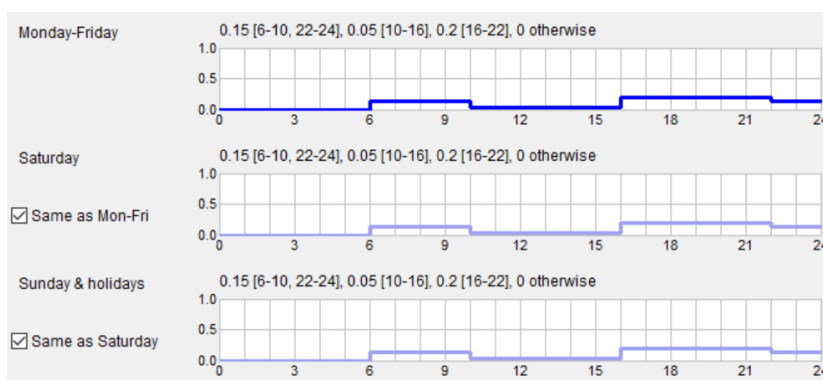
Elamu vabasoojuste väärtused ning kasutusprofiilid võetakse vastavalt MKM määrusele nr 58. Määrus näeb ette väikeelamule pindalaga 120-220 m² järgmised sisemiste vabasoojuste väärtused:

- inimesed 42,5 m²/in;
- seadmed 2,4 W/m²;
- valgustus 6 W/m² vana määruse järgi;
- valgustus 5 W/m² uue määruse järgi.

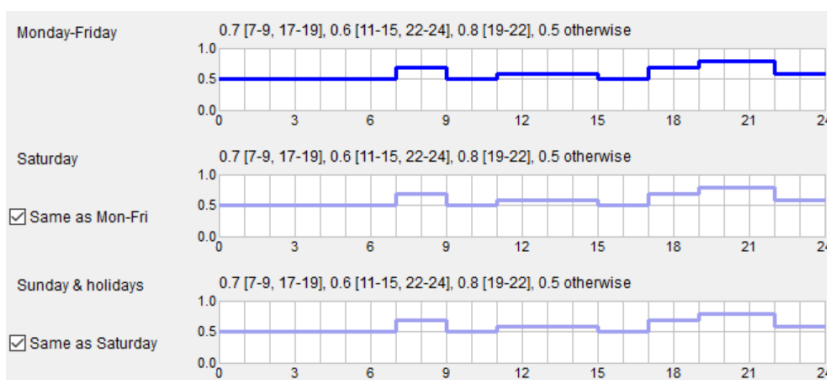
Sisemiste vabasoojuste kasutusprofiilid on kujutatud allolevatel joonistel:



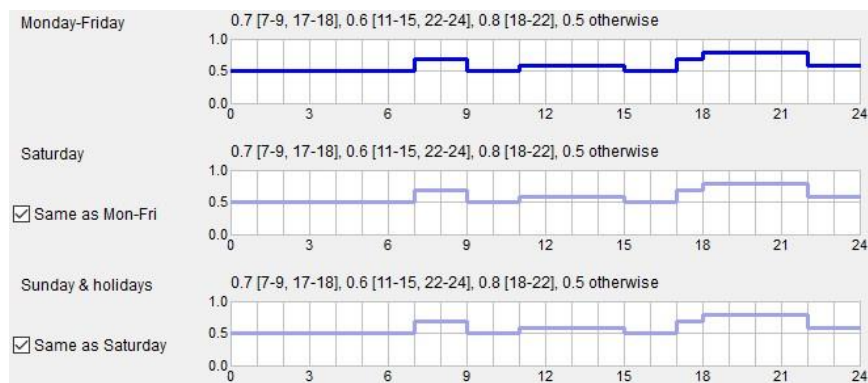
Joonis 2.8. Inimeste kasutusprofiil kujutatud IDA ICE tarkvaras (uus ja vana määrus).



Joonis 2.9. Valgustuse kasutusprofiil kujutatud IDA ICE tarkvaras (uus ja vana määrus).



Joonis 2.10. Seadmete kasutusprofiil kujutatud IDA ICE tarkvaras (vana määrus).

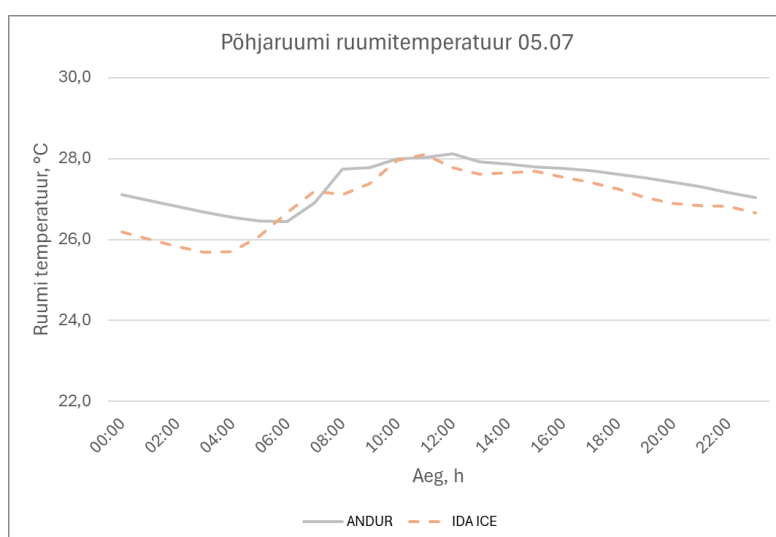


Joonis 2.11. Seadmete kasutusprofiil kujutatud IDA ICE tarkvaras (uus määrus).

2.2.3 Simulatsioonimudeli kalibreerimine

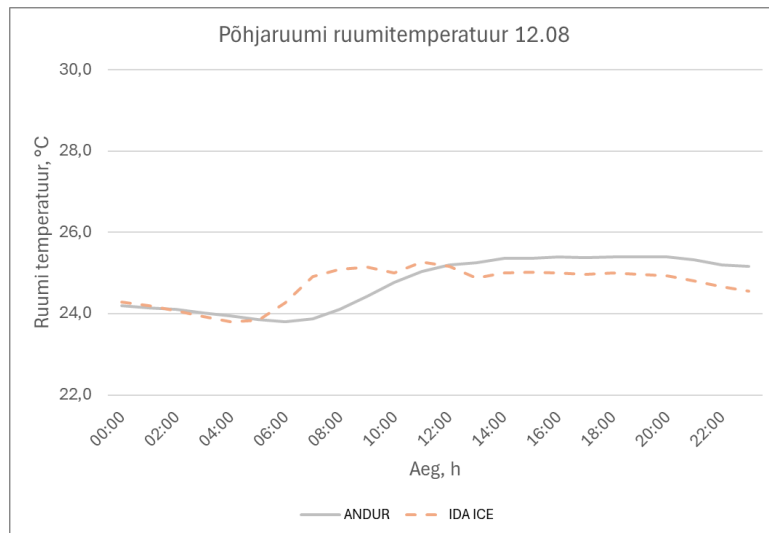
Mudeli kalibreerimiseks koostatakse kolme päeva (perioodil 01.06.2023-31.08.2023) andurite näitude põhjal ööpäevased graafikud ühetunnise intervalliga. Mõõtepäevadel on rakendatud mitmete akende erinevaid asendeid ning varjestust (aknakatteid), mis on kirjeldatud allpool. Täpsemate arvutuste läbiviimiseks koostati Tartu-Tõravere ilmaandmete põhjal kliimafail.

Anduri ning simulatsiooni tulemuste võrdlemiseks valiti esimeseks päevaks 5. juuli, mil ruumi tuulutamiseks oli avatud üks katuseaken. Siseuks oli valitud päeval suletud ning aknakatteid ei kasutatud. Ruumi jahutuse seadeväärtuseks valiti +27°C ning akna avatus 10% (ööpäevaringselt). Sisemised vabasoojused ning ventilatsioon puudusid terve suve vältel, seega ka teiste simuleeritud päevade puhul olid need arvestamata. Esimese päeva simulatsiooni tulemused on illustreeritud alloleval joonisel Joonis 2.12:



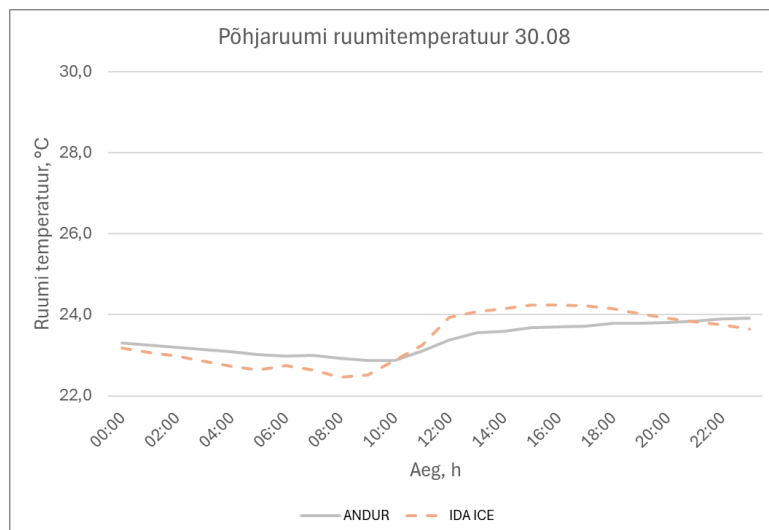
Joonis 2.12. Referentsruumi temperatuurigraafik 05.07.

Teine simuleeritav päev on 12. august, mil kõik ruumi aknad olid tuulutusesendis ning aknakatted ees. Ruumi siseuks oli antud päeval kinni. Ruumi jahutuse seadeväärtuseks valiti +25°C ja tuulutamiseks katuseakende avatus 20% ning tavaakende puhul 10% (akende avamise graafikud ööpäevaringsed). Teise päeva simulatsiooni tulemused on illustreeritud alloleval joonisel Joonis 2.13:



Joonis 2.13. Referentsruumi temperatuurigraafik 12.08.

Viimane simuleeritav päev on 30. august, mil kõik ruumi aknad ning siseuks olid suletud. Akendel katteid ees polnud. Kolmanda päeva simulatsiooni tulemused on illustreeritud alloleval joonisel Joonis 2.14:



Joonis 2.14. Referentsruumi temperatuurigraafik 30.08.

Anduri ja simulatsiooni temperatuurigraafikud on sarnased, kuid tulemustes ilmneb kergeid kõrvalekaldeid. 5. juuli esimestel öötundidel, 12. augusti hommikutundidel ning

30. augustil lõuna paiku on märgata kuni ühekraadist temperatuuride erinevust. Kuna vahemaa Tartu-Tõravere ilmajaama ja referentsobjekti vahel on linnulennult ligi 40 km, siis võib ilm mõlemas asukohas erineda – pilvisus, sademed jne.

2.2.4 HAMWall mudel

Niiskuse liikumist läbi konstruktsiooni analüüsitakse HAMWalli plugina abil, mis on välja töötatud J. Kurnitski ja M. Vuolle poolt. Plugina kasutamise eesmärk on kalibreerida dünaamilise simulatsiooni mudelit, võrreldes simulatsiooni tulemusi katusekonstruktsioonidesse paigaldatud andurite mõõtetulemustega. IDA ICE sidumine HAMWalliga teostatakse simulatsiooni matemaatilisel tasemel, kus vastav konstruktsioon (tarkvaras defineeritud kui *BDFWall*) asendatakse pistikprogrammiga.

Niiskustehniliste simulatsioonide tegemiseks on oluline kirjeldada materjalide niiskuslikud omadused, mis on HAMWall pluginas defineeritud kui δ_0 (veeaaurerijuhtivus δ_0), *slope* (konstant), *power* (konstant), w_1 (materjali niiskussisaldus materjali sorptsioonikõveral kindla suhtelise niiskuse juures) ning w_2 (materjali niiskussisaldus sorptsioonikõveral 100% suhtelise niiskuse juures). Lähteandmed niiskuslike omaduste kohta koguti tootjalehtedelt, sarnaste materjalide sorptsioonikõveratelt ning niiskustehniliste arvutuste käigus. Materjalide niiskustehnilised omadused on esitatud allolevas tabelis Tabel 2.5 [21]:

Tabel 2.5. Katusekonstruktsiooni materjalide niiskustehnilised omadused [21] [22]:

Katusekonstruktsioonikihid	Materjali omadused					Veeaurerijuhtivus, m ² /s			Sorptsioonikõver			
	<i>d</i> , mm	λ , W/(m·K)	ρ , kg/m ³	<i>cp</i>	μ , -	δ_0 , m ² /s	<i>B</i> (SLOPE)	<i>C</i> (Power)	Punkt 1		Punkt 2	
									<i>RH</i> ₁ , %	<i>w</i> ₁ , kg/m ³	<i>RH</i> ₂ , %	<i>w</i> ₂ , kg/m ³
puitlaudis	0,012	0,13	500	1600	5							
lambavill	0,045	0,038	18	1760	1	2,59E-05	0	1	33	2,1	100	15,1
õhu- ja aurutõke		-	-	-	35	5,47E-10	0	1	90	0,1	100	0,11
puistevill	0,315											
- puistevill puidust (KL-3)		0,038	32	2100	3	8,57E-06	0	1	33	2,2	100	22,2
- tselluvill (KL-1)		0,039	50	1600	1	2,57E-05	0	1	33	2,1	100	15,1
- ISOVER InsulSafe (KL-2)		0,041	65	1030	1	2,57E-05	0	1	33	2,1	100	15,1
TTP Steico Universal (puitkiud)	0,035	0,048	270	2100	5	2,52E-05	0	4,75	33	0,2	100	0,7

HAMWalli simulatsiooni tulemused on esitatud lisades Lisa 3, Lisa 4 ning Lisa 5.

2.2.5 Co-heating test

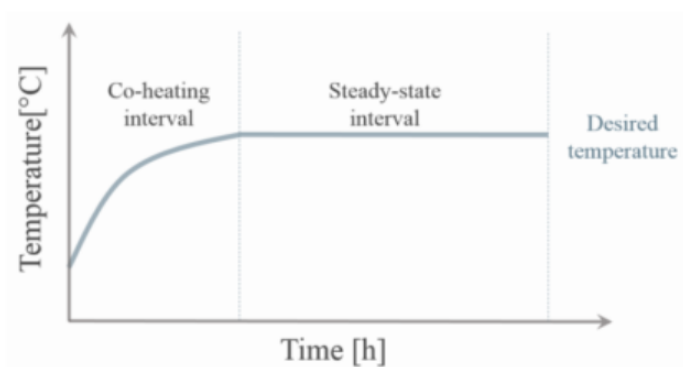
Co-heating test ehk hoone soojuserimahutuvuse analüüs on töökindel meetod, mille abil hinnata soojuse liikumist (nii soojusjuhtivuse, -kiirguse kui ka konvektiivse soojuslevi kujul) hoonest väliskeskkonda. Standardne uuritav periood on üks kuni kolm nädalat. Testi edukaks läbiviimiseks on lähtunud järgnevalt kirjeldatud tingimustest [23].

Soojuskadude täpsemaks määramiseks on vajalik suurt temperatuuride vahet sise- ja väliskeskkonna vahel. Ideaalne aeg testi läbiviimiseks on sügise perioodi lõpp, talvine

aeg või kevadise perioodi algus (temperatuuride vahe peab olema vähemalt 10°C). Teine tähtis tingimus on ruumide mittekasutamine s.t sisemised vabasoojused (soojuskoormused) inimestelt, seadmetelt ning valgustusest peaksid olema välistatud. Samuti on vajalik mõõdetavaks perioodiks välja lülitada ventilatsioon ning sulgeda aknad, et vältida lisanduvaid õhulekkeid [23].

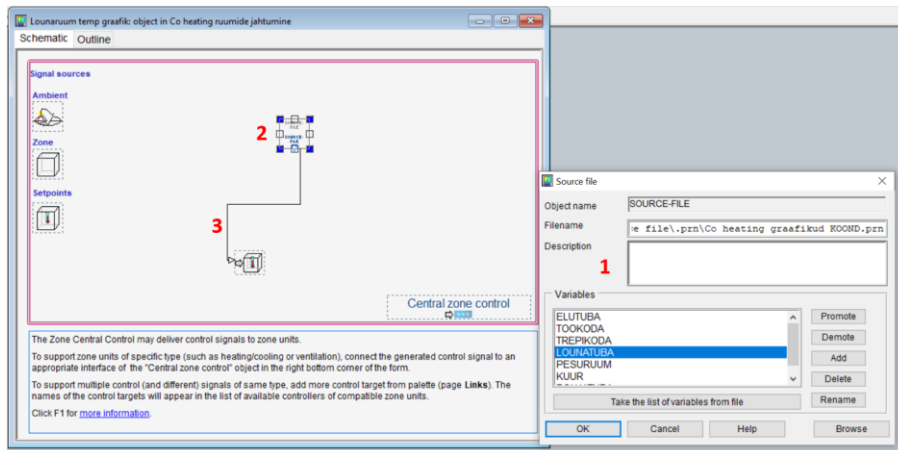
Co-heating meetod koosneb kolmest osast [23]:

- 1) Uuritav ruum köetakse stabiilse temperatuurini (valitakse kütte seadepunkt);
- 2) kui ruumis on saavutatud vastav temperatuur, lülitatakse kütte välja;
- 3) temperatuuride vahe tõttu sise- ja väliskeskonna vahel tekivad soojuskaod ning ruumi temperatuur jahutatakse järgmise seadepunktini.



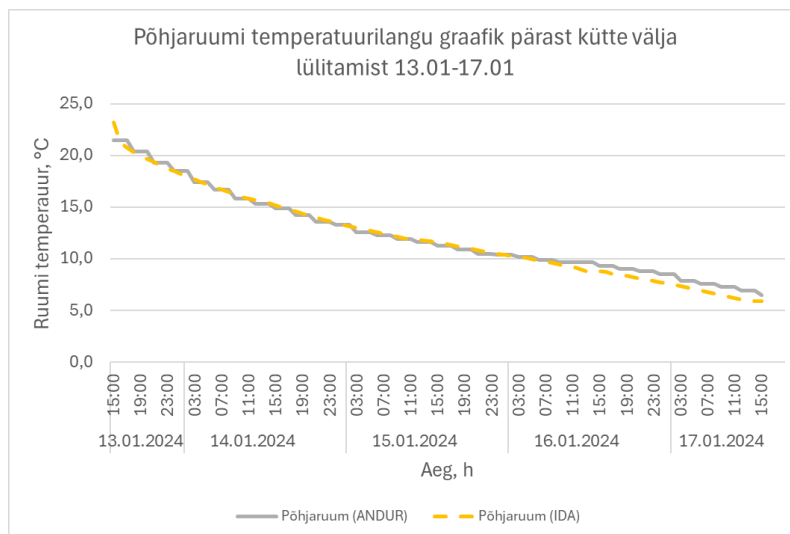
Joonis 2.15. Co-heating testi kütte seadepunkti saavutamise ajavahemik [23].

Co-heating testi tulemusi kasutatakse uuritava ruumi kalibreerimiseks dünaamilises simulatsioonis. Mõõteperioodil kogutud andmetest (temperatuurigraafikutest) koostatakse matemaatilise mudeli sisendiks lähtefail ainult ümbritsevate ruumide jaoks, et hinnata eelkõige kui kiiresti referentsruumis õhutemperatuur jahtub peale kütte välja lülitamist ning kuidas mõjutab kõrvalruumide temperatuurilang uuritava ruumi temperatuuri langemise kiirust. Temperatuurigraafik seotakse vastava ruumiga (1), misjärel moodustub lähtefail (2), mis annab signaali ruumi temperatuuri väljundile (3). Juhtimisskeem on illustreeritud alloleval joonisel Joonis 2.16:

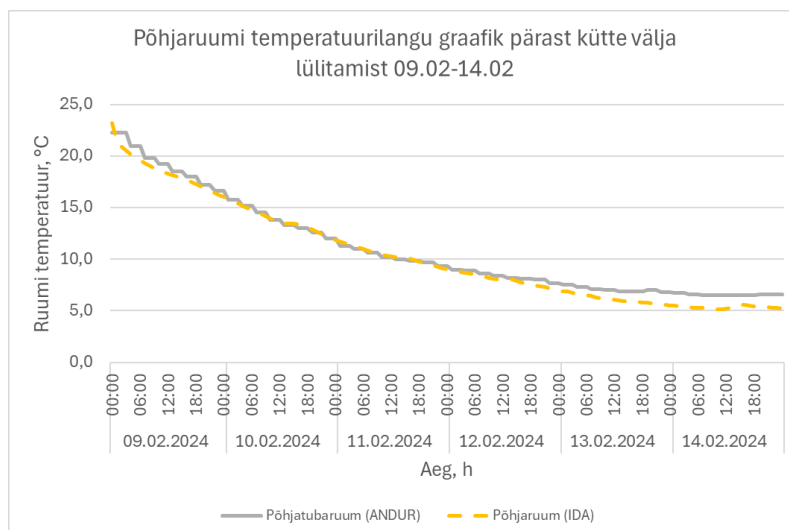


Joonis 2.16. Näide juhtimisskeemist Co-heating testi jaoks.

Simuleerimiseks lülitatakse kõikides ümbritsevates ruumides välja ventilatsioon ning vabasoojused (elanikke mõõteperioodil pole). Põhjaruumis lülitatakse välja ka küte, kuna uuritava ruumil puudub temperatuurigraafiku sisend. Täpsemate arvutuste tegemiseks on kogutud Keskkonnaagentuurist vastava perioodi väliskliima andmed. Juhtimisskeemiga simuleeritud co-heating tulemused Põhjaruumile on esitatud joonistel Joonis 2.17 ning Joonis 2.18:



Joonis 2.17. Co-heating testi võrdlus anduri ning simulatsiooni tulemuste vahel jaanuaris.



Joonis 2.18. Co-heating testi võrdlus anduri ning simulatsiooni tulemuste vahel veebruaris.

Eelnevatelt joonistelt selgub, et simulatsioonitulemused on sarnased mõõdetud suurustele, kuid esinevad mõningad ebakõlad, mis väljenduvad temperatuuride erinevustes – temperatuurid kõiguvad kuni ühe kraadini. Simulatsiooni ja anduri tulemuste erinevused võivad olla põhjustatud kahest tegurist:

- Ebatäpsed välistarindite soojusläbivuse väärtused: simulatsioonimudeli tarindite soojusläbivuste väärtused pole korrigeeritud, s.t et pole arvestatud parandusi mehaanilistest kinnititest, õhupiludest soojustuses jne.

Mõõtevead: mudeli sisendina kasutatud temperatuurigraafikute väärtused on sisestatud käsitsi 3-tunnise täpsusega soojuspumba rakenduse poolt väljastatud tulemuste järgi. Töö autor on hinnanud väljastatud graafikult tulemusi silma järgi, mis tähendab, et graafikute täpsus on ligikaudne.

Co-heating testi simulatsiooni tulemused juhtimisskeemi kasutamata on esitatud igale ruumile lisas Lisa 6 Co-heating test tulemused juhtimisskeemita.

2.3 Analüüsi komponendid

Katusekorterite ülekuumenemise analüüsis viiakse läbi dünaamilised simulatsioonid, katsetades erinevaid arhitektuurseid, konstruktiivseid ja ehitusfüüsikalisi lahendusi. Simulatsioonimudel kalibreeritakse vastavalt tegelikele mõõtmistele ning tulemuste hindamisel lähtutakse määruse ja standardite nõuetest. Simulatsiooniarvutustes analüüsitud komponendid on kirjeldatud järgnevalt:

- konstruktsioonitüübid (kerg- ja raskekonstruktsioonide võrdlus);

- akende mõju ülekuumenemisele (akende suurus, klaaspakettide g-väärtused);
- katusekatte materjal (materjali võime päikesekiirgust neelata ning peegeldada);
- passiivsed jahutusmeetodid (ventilatsiooni õhuvooluhulgad, tuulutusasendid);
- aktiivsed jahutusmeetodid;
- ruumi orientatsioon ilmakaarte suhtes.

Lõputöö suure mahu tõttu varjestavaid elemente ei uuritud. Varjestuste analüüsi tuleks edaspidi uurida. Antud referentsruumi puhul on viilkatuse tõttu välise varjestuste kasutamine piiratud ning uurida saaks üleulatuva katuseräästa sügavuse ning välisribakardinate mõju erinevate ilmakaarte suhtes.

2.3.1 Sisekliima

PMV ja PPD indeks

Soojusliku mugavuse nõuete kontrolliks viiakse läbi tunnipõhised arvutused dünaamilises simulatsioonis. Simulatsioonid tehakse vastavalt Fangeri võrrandile, mille kaudu arvutatakse PMV ja PPD indeksid. Sisekliima klassid ning sellele vastavad nõuded on käsitletud standardis EVS-EN 16798-2. Antud uurimisobjekt on rekonstrueeritud, mis tähendab nõuete tõendamist II sisekliima klassile. Sisekliima klass II näeb ette, et ruumis on vajalik tagada PMV indeksi vahemikus $-0,5 \dots +0,5$ ning PPD indeksi alla 10%. Soojusliku mugavuse arvutustel on vastavalt eelnimetatud standardile ruumis viibiva inimese kehalise aktiivsuse väärtuseks võetud 1,2 met (*metabolism*) ja riietuse soojustakistus suvel 0,5 clo (*clothing*).

Operatiivne temperatuur

Lisaks PMV ja PPD indeksile kontrollitakse operatiivse temperatuuri vastavust nõuetele, mis annab täpsema tulemuse inimese mugavustunde kirjeldamisel kui tavalise õhutemperatuuri arvutamine. Operatiivne temperatuur arvutatakse mehaanilise jahutussüsteemideta hoonetele, antud juhul eluhoonele, kus hoones viibijatel on kerge juurdepääs avatavatele akendele ja võimalik kohandada riietust vastavalt ümbritsevatele soojuslikele tingimustele. Nõudeid operatiivsele temperatuurile käsitletakse standardis EVS-EN 16798-2.

Nõuded vastavalt sisekliima II klassile näevad ette operatiivse temperatuuri piirväärtused nii kütte- kui ka jahutusperioodile. Suveperioodil maksimaalne $+26,0^{\circ}\text{C}$. Suvisel perioodil on lubatud kasutada suuremaid õhu liikumise kiiruseid, et katta operatiivse temperatuuri tõusu ruumis. Maksimaalne õhu liikumise kiirus vastavalt II sisekliima klassile on 0,19 m/s.

Ruumiõhu temperatuur

Ruumide ülekuumenemist tavalise temperatuuri näol, mis ei arvesta ruumis viibijate mugavustunnet, on kirjeldatud kohalikus energiatõhususe määruses. Suvise ruumitemperatuuri tagamist on kajastatud Majandus- ja taristuministri poolt koostatud määruses nr 63 „Hoone energiatõhususe miinimumnõuded“.

Suvise ruumitemperatuuri tagamise arvutused tehakse ruumidele, kus pidevalt viibitakse ning puudub jahutussüsteem sisekliima tagamiseks suvisel perioodil, nt eluruumid, söimeruumid, klassiruumid jms. Väikeelamu jahutuse seadeväärtus vastavalt vanale määrusele on +27°C ning uue määruse kohaselt +26°C. Ülekuumenemise analüüsis arvutatakse tunnipõhised dünaamilised simulatsioonid ajavahemikus 1. juuni kuni 31. august ning eluruumid ei tohi ületada jahutuse seadeväärtust rohkem kui 150 kraadtundi (°Ch).

2.3.2 Ruumi jahutus

Akende mõju

Orientatsioon

Otsese päikesekiirguse jõudmine ruumidesse on seotud akende orientatsiooniga ilmakaarte suhtes ning hoone fassaadile jõudev kogukiirgus koosneb kolmest komponendist – otsene päikesekiirgus, hajus- ja peegeldunud kiirgus. Otsese kiirguse mõju on kõige intensiivsem, olles seotud päikese asendiga ning suunaga pinna suhtes. Hajus- ja peegeldunud kiirgus omavad nõrgemat mõju. Hajuskiirguse osatähtsus suureneb, kui on pilvine ilm ning otsese kiirguse osakaal väiksem. Peegeldunud kiirgus on seotud maapinna peegeldussuhtega ning peegeldava pinna nurgaga [6].

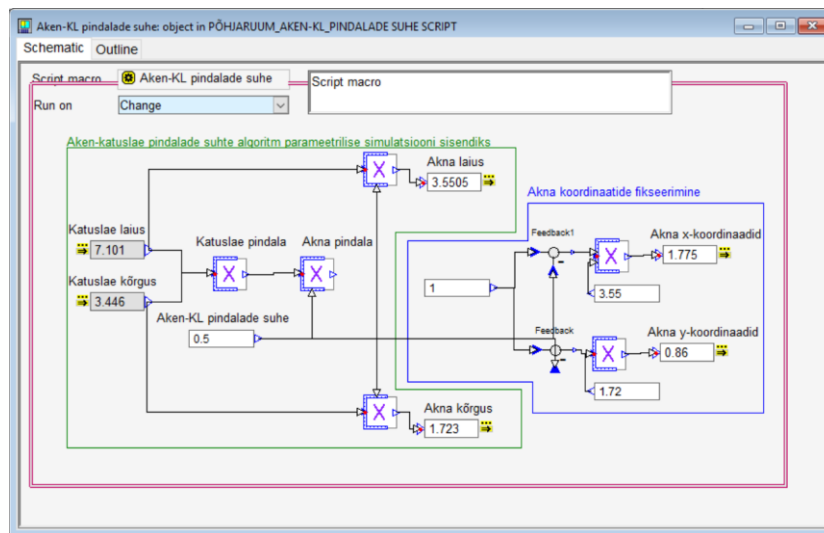
Otsese päikesekiirguse esmane mõju algab hommikusest päikesetõusust idafassaadile ning kestab kuni lõunani (ligikaudu kuni 11:45-ni). Lõunafassaadile mõjub otsene päikesekiirgus vahemikus 09:00-16:00. Läänefassaadi puhul algab otsese päikesekiirguse mõju alates kella 13:00-st ning kestab kuni 16:00. Olenevalt aastaajast on kiirguse hulk erinev – septembrist aprillini [6].

Suurus (WWR)

Põhilise vabasoojuskoormuse ruumidele tekitab päikesekiirgus, millega tuleb arvestada juba hoone projekteerimise algfaasis. Akende suurusel on liigsoojuse hulk päikesest ja see on aluseks ventilatsiooni-/jahutussüsteemide hinna, suuruse ning võimsuse määramisel. Suurte akende projekteerimine on kaasaegne trend ning sellega

kaasneb nii kütte- kui ka jahutusenergia suur tarbimine. Talvisel ajal on suure pindalaga akendest suured soojuskaod ning suvel palju vabasoojust [6].

Akende suuruse mõju sisekliimale on kõige parem analüüsida akende pindala suhtena välisfassaadi pindalasse ehk WWR-ga. Optimaalse pindala leidmiseks koostatakse simulatsioonis skript, kus WWR väärtust arvutatakse vastavalt akna laiuse ja kõrguse muutumisele. Analüüsis võetakse WWR väärtuse sammuks 5%. Akna pindala suhe välispiirde pindalasse on parameetrilise simulatsiooni sisendiks (vt Joonis 2.19).



Joonis 2.19. Algoritm akna ja katuslae pindalade suhte arvutamiseks parameetrilises simulatsioonis [24].

Klaaspaketi tehnilised näitajad

Akende valikul on oluline jälgida klaaspakettide tehnilisi parameetreid, mis määravad päikesekiirguse läbivust väliskeskkonnast ruumi. Üks põhilistest parameetritest on päikeseläbivustegur, mille väärtus määrab päikesekiirguse langemise aknaklaasile, sisenemise ruumi ja peegeldumise aknaklaasilt tagasi väliskeskkonda. Näiteks päikesevalguteguri $g = 0,30$ korral siseneb 30% aknaklaasile langevast päikesekiirgusest ruumi ning ülejäänud 70% peegeldub tagasi keskkonda. Päikesevalgutegurit g iseloomustab järgnev valem (2.5) [6]:

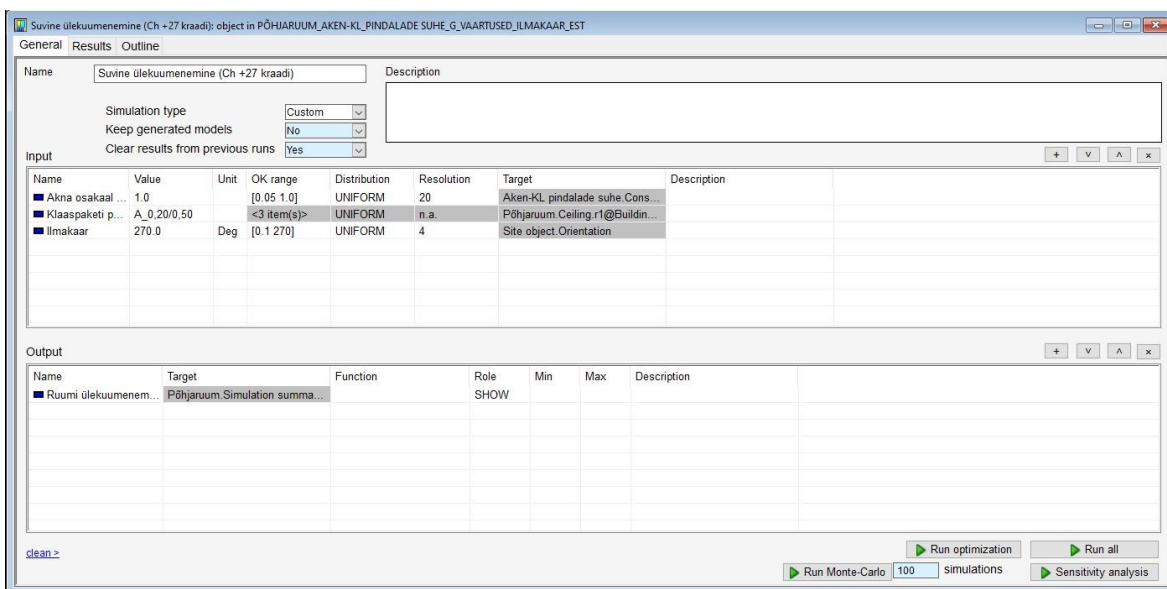
$$g = \frac{\text{päikesekiirgus ruumi läbi akna}}{\text{päikesekiirgus akna pinnale}} \quad (2.5)$$

Akende klaaspakettide valikul lähtuti IDA ICE andmebaasis pakutavatest klaaspakettidest, mille tehnilised näitajad on kirjeldatud allolevas tabelis Tabel 2.6:

Tabel 2.6. Suvise ülekuumenemise analüüsis kasutatavate klaaspakettide parameetrid.

Klaaspaketi nimi	Klaaspaketi tüüp	g-väärtus	T	Tvis
Pilkington Suncool 40/22 (6C(40)-15Ar-4-15Ar-S(3)4)	3x klaaspakett	0,20	0,17	0,36
Pilkington Optifloat Green (6gn-15Ar-S(3)6)	2x klaaspakett	0,40	0,34	0,66
Pilkington Optitherm S3 (6-15Ar-S(3)4)	2x klaaspakett	0,59	0,52	0,79

Alloleval joonisel Joonis 2.20 on kujutatud parameetrilise simulatsiooni ülesehitus, mis koosneb sisenditest ning väljundist. Simulatsiooni sisendina on kombineeritud erinevad parameetrid, mis omavad olulist mõju suvisele ruumitemperatuurile: klaaspaketi g-väärtus, akna pindala suhe katuslae pindalasse suhe ning ilmakaared. Tulemuste analüüsil lähtutakse määruse nr. 63 „Hoone energiatõhususe miinimumnõuded“ lisas Lisa 1 määratud väikeelamu jahutuse seadeväärtusest ning paragrahvist 11 punktist 2, mis sätestab, et elamus ajavahemikul 1. juunist 31. augustini ei tohi antud jahutuse seadeväärtust ületada rohkem kui 150 kraadtundi [3].



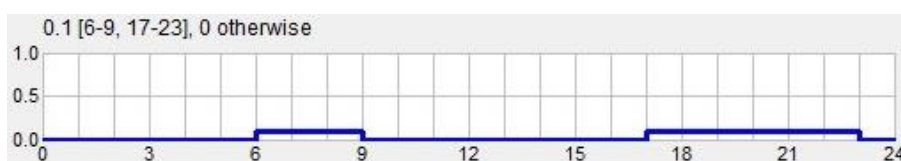
Joonis 2.20. Parameetriline simulatsioon suvise ülekuumenemise arvutamiseks akna erinevate parameetrite kombinatsioonina [24].

Tuulutusmeetodid

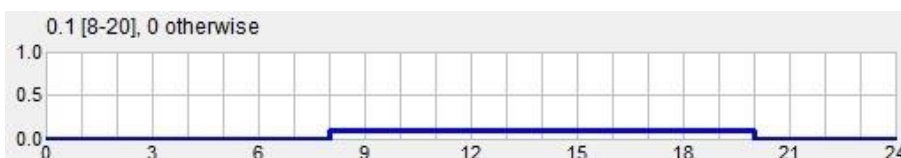
Harjumus aknaid avada on individuaalne ja sõltub kõige enam ümbritsevast (elu)keskkonnast ning hoones viibimise ajast. Akende avamisel jõuab eluruumidesse väljastpoolt rohkem müra ning olenevalt piirkonnast võib tekkida ka sissemurdmisoht. Tööpäevadel, kui kodus ainult hommikul ja õhtusel ajal viibitakse, tuleb teha valik, kas avada aknad hommikul terveks päevaks või õhtul koju tagasi jõudes [25].

Antud töös on tegemist maapiirkonnas asuva eramuga, kus puudub ümbritsev müra, seega akende avamisele piiranguid ei rakendata. Akende avamisel analüüsitakse nelja kasutusprofiili – akende avamine enne ja pärast tööpäeva (hommiku- ja õhtutundidel), päeval, öösel ning ööpäevaringselt.

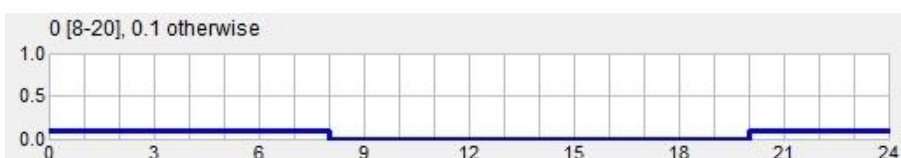
Akende avatavuse osakaalu valikul lähtutakse määrusest nr 63 „Hoone energiatõhususe miinimumnõuded“, mis näeb ette, elu- ja magamistubade aknad suurema pindalaga kui 1 m² peavad olema avatavad kogu akna pindalast vähemalt 10% ulatuses [3]. Kasutusprofiilid on kujutatud allolevatel joonistel:



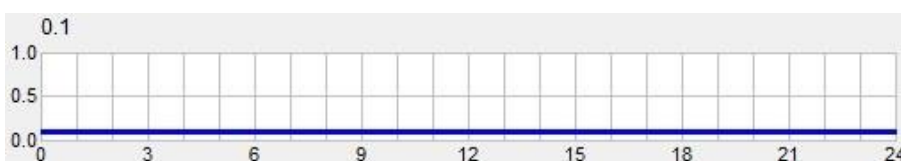
Joonis 2.21. Akende avamise profiil hommiku- ja õhtutundidel.



Joonis 2.22. Akende avamise profiil päevasel ajal.



Joonis 2.23. Akende avamise profiil öisel ajal.



Joonis 2.24. Akende avamise profiil ööpäevaringselt.

Soojussalvestus tarindis

Materjalid omavad võimet endasse soojusenergiat neelata, salvestada ja vabastada ning seda omadust kasutatakse ära ka hoonete ehitamisel. Ehituses oleneb see konstruktsioonitüübist – kas tegemist on raske- või kergkonstruktsiooniga [26]. Päikesekiirgus ei soojenda ruumide õhku otse, vaid kiirgusest tulenev soojus salvestub kõigepealt tahkesse pinda ning aja jooksul vabaneb konvektiivsel teel ruumi. Soojuse vabanemise aeg oleneb konstruktsiooni materjali omadustest ning paksusest. Kergkonstruktsiooniga hoonete puhul on soojuse vabanemiseks kuluv aeg väike ning seetõttu on antud tüüpi hooned päikeselt tulenevast soojusest rohkem mõjutatud [6].

Olenevalt väliskliimast on soojussalvestuse mõju erinev ning seetõttu sääst energiakasutuse vähenemisele jahutusenergia pealt kaheldav. Kuuma kliimaga tsoonid saavad rohkem kasu ehitades raskekonstruktsiooniga hooneid, samal ajal külmas kliimas on energiakasutuse vähenemine, olenemata konstruktsioonitüübist, marginaalne [26].

Antud töös analüüsitakse kerg- ning raskekonstruktsiooni mõju ruumi ülekuumenemisele ning hinnatakse erinevate materjalide ning nende paksuste võimet soojust salvestada. Olemasolevat (kergkonstruktsiooni) võrreldakse olukorraga, kus põrand, välis- ning siseseinad muudetakse betooniks (raskekonstruktsioon).

Katusekatte omadused

Katusekate on otseses kokkupuutes väliskeskkonnaga, eelkõige päikesega, neelates või peegeldades erinevaid kiirguse liike. Kasutades ära materjalide füüsikalisi iseärasusi, nagu on seda albeedo, saab tekitada jahutusefekti [27]. Albeedo on materjali pinnalt peegeldunud kiirguse osakaalu suhe pinnale langeva kogukiirgusesse, mille väärtust kirjeldatakse skaalal 0-1 (väärtus 1 vastab 100%) [28]. Mida heledam pind, seda kõrgem on albeedo väärtus. Teadustööd on näidanud, et olenevalt kliimast on võimalik katusekatte värvuse abil vähendada hoonete energiakasutust jahutusele ning paranada ruumide soojuslikku sisekliimat [27].

Teine olulise mõjuga tegur on katusekatte materjali soojuserijuhtivus, mis iseloomustab kui palju on materjal võimeline soojust läbi laskma ehk kui suur on soojusvool läbi materjalikihi. Soojuserijuhtivust väljendatakse vattides 1 m paksuse ja ühe 1m² materjalikihi kohta, kui temperatuuride vahe kihi välispindade vahel on 1 K. Mida suurem on materjali soojuserijuhtivus, seda rohkem soojust läbib materjali [18].

Analüüsis arvutatakse katuse pinnakatete (materjalid, pinnakatete värvid) mõju katuseruumi ülekuumenemisele. Arvutustes kasutatakse erinevaid materjale erinevate

värvustega. Analüüsitavad katusekatted koos füüsikaliste omaduste (IDA andmebaasi põhjal) ning kirjeldustega on kujutatud allolevas tabelis Tabel 2.7:

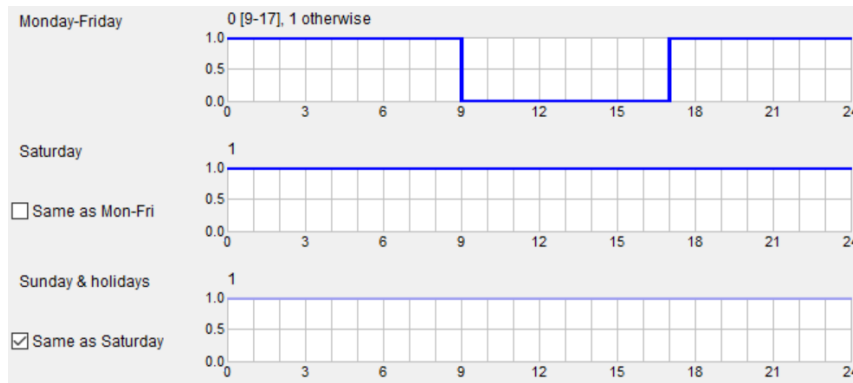
Tabel 2.7. Katusekatte materjalide tüübid ning peegeldustegurid.

Materjal	Värvus	Paksus, mm	Soojuseri-juhtivus, $W/(m*K)$	Pinna peegeldustegur $R, -$	Emissioonitegur $\epsilon, -$
Plekk	Tume	0,60	50	0,099	0,90
	Hele			0,70	
Kivi	Tume	26	0,65	0,099	
	Hele			0,70	

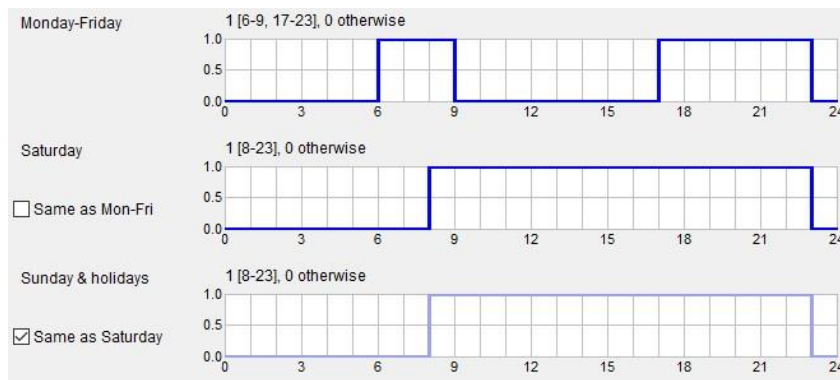
Mehaaniline jahutus

Ruumi temperatuuri alandamine suvel ventilatsiooni õhuvooluhulkade ning akende kaudu tuulutamisega tagab vaid kindla osa ruumi ülekuumenemise vältimisest, piirates valikuid akende suuruse ning klaaspaketi g-väärtuste tegemisel. Ülekuumenemise nõude ületamist on võimalik kompenseerida jahutussüsteemi projekteerimisega, mis annab mingisuguse piirini vabaduse teha järeleandmisi akende suuruse ning klaaspakettide valikul. Käesolevas töös analüüsitakse nii ventilatsiooni sissepuhkeõhu jahutamist kui ka ruumiseadmete kasutamist ruumi jahutamiseks.

Jahutuskoormuste arvutamisel on tähtis teha kindlaks, kui suured on tegelikud sisemised soojuseraldused inimestelt, seadmetelt ning valgustusest. Simulatsioonis ei kasutata määruse järgseid sisemisi vabasoojuseid ega ka kasutusprofiile, vaid määratakse need vastavalt tegelikule olukorrale. Detailselt käsitletakse inimeste kohaolekut nädala lõikes, tööpäevadel (E-R) ning puhkepäevadel (L-P, riigipühad), mis omakorda omavad mõju seadmete ning valgustuse kasutusprofiilidele. Jahutuskoormuste arvutamiseks kasutatavad sisemiste vabasoojuste kasutusprofiilid on illustreeritud järgnevalt:



Joonis 2.25. Inimeste kasutusprofiil ruumi jahutuskoormuse arvutamiseks.



Joonis 2.26. Valgustuse ja seadmete kasutusprofiil ruumi jahutuskoormuse arvutamiseks.

Jahutuskoormuste arvutamiseks lähtutakse minimaalsest (öisest) välistemperatuurist $+20^{\circ}\text{C}$, maksimaalsest (päevasest) $+27^{\circ}\text{C}$ ning suhtelisest niiskusest 50%. Seekaudu määratakse $+27^{\circ}\text{C}/50\%$ märjatermomeetri temperatuuri väärtus $+19,7^{\circ}\text{C}$. Simuleerimisel ei kasutata EstonianTRY kliimafaili, vaid IDA ICE *Synthetic (summer)* faili. Arvutustes arvestatakse pilvitu ilmaga (*clearness=1*) ning vaikeväärtuses muudetakse silumine nulli (*no smoothing*).

Inimeste arv arvestatakse voodikohtade järgi 4 inimest, soojuseralduseks (*met*) võetakse 1,2 met ning riietuse soojustakistuseks (*clo*) 0,5. Ruumis arvestatakse seadmena üks teler soojuseraldusega 80 W ning valgustus 6 W/m^2 . Arvutused viiakse läbi *cooling load* simulatsiooniga, kus arvestatakse sisemiste vabasoojuse osakaaluga 100% ning jahutuskoormuse *room unit cool* väärtusega. Arvutatavaks perioodiks valitakse aprill kuni september. Hoonesse projekteeritava jahutussüsteemi energiaarvutuste tegemiseks vana määrase järgi valitakse jahutuse seadeväärtuseks $+26^{\circ}\text{C}$ ning uue määrase kohaselt $+25^{\circ}\text{C}$.

2.3.3 Päevavalgus

Analüüsitava ruumi päevavalgusavad on kald- ning vertikaalavad, mille soovituslikud valgustustihedused koos päevavalgusteguritega on esitatud tabelis Tabel 1.8. Antud töös lähtutakse päevavalgusteguri järgnevatest piirväärtustest – (keskmise) minimaalne päevavalgustegur 0,7% ning (keskmise) maksimaalne päevavalgustegur 2,2% [5].

Tabel 2.8. Elamu ruumide soovitusliku valgustustihedused [29].

Hoone tüüp	Ruumi tüüp	Tagatud valgustustihedus \bar{E}_m (lx)	Ühtlus U_0
Eluhoone	Elutuba	150	-
Eluhoone	Elutoa lugemisala	500	-
Eluhoone	Magamistuba	80	-
Eluhoone	Magamistoa lugemisala	500	-
Eluhoone	Esik	100	0,4
Eluhoone	Köök	300	0,6
Eluhoone	Vannitoad ja tualetid	200	0,4
Eluhoone	Majandusruum	150	0,4

Päevavalguse simulatsiooni läbiviimiseks arvestatakse järgnevate kriteeriumitega:

- ruumi vaatluspinna kõrgus 0,85 m põrandast [5];
- akende klaaspaketi g-väärtus;
- akende suurus;
- väliskliima – pilvine ilm (*CIE overcast sky*);
- ruumi sisepindade peegeldustegurid (IDA ICE andmebaasist, vt Tabel 2.9).

Tabel 2.9. Põhjaruumi sisepindade peegeldustegurid.

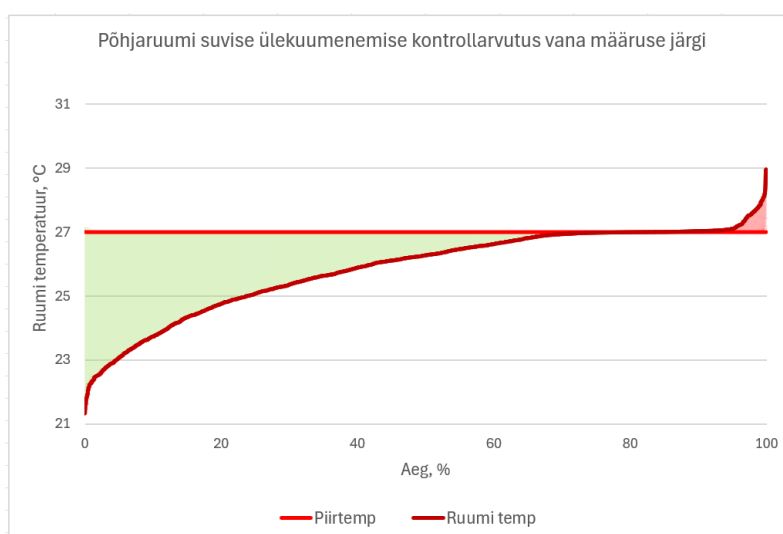
Ruumi sisepinna tüüp	Peegeldustegur
Sisesein (hele puit)	0,56
Põrand (puit)	0,33
Lagi (hele puit)	0,56
Aknaraam (hele puit)	0,56
Välissein (tume puit)	0,09
Katus (tume)	0,09

3 TULEMUSED JA ANALÜÜS

Käesolevas peatükis analüüsitakse katuseruumi olemasolevat olukorda ning erinevate arhitektuursete, konstruktiivsete ning ehitusfüüsikaliste tegurite mõju ruumi ülekuumenemisele. Analüüsi käigus võrreldakse vana ning uue määruse järgse kliimafaili EstonianTRY tulemusi ning uue kliimafailiga kaasnevaid väljakutseid suvise ruumitemperatuuri tagamisel. Samuti hinnatakse tulevikukliima stsenaariumite mõju. Analüüsi eesmärk on optimeerida akende mõju tulemusi, kuni tagatakse kolme sisekliima parameetrite samaaegne nõuete tagamine – suvine ülekuumenemine, soojuslik mugavus ning päevavalgustegur.

3.1 Referentsruumi olemasolev olukord

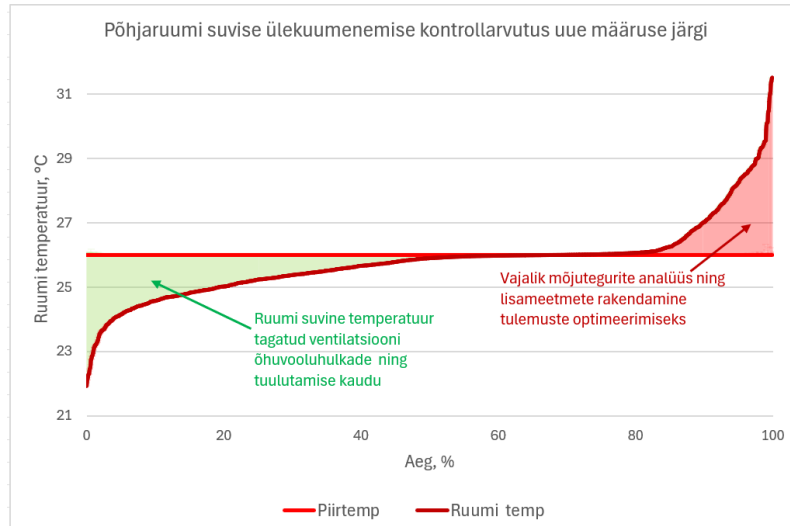
Esiõlgssed simulatsiooni tulemused näitavad, et vastavalt vanale määrusele tagatakse ruumis suvise ülekuumenemise nõue, mille kohaselt ei tohi perioodil 1. juuni- 31. august jahutuse seadeväärtust 27°C ületada rohkem kui 150 °Ch. Referentsruumi suvine ületatav kraadtundide arv on 69 °Ch, kui katuse- kui ka tavaakende avatavus on arvestatud 10% (ööpäevaringse tuulutusasendi graafikuga).



Joonis 3.1. Referentsruumi suvise ülekuumenemise kontrollarvutus vana määruse järgi.

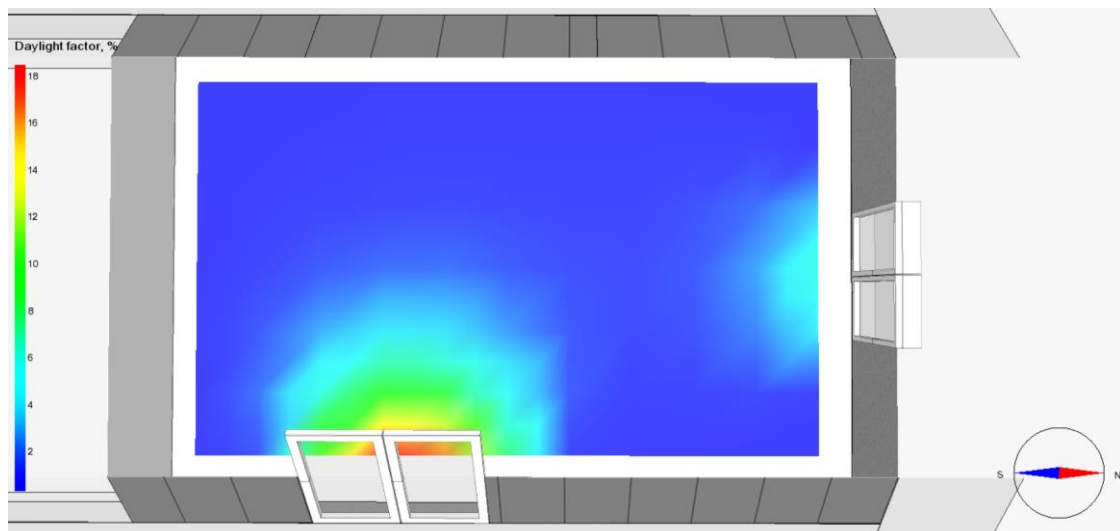
Uue määruse nõuded on muudetud rangemaks, mille kohaselt on jahutuse seadeväärtuseks määratud +26°C, muutes suvise ülekuumenemise nõude täitmist keerulisemaks. Lisaks uuele piirväärtusele on värskendatud uuemate ilmaandmete põhjal viimase 30-aasta EstonianTRY kliimafail, mille andmete analüüsimisel on näha kõrgemaid suviseid temperatuure ning intensiivsemat päikesekiirguse osakaalu (vt Tabel 2.3, Tabel 2.4 ning Joonis 2.7).

Eelnimetatud tegurid raskendavad nõude täitmist ning olemasoleva olukorra puhul uue määruse järgi suvise ülekuumenemise nõuet ei täideta ning ületatav kraadtundide arv on 614 °Ch. Antud olukorras on vajalik lisameetmete rakendamine (nt mehaaniline jahutus, päikesekaitseklaas jm).



Joonis 3.2. Referentsruumi suvise ülekuumenemise kontrollarvutus uue määruse järgi.

Päevavalguse simulatsioonist selgub, et ruumi keskmine päevavalgustegur on 2,3%, mis ületab standardis EVS-EN 17037:2019 esitatud piirväärtust 2,2%. Ruumi kogu ulatuses arvatud minimaalne päevavalgustegur on 0,34% ning maksimaalne 18,4% (vt. Joonis 3.3). Antud töös käsitletakse päevavalguse simulatsioonis arvatud väärtusena keskmist tulemust.



Joonis 3.3. Ruumi päevavalgustegur olemasolevate akendega.

3.2 Ruumi ülekuumenemist mõjutavate tegurite analüüs

3.2.1 Akende parameetrite analüüs

Akende mõju analüüsis arvutatakse parameetriliste simulatsioonide abil erinevate komponentide omavaheline koosmõju ruumi suvisele kraadtundide väärtustele. Simulatsioonis kombineeritakse järgnevad parameetrid:

- Akna osakaal välispiirde pindalasse: 0-1;
- Akna klaaspaketi g-väärtused 0,20-0,60;
- Akna paiknemine ilmakaarte suhtes: põhi, ida, lõuna, lää.ä.

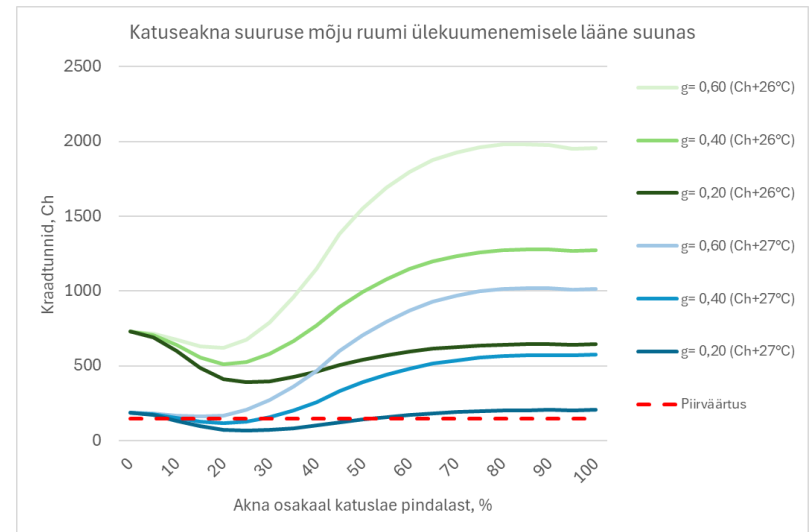
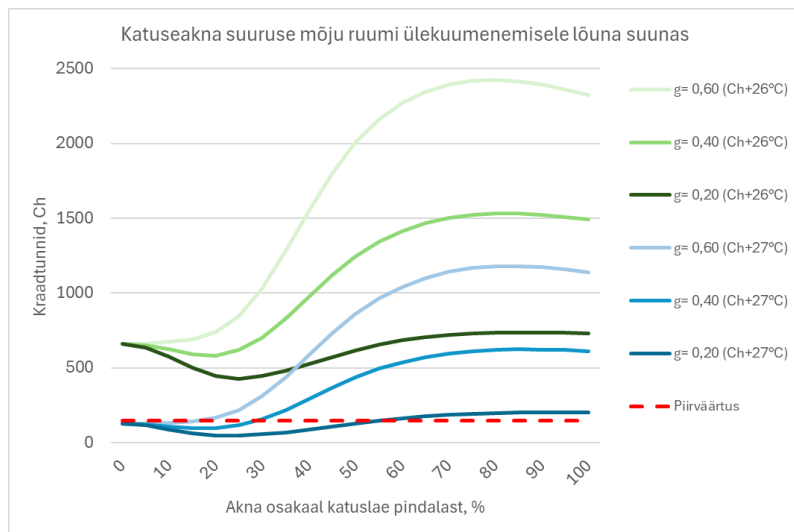
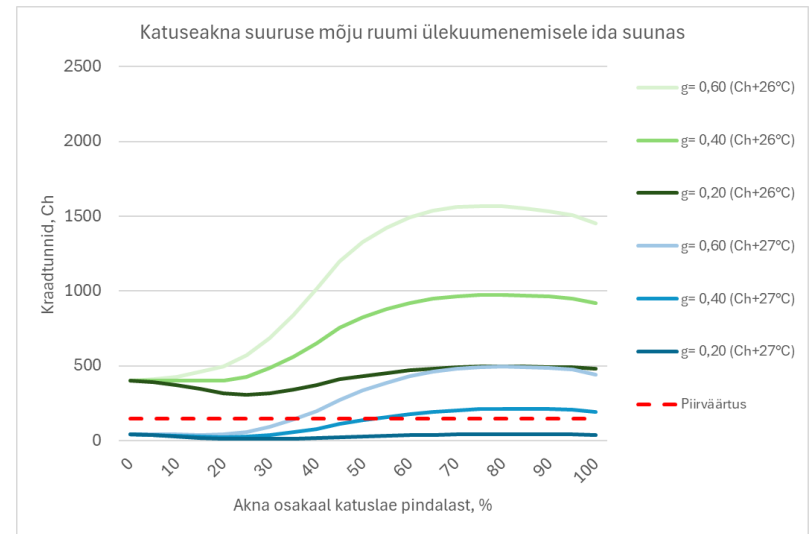
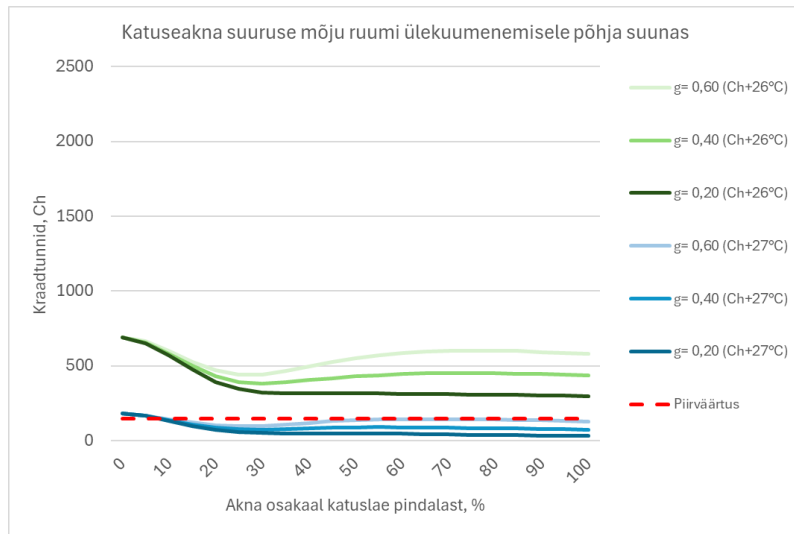
Akna pindala suhet välispiirdesse arvutatakse nii katuse- kui ka tavaaknale, vastavalt katuslae ning välisseina pindalasse. Akende osakaalud arvutatakse vahemikus 0-1 (0-aken puudub, 1- aken katab terve välispiirde osa). Arvutused tehakse sammuga 0,05. Akna klaaspaketi päikese läbilaskvusteguri mõju hindamiseks võetakse g-väärtuste vahemikuks 0,20-0,60. Klaaspaketid valitakse IDA ICE andmebaasist, mis on detailselt kirjeldatud peatükis Akende mõju. Ruumi suvise ülekuumenemise arvutamiseks on akna pindala ning klaaspaketi g-väärtuste kombinatsioon arvutatud erinevate ilmakaarte suhtes. Arvutustes analüüsitakse nelja asimuuti - 0 (põhi), 90 (ida), 180 (lõuna) ja 270 (lää.ä).

Analüüsi tulemuste lugemisel on tähtis silmas pidada, et katuseakna mõju analüüsis jäetakse välisseinas paikneva tavaakna algparameetrid (olemasoleva olukorra) samaks ning vastupidi. Algselt on katuseakna suund idas, pindala osakaal katuslae pindalasse 31% ning klaaspaketi g-väärtusega 0,47. Välisseina akna esialgne osakaal välisfassaadi pindalast on 17%, g= 0,50 ning suunaga põhja.

Analüüsi eesmärk on arvutada ruumi suvist ülekuumenemist uue ning vana määruse järgsete nõuetega ($Ch_{+26^{\circ}C}$ ja $Ch_{+27^{\circ}C}$), analüüsidest missuguste eelnimetatud akna parameetrite kombinatsioonil erinevate ilmakaarte suhtes on võimalik tagada suvise ülekuumenemise nõue 150 kraadtundi ajavahemikus 1. juuni – 31. august.

Tulemuste analüüsis on arvestatud järgneva olukorraga:

- katuseaken põhjas => algparameetritega välisseina aken lää.änes;
- katuseaken idas => algparameetritega välisseina aken põhjas;
- katuseaken lõunas => algparameetritega välisseina aken idas;
- katuseaken lää.änes => algparameetritega välisseina aken lõunas.



Joonis 3.4. Katuseakna mõju analüüs ruumi suvisele temperatuurile.

Tulemused näitavad, et katuseakna suuruse mõju on kõige väiksem ja stabiilsem põhja suunas, kus hüppelist kasvu kraadtundide väärtustes akna osakaalu ning g-väärtuse suurenedes ei toimu. Vastupidiselt on hüppelisemad graafikud ida, lõuna ja lääne suunas, kus kokkupuude päikesekiirgusega päeva jooksul on pikem ning intensiivsem. Samuti on tulemustest näha, et ida, lõuna ning lääne suunas toimub alates akna pindala osakaalust 20% märgatav tõus kraadtundide väärtuses.

Graafikutel illustreerivad sinised jooned vana määruse järgi arvatud olukorda ning rohelised jooned uue määruse järgseid tulemusi. Simulatsiooni tulemustest selgub, et uue määruse järgi simuleeritud suvised kontrollarvutused ei taga ühegi olukorra puhul suvise ülekuumenemise nõuet, mis nõuab lisameetmete rakendamist – antud olukorras jahutussüsteemi projekteerimist. Edaspidi analüüsitakse antud peatükis vaid vana määruse järgi arvatud tulemusi ning uue määruse tulemusi käsitletakse ruumi jahutusarvutuste peatükis.

Katuseakna paiknemisel põhjas, asetsevad algparameetritega välisseina aknad lääne suunas, kuhu paistab õhtune päike ning seetõttu ei täideta ruumi ülekuumenemise nõuet välisseinas paiknevate akende tuulutusasendiga isegi siis, kui katuseaknad puuduvad. Küll aga annab katuseaken eelise langetada ruumi temperatuuri lisanduva tuulutamisega, mis tagab piisava õhuvahetuse alates katuseakna osakaalust 10%. Alates 10% akna osakaalust katuslae pindala suhtes tagatakse ruumis ülekuumenemise nõue iga klaaspaketi g-väärtuse juures.

Ida suunas paikneva katuseakna puhul tagatakse suvise ülekuumenemise nõue klaaspaketi $g = 0,20$ juures terve katuslae ulatuses. Klaaspaketi $g = 0,40$ juures tuleb kraadtundide arvu tagamiseks piirduda akna osakaaluga 50% ning $g = 0,60$ puhul osakaaluga 35%.

Lõuna ja lääne suunas on kõige keerulisem suvist ülekuumenemist vältida, kuna algparameetritega välisseina aken on suunatud vastavalt ida ning lõuna suunas, kitsendades katuseakna parameetrite valikut. Lõunasse suunatud katuseakna osakaal $g = 0,20$ juures saab olla maksimaalselt 55%, $g = 0,40$ osakaal 25% ning kõige kirkama klaasi ($g = 0,60$) puhul peab piirduma akna osakaaluga 15%.

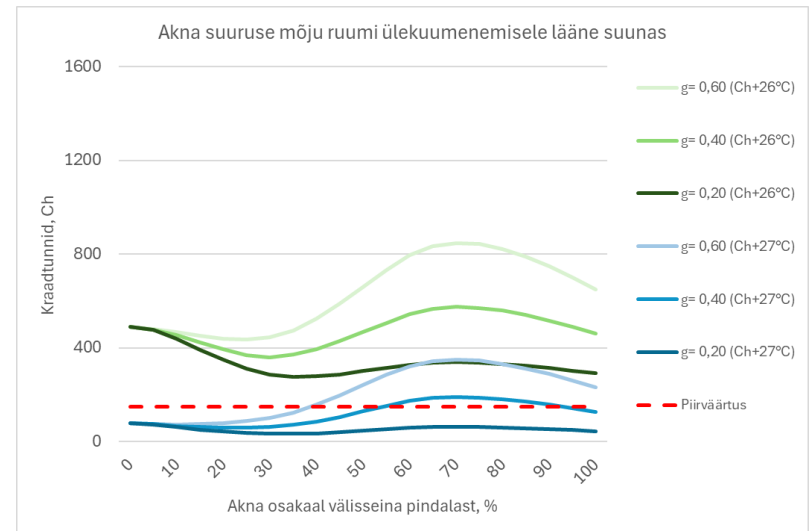
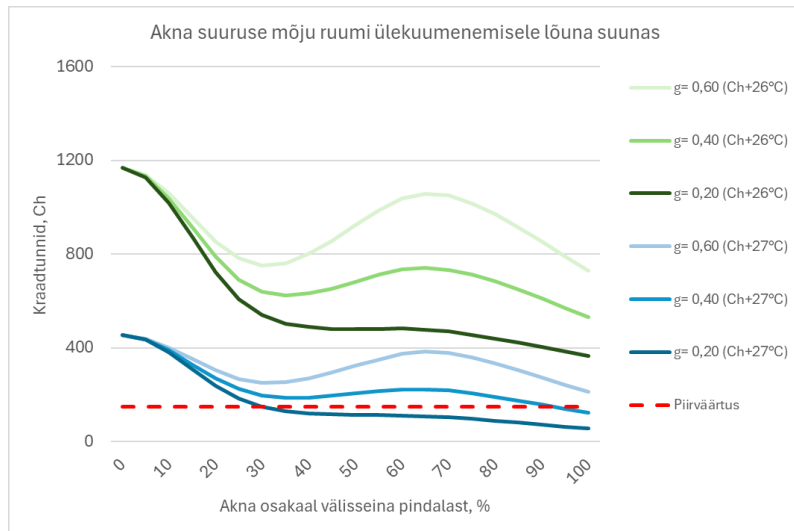
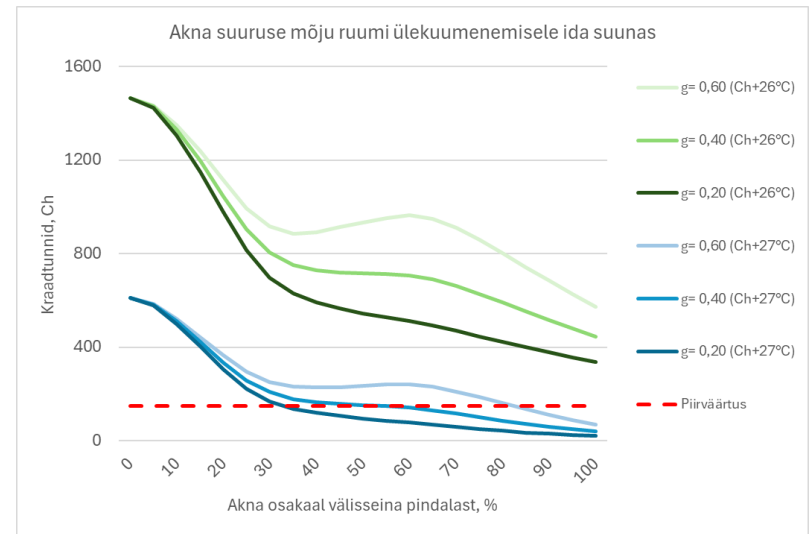
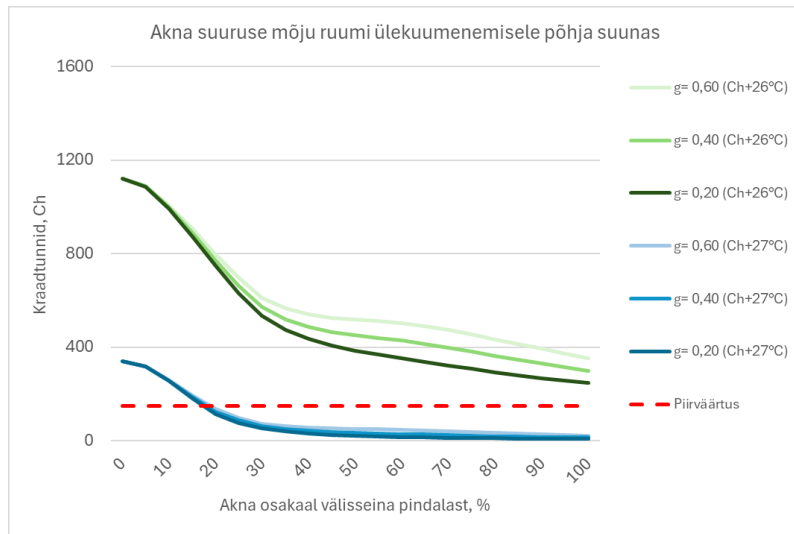
Lääne suunas (sarnaselt põhjas asetsevale katuseakna graafikule) on ülekuumenemise probleem ka olukorras, kus katuseaken puudub. Klaaspaketi $g = 0,20$ puhul tagatakse alates akna osakaalust 10% ning $g = 0,40$ osakaalust 15% piisav õhuvahetus ruumi suvise temperatuuri tagamiseks. Klaaspaketi g-väärtuse 0,60 juures ületatakse kraadtundide piirväärtust iga akna pindala juures. Suvise ülekuumenemise nõude

tagamiseks läänes on katuseakna $g = 0,20$ ja $g = 0,40$ maksimaalsed osakaalud vastavalt 50% ning 25%.

Samal põhimõttel on arvutatud ka välisseinas paikneva akna osakaalu mõju. Tulemuste analüüsis on arvestatud järgneva olukorraga:

- aken põhjas => algparameetritega katuseaken idas
- aken idas => algparameetritega katuseaken lõunas
- aken lõunas => algparameetritega katuseaken läänes
- aken läänes => algparameetritega katuseaken põhjas

Välisseina akna mõju arvutused on illustreeritud allolevatel graafikutel:



Joonis 3.5. Välisseina akna mõju analüüs ruumi suvisele temperatuurile.

Võrreldes katuseakna parameetrite analüüsiga on välisseinas paikneva akna pindala osakaalu ning klaaspaketi g-väärtuste mõju suvisele ruumi ülekuumenemisele märgatavalt vähemolulisem, kuna vertikaalasendis akna kontakt otsese päikesekiirgusega on väiksem. Sarnaselt katuseakna mõju arvutustele selgub ka antud analüüsist, et uue määruse kohaselt ei tagata suvise ruumitemperatuuri nõuet, mistõttu tekib vajadus jahutussüsteemi järgi. Seega antud peatükis analüüsitakse vaid vana määruse järgseid arvutusi ning uue määruse järgset suvist olukorda käsitletakse jahutuskoormuste peatükis.

Käesolevas analüüsis peegeldub graafikutelt anomaalia – tavaakna projekteerimine katuseruumi omab pigem positiivset mõju ruumi suvisele temperatuurile, vähendades katuseakendest tingitud ülekuumenemise riski lisanduva tuulutuse kaudu. Graafikutelt on näha, et kraadtundide arv, olenemata ilmakaarest, hakkab järsult vähenema tavaakna pindala osakaalu 10% juures. Antud olukord omab ruumi temperatuurile kasulikku mõju kuni akna osakaaluni 30%, millest edasi efekt kaob kuni akna 60%-lise pindala osakaaluga hakkab kraadtundide arv taas vähenema.

Samuti on tavaakna puhul põhja suunas kõige väiksem mõju ruumi suvisele temperatuurile ning akna pindala kui ka klaaspaketi g-väärtuste valik antud ilmakaares pole nii piiratud. Alates 20% akna osakaalust tagatakse piisav tuulutus, et hoida ruumi suvist temperatuuri kontrolli all. Klaaspaketi g-väärtused 0,20 kuni 0,60 võivad katta kogu fassaadi, hoides kraadtundide väärtust alla 150 °Ch.

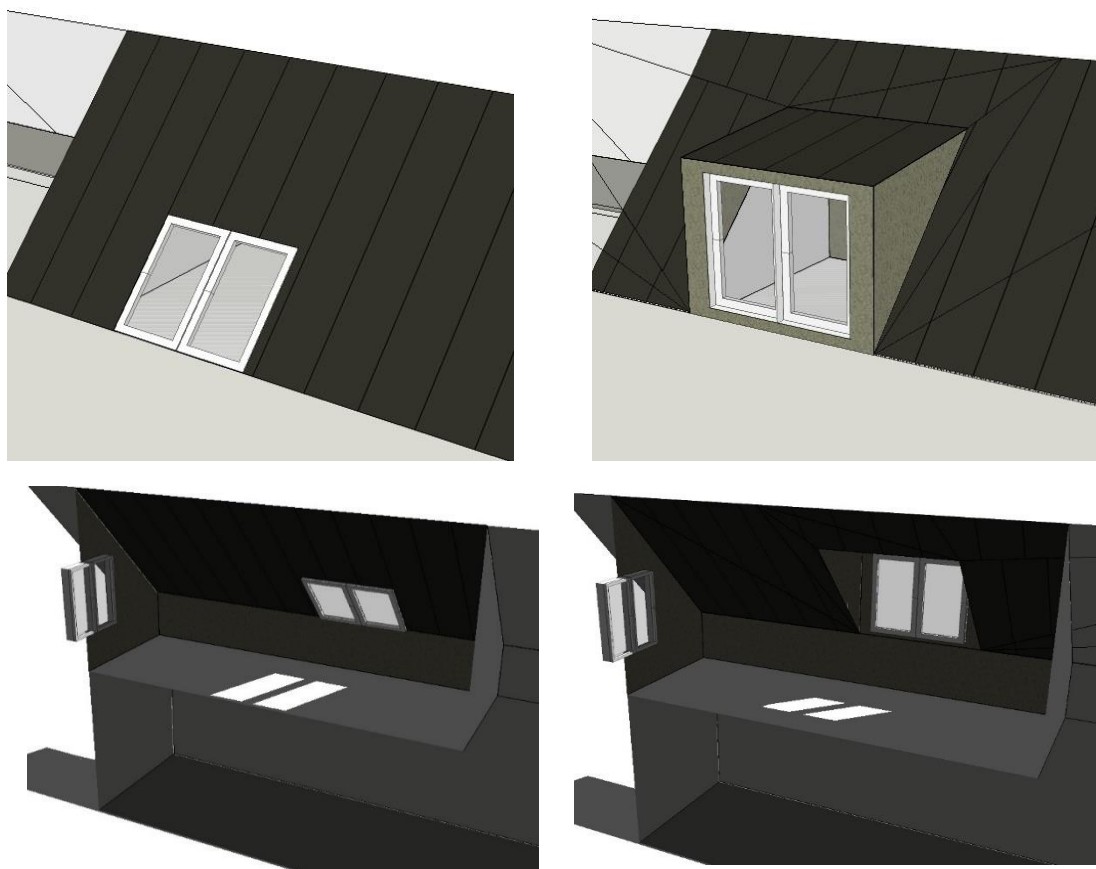
Sarnaselt katuseakna analüüsi tulemustele on ida suunas tavaakna mõju suvisele ülekuumenemisele lõuna ja lääne omadega võrreldes väiksem, olles päikesega kontaktis ainult hommikutundidel. Klaaspaketi $g = 0,20$ osakaaluga 35%, $g = 0,40$ osakaaluga 55% ning $g = 0,60$ osakaaluga 85% tagatakse piisav tuulutus suvise ülekuumenemise vältimiseks.

Lõuna suunas paikneva akna (kui katuseaken on suunatud läände) parameetrite valik on enim piiratud. Klaaspaketi $g = 0,60$ juures pole võimalik suvist ülekuumenemist vältida ning $g = 0,40$ juures on see võimalik vaid praktiliselt tervet fassaadi katva akna pindala juures, kus tuulutusasend on kõige suurem. Akna g-väärtuse 0,20 juures on piisav tuulutus ülekuumenemise vältimiseks tagatud pindala osakaaluga 30%.

Lääne suunal on katuseakende algparameetritega (paiknedes põhja pool) ruumi suvine temperatuur tagatud ja klaaspaketiga $g = 0,20$ ning $g = 0,40$ (v.a. pindala osakaalud 55-90%, mis annavad piiripealsed väärtused) aknad võivad katta terve fassaadi. Klaaspaketi $g = 0,60$ osakaal välisfassaadist saab olla maksimaalselt 35%.

3.2.2 Katuseakende asend

Lähtudes eelneva peatüki tulemustest saab järeldada, et kaldasendis katuseaknad kujutavad suuremat riski ruumi suvisele ülekuumenemisele, kui vertikaalasendis välisseina aknad. Samuti on katuseakendele tunduvalt raskem projekteerida varjestuslahendusi, mis jääksid arhitektuurselt esteetilised. Antud olukorda on võimalik lahendada ehitades katusest väljaulatuva ehituskonstruktsiooni osa (vintskapi), kuhu projekteeritakse vertikaalasendis aknad, vähendades kontakti otse peale kiirgava päikesega.



Joonis 3.6. Referentsruumi katuseakende esialgne paiknemine (vasakul) ning modelleeritud vintskap (paremal).

Referentsruumi kraadtundide arv vastavalt uuele määrusele on 614,5 °Ch ning vintskapi projekteerimisel parandatakse tulemust kraadtundide arvuni 315,5 °Ch (-48,7%). Lisaks suvise ülekuumenemise riski vähenemisele omab vintskapi kasutamine ka positiivset mõju päevavalgustegurile, stabiliseerides naturaalse valguse jaotumist ruumis. Keskmise päevavalgustegur olemasoleva katuseakende paiknemisega on 2,3% ning vintskapis asetseva akende puhul 1,1%.

3.2.3 Ehitusfüüsikaliste omaduste mõju hindamine

Katusekatte materjali omadused

Käesolevas analüüsis hinnatakse kahe erineva katusekatte ning nende värvuse mõju ruumi suvisele ülekuumenemisele (kraadtundide kujul). Simulatsioonis võrreldakse tumedat ja heledat katusekivi ning plekk-katust. Täpsemad lähteandmed on esitatud peatükis Ehitusfüüsikaliste omaduste mõju hindamine. Analüüsi tulemused on esitatud allolevas tabelis:

Tabel 3.1. Katusekatte materjali ja värvuse mõju suvisele ruumitemperatuurile.

	Plekk-katus		Katusekivi	
	Hele	Tume	Hele	Tume
Ch _{+27°C} (vana määrus)	570,6	693,0	504,2	620,4
Ch _{+26°C} (uus määrus)	60,9	92,1	54,7	82,6

Analüüsist selgub, et plekk-katusega ruumi suvised temperatuurid on kõrgemad, kui kivikatusega olukorras. Pleki ja kivikatuse peamine erinevus on nende soojuserijuhtivused. Plekil on kivikatusega võrreldes väga suur soojuserijuhtivus ning sellest tingitult liigub soojus kergesti materjalist läbi ning soojendab selle kiiremini üles. Olenevalt katusekatte materjali värvusest on heledama värviga kattel väiksem mõju ruumi temperatuurile, kuna hele materjal peegeldab suurema osa päikesekiirgusest tagasi ümbritsevasse keskkonda. Tulemuste täpsemal analüüsimisel selgub, et materjali värvil on suurem mõju ruumi suvisele temperatuurile, kui on seda materjali soojuserijuhtivusel.

Kerg- vs raskekonstruktsioon

Konstruktsioonitüüpide mõju analüüsis hinnatakse kahe erineva massiivsusega tarindite mõju ning materjalide võimet salvestada energiat ning seda vabastada. Antud peatükis võrreldakse kerg- ning raskekonstruktsioone, kus kergkonstruktsioonina käsitletakse hoone olemasolevaid konstruktsioone ning raskekonstruktsiooni arvutusteks asendatakse põrand, välis- ning siseseinad betooniga. Antud analüüsis hinnatakse konstruktsioonitüüpide mõju ruumi päevasele temperatuurile ning suvisele ruumitemperatuurile (kraadtundide arvule). Välispiirded asendatakse nii, et nende soojuslähivus jääks olemasolevatega samaks. Järgnevalt on kirjeldatud raskekonstruktsioonide materjalid:

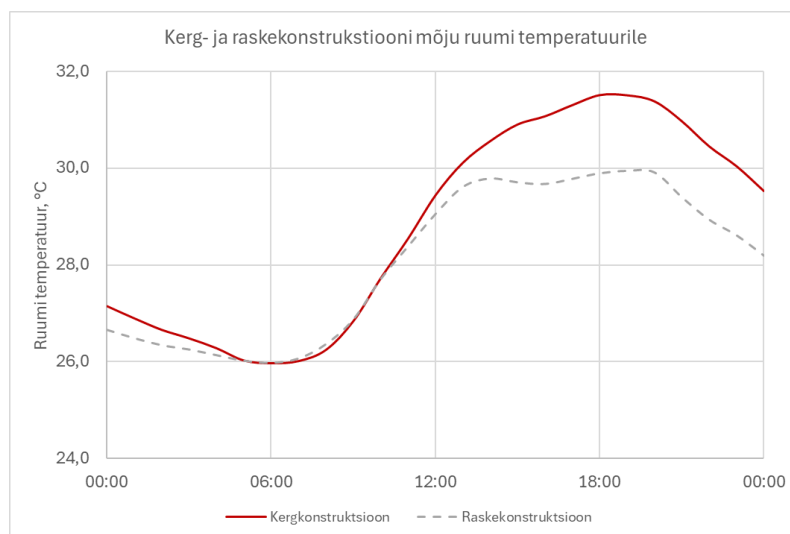
- Sisesein: 2x kipsplaat, kergbetoonplokk 140 mm;

- Välissein: 2x kipsplaat, poorbetoonplokk müüritis 250 mm, mineraalvill 300 mm tuuletõkkeplaat 30 mm;
- Vahelagi: puitlaudis 20 mm, raudbetoon põrandaplaat 80 mm, mineraalvill 30 mm, EPS 20 mm, õõnespaneel 265 mm.

Tabel 3.2. Kerg- ja raskekonstruktsiooni mõju suvisele ruumitemperatuurile.

	Puitkonstruktsioon (kergkonstruktsioon)	Raudbetoonkonstruktsioon (raskekonstruktsioon)	Muutus
Ch _{+27°C} (vana määrus)	69,0	45,5	-34,1%
Ch _{+26°C} (uus määrus)	614,5	463,1	-24,6%

Suvise ruumitemperatuuri arvutustest selgub, et raskekonstruktsiooni kasutades on kraadtundide arv vana määruse kohaselt 23,5 °Ch (-34,1%) ning uue määruse järgi 151,4 °Ch väiksem (-24,6%). Tulemustest võib järeldada, et raskekonstruktsiooni võime salvestada energiat ning seda aeglaselt ruumi vabastada annab eelise suvise ruumitemperatuuri vähendamiseks. Allolevalt on kujutatud ruumi temperatuuri ühe päeva näitel mõlema konstruktsioonitüübi puhul:

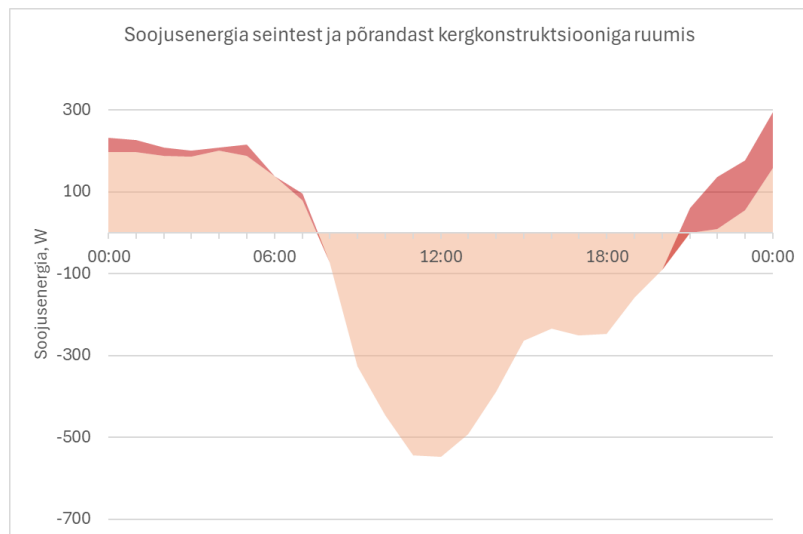


Joonis 3.7. Kerg- ja raskekonstruktsiooni mõju ruumi temperatuurile ühe päeva näitel.

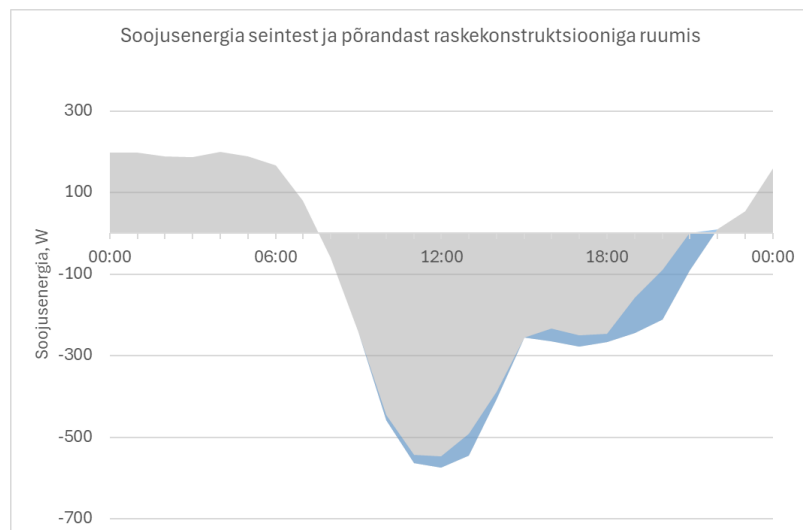
Temperatuuri tõus ruumis varajastel hommikutundidel on mõlema konstruktsiooni puhul suhteliselt sarnane, kuid kergkonstruktsiooniga ruumis on see järsum. Alates pärastlõunast (kell 14:00) on näha muutusi raskekonstruktsiooniga ruumis, kus temperatuur stabiliseerub, samal ajal kui kergkonstruktsiooniga ruumis temperatuur jätkuvalt tõuseb. Öösel maha jahtutatud välispiirded hakkavad keskpäeval endasse ruumi kogunenud soojust salvestama. Päeva jooksul tekib kuni 1,6-kraadine

temperatuuride vahe ning päeva lõpuks on raskekonstruktsiooniga ruumi temperatuur 1,3°C madalam.

Samuti on ühe päeva näitel koostatud soojusenergia bilansi graafikud, mis võtavad arvesse soojuskadusid läbi konstruktsioonide ning konstruktsioonist vabanenud energiat. Esimesel graafikul on punaselt kujutatud kergkonstruktsiooniga ruumis järsku üleliigse soojuse eraldumise hulka ning teisel graafikul on sinisega märgitud ala, mis kujutab raskekonstruktsiooni salvestunud lisasoojusenergia hulka.



Joonis 3.8. Kergkonstruktsiooniga ruumi soojusenergia (seinad ja põrand) bilanss.



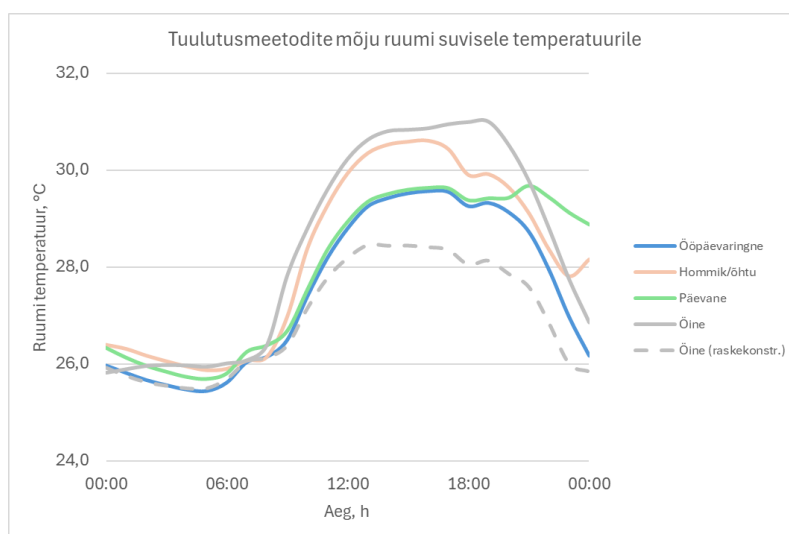
Joonis 3.9. Raskekonstruktsiooniga ruumi soojusenergia (seinad ja põrand) bilanss.

Öösel jahutatakse pinnad maha, nt akende kaudu tuulutamisega, et päeval oleks võimalik soojusenergiat massi salvestada. Tulemustest selgub, et päeva jooksul ülessoojenenud pinnad hakkavad öhtusel/öisel ajal konvektiivsel kujul ruumiõhku soojendama ning kergkonstruktsiooniga ruumis toimub see järsult suurema soojuseraldusega, kui raskekonstruktsiooniga ruumis. Betoonseinad ning -põrand salvestavad päeva jooksul 404 W soojusenergiat. Kergkonstruktsiooniga olukorras lisandub öhtusel ajal/öösel 566 W rohkem soojusenergiat ruumi.

3.3 Ülekuumenemise vältimine jahutuse abil

3.3.1 Tuulutusmeetodid

Passiivse jahutusmeetmena simuleeritakse erinevaid tuulutusmeetodeid ning hinnatakse nende mõju ruumi temperatuurile. Akende kasutusprofiilid on detailselt kirjeldatud peatükis Tuulutusmeetodid. Tulemused esitatakse ühe päeva näitel, mis on illustreeritud alloleval joonisel Joonis 3.10:



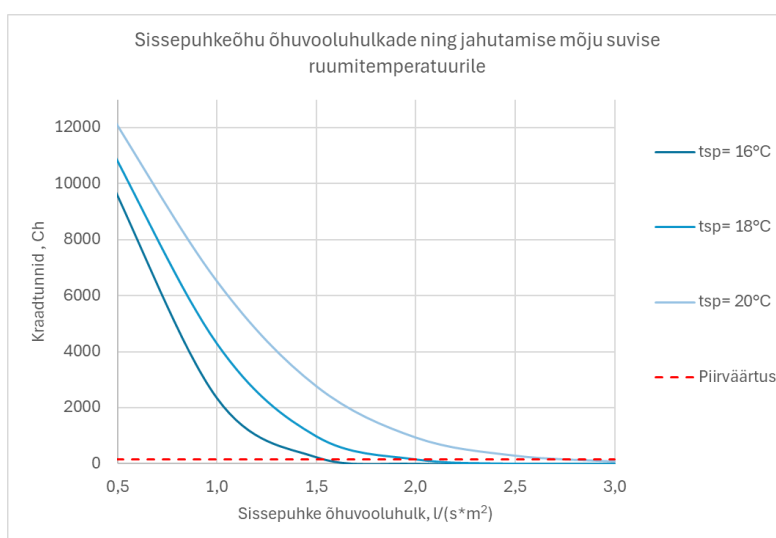
Joonis 3.10. Erinevate tuulutusmeetodite rakendamine ning nende mõju ruumi temperatuurile.

Kõige enam avaldab positiivset mõju ruumi temperatuurile ööpäevaringne akende avatus ning kõige ebastabiilsem olukord tekib öise tuulutamisega. Samuti ei oma päevane akende avamine efekti ruumi temperatuuri alandamisele, kuna päevasel ajal pole temperatuuride vahe sise- ja väliskeskonna vahel piisavalt suur, et soojust välja juhtida ning nii jääb päeva peale kogunenud soojusest tingitult temperatuur muutumatuna. Akende avamine hommiku- ja öhtutundidel ei anna piisavalt tuulutavat efekti ruumi temperatuuri alandamiseks, vaid tekitab järske temperatuuri muutuseid selle sulgemisel ning avamisel, vastavalt hommikul ning öhtul. Analüüsis simuleeriti öise

tuulutamise efekti hindamiseks ka raskekonstruktsiooniga variant, kus on näha ajaliselt hilisemat temperatuuri tõusu võrreldes kergkonstruktsiooniga ning oluliselt väiksemat temperatuuri piiki. Alates pärastlõunast (kell 13:00) hakkab ruumi temperatuur stabiilselt langema, kasutades ära oma võimet ruumist liigset soojust jahedasse massi salvestada.

3.3.2 Ventilatsiooni sissepuhkeõhu jahutamine

Ventilatsiooni sissepuhkeõhu mõju ruumi suvisele ülekuumenemisele analüüsitakse erinevate õhuvooluhulkade ning sissepuhkeõhu temperatuuride juures. Analüüsis simuleeritakse õhuvooluhulkade 0,42-3,0 l/(s*m²) mõju koos jahutusega, kus sissepuhkeõhu temperatuurid varieeruvad 16°C-20°C. Erinevate õhuvooluhulkade ning sissepuhke temperatuuride koosmõju on illustreeritud alloleval joonisel Joonis 3.11:

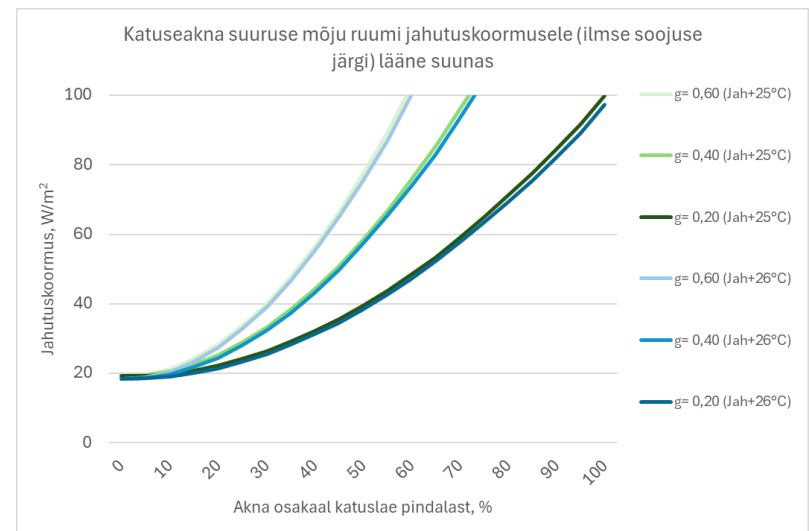
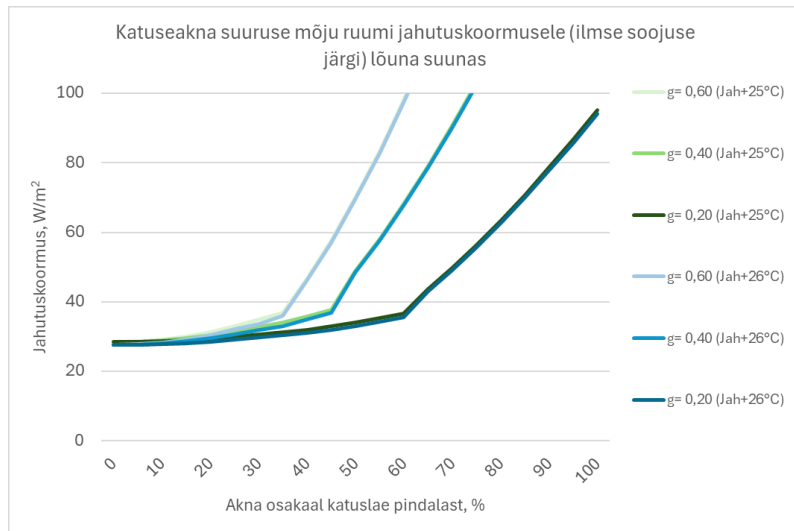
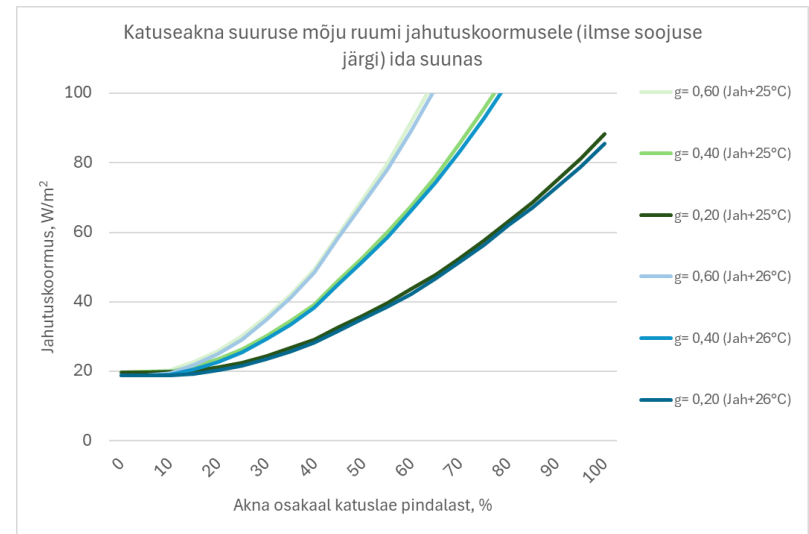
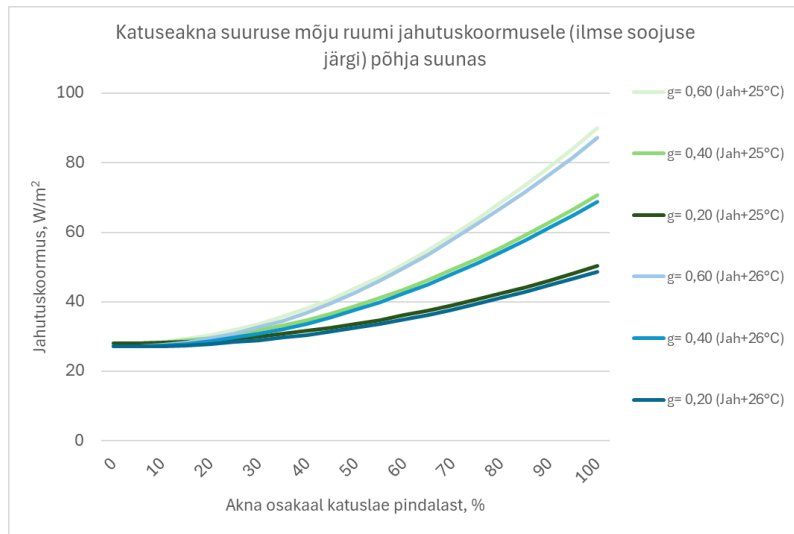


Joonis 3.11. Sissepuhkeõhu temperatuuri ning õhuvooluhulga mõju ruumi temperatuurile.

Alates õhuvooluhulgast 1,0 l/(s*m²) on näha jahutatud õhu märgatavat mõju ruumile. Vastavalt energiatõhususe määrasele ei tohi elamu ventilatsiooni õhuvooluhulk olla suurem kui 0,42 l/(s*m²), mis ei ole piisavalt suur, et jahutatud sissepuhkeõhuga suvise ruumitemperatuuri nõuet tagada. Ruumi jahutuskoormuste tagamiseks peaks õhuvooluhulgad kordades üle dimensioneerima. Samuti paikneb referentsruumi ventilatsiooni sissepuhke lõppelement seina alaosas, mis vähendab märkimisväärselt jahutamise efektiivsust, kuna külm õhk langeb otse põrandale ega jõua viibimistsooni. Antud tulemuste põhjal ei ole mõistlik eramutesse jahutusega ventilatsioonisüsteemi projekteerida,

3.3.3 Ruumi jahutus

Jahutuskoormuste arvutused viiakse läbi sarnaselt ruumi ülekuumenemise parameetrilise simulatsioonile, kus muudetakse akna osakaalu välispiirdesse, klaaspakettide g-väärtuseid ning akende suunda ilmakaarte suhtes. Jahutuse seadeväärtused valitakse vastavalt energiatõhususe määrusele, mis vana määruse kohaselt on +26°C ning uue määruse järgi +25°C. Jahutusarvutuste meetodika on esitatud peatükis. Jahutuse piirväärtuseks võetakse 50 W/m².

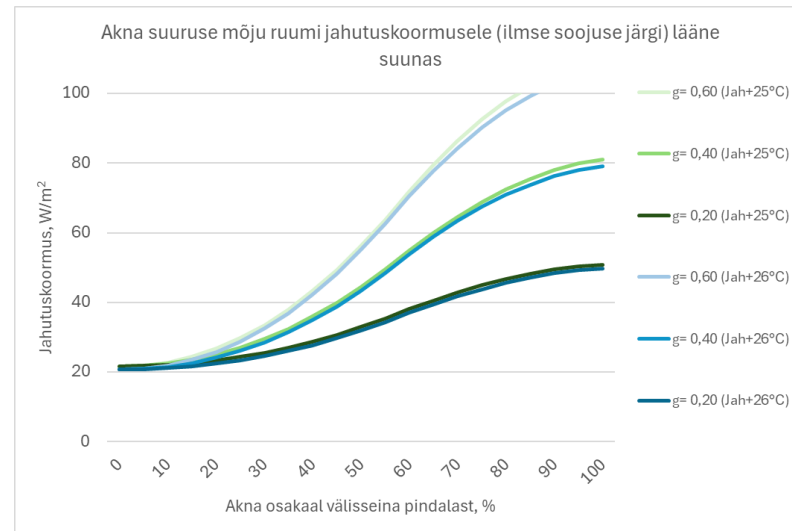
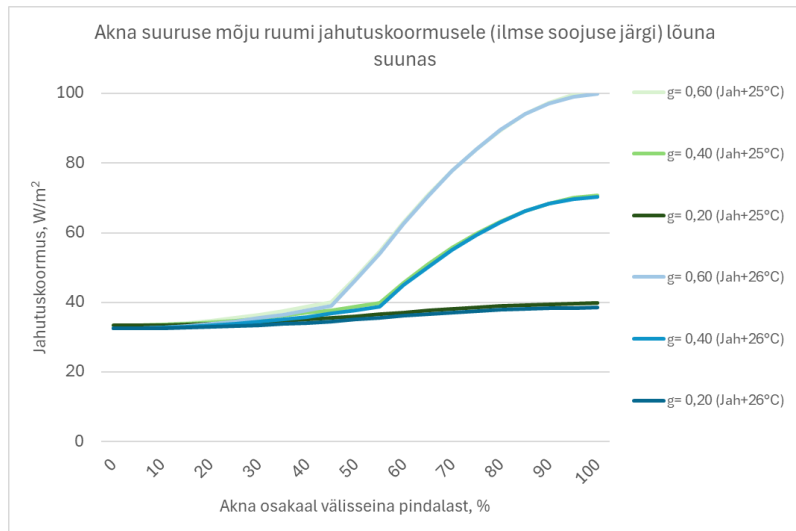
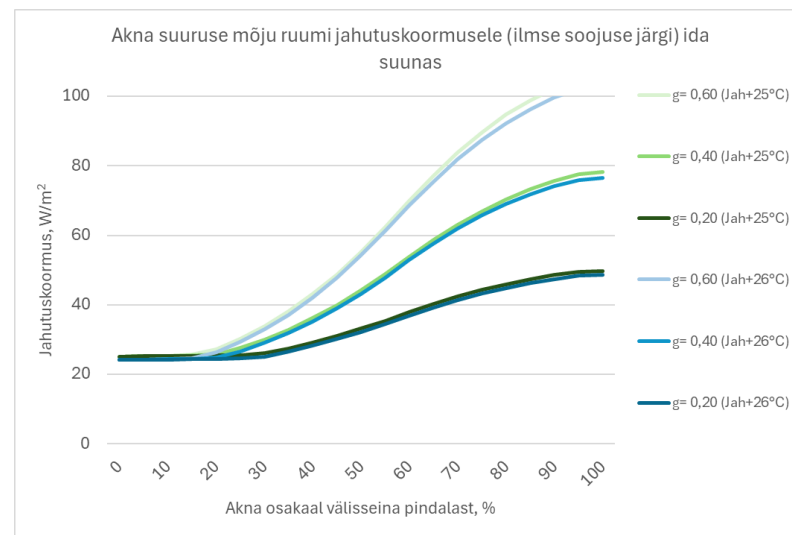
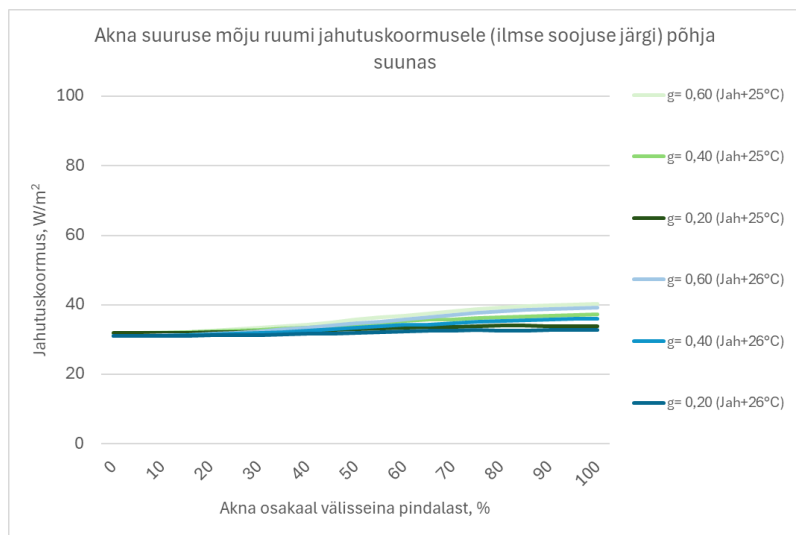


Joonis 3.12. Katuseakna mõju analüüs ruumi jahutuskoormusele.

Põhja suunas asetseva akna puhul on olukord kõige stabiilsem, kus akna pindala kuni 20% erinevate g-väärtuste juures jahutuskoormusele märkimisväärset tõusu ei põhjusta. Kõige tumedama ($g = 0,20$) klaaspaketi puhul jääb maksimaalne jahutuskoormus alla 50 W/m^2 ka terve fassaadi katmisel klaasiga. Klaaspaketiga $g = 0,40$ on akna osakaal maksimaalselt 70% ning $g = 0,60$ maksimaalselt 60%.

Idas ja läänes paikneva katuseakna jahutuskoormuste graafikud on omavahel kõige sarnasemad ning akna osakaaluni kuni 10% püsivad jahutuskoormused stabiilsena, edasi aga liiguvad tõusutrendis. Jahutuskoormuse piirväärtus 50 W/m^2 tagatakse ida suunas $g = 0,20$ korral osakaaluga 65%, $g = 0,40$ osakaaluga 45% ning $g = 0,60$ puhul tuleb piirduda 40% akna osakaaluga. Lääne suunas on akende osakaalud $g = 0,20$, $g = 0,40$ ja $g = 0,60$ juures vastavalt 60%, 45% ning 35%.

Lõuna suunas on katuseakna parameetrite valik vähem piiratud, kui on seda ida ning lääne suunal, kuna kahe eelnimetatud ilmakaare puhul paistab päike vastavalt hommiku- ja õhtutundidel intensiivsemalt aknast sisse, tekitades ruumis järsumaid temperatuurimuutuseid. Lõunast paistab aga päike kõrgemalt. Jahutuskoormuse 50 W/m^2 tagamiseks peab klaaspaketi $g = 0,20$ akna osakaal jääma 70%, $g = 0,40$ korral 50% ning $g = 0,60$ osakaal 40%.



Joonis 3.13. Välisseina akna mõju analüüs ruumi jahutuskoormusele.

Vertikaalasendis akna paiknemisel põhja suunas, tagamaks 50 W/m^2 jahutuskoormus, ei teki vajadust seada piire akende parameetrite valikule, kuna jahutuskoormused antud olukorras jäävad alla piirväärtuse. Nii vana kui ka uue määruse jahutuse seadeväärtusega saavutatakse, ka kõige kirkama klaasiga ($g = 0,60$) täielikult kaetud välisfassaadi korral, maksimaalne jahutuskoormus 40 W/m^2 .

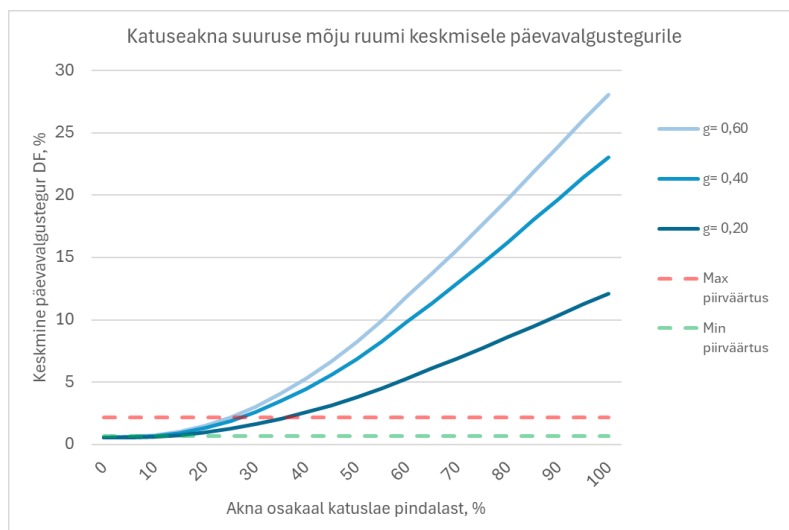
Katuseakna mõju graafikutele omaselt on ka vertikaalakna puhul ida ja lääne suuna mõju jahutuskoormustele kõige järsum. Ida suunas jäävad klaaspaketi $g = 0,20$ korral jahutuskoormused alla 50 W/m^2 ka fassaadi täielikul katmisel klaasiga. Klaaspaketi $g = 0,40$ puhul ei tohi akna osakaal ületada 55% ning $g = 0,60$ korral 45%. Akende asetsemisel lääne suunas on uue määruse järgi maksimaalne akna osakaal $g = 0,20$ puhul 90% ning vana määruse kohaselt saab aken katta terve fassaadi. Klaaspaketi $g = 0,40$ osakaal on mõlema määruse kohaselt maksimaalselt 55% ning $g = 0,60$ osakaal 45%.

Lõuna suunas on erinevate klaaspakettide g -väärtuste puhul tekkinud kindlate akna pindala osakaalude vahemike juures stabiilsed jahutuskoormuste väärtused. Klaaspaketi $g = 0,20$ juures jääb jahutuskoormus kuni terve välisfassaadi ulatuses stabiilseks ning alla 50 W/m^2 , kuid kirkamate klaaside juures tekivad akna pindalade suhtes piirangud. Akna klaaspaketi $g = 0,40$ osakaal jahutuskoormuse 50 W/m^2 tagamiseks on maksimaalselt 60% ning $g = 0,60$ juures 50%.

3.4 Ruumi päevavalgust mõjutavate tegurite analüüs

Käesolevas peatükis viiakse läbi ruumi keskmise päevavalgusteguri simulatsiooni analüüs. Sarnaselt varasematele analüüsidele muudetakse akende suurust ning klaaspaketi g -väärtuseid. Päevavalgusteguri simulatsiooni lähteandmed on esitatud peatükis Päevavalgus. Kuna päevavalgustegurit arvutatakse hajuskiirguse järgi, siis päevavalgusteguri tulemused kehtivad iga ilmakaare kohta.

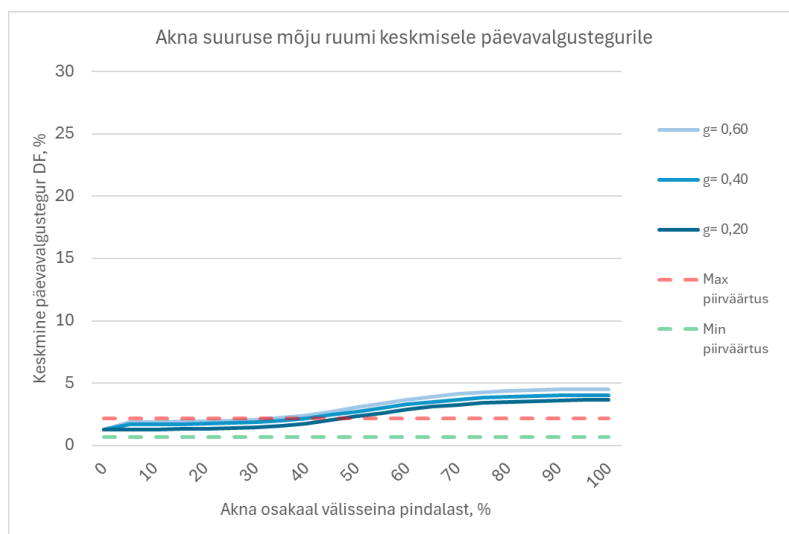
Päevavalgusteguri väärtuste tulemused katuse- ning tavaakna tundlikkuse analüüsist on illustreeritud allolevatel graafikutel:



Joonis 3.14. Katuseakna parameetrite mõju ruumi keskmisele päevavalgustegurile.

Katuseaken on suuremas kontaktis ümbritseva keskkonnaga omades valgusallikana rohkem mõju kui vertikaalasendis aken. Küll aga tuleb olla ettevaatlik akna suuruse ning klaaspaketi tehniliste näitajate valikul, et ruumi mitte üle valgustada. Ülevalgustatud ruum, kus omakorda peegeldavad pinnad, tekib visuaalselt ebamugav tunne. Analüüsi tulemustest selgub, et akna pindala osakaalust üle 20% hakkab keskmine päevavalgustegur järsku tõusma. Katuseakna lahendused, kus keskmised päevavalgusteguri tulemused jäävad vahemikku 0,7% kuni 2,2% on järgmised:

- Katuseaken klaaspaketiga $g = 0,20$ pindala osakaaluga 15-35%;
- Katuseaken klaaspaketiga $g = 0,40$ pindala osakaaluga 15-25%;
- Katuseaken klaaspaketiga $g = 0,60$ pindala osakaaluga 10-25%.



Joonis 3.15. Vertikaalasendis akna parameetrite mõju ruumi keskmisele päevavalgustegurile.

Erinevalt katuseaknast on vertikaalasendis aknal ruumi ülevalgustamise risk väiksem ning akna suuruse ning klaaspaketi g-väärtuste valikuvõimalused paindlikumad. Vertikaalasendis akna päevavalgusteguri analüüsi tulemused on katuseakna tundlikkuse analüüsiga võrreldes märgatavalt stabiilsemad. Vertikaalasendis akna lahendused, kus keskmised päevavalgusteguri tulemused jäävad vahemikku 0,7% kuni 2,2% on järgmised:

- Aken klaaspaketiga $g = 0,20$ pindala osakaaluga 0-45%;
- Aken klaaspaketiga $g = 0,40$ pindala osakaaluga 0-40%;
- Aken klaaspaketiga $g = 0,60$ pindala osakaaluga 0-30%.

3.5 Sisekliima tulemuste optimeerimine

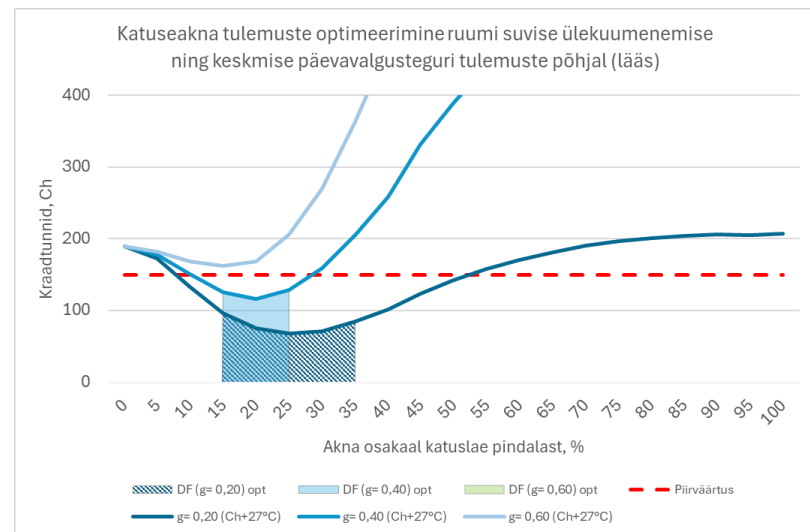
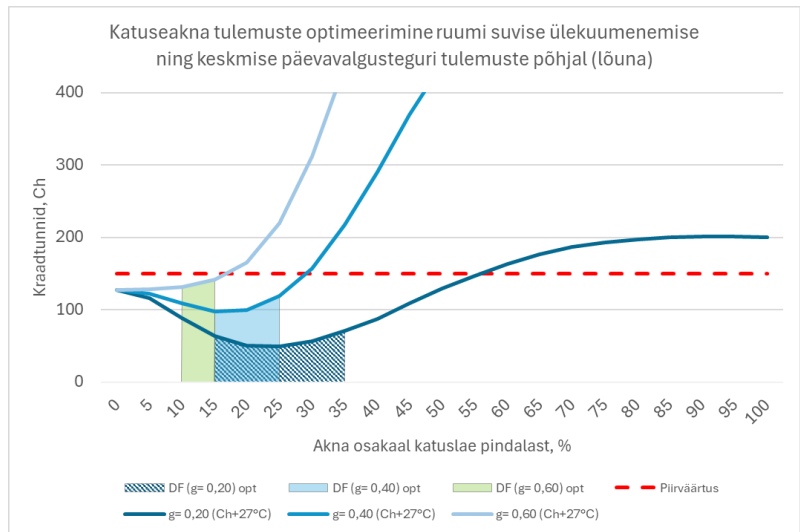
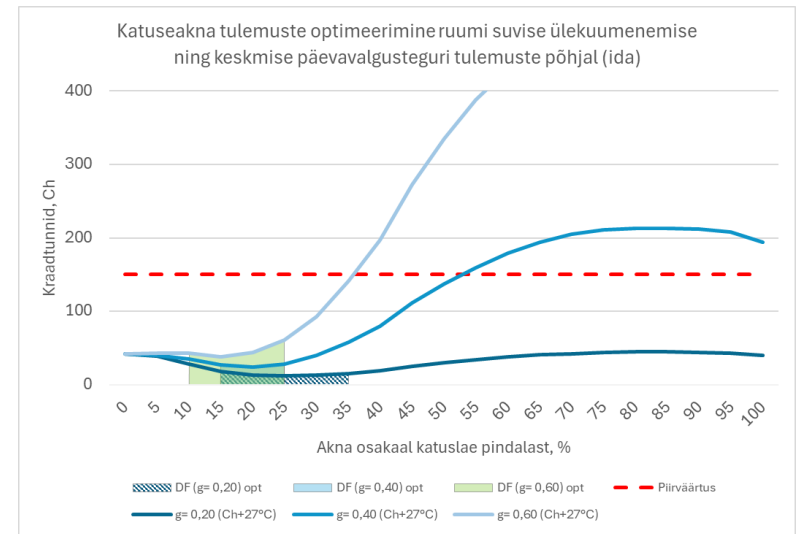
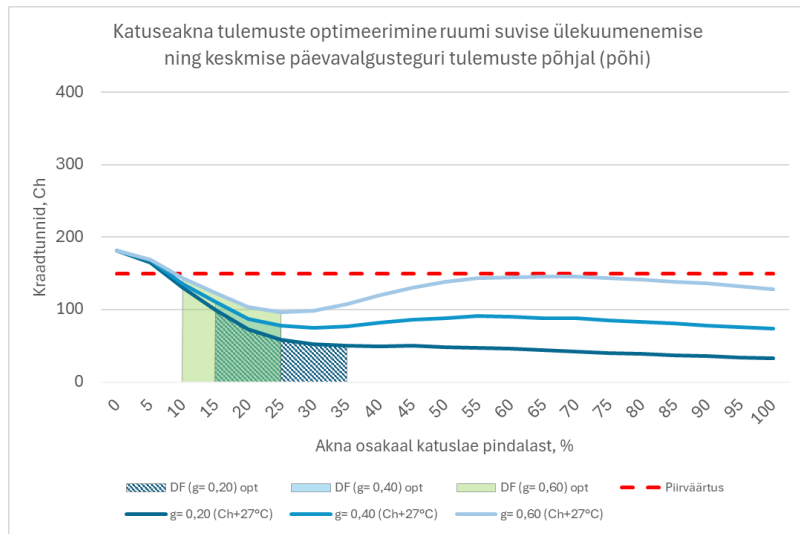
Ruumi suvise ülekuumenemise ja jahutuskoormuste analüüsi tulemused pole ainuüksi piisavad sisekliima tagamisel ruumis, mistõttu on vajalik läbi viia täiendav analüüs kombineerimaks antud tulemused kahe teise sisekliimat iseloomustava komponendiga – päevavalgustegur ning soojuslik mugavus (PMV/PPD, operatiivne temperatuur). Antud analüüs kitsendab eelnevalt simuleeritud tulemuste vahemikke, mis olid sobivad vaid kindlate nõuete täitmiseks.

Eelnevalt nimetatud komponentide kombineerimine ja nende nõuete samaaegne tagamine pole päris võimalik, kuna piirväärtused võivad niivõrd erinevad, et ühe komponendi nõue pole piisavalt range teise komponendi nõude täitmiseks. Näitena standard ISO 7730 näeb ette, et II sisekliima klassi kuuluva hoone ruumi operatiivne temperatuur ei tohi ületada $+26^{\circ}\text{C}$, kuid ruumi suvise ülekuumenemise nõue näeb ette (vana määruse kohaselt), et ruumi jahutuse seadeväärtust $+27^{\circ}\text{C}$ tohib ületada maksimaalselt 150 °Ch. Operatiivne temperatuur erineb ruumitemperatuurist, mis on inimesele tajutav lisaks ruumitemperatuurile pindadelt kiirgava ning konvektiivsel teel liikuva soojuse kujul. Suvisel perioodil, kui ruumi ülekuumenemise risk on suur, siis operatiivne temperatuur on reeglina ruumiõhu temperatuurist kõrgem ning kahe eelnevalt mainitud nõude samaaegne tagamine pole võimalik.

Antud olukord välistab ka uue määruse suvise ülekuumenemise kraadtundide meetodi ning vana määruse järgse jahutuse (jahutussüsteemi juhtimistemperatuur $+26^{\circ}\text{C}$) kombinatsiooni soojusliku mugavuse nõuetega. Erinevalt suvise ülekuumenemise ning soojusliku mugavuse nõuete samaaegse tagamise mittevõimalikkusest saab päevavalgusteguri nõudeid kõikide komponendiga kombineerida.

Käesolevas analüüsis kombineeritakse järgmised sisekliima komponendid ning tulemused esitatakse järgneval kujul:

- Vana määruse järgsed suvise ruumitemperatuuri tulemused katuseakna tundlikkuse analüüsi põhjal kombineerituna päevvalgusteguri nõuetega;
- Vana määruse järgsed suvise ruumitemperatuuri tulemused välisseina akna tundlikkuse analüüsi põhjal kombineerituna päevvalgusteguri nõuetega;
- Vana määruse järgsed jahutuskoormuste tulemused katuseakna tundlikkuse analüüsi põhjal kombineerituna päevvalgusteguri nõuetega;
- Vana määruse järgsed jahutuskoormuste tulemused välisseina akna tundlikkuse analüüsi põhjal kombineerituna päevvalgusteguri nõuetega;
- Uue määruse järgsed jahutuskoormuste tulemused katuseakna tundlikkuse analüüsi põhjal kombineerituna päevvalgusteguri ning soojusliku mugavuse nõuetega;
- Uue määruse järgsed jahutuskoormuste tulemused välisseina akna tundlikkuse analüüsi põhjal kombineerituna päevvalgusteguri ning soojusliku mugavuse nõuetega.



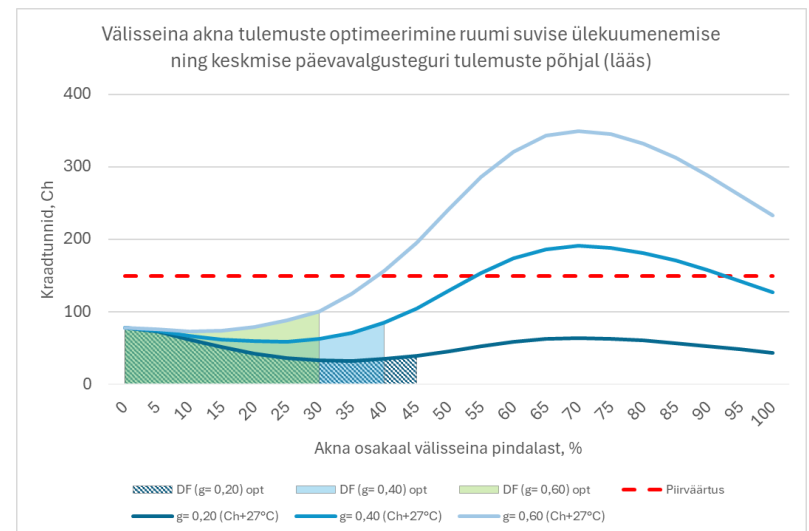
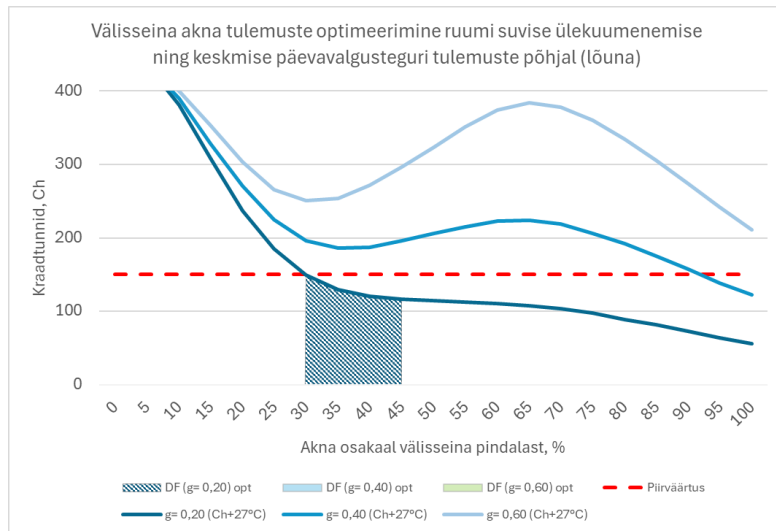
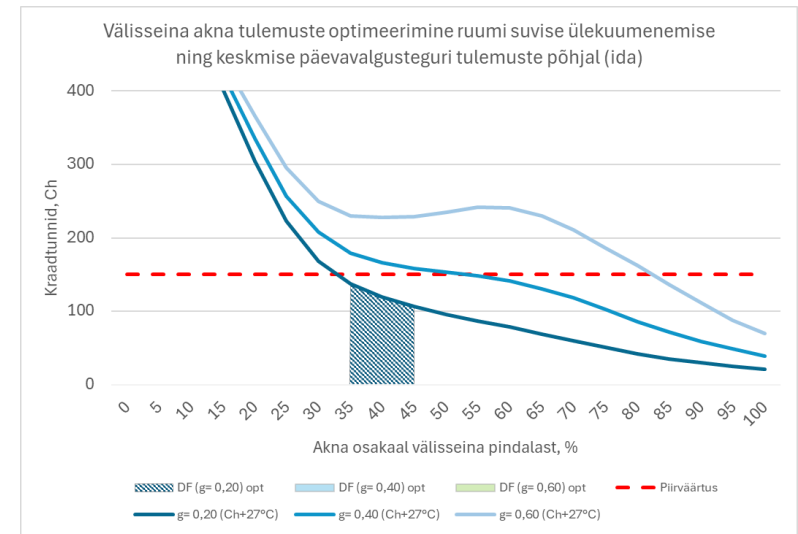
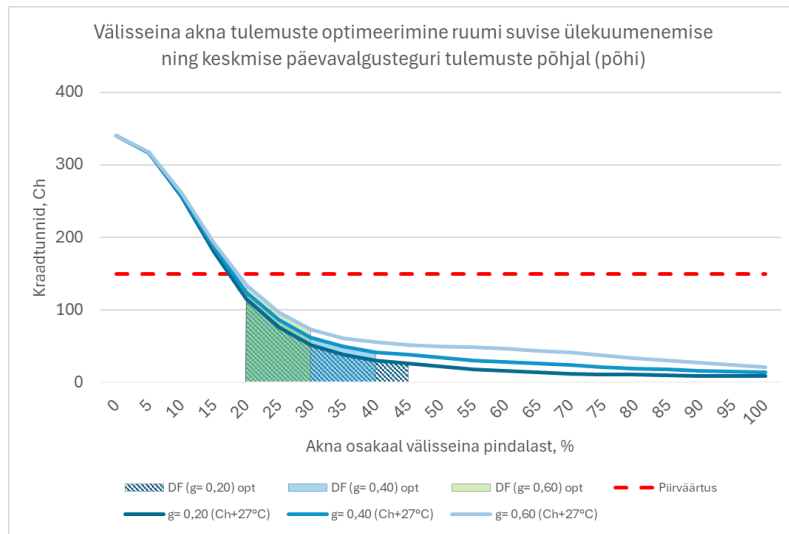
Joonis 3.16. Katuseakna tulemuste optimeerimine ruumi suvise ruumitemperatuuri (vana määruse järgsete) nõuete kombineerimisel päevalgusteguri tulemustega.

Ruumi ülekuumenemise ning päevavalgusteguri tulemuste kombineerimisel, tagamaks 150 kraadtunni piir ning keskmine päevavalgustegur vahemikus 0,7% kuni 2,2%, on märgitud värvilise alana igale klaaspaketi g-väärtusele eraldi.

Katuseakna asetsemisel põhjas ning idas peab akna klaaspaketi $g = 0,20$ puhul minimaalne pindala välispiirdest katma vähemalt 15% ning maksimaalselt 35%. Klaaspaketi $g = 0,40$ korral on vajalik minimaalse päevavalgusteguri nõude täitmiseks akna osakaal 15% ning maksimaalne 25%. Kõige kirkama klaasi $g = 0,60$ puhul päevavalgusteguri ning ruumi ülekuumenemise nõude täitmiseks ei tohi klaaspaketi pindala osakaal olla väiksem kui 10% ning suurem kui 25%.

Lõunasuunaliste akende klaaspaketi väärtuste $g = 0,20$ ning $g = 0,40$ osakaalud peavad jääma vahemikku vastavalt 15-35% ning 15-25%. Klaaspaketi $g = 0,60$ minimaalne osakaal nõuete täitmiseks peab olema 10% ning maksimaalne 15%.

Lääne suunas asetseva katuseakna valikul pole võimalik kõige kirkama aknaga suvise ülekuumenemise nõudeid saavutada, seega graafikutel on ette antud ainult optimaalsed akende pindala osakaalude väärtused $g = 0,20$ ning $g = 0,40$ klaaspakettidele. Klaaspaketi $g = 0,20$ pindala osakaalude vahemik on jätkuvalt 15-35% ning $g = 0,40$ puhul 15-25%.



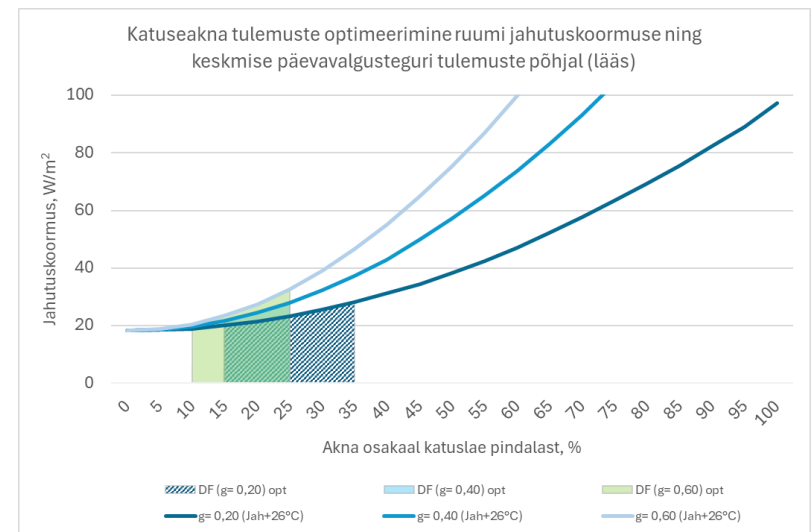
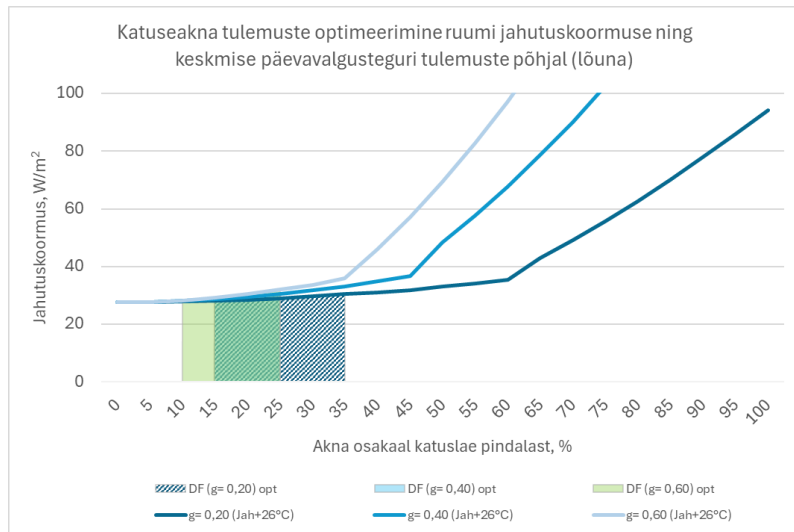
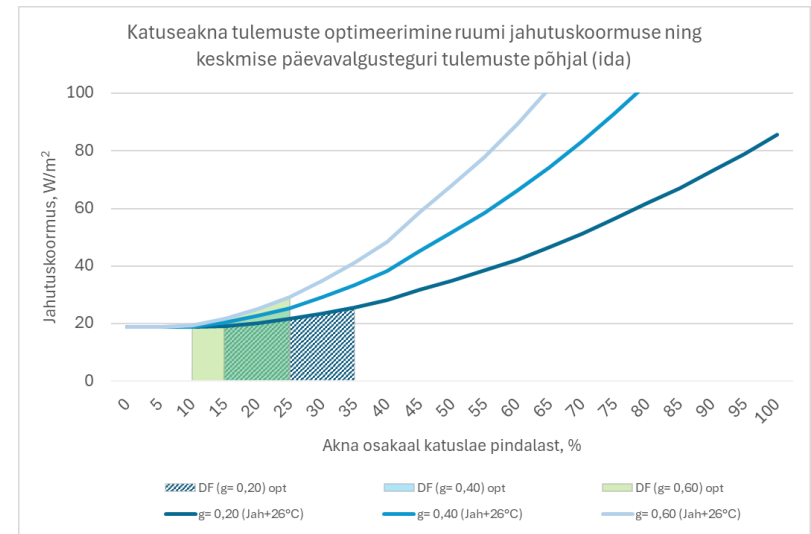
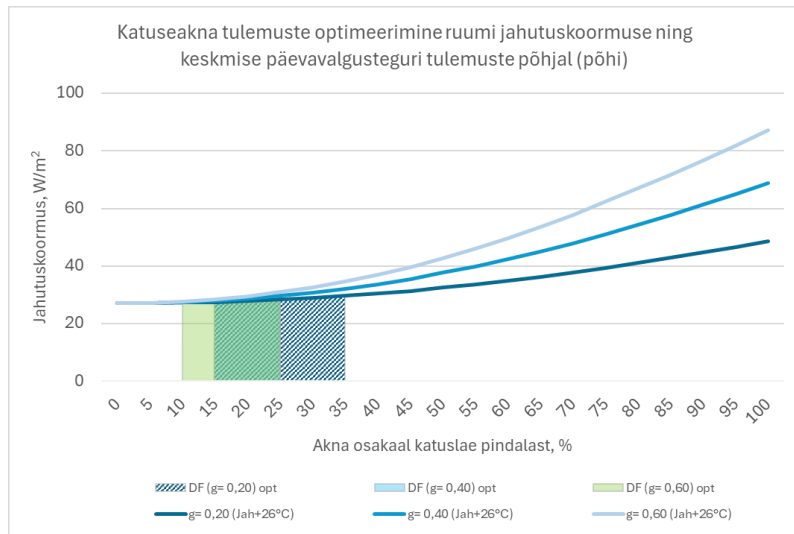
Joonis 3.17. Välisseina akna tulemuste optimeerimine suvise ruumitemperatuuri (vana määrase järgsete) nõuete kombineerimisel päevvalgusteguri tulemustega.

Võrreldes katuseakna mõju analüüsiga on välisseina akna suuruse ning klaaspaketi valikul suuremad piirangud, kuna algparameetritega katuseaken omab suurt mõju ruumi suvisele ülekuumenemisele ning ruumi jahutamine tuulutamise teel saavutatakse alles suuremate akende pindalade juures, kus päevavalguse nõude maksimaalset piiri ületatakse.

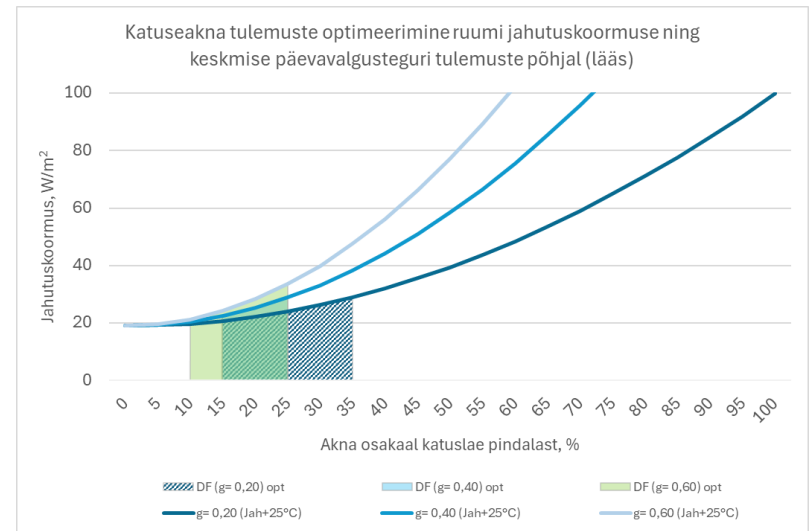
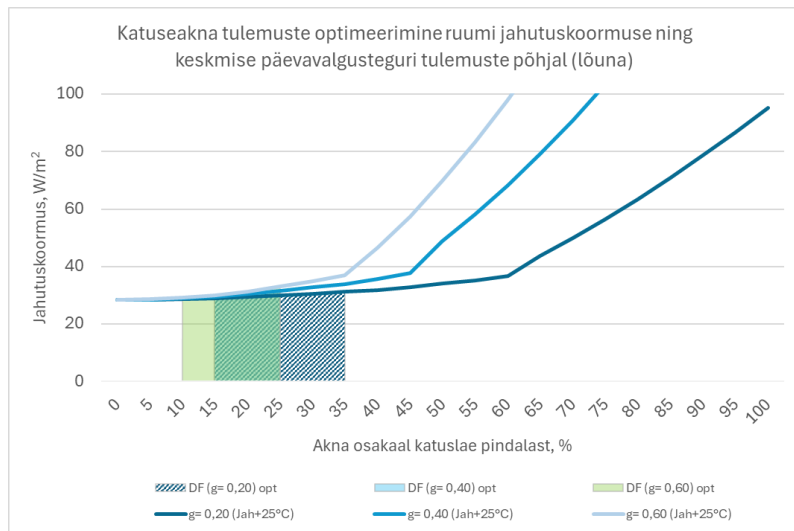
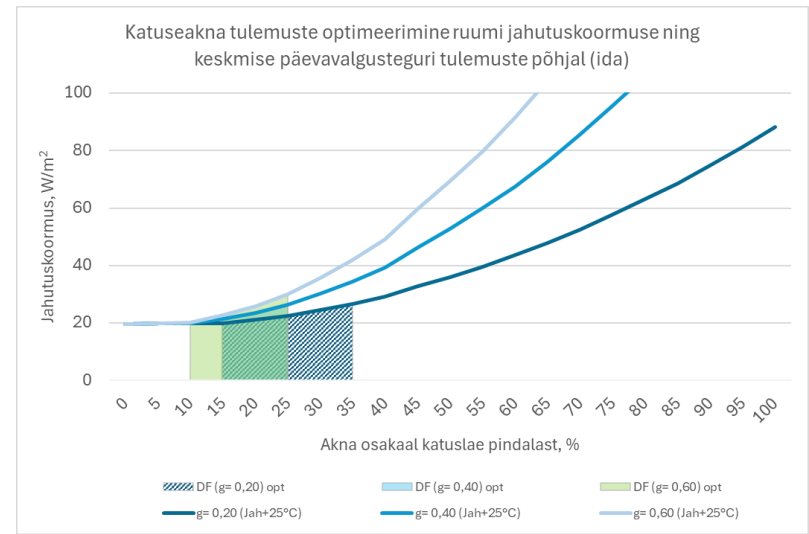
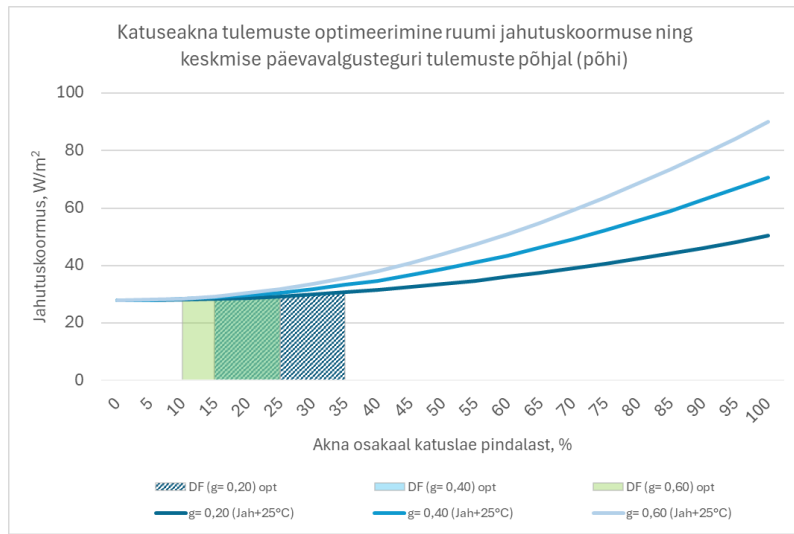
Põhja suunas asetseva vertikaalasendis akna klaaspaketi $g = 0,20$ pindala osakaal peab jääma vahemikku 20-45%, $g = 0,40$ osakaal 20-40% ning $g = 0,60$ osakaal 20-30%. Kõige rohkem piiranguid seavad vertikaalasendis aknale ida ning lõuna, kuna algparameetritega katuseaken on nendes ilmakaartes suunatud vastavalt lõunasse ning läände, tekitades ruumis oluliselt suuremat ülekuumenemist. Mõlema ilmakaare puhul on võimalik kasutada ainult klaaspaketti $g = 0,20$, mille optimaalne pindala osakaalu vahemik idas on 35-45% ning lõunas 30-45%.

Lääne suunas on akna suuruse ning parameetrite valik kõige ulatuslikum, kuna suvise ülekuumenemise risk põhjas paikneva algparameetritega katuseakna tõttu on väiksem. Läänepoolse klaaspaketi $g = 0,20$ akna pindala osakaal võib küündida kuni 45%-ni, $g = 0,40$ osakaal 40%-ni ning $g = 0,60$ osakaal 30%-ni.

Järgnevalt analüüsitakse päevavalgusteguri nõuete kombineerimist jahutuskoormuste tulemustega, kus vana määruse järgsed arvutused ei sisalda soojusliku mugavuse nõudeid ning uue määruse järgsed arvutused sisaldavad kontrollitud PMV/PPD ning operatiivse temperatuuri nõuete vastavust tulemustele:



Joonis 3.18. Katuseakna tulemuste optimeerimine ruumi jahutuskoormuse (vana määruse järgse) kombineerimisel päevvalgusteguri tulemustega.

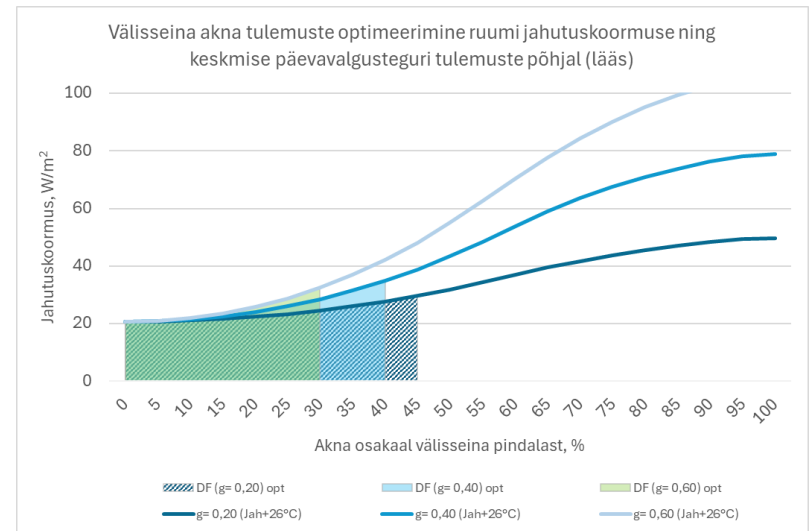
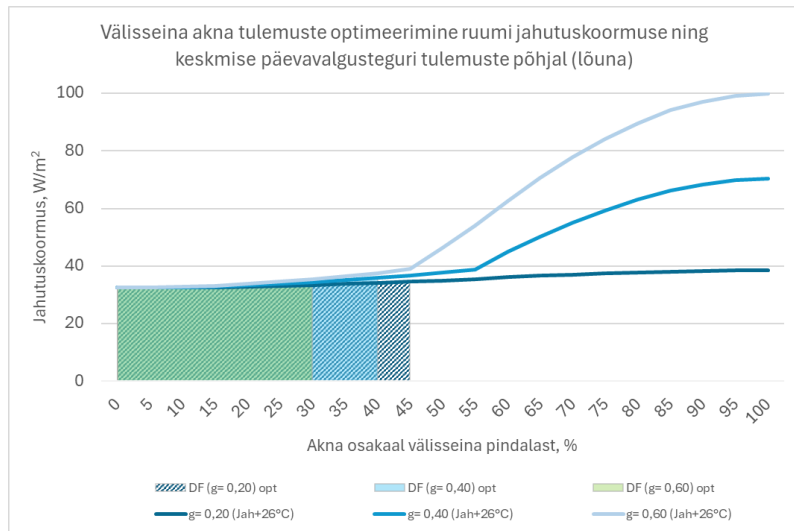
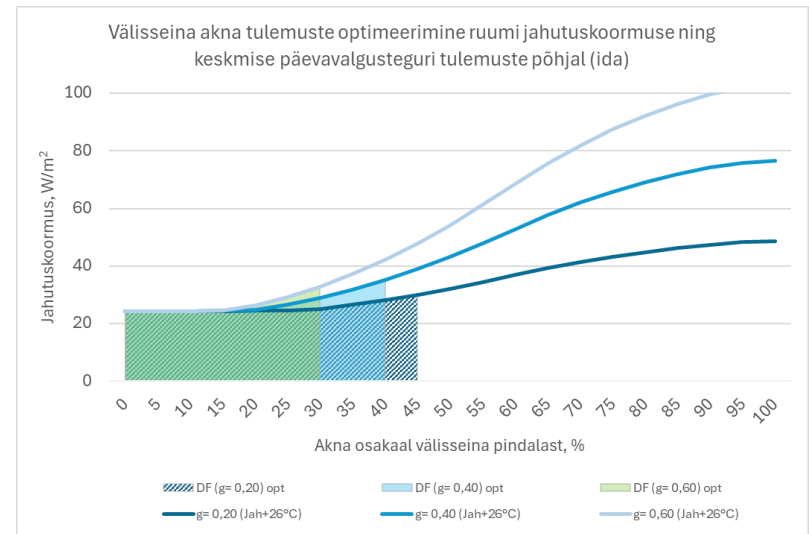
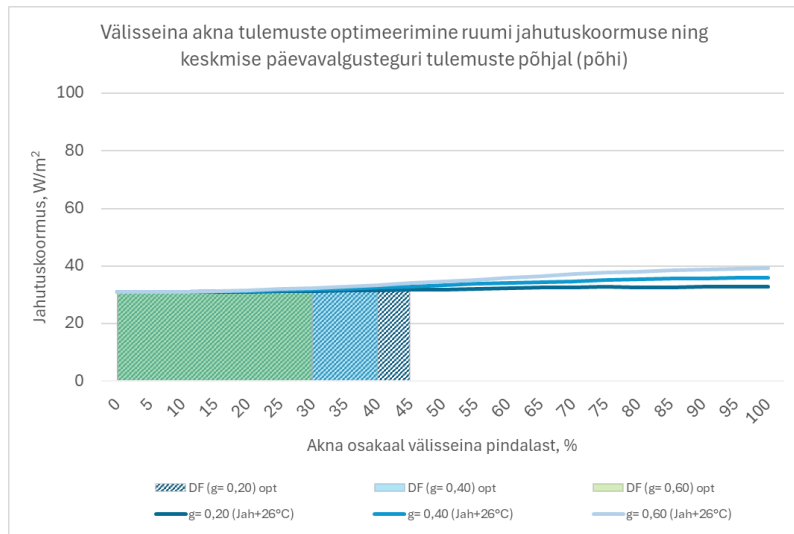


Joonis 3.19. Katuseakna tulemuste optimeerimine ruumi jahutuskoormuse (uue määruse järgse) kombineerimisel päevalgusteguri ning soojusliku mugavuse tulemustega.

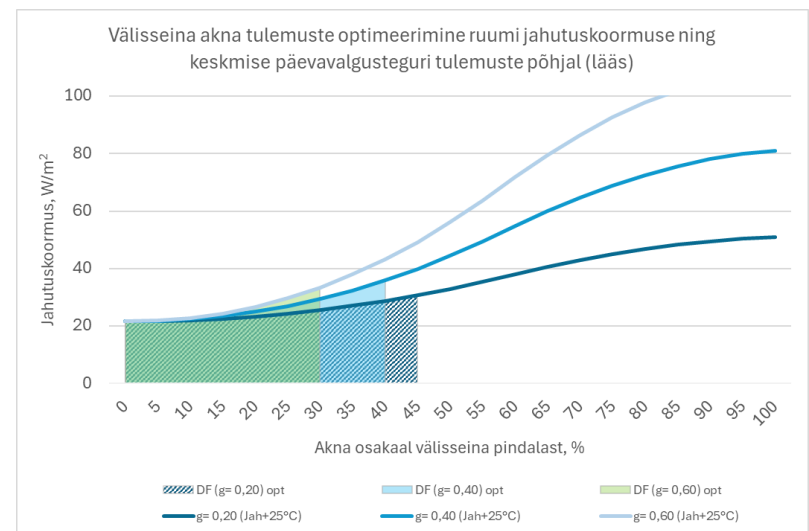
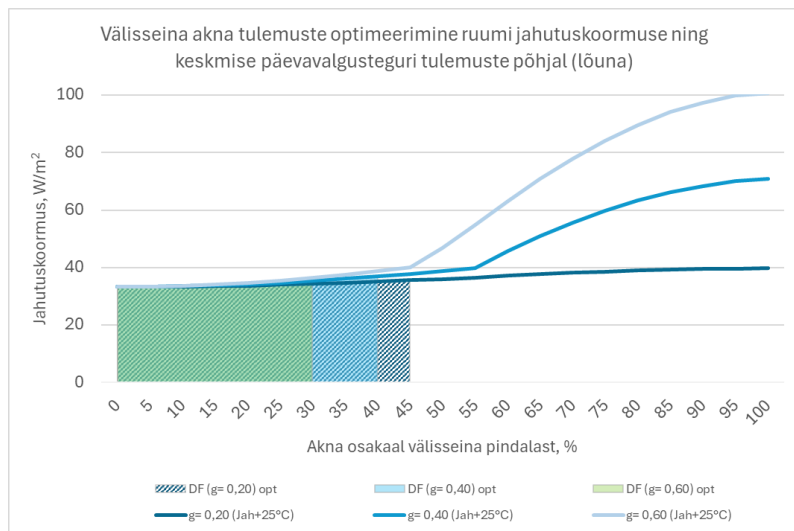
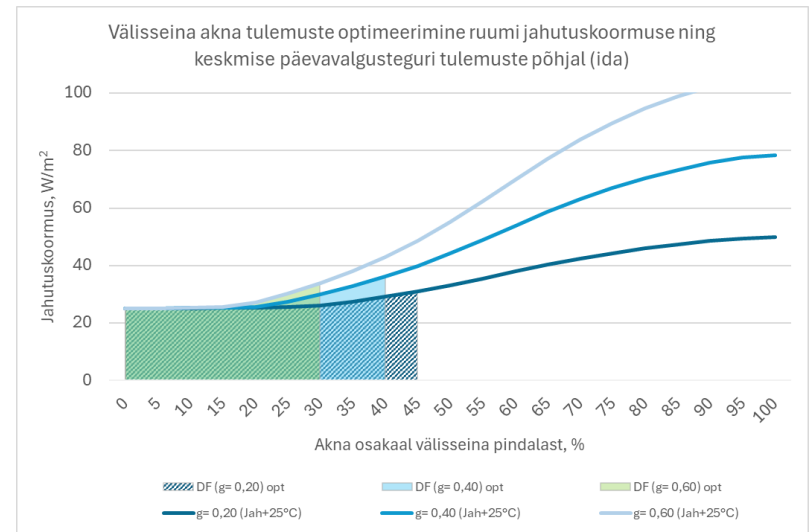
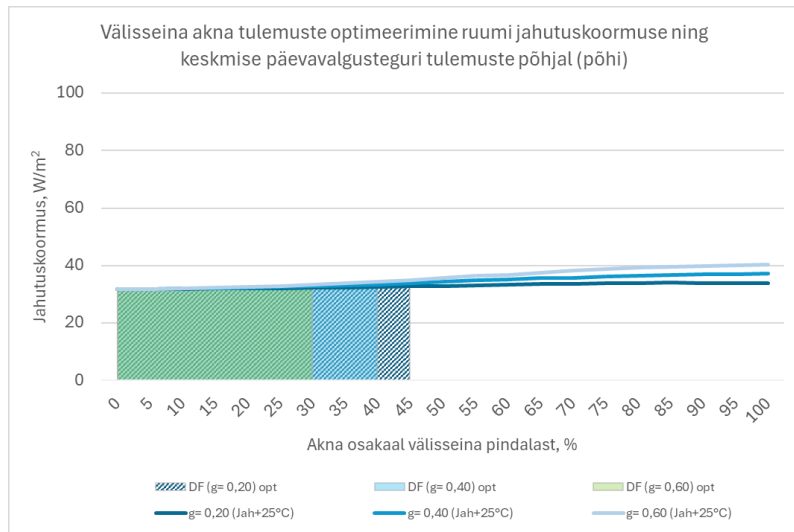
Graafikutelt selgub, et uue ning vana määruse järgsete tulemuste optimeerimine annab täpselt samad tulemused, arvestades seda, et uue määruse tulemuste optimeerimisel on lisaks kombineeritud kolmas nõue. Kuna analüüsi alustati esmalt päevvalgusteguri nõuete optimeerimisega, siis antud komponent juba kitsendas tulemuste vahemikku piisavalt, et tagada ka soojuslik mugavus. Kui tulemuste optimeerimist oleks alustatud soojusliku mugavuse aspektist, siis oleksid olnud algsed tulemuste vahemikud ulatuslikumad. Selle asemel valiti kõigepealt komponent, mis optimeerib tulemuste vahemikku rohkem ning järgnevalt kontrolliti, kas tagatakse soojuslik mugavus.

Kõikide arvutuste tulemusena on saadud iga ilmakaare suhtes samad akende suurused iga klaaspaketi g -väärtuse kohta, mis täidavad päevvalgusteguri minimaalseid ja maksimaalseid nõudeid ning soojusliku mugavuse väärtuseid (seda ainult uue määruse kohaste arvutustega). Klaaspaketi väärtusega $g = 0,20$ tagatakse nõutud päevvalgusteguri vahemik 15-35% akna osakaaluga, $g = 0,40$ puhul osakaaluga 15-25% ning $g = 0,60$ klaaspaketil osakaaluga 10-25%.

Samuti on tulemused erinevate nõuete kombinatsioonil saavutanud olukorra, kus ruumi jahutuskoormused jäävad alla 40 W/m^2 .



Joonis 3.20. Välisseina akna tulemuste optimeerimine ruumi jahutuskoormuse (vana määruse järgse) kombineerimisel päevavalgusteguri tulemustega.



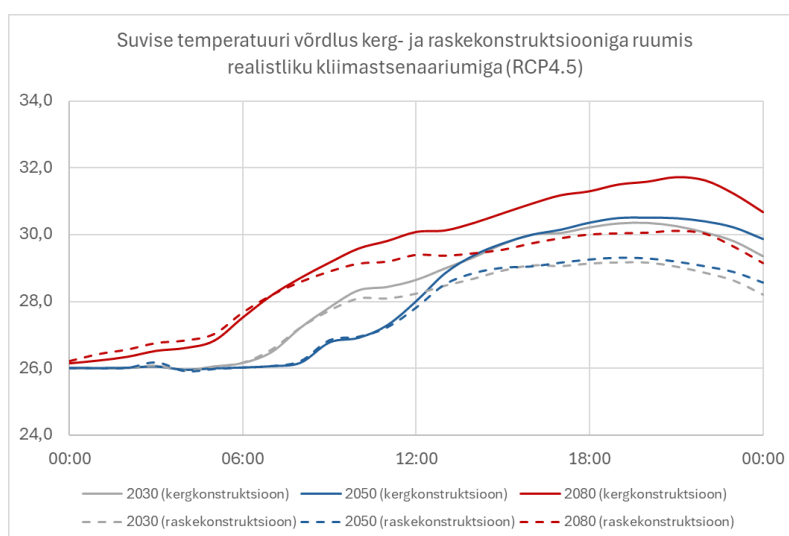
Joonis 3.21. Välisseina akna tulemuste optimeerimine ruumi jahutuskoormuse (uue määruse järgse) kombineerimisel päevalgusteguri ning soojusliku mugavuse tulemustega.

Sarnaselt katuseakna arvutustele saavutatakse ka välisseina akna tulemuste optimeerimisel ruumi jahutuskoormus alla 40 W/m^2 . Välisseina akna puhul valides klaaspaketi g-väärtusega 0,20 on akna pindala osakaal välisfassaadist maksimaalselt 45%, $g = 0,40$ osakaal kuni 40% ning $g = 0,60$ kuni 30%.

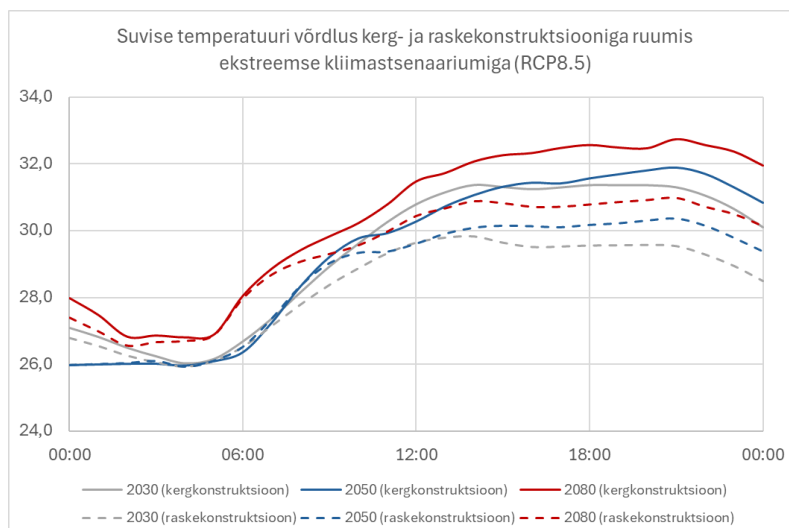
3.6 Tuleviku kliimastenaariumite mõju

Aasta keskmised temperatuurid liiguvad tõusvas trendis ning eluruumide suvine ülekuumenemise risk seetõttu suureneb. Katuseruumi projekteerimisel on oluline vaadelda erinevate arhitektuursete, ehitusfüüsikaliste ning konstruktiivsete lahenduste mõju ka pikemas perspektiivis, seda eelkõige suvise ruumitemperatuuri kontrollarvutuste tegemisel – kas on mõistlik tulemused optimeerida piirväärtuseni või jätta ka varu ning arvestada, et ruumi temperatuuri tagamine muutub iga kümnendiga aina keerulisemaks.

Käesolevas peatükis võrreldakse kolme aasta (2030, 2050 ning 2080) kliimastenaariumite mõju suvisele ruumitemperatuurile. Mõju hindamiseks viiakse läbi arvutused konstruktsiooni massiivsuse võrdluse alusel, mille lähteandmed jäävad vastavalt peatükis Ehitusfüüsikaliste omaduste mõju hindamine kirjeldatule. Kliimastenaariumite võrdlus (välisõhu temperatuurid, otsese päikesekiirguse intensiivsus) on esitatud peatükis Kliimafail. Analüüsi tulemuste esitamiseks on valitud kriitilisemad (kõige soojemad) päevad, et tuua rohkem esile tarindi massiivsuse mõju. Tulemused on esitatud allolevatel joonistel:



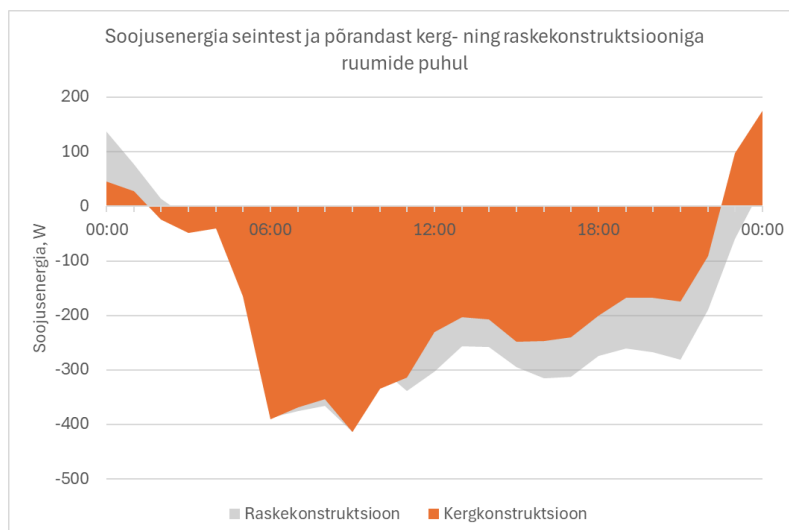
Joonis 3.22. Kerg- ja raskekonstruktsiooni mõju analüüs ruumi suvisele temperatuurile realistliku kliimastenaariumi korral.



Joonis 3.23. Kerg- ja raskekonstruktsiooni mõju analüüs ruumi suvisele temperatuurile ekstreemse kliimastenaariumi korral.

Graafikutelt on näha, et erinevalt kergkonstruktsiooniga ruumist on tarindite massiivsuse omadusi kasutades võimalik ära hoida järske temperatuuritõuse, tagades päeva jooksul stabiilsema ruumitemperatuuri. Kliimamuutustest (antud juhul kliimafailide analüüsi kohaselt kliima soojenemisest) tingitult, annab raskekonstruktsiooni kasutamine eelise kergkonstruktsiooni ees eriti kõrgemate suviste temperatuuride puhul. Analüüsi tulemustest selgub, et ekstreemse stsenaariumi puhul on ruumi temperatuuride erinevus suurem. Kui realistliku stsenaariumi kohaselt on 2080. aasta ruumi temperatuuride maksimaalne erinevus 1,6°C, siis kehvema olukorra puhul on see 1,9°C. 2050. aasta kliimafailide alusel on realistliku stsenaariumi maksimaalne temperatuuride vahe 1,4°C ning ekstreemse puhul 1,5°C. Kõige märgatavam erinevus esineb 2030. aasta stsenaariumite puhul, kus esimese stsenaariumi puhul on 1,2°C-ne erinevus ning ekstreemse korral 1,8°C. Antud tulemused viitavad sellele, et mida kuumema kliimaga on tegemist, seda enam on mõistlik ehitada raskekonstruktsiooniga hooneid.

2080. aasta RCP4.5 kliimastenaariumi põhjal on koostatud kerg- ja raskekonstruktsiooniga ruumide soojusenergia (seintest ning põrandast) bilansi võrdlus ühe päeva näitel:



Joonis 3.24. Soojusenergia salvestamine massiivi võrreldes esialgse kergkonstruktsiooni olukorraga.

Simulatsiooni tulemustest selgub, et tulevikus esinevate kõrgete temperatuuride korral on võimalik efektiivsemalt passiivset jahutust rakendada. Antud analüüsist selgus, et kasutades ära hoone massiivsust on võimalik päeva jooksul salvestada kokku 800 W soojusenergiat. Meede hakkab vastupidiselt (negatiivselt) toimima kuumalaine perioodidel, kui välisõhu temperatuur ei lange alla ruumi temperatuuri ning hoone massiivi öö jooksul maha ei jahutata.

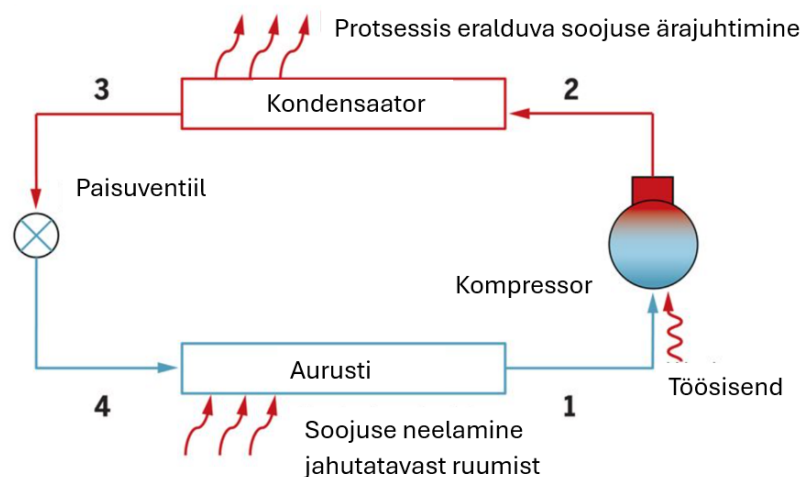
3.7 Aktiivjahutuse lahendused eluruumidele

3.7.1 Ruumide jahutus

Tulevasest määrusest [3] tingitult tuleb arvestada lisainvesteeringuga jahutusseadmetesse ning nendega seonduvatesse püsikuludesse. Antud peatükis tuuakse lugejale välja lühiülevaatenähtused võimalused eramu jahutussüsteemidest, kus kirjeldatakse detailselt külmaenergia tootmist ning liigsoojuse ärajuhtimist ruumist jahutusseadmete abil. Samuti hinnatakse erinevate ruumiseadmete eeliseid ning puuduseid.

Külmaallikas

Hoone jahutussüsteem koosneb kahest osast – jahutuseenergia tootmine primaarpoolel ning liigsoojuse eemaldamine (jahutusenergia jaotamine) sekundaarpoolel. Jahutusenergiat on võimalik toota erinevate seadmete abil, mis kasutavad protsessiks elektrit, soojust, vett vm [6]. Enamlevinud viis jahutusenergia tootmiseks on kompressor-jahutusseadmete kasutamine, mis tarbivad 1 kWh jahutusenergia tootmiseks 0,2 kuni 0,3 kWh elektrienergiat [6]. Kompressoriseadme tööprotsess põhineb Carnot' ringprotsessil ning koosneb neljast komponendist [30]:



Joonis 3.25. Kompressor-jahutusseadme tööprotsessi kirjeldus.

- 1) Aurusti (4→1)– külmaaine saab soojusenergiat ruumist, mida jahutatakse ning selle abil toimub külmaaine faasiire vedelast gaasilisse olekusse (aurustmine), mis suunatakse edasi kompressorisse;
- 2) Kompressor (1→2) – gaas surutakse kokku ja selle temperatuur ning rõhk suurenevad, kõrge rõhu all gaas suunatakse kondensaatorisse;

- 3) Kondensaator (2→3)– protsessi käigus eraldunud soojus suunatakse väliskeskkonda ning aine kondenseerub, külmaaine suunatakse paisventiili;
- 4) Paisventiil (3→4)- külmaaine temperatuur ning rõhk alanevad, külmaaine liigub aurustisse.

Eramu puhul saab kompressorseadmetena kasutada multisplit ning VRV/VRF seadmeid, mis koosnevad kahest osast – välimine osa (kondensaator) ning sisemine osa (aurusti). VRV/VRF eelis multisplit süsteemi ees on elektrienergia säästmine (5-15%), kuna VRV ja VRF jahutusüsteemide paisuventiilid reguleerivad ruumiõhu temperatuurile (temperatuurianduri signaalile) vastavalt jahutusagensi mahtu või vooluhulka. Multisplit süsteem see-eest lülitab süsteemi kas sisse või välja [14].

Külmaenergiat (külma vett) on võimalik toota ka soojuspumbaga, mis kombineeritakse ruumi jahutusseadmega. Külma vee tootmiseks sobib maasoojuspump, millega on võimalik puuraukude abil ammutada maast lisaks soojusele ka jahutusenergiat. Jahutusenergia tootmiseks kulub võrdlemisi vähe energiat, olles pikemas perspektiivis majanduslikult kasulik, kuid soojuspumpsüsteemi esialgne investeering ise on suur [6].

Olenevalt hoone asukohast on võimalik saada jahutusenergia kaugjahutuse teel [6]. Kaugjahutus on eelnimetatud viisidest kõige väiksema keskkonnamõjuga, kasutades vähemalt 50 protsenti taastuenergiat, 50 protsenti heitsoojust, 75 protsenti koostoodetud soojust või 50 protsenti sellise energia ja soojuse kombinatsiooni. Seetõttu on ka energiakandja kaalumistegur väike (kaugjahutusel 0,4 ning tõhusal kaugjahutusel 0,2, mis on elektri energiakandja kaalumistegurist vastavalt 5 ning 10 korda väiksem), vähendades hoone energiatõhususarvu [3].

Ruumiseadmed

Tulemuste optimeerimisel saadi jahutuskooormuste maksimaalseks ilmseks võimsuseks $\sim 40 \text{ W/m}^2$. Kuna tegemist on võrdlemisi väikese jahutuskooormusega, siis ei sea see niivõrd suuri piiranguid ruumiseadmete valikule. Kindlasti on keeruline jahutuspalkide kasutamine, kuna tegemist on kondensaadivaba süsteemiga, seega tuleb välistada kondensaadi teke. Eramu puhul on seda keeruline teha, kuna pidev akende, rõduuste jm avamine ei võimalda antud süsteemi kasutamist. Lisaks sellele kasutab antud süsteem ventilatsiooniõhku, mis on eramu puhul jahutuskooormuste tagamiseks liiga väike.

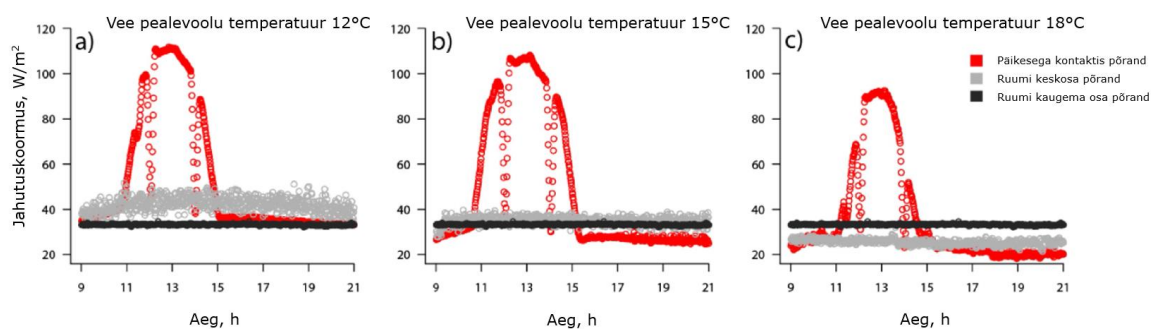
Samuti pole fan-coili jahutuskassetide kasutamine mõistlik, kuna ühtlasemaks õhujaotuseks on vaja seade paigaldada kõrgemale ja nii väikese eluruumi puhul pole see võimalik, seetõttu puhub külma õhku elanikele peale tekitades ebamugavustunnet. Antud seadmed on mõeldud eelkõige kommertshoonete jahutuskoormuste tagamiseks ning need seadmed ei sobi kasutamiseks eramutesse. Samuti jäävad antud ruumiseadmed visuaalselt inetud ning võtavad palju ruumi.

Parimad võimalikud lahendused eramute jahutusseadmete valikul on multisplit (VRV/VRF) süsteemid, fan-coil seinaradiaatorid või pörandjahutus. Split-tüüpi süsteemid on võimelised jahutatud õhuga katma ka suuri jahutuskoormuseid, kuid pörandjahutusega (kiirguse kujul) tuleb arvestada tarindi soojusinertsiga. Soojusinertsitõttu jõuab jahutusenergia pörandi pealmise pinnani viivitusega ning seepärast ei ole korraga võimalik sama suures koguses liigsoojust ruumist eemaldada nagu ventilaatorikonvektoritega. Samuti tuleb arvestada, et tegemist on kondensaadivaba süsteemiga ning seetõttu tekivad selle kasutamisel piirangud.

Pörandjahutusega on õhuniiskuse kondenseerumise oht pörandapinnal ning pealevoolutemperatuur tuleb seetõttu valida kõrgem. Varasemalt on uuritud erinevate temperatuurigraafikutega pörandjahutuse kasutamist ning hinnatud kondensaadi tekkeohtu pörandapinnal. Kondensaadi vältimiseks ei tohi pörandapinna temperatuur langeda alla ruumi kastepunkti temperatuuri. Ruumi jahutuse seadeväärtus antud uurimistöös on +27°C. Temperatuurigraafikuga +15/20°C hoitakse pörandapinna minimaalsed temperatuurid massiivsete siseseintega ruumis vahemikus 21,97-23,36°C ning mittemassivsete siseseintega ruumis vahemikus 22,04-23,21°C. Antud temperatuurivahemikes kondensaadi tekkeohtu pörandapinnal pole. Samuti on eelnimetatud minimaalsete temperatuurivahemike juures ka soojuslik mugavus tagatud [31].

Pörandjahutuse kohta on läbi viidud mitmeid teadustöid uurimaks süsteemi maksimaalseid jahutusväljastusi. Viimaste uuringute kohaselt, mis on läbi viidud TalTech liginullenergiahoonete uurimisrühma ekspertide poolt liginullenergia testmajas, selgus, et pörandjahutus ning fan-coil seinaradiaator annavad välja peaaegu väljundvõimsuse 40 W/m² (temperatuurigraafikuga +15°C/+17°C, jahutava vee vooluhulgad vastavalt 328 ning 338 l/h) ning need süsteemid ei sobi kasutamiseks ruumides, mille jahutuskoormus on suurem kui 50 W/m². Fan-coil seinaradiaatori puhul tagati antud temperatuurigraafikuga ruumi temperatuur +25°C ning pörandjahutusega +26°C. Kuna uuring viidi läbi september-november perioodi näitel, siis tulemuste vastavus suvisele perioodile, väiksema päikesekiirguse tõttu, on küsitav [32].

Samuti on laboratoorselt viidud läbi uuring aprillist maini, millest selgus, et olenevalt pörandapinna kontaktist otsese päikesekiirgusega võivad jahutuskoormused küündida kuni 115 W/m^2 -ni – mida suurem on kontakt päikesekiirgusega, seda suurem on jahutusväljastus. Töös uuriti ruumi kolme piirkonda: päikesekiirgusega otseses kontaktis olev pörandapind, ruumis keskosa pörandapind (kuhu jõudis osaliselt valgust) ning ruumi kõige kaugem osa aknast, kuhu päikesekiirgust ei jõudnud. Maksimaalsed jahutuskoormuste suurused pealevoolu temperatuuri $+12^\circ\text{C}$ juures varieerusid vastavalt eelnimetatud pörandapindadele 115 W/m^2 , 50 W/m^2 ning 35 W/m^2 . Pealevoolu temperatuuri tõstmisel kuni $+18^\circ\text{C}$ -ni vähenevad jahutustkoormused päikesekiirgusega kontaktis oleva pörandapinna puhul 18%, ruumi keskosa pörandapinna puhul 25% ning ruumi sügavamas osas pörandapinna jahutuskoormuste suurus praktiliselt ei muutu. Pörandjahutuse jahutuskoormuste sõltuvus vee pealevoolu temperatuurist on kujutatud alloleval joonisel [33]:



Joonis 3.26. Pörandjahutuse väljastuse suurused vastavalt jahutusvee pealevoolu temperatuurile ning eksperimendi kontrolltsoonidele.

Päikesekiirgusest tulenev soojus ei soojenda otse õhku, vaid kõigepealt pindasid. Üles soojenenud pind jahutatakse enne pörandjahutusega maha, kui see jõuab konvektiivsel teel hakata ruumiõhku soojendama. Antud uurimistööst võib järeldada, et pörandjahutus on efektiivsem ruumides, kus on suure klaaspinnaga fassaadid – mida suurem klaasfassaad, seda suuremat pinda päikesekiirgust soojendab. Väiksema klaasfassaadiga hoonete puhul, nt eramutes, võib väheneda seetõttu jahutusväljastus ligi poole võrra. Kui arvestada, et suuremas osas pörandapinnast on kontaktis hajusvalgusega, siis tuleb vaadelda olukorda, kus eelneval joonisel on kujutatud ruumi keskosa pörandapinna jahutusväljastust (eramute puhul pigem pealevoolu $+18^\circ\text{C}$ juures). Sellisel juhul väheneb jahutusväljastus 25 W/m^2 -ni ning tekib vajadus lisanduva jahutusseadme järele. Seega pörandjahutus ei pruugi igas olukorras ruumi jahutuskoormust katta ning see tuleb kombineerida teise jahutusseadmega.

Igal süsteemil on omad eelised ning puudused. Põrandjahutuse puuduseks on soojusinerts – kui on vaja ruumi kiiresti jahutada ja suurel hulgal liigsoojust välja viia, siis põrandjahutusega pole võimalik seda teha ning fan-coil seinaradiaatoril või split-süsteemil on see eelis olemas. Kõikide eelnimetatud jahutusseadmetega tekib soojusliku ebamugavuse risk – ventilaatorkonvektor süsteemide puhul külma õhu peale puhumine ning põrandjahutusel temperatuuri asümmeetria. Kuna fan-coil seinaradiaatori ning split-süsteemi puhul kasutatakse ruumi jahutamiseks õhku, siis tekitab ventilaator müra ning põrandjahutuse puhul antud probleemi ei teki.

3.7.2 Ventilatsiooniõhu jahutus

Külmaallikas

Ventilatsiooni sissepuhkeõhu jahutamiseks on vajalik jahutuskalorifeer ventilatsioonisüsteemis, mis jahutab õhu soovitud temperatuurini. Samuti omab jahutuskalorifeer teist olulist funktsiooni, õhu kuivatamine, mis on vajalik üleliigse õhuniiskuse eemaldamiseks. Jahutuskalorifeeris kasutatakse energiakandjaks üldiselt vett. Kui välisõhu temperatuur on madalam kui vajalik sissepuhkeõhu temperatuur, siis täiendav õhu jahutamine pole vajalik. Samuti on võimalik kasutada maasoojuspumba puurauke ventilatsiooniõhu eeljahutamiseks suvel (ja eelsoojendamiseks talvel). Ventilatsiooni sissepuhkeõhu jahutusvõime oleneb sissepuhkeõhu vooluhulgast ning temperatuurist [6].

Ruumiseadmed

Jahutatud sissepuhkeõhk suunatakse ruumi ning jaotatakse lõppelemendi abil. Olenevalt ventilatsioonisüsteemi lõppelemendist (õhujaotusseadmed) võib tekkida soojusliku ebamugavustunde ning tuuletõmbuse risk [6]. Ventilatsiooniõhu jahutamine eluruumide jahutamiseks pole efektiivne, kui ainult väga väikeste jahutuskoormuste juures. Peatükis Ruumi jahutus on näitena esitatud ventilatsiooni jahutuse mõju suvisele ruumitemperatuurile erinevate sissepuhkeõhu temperatuuride ning õhuvoolehulkade kombineerimisel.

JÄRELDUSED

Akende parameetrid ja asend

Analüüsi tulemuste hindamisel selgus, et kõige rohkem mõju avaldab katuseruumi suvisele temperatuurile akende suurus ning klaaspakettide g-väärtus, seda eriti katuseakende puhul, mis on pidevas kontaktis päikesekiirgusega. Uuest aastast kehtima hakkava energiatõhususe määrase [3] suvise ruumitemperatuuri kontrollarvutuste kohaselt pole antud referentsruumi näitel võimalik 150 °Ch nõuet täita. Küll aga veel viimast aastat kehtiva määrase [3] kohaselt on võimalik optimeerida akende suuna, suuruse ning klaaspaketi g-väärtusega tulemusteni, mis tagavad suvise ruumitemperatuuri nõude.

Keskmise päevavalgusteguri suurus ruumis on mõjutatud eelkõige katuseakna suurusest, kus minimaalne akna pindala osakaal toonitud klaasi ($g = 0,20$) puhul on 15% ning kirkal klaasil ($g = 0,60$) 10%. Vertikaalasendis akna puhul pole suuruse ega klaaspaketi g-väärtuste valik nii piiratud ning akende osakaal välisfassaadi pindalasse võib vastavalt klaasi toonile olla maksimaalselt 45%. Katuseakna kontakti päikesega on võimalik vähendada, parandades suvist ruumitemperatuuri ning keskmist päevavalgustegurit, projekteerides katusest väljaulatava vintskapi, mille abil paigutatakse katuseaken vertikaalasendisse. Suvise ruumitemperatuuri kontrollarvutuste põhjal selgus, et antud ruumi näitel on vintskapiga võimalik vähendada kraadtundide arvu ligi 50%.

Ehitusfüüsikalised näitajad

Valides teadlikult ehitusmaterjale, on võimalik nende füüsikalisi omadusi targalt ära kasutada, hoides kokku energiakulusid ning tagades parema sisekliima. Uuriti kerg- ja raskekonstruktsiooni mõju ruumi temperatuurile ning võrreldi mõlema konstruktsiooni tarindite soojusenergia bilanssi. Tulemustest selgus, et raskekonstruktsiooni võime salvestada ning vabastada energiat hoiab päeva jooksul ruumi temperatuuri rohkem stabiilsena ning hoiab ära temperatuuri kõikumisi, luues see abil parema sisekliima. Samuti selgus tuleviku kliimastsenaariumi analüüsist, et mida kuumem on kliima, seda kasulikum on kasutada hoone massiivsust passiivseks jahutamiseks. Mida kõrgem on välisõhu temperatuur, seda enam kuumeneb ruum üles ja seda rohkem soojusenergiat salvestab jahe mass endasse.

Katusekatte materjali analüüsi tulemused näitasid, et materjali värvusel on oluliselt suurem mõju kui materjali tüübil endal. Katusekatte materjali valikul tuleks eelistada väiksema soojuseri juhtivusega ning heledama tooniga materjale, et katusekonstruktsioon vastavalt liiga palju soojust ei juhiks ega neelaks. Küll aga heleda tooniga katusekatte puhul tuleb arvestada, et pind määrdub aja jooksul ning peegeldustegur võib väheneda. Samuti mängib tänapäeval suurt rolli päikesepaneelide paiknemine katusel, mis võib vähendada katusematerjali mõju osakaalu ruumi suvisele ülekuumenemisele, kattes enamuse katuse pinnast ning võttes vastu päikesekiirgusest tuleneva soojuskoormuse.

Jahutusmeetmed

Antud magistritöös uuritud katusekorruse ruumi näitel pole suvise ruumitemperatuuri kontrollarvutuste kohaselt võimalik ilma aktiivjahutuseta nõudeid tagada, mis tekitab vajaduse jahutussüsteemi järgi. Ruumi on võimalik jahutada passiivsel kui ka aktiivsel teel. Passiivne meetod, lisaks hoone massiivsuse ära kasutamisele, on akende kaudu tuulutamine. Kõige väiksemad ruumiõhu temperatuurid tagati analüüsis ööpäevaringse tuulutusega. Raskekonstruktsiooni puhul on efektiivne kasutada öist tuulutust, jahutades öösel maha hoone konstruktsioonid ning salvestades päeva jooksul soojusenergia.

Akende mõju analüüsi tulemustest selgus, et olukorras, kus ruumis on üks katuseaken ning välisseinas aknad puuduvad, on ülekuumenemise risk suurem. Kui lisada välisseina aken, mille WWR on vähemalt 10%, on näha järsku langust ruumi kraadtundide arvus. See viitab sellele, et vertikaalasendis akna lisamine ei mõju ruumi temperatuurile negatiivselt, vaid vastupidiselt, loob läbi lisanduva tuulutuse parema õhuvahetuse.

Aktiivsete meetmetena on võimalik kasutada ventilatsiooni sissepuhkeõhu jahutamist ning ruumiseadmetega jahutamist. Ventilatsiooni sissepuhkeõhu jahutamine eramute puhul pole mõistlik, kuna ventilatsiooni õhuvooluhulgad on liiga väikesed ning jahutuskoormuste tagamiseks peaks need mitmekordselt üle dimensioneerima. Ruumi jahutamiseks eramus on mõistlik kasutada põrandjahutust, split-süsteemi või fan-coil seinaradiaatorit. Split-süsteem ning fan-coil seinaradiaatorid on võimelised teenindama suuremaid jahutuskoormuseid, kuid põrandjahutuse jahutusväljatus on kaheldava väärtusega, sõltudes eelkõige sellest, kui suures kontaktis on põrand päikesekiirgusega.

Ruumi akende mõju tulemuste optimeerimisel saavutatakse olukord, kus kombinatsioonil päevavalgusteguri ning soojusliku mugavuse nõuetega jäävad jahutuskooormused alla 40 W/m².

Limitatsioonid

Käesolevas töös uuriti erinevate arhitektuursete, konstruktiivsete ja ehitusfüüsikaliste tegurite mõju ruumi suvisele temperatuurile ning passiivsete/aktiivsete jahutusmeetmete kasutamist mõjude vähendamiseks. Tulemusi optimeeriti vastavalt energiatõhususe määrusele [3], päevavalgus [5] ning soojusliku mugavuse [4] standarditele. Uurimistöö põhjal on võimalik läbi viia täiendavaid uuringuid järgmistel teemadel, mis antud töö mahust välja jäid:

- Missugune on erinevate välisvarjestuste (välimised ribikardinad, üleulatuva katuse jm) mõju suvisele ruumitemperatuurile ning keskmisele päevavalgustegurile;
- Missuguseid jahutusseadmeid saab kombineerida eluruumide jahutuskooormuste tagamiseks, nt põrandjahutuse kombineerimine sissepuhkeõhu jahutamisega:
 - Jahutussüsteemi projekteerimisega kaasnevad lisainvesteeringud ja lisakulud hooldusele ning energiakasutusele hoone kasutusajal;
 - Jahutusseadmete mõju soojuslikule mugavusele.
- Referentsruumide mitmekesisem valik:
 - erineva geomeetriaga ruumid (sügavus, kõrgus, katusetüüp jne).

KOKKUVÕTE

Antud töö raames uuriti erinevate arhitektuursete, konstruktiivsete ning ehitusfüüsikaliste tegurite mõju katuseruumi suvisele temperatuurile. Tulemused esitati energiatõhususe määruise suvise ruumitemperatuuri (kraadtundide) ning jahutuskoormuste kujul. Akende mõju analüüsis optimeeriti eelnimetatud tulemused kombineerides päevvalgusteguri ning soojusliku mugavuse nõuetega. Töö peamine eesmärk oli hinnata järgmisest aastast (01.03.2025) kehtima hakkava uue energiatõhususe määruisega kaasnevaid probleeme suvise ruumitemperatuuri tagamisel.

Analüüsid viidi läbi kasutades dünaamilise simulatsiooni tarkvara IDA ICE, kus dünaamilise mudeli kalibreerimisel toetuti kohapeal läbi viidud sisekliima mõõtmisandmetele. Tulemuste hindamisel lähtuti energiatõhususe määruisest, päevvalgusteguri ning soojusliku mugavuse standarditest. Tulemuste optimeerimine erinevate nõuete kombineerimisel oli piiratud, kuna teatud nõuete kriteeriumid lähevad vastuollu, nt suvise ruumitemperatuuri nõue $+27^{\circ}\text{C}$ ning soojusliku mugavuse operatiivse temperatuuri nõue $+26^{\circ}\text{C}$.

WWR analüüsi tulemuste optimeerimisel, kombineerides suvise ruumitemperatuuri (vana määruise järgi) ning päevvalgusteguri nõuded, jõuti katuseakna $g = 0,20$ ja $g = 0,40$ pindala osakaalude vahemikeni, mis on vastavalt 15-35% ning 15-25% (kehtivad iga ilmakaare kohta). Klaaspaketi $g = 0,60$ korral on akende suuruse valik rohkem piiratud – põhi kuni ida suunas osakaalu vahemik 10-25% ning lõunas 10-15%. Läänes antud klaaspaketiga ülekuumenemist vältida pole võimalik ning antud g -väärtusega akent kasutada ei saa.

Samal põhimõttel optimeeriti ka välisseina akna tulemused. Klaaspaketi $g = 0,20$ pindala vahemikud põhja suunas on 20-45%, idas 35-45%, lõunas 30-45% ning läänes 0-45%. Kirkamate klaaside, $g = 0,40$ ja $g = 0,60$, puhul ei ole võimalik ida ja lõuna suunas aknaid projekteerida ilma, et ruum üle ei kuumeneks. Klaaspaketi $g = 0,40$ pindala osakaalud välisfassaadi põhja suunas on 20-40% ning läänes 0-40%. Akna klaaspaketi $g = 0,60$ pindala osakaalud jäävad põhja suunas vahemikku 20-30% ning lääne suunas 0-30%.

Aktiivjahutusega ruumis optimeeriti WWR tulemused, kombineerides lisaks päevvalgusteguri kriteeriumitele ka soojusliku mugavuse nõue (ainult uue määruise tulemuste analüüsis), järgnevate katuseakende osakaalude vahemikeni – $g = 0,20$ osakaaluga 15-35%, $g = 0,40$ osakaaluga 15-25% ning $g = 0,60$ pindala osakaaluga

10-25%. Välisseina akna pindala tulemuste optimeerimisel kitsenesid akende suurused järgnevate vahemikeni – $g = 0,20$ osakaaluga 0-45%, $g = 0,40$ osakaaluga 0-40% ning $g = 0,60$ osakaaluga 0-30%. Antud tulemused kehtivad iga ilmakaare kohta.

Töös käsitletud referentsruumi suviste arvutustulemuste alusel ei ole võimalik uue määruse järgsete nõuetega tagada suvise ruumitemperatuuri nõuet ilma aktiivjahutust kasutamata. Eramute aktiivjahutuse lahendusena on kõige mõistlikum kasutada väiksemate jahutuskoormuste puhul pörandjahutust ning suuremate korral split-süsteemi ning fan-coil seinaradiaatorit. Erinevate uuringute kohaselt on pörandjahutuse ligikaudne jahutusväljstus 40 W/m^2 . Kuid tuleb arvestada, et eramutes puuduvad suure klaaspinnaga ruumid, mistõttu ei soojendata tervet pörandapinda otsese päikesekiirguse poolt üles ning kiirgusliku jahutuse efektiivsus väheneb. Ventilatsiooni sissepuhkeõhu jahutamine ei ole eramu ruumide jahutamiseks efektiivne meede, kuna õhuvooluhulgad on liiga väikesed ning jahutuskoormuste tagamiseks oleks vaja õhu kogused üle dimensioneerida.

Enne aktiivjahutust on võimalik vähendada ruumi jahutusvajadust passiivsel teel. Analüüsist selgus, et efektiivne viis hoonet passiivsel kujul jahutada on kasutada materjalide omadust salvestada ning vabastada energiat, mis on omane just suure soojusmahtuvusega materjalidele, nt betoon. Vastavalt tuleviku kliimastsenaariumite analüüsile, mille kohaselt kliima soojeneb, annab hoone massiivsuse kasutamine aina rohkem efekti, eriti meie kliimas, kus suvel on soojad päevad ja jahedad ööd. Antud meede ei oma positiivset mõju kuumalaine perioodidel, kui öine temperatuur on kõrgem ruumi temperatuurist. Nii ei jahutata öösel tarindite massi maha ning päeval pole soojust kuhugi salvestada.

SUMMARY

In this study, the impact of various architectural, constructive and building physics factors on the summer temperature of attic spaces was examined. The results were presented in the form of summer room temperature (degree-hours) and cooling loads according to the energy efficiency legislation. In the analysis of window impact, the aforementioned results were optimized by combining daylight factor and thermal comfort requirements. The main purpose of the research was to assess the issues associated with ensuring the summer room temperature under the new energy efficiency regulation, which will come into force next year (1st of March, 2025).

The analyses were conducted using the dynamic simulation software IDA ICE, where the calibration of the dynamic model was based on indoor climate measurement data collected on-site. The evaluation of the results was based on the energy efficiency regulation, daylight factor and thermal comfort standards. The optimisation of results by combining different requirements was limited, as certain requirement criteria are contradictory, e.g. the summer room temperature requirement of +27 degrees and the thermal comfort operational temperature requirement of +26 degrees.

In optimising the results of the WWR analysis, combining the summer room temperature (according to the old regulation) and daylight factor requirements, a range of roof window area ratios was determined. For g-value of 0,20 and 0,40, the area ratios ranged from 15-35% and 15-25%, respectively, applicable to each azimuth. For a g-value of 0,60, the window size selection is more restricted – with ratios from 10-25% for the north to east directions, and 10-15% for the south. In the west, it is impossible to avoid overheating with this g-value, making it unsuitable for use in windows facing that direction.

The results for exterior wall windows were optimised using the same principles. For a glazing unit with g-value of 0,20, the area ratios for north-facing windows are 20-45%, for east-facing 35-45%, for south-facing 30-45% and for west-facing 0-45%. For clearer glass, with g-values of 0,40 and 0,60, it is not possible to design windows facing east and south without causing the room to overheat. For g-value of 0,40, the area ratios for north-facing windows are 20-40% and for west-facing 0-40%. For g-value of 0,60, the area ratios for north-facing windows are 20-30% and for west-facing 0-30%.

In a room with active cooling, the WWR results were optimised by combining daylight factor criteria and thermal comfort requirements (analysing results based on the new regulation only). The following ranges for roof window area ratios were determined -

for a g-value of 0,20, the area ratio is 15-35%, for a g-value of 0,40, the area ratio is 15-25% and for a g-value of 0,60, the area ratio is 10-25%. When optimising the exterior wall window area ratios, the window sizes were narrowed to the following ranges - for a g-value of 0,20, the area ratio is 0-45%, for a g-value of 0,40, the area ratio is 0-40% and for a g-value of 0,60, the area ratio is 0-30%. These results apply to each azimuth.

Based on the summer calculation results for the reference room discussed in the study, it is not possible to meet the summer room temperature requirements under the new regulations without using active cooling. For residential houses, the most sensible solution for active cooling is to use floor cooling for smaller cooling loads and a split-system or a fan-coil wall radiator for larger cooling loads. According to various studies, the approximate cooling output of floor cooling is 40 W/m². However, it should be noted that residential houses typically lack rooms with large glass surfaces, so the entire floor area is not heated by direct sunlight, reducing the effectiveness of radiant cooling. Cooling the supply air of the ventilation system is not an effective measure for cooling residential spaces, as the airflow rates are too low and would need to be oversized to meet the cooling loads.

Before resorting to active cooling, it is possible to reduce the cooling needs of a room through passive means. The analysis revealed that an effective way to cool a building passively is to use materials that can store and release energy, which is characteristic of materials with high thermal mass, such as concrete. According to future climate scenario analyses, which predict climate warming, using the mass of a building becomes increasingly effective, especially in our climate where summers have warm days and cool nights. This measure, however, is not beneficial during heatwave periods when nighttime temperatures are higher than the room temperature. In this way, the mass of the buildings is not cooled down at night, and there is nowhere to store the heat during the day.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] D. Katunský, M. Vertal, E. Dolníková, S. Zozuláková, K. Hutkai and Z. Dická, "Mutual Interaction of Daylight and Overheating in the Attic Space in Summer Time," *Sustainability*, vol. 14, no. 23, p. 15634, 2022.
- [2] A. Luhamaa, A. Kallis, K. Mändla, A. Männik, T. Pedusaar ja K. Rosin, „Eesti tuleviku kliimastenaariumid aastani 2100,“ Keskkonnaagentuur, Tallinn, 2015.
- [3] MKM määrus nr 63, Hoone energiatõhususe miinimumnõuded, Riigi Teataja, 2023.
- [4] EVS-EN ISO 7730:2006, Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2006.
- [5] EVS-EN 17037:2019+A1:2021, Päevavalgus hoonetes, Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2021.
- [6] E. Abel, H. Voll, T. Tark, P. Pikk ja R. Daniel, Hoonete energiatarve ja sisekliima, Tallinn: EKVÜ, 2022.
- [7] A. Kallis, K. Rosin, P. Pärnpuu, K. Loodla ja V. Šišova, 100 aastat Eesti ilma(teenistust), Tallinn: Keskkonnaagentuur, 2019.
- [8] V. Russak ja A. Kallis, Eesti kiirguskliima teatmik, Tallinn: Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituut, 2003.
- [9] S. Fantucci ja V. Serra, „Investigating the performance of reflective insulation and low emissivity paints for the energy retrofit of roof attics,“ *Energy and Buildings*, kd. 182, pp. 300-310, 2019.
- [10] D. Chwieduk, „Impact of solar energy on the energy balance of attic rooms in high latitude,“ *Applied Thermal Engineering*, kd. 136, pp. 548-559, 2018.
- [11] P.-E. Nilsson, E. Abel, L. Ekberg, P. Fahlén, L. Jagemar, R. Clark, P. O. Fanger, C. Fitzner, L. Gunnarsen, P. V. Nielsen, J. L. Stoops, A. Trüschel ja P. Wargocki, Achieving the desired indoor climate: energy efficiency aspects of system design, Studentlitteratur, 2003.
- [12] 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., Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2019.
- [13] „Tehnilised nõuded mittelehoonetele 2021: 5. Külmaravustus ja jahutus,“ Riigi Kinnisvara, 2021.
- [14] Z. J. Zhai ja J. Rivas, „Promoting variable refrigerant flow system with a simple design and analysis tool,“ *Journal of Building Engineering*, kd. 15, pp. 218-228, 2018.
- [15] L. Vanhoutteghem, G. C. J. Skarning, C. A. Hviid ja S. Svendsen, „Impact of façade window design on energy, daylighting and thermal comfort in nearly zero-energy houses,“ *Energy and Buildings*, kd. 102, pp. 149-156, 2015.
- [16] EVS 894:2008, Loomulik valgustus elu- ja bürooruumides, Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2008.
- [17] „Avaski talu abihoone rekonstrueerimine ja laiendus (arhitektuurne tööprojekt),“ Targo Kalamees, 2021.
- [18] Kredex, „Liginullenergia eluhooned: Rida- ja korterelamud,“ Tallinn, 2017.
- [19] „Avaski talu abihoone rekonstrueerimine ja laiendus (sisekliima mõõtmised),“ Targo Kalamees, 2023-2024.
- [20] Keskkonnaagentuur, „Tartu-Tõravere ilmaandmed 01.01.2023-01.04.2024,“ 2024.
- [21] T. Kalamees, „IDA ICE: the simulation tool for making the whole building energy- and HAM analysis,“ Zürich, 2004.

- [22] J. Vinha, I. Valovirta, M. Korpi, A. Mikkilä ja P. Käkelä, „Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona.“ Tampere, 2005.
- [23] E. Brycke ja J. Nilsen, „Assessment of Co-heating Test. A Practical Method to Evaluate the In-situ Heat Transfer Coefficient in Dwellings.“ Magistritöö, Chalmersi Tehnikaülikool, 2015.
- [24] „Hoonete energiasimulatsioon (EEA5042) õppematerjalid,“ Tallinna Tehnikaülikool.
- [25] D. Schiela ja C. Schünemann, „Window Ventilation Behavior for Overheating Evaluation: Residents’ Survey and Derived Ventilation Profiles.“ *International Journal of Built Environment and Sustainability*, kd. 8, nr 3, 2021.
- [26] V. Stevens, M. Kotol, B. Grunau ja C. Craven, „The Effect of Thermal Mass on Annual Heat Load and Thermal Comfort in Cold Climate Construction.“ *Journal of Cold Regions Engineering*, kd. 20, nr 1, 2015.
- [27] A. Baniassadi, D. J. Sailor, P. J. Crank ja G. A. Ban-Weiss, „Direct and indirect effects of high-albedo roofs on energy consumption and thermal comfort of residential buildings.“ *Energy and Buildings*, kd. 178, pp. 71-83, 2018.
- [28] M. J. Siebert, „GLACIAL LANDFORMS, ICE SHEETS | Growth and Decay,“ *Encyclopedia of Quaternary Science (Second Edition)*, pp. 877-883, 2013.
- [29] „Valgustustiheduse ja nõudluspõhise valgustuse energiasimulatsiooni juhend.“ Kredex, Tallinn, 2018.
- [30] M. O. McLinden, C. J. Seeton ja A. Pearson, „New refrigerants and system configurations for vapor-compression refrigeration.“ *Science*, kd. 370, pp. 791-796, 2020.
- [31] E. Sein, „Põrandjahutuse kasutamine suveperioodil eluruumide ülekuumenemise vältimiseks.“ *Magistritöö*, 2020.
- [32] K.-V. Võsa, A. Ferrantelli ja J. Kurnitski, „Cooling Thermal Comfort and Efficiency Parameters of Ceiling Panels, Underfloor Cooling, Fan-Assisted Radiators, and Fan Coil,“ *Energies*, kd. 15, nr 11, p. 4156, 2022.
- [33] J. Pantelic, S. Schiavon, B. Ning, E. Burdakis, P. Raftery ja F. Bauman, „Full scale laboratory experiment on the cooling capacity of a radiant floor system,“ *Energy and Buildings*, kd. 170, pp. 134-144, 2018.

LISAD

Lisa 1 Välispiirete soojuslähivuse arvutused

L1.1 Välisseina VS-1 soojuslähivus

Kogusoojustakistuse ülemise piirväärtuse arvutamine

- 1) Soojustuse sektsiooni soojustakistus $R_{soojustus}$:

$$R_{soojustus} = 0,13 + \frac{0,019}{0,13} + \frac{0,045}{0,035} + \frac{0,245}{0,035} + \frac{0,009}{0,25} + \frac{0,050}{0,031} + 0,04 = 10,251 \frac{m^2 * K}{W}$$

- 2) Puidu sektsiooni soojustakistus R_{puut} :

$$R_{puut} = 0,13 + \frac{0,019}{0,13} + \frac{0,045}{0,13} + \frac{0,245}{0,13} + \frac{0,009}{0,25} + \frac{0,050}{0,031} + 0,04 = 4,196 \frac{m^2 * K}{W}$$

- 3) Kogusoojustakistuse ülemine piirväärtus R_T' :

$$R_T' = \frac{600}{\frac{555}{10,251} + \frac{45}{4,196}} = 9,250 \frac{m^2 * K}{W}$$

Kogusoojustakistuse alumise piirväärtuse arvutamine

- 1) Karkass/vill 245 mm osa soojustakistus $R_{karkass/vill, 245 \text{ mm}}$:

$$R_{karkass/vill} = \frac{600}{\frac{555}{\frac{0,245}{0,035} + \frac{0,245}{0,13}} + \frac{45}{0,13}} = 5,816 \frac{m^2 * K}{W}$$

- 2) Roov/vill 45 mm osa soojustakistus $R_{roov/vill, 45 \text{ mm}}$:

$$R_{roov/vill} = \frac{600}{\frac{555}{\frac{0,045}{0,035} + \frac{0,045}{0,13}} + \frac{45}{0,13}} = 0,771 \frac{m^2 * K}{W}$$

- 3) Kogusoojustakistuse alumine piirväärtus R_T'' :

$$R_T'' = 0,13 + \frac{0,019}{0,13} + 0,771 + 5,816 + \frac{0,009}{0,25} + \frac{0,050}{0,031} + 0,04 = 8,552 \frac{m^2 * K}{W}$$

Kogusoojustakistus R_T :

$$R_T = \frac{9,250 + 8,552}{2} = 8,901 \frac{m^2 * K}{W}$$

Soojuslääbivus U:

$$U = \frac{1}{8,901} = 0,112 \frac{W}{m^2 * K}$$

Korrigeeritud soojuslääbivus U_c :

1) Õhupiludest tingitud parandus ΔU_g soojustuse paigaldustaseme 1 korral:

$$\Delta U_{g,karkass/vill} = 0,01 * \left(\frac{5,709}{8,901}\right)^2 = 0,00427 \frac{W}{m^2 * K}$$

$$\Delta U_{g,roov/vill} = 0,01 * \left(\frac{1,541}{8,901}\right)^2 = 0,00008 \frac{W}{m^2 * K}$$

2) Mehaanilistest kinnititest tingitud parandus ΔU_f :

$$\Delta U_f = 0,8 * \frac{50 * \pi * 0,006^2 * 4}{0,050} * \left(\frac{\left(\frac{0,050}{0,031}\right)}{8,901}\right)^2 = 0,0655 \frac{W}{m^2 * K}$$

3) Soojustuse sisest mikrokonventsioonist tingitud parandus ΔU_a :

$$\Delta U_{a,karkass/vill} = 0,005 * \left(\frac{5,709}{8,901}\right)^2 = 0,00213 \frac{W}{m^2 * K}$$

$$\Delta U_{a,roov/vill} = 0,005 * \left(\frac{1,541}{8,901}\right)^2 = 0,00004 \frac{W}{m^2 * K}$$

4) Korrigeeritud soojuslääbivus U_c :

$$U_c = 0,112 + 0,00427 + 0,00008 + 0,0655 + 0,00213 + 0,00004 = 0,184 \frac{W}{m^2 * K}$$

L1.2 Katuslae KL-1 soojuslääbivus

1) Konstruktsiooni kihtide (ristlõigete) soojustakistused:

$R_1 = \text{sisepind} + \text{laelaudis} + \text{vill} + \text{vill} + \text{vill} + \text{tuuletõkkeplaat} + \text{välispind}$

$R_2 = \text{sisepind} + \text{laelaudis} + \text{puit} + \text{puit} + \text{puit} + \text{tuuletõkkeplaat} + \text{välispind}$

$R_3 = \text{sisepind} + \text{laelaudis} + \text{vill} + \text{puit} + \text{puit} + \text{tuuletõkkeplaat} + \text{välispind}$

$R_4 = \text{sisepind} + \text{laelaudis} + \text{vill} + \text{vill} + \text{puit} + \text{tuuletõkkeplaat} + \text{välispind}$

$R_5 = \text{sisepind} + \text{laelaudis} + \text{puit} + \text{puit} + \text{vill} + \text{tuuletõkkeplaat} + \text{välispind}$

$R_6 = \text{sisepind} + \text{laelaudis} + \text{puit} + \text{vill} + \text{vill} + \text{tuuletõkkeplaat} + \text{välispind}$

$R_7 = \text{sisepind} + \text{laelaudis} + \text{vill} + \text{puit} + \text{vill} + \text{tuuletökkeplaat} + \text{välispind}$

$R_8 = \text{sisepind} + \text{laelaudis} + \text{puit} + \text{vill} + \text{puit} + \text{tuuletökkeplaat} + \text{välispind}$

$$R_1 = 0,10 + \frac{0,020}{0,13} + \frac{0,045}{0,035} + \frac{0,070}{0,035} + \frac{0,245}{0,035} + \frac{0,035}{0,048} + 0,04 = 11,309 \frac{m^2 * K}{W}$$

$$R_2 = 0,10 + \frac{0,020}{0,13} + \frac{0,045}{0,13} + \frac{0,070}{0,13} + \frac{0,245}{0,13} + \frac{0,035}{0,048} + 0,04 = 3,792 \frac{m^2 * K}{W}$$

$$R_3 = 0,10 + \frac{0,020}{0,13} + \frac{0,045}{0,035} + \frac{0,070}{0,13} + \frac{0,245}{0,13} + \frac{0,035}{0,048} + 0,04 = 4,732 \frac{m^2 * K}{W}$$

$$R_4 = 0,10 + \frac{0,020}{0,13} + \frac{0,045}{0,035} + \frac{0,070}{0,035} + \frac{0,245}{0,13} + \frac{0,035}{0,048} + 0,04 = 6,193 \frac{m^2 * K}{W}$$

$$R_5 = 0,10 + \frac{0,020}{0,13} + \frac{0,045}{0,13} + \frac{0,070}{0,13} + \frac{0,245}{0,035} + \frac{0,035}{0,048} + 0,04 = 8,908 \frac{m^2 * K}{W}$$

$$R_6 = 0,10 + \frac{0,020}{0,13} + \frac{0,045}{0,13} + \frac{0,070}{0,035} + \frac{0,245}{0,035} + \frac{0,035}{0,048} + 0,04 = 10,369 \frac{m^2 * K}{W}$$

$$R_7 = 0,10 + \frac{0,020}{0,13} + \frac{0,045}{0,035} + \frac{0,070}{0,13} + \frac{0,245}{0,035} + \frac{0,035}{0,048} + 0,04 = 9,847 \frac{m^2 * K}{W}$$

$$R_8 = 0,10 + \frac{0,020}{0,13} + \frac{0,045}{0,13} + \frac{0,070}{0,035} + \frac{0,245}{0,13} + \frac{0,035}{0,048} + 0,04 = 5,254 \frac{m^2 * K}{W}$$

2) Roov/vill 45 mm osa soojustakistus $R_{\text{roov/vill 45 mm, s.400}}$:

$$R_{\text{roov/vill 50mm,s.400}} = \frac{400}{\left(\frac{355}{0,045} + \frac{45}{0,045}\right) \frac{0,035}{0,13}} = 0,985 \frac{m^2 * K}{W}$$

3) Roov/vill 70 mm osa soojustakistus $R_{\text{roov/vill 70 mm, s.400}}$:

$$R_{\text{roov/vill 70mm,s.400}} = \frac{400}{\left(\frac{330}{0,070} + \frac{70}{0,070}\right) \frac{0,035}{0,13}} = 1,356 \frac{m^2 * K}{W}$$

4) Roov/vill 70 mm osa soojustakistus $R_{\text{roov/vill 70 mm, s.900}}$:

$$R_{\text{roov/vill 70mm,s.900}} = \frac{900}{\left(\frac{830}{0,070} + \frac{70}{0,070}\right) \frac{0,035}{0,13}} = 1,651 \frac{m^2 * K}{W}$$

5) Sarikas/vill 245 mm osa soojustakistus $R_{\text{sarikas/vill 245 mm, s.900}}$:

$$R_{roov/vill\ 250mm,s.900} = \frac{900}{\left(\frac{855}{0,035} + \frac{45}{0,13}\right)} = 6,164 \frac{m^2 * K}{W}$$

6) Kogusoojustakistuse ülemine piirväärtus R':

$$R' = 0,10 + \frac{0,020}{0,13} + 0,985 + 1,356 + 1,651 + 6,164 + \frac{0,035}{0,048} + 0,04 = 11,179 \frac{m^2 * K}{W}$$

7) Kogusoojustakistuse alumine piirväärtus R'':

$$R'' = \frac{900 * 400}{\frac{855 * 355}{11,309} + \frac{45 * 45}{3,792} + \frac{355 * 45}{4,732} + \frac{355 * 45}{6,193} + \frac{45 * 855}{8,908} + \frac{45 * 855}{10,369} + \frac{355 * 855}{9,847} + \frac{45 * 45}{5,254}}$$

$$= 4,961 \frac{m^2 * K}{W}$$

8) Kogusoojustakistus R_T:

$$R_{tot} = \frac{11,179 + 4,961}{2} = 8,070 \frac{m^2 * K}{W}$$

9) Katuslae soojusläbivus U:

$$U = \frac{1}{8,070} = 0,124 \frac{W}{m^2 * K}$$

10) Korrigeeritud soojusläbivus U_c:

Õhupiludest tingitud parandus ΔU_g= 0 soojustuse paigaldustaseme 0 korral (soojustus puistevill tihedusega 70 kg/m³, teibitud liitekohtadega tuuletõkkeplaat)

Soojustuse sisesest mikrokonventsioonist tingitud parandus ΔU_a= 0

L1.3 Põranda soojusläbivus

1) Põranda iseloomulik mõõt:

$$B = \frac{A}{\left(\frac{P}{2}\right)} = \frac{(5,68 * 16,23)}{\left(\frac{43,82}{2}\right)} = 4,21 \text{ m}$$

2) Põranda ekvivalentne paksus:

$$d_t = w + \lambda * (R_{si} + R_f + R_{se}) = 0,368 + 2,0 * \left(0,17 + \frac{0,100}{2,1} * \frac{0,400}{0,036} + 0,04\right) = 23,1 \text{ m}$$

3) Põranda soojusläbivus U:

$$d_t \geq B' \Rightarrow U = \frac{\lambda}{0,457 * B' + d_t} = \frac{2,0}{0,457 * 4,21 + 23,1} = 0,080 \frac{W}{m^2 * K}$$

Lisa 2 Joonkülmasilla väärtuste arvutused

Tarkvara:	THERM 7.8		
Kuupäev:	30.10.2023		
Autor:	Anette Põldsepp		

Tarkvara:	THERM 7.8		
Kuupäev:	30.10.2023		
Autor:	Anette Põldsepp		

Välissein VS2 / Välissein VS2

Lähteandmed	$R_{s1}, m^2 \cdot K/W$	$h_{s1}, W/(m^2 \cdot K)$	$\theta_s, ^\circ C$
Välispind (välisõhk)	0,04	25,0	-15,0
Välispind (pinna)	0	1000	-15,0
Sisepind. Joonsoojuslähivuse arvutuseks			
- Horisontaalne soojusvoog (sein)	0,13	7,7	21,0
- Soojusvoog üles (lagi)	0,1	10,0	21,0
- Soojusvoog alla (põrand)	0,17	5,9	21,0
Sisepind. Külmasilla kriitilise hindamiseks			
- Horisontaalne soojusvoog (sein)	0,25	4,0	21,0
- Soojusvoog üles (lagi)	0,1	10,0	21,0
Sise- ja väliskesk. temperatuuride vahe, $\theta_{s1}-\theta_{s2}$			36,0 K

Liituvate tarindite soojuslähivused	
1. liituv tarindi soojuslähivus, U_1	0,0976 W/m ² K
2. liituv tarindi soojuslähivus, U_2	0,0976 W/m ² K
Liituvate tarindite arvutusulatus (arvutusmudelid)	
1. liituv tarindi arvutusulatus, l_{i1} (sisemõõdud)	1104 mm
2. liituv tarindi arvutusulatus, l_{i2} (sisemõõdud)	1104 mm
Kogu arvutusulatus üldmõõt l_{ig} (üldised sisemõõdud)	2208 mm
Tarindite liitekohaga arvutusulatust läbiv soojusvool, Φ	8,88 W
Liituvate tarindite arvutusulatuse keskmine soojuslähivus, U	0,120 W/m ² K
Madalaim sisepinna temperatuur	17,60 °C
Tarindite liitekohaga arvutusulatuse soojuserikadu ja joonsoojuslähivused	
Liituvate tarindite arvutusulatuse soojuserikadu (2D arvutusest), L_{2D}	0,247 W/(m·K)
Liituvate tarindite arvutusulatuse soojuserikadu (1D, sisemõõdud), $U_1 \cdot x_{i1} + U_2 \cdot x_{i2}$	0,216 W/(m·K)
Liituvate tarindite arvutusulatuse soojuserikadu (1D, üldised sisemõõdud), $U_1 \cdot x_{i1} + U_2 \cdot x_{i2}$	0,216 W/(m·K)
Tarindite liitekohaga joonsoojuslähivus Ψ_1 (sisemõõdud)	0,04 W/(m·K)
Tarindite liitekohaga joonsoojuslähivus Ψ_{ig} (üldised sisemõõdud)	0,04 W/(m·K)
Tarindite liitekohaga sisepinna minimaalne temperatuurindeks f_{Rsi}	0,90

Eestis on elamute tarindite liitekohtade temperatuurindeksi piirsuuruseks $f_{Rsi} \geq 0,80$.
Eestis on elamute akende temperatuurindeksi piirsuuruseks $f_{Rsi} \geq 0,70$.

Liitekohaga sõlm

Temperatuurivälja joonis

Tarkvara:	THERM 7.8		
Kuupäev:	27.11.2023		
Autor:	Anette Põldsepp		

Tarkvara:	THERM 7.8		
Kuupäev:	27.11.2023		
Autor:	Anette Põldsepp		

Välissein VS2 / Katuslagi KL1

Lähteandmed	$R_{s1}, m^2 \cdot K/W$	$h_{s1}, W/(m^2 \cdot K)$	$\theta_s, ^\circ C$
Välispind (välisõhk)	0,04	25,0	-15,0
Välispind (pinna)	0	1000	-15,0
Sisepind. Joonsoojuslähivuse arvutuseks			
- Horisontaalne soojusvoog (sein)	0,13	7,7	21,0
- Soojusvoog üles (lagi)	0,1	10,0	21,0
- Soojusvoog alla (põrand)	0,17	5,9	21,0
Sisepind. Külmasilla kriitilise hindamiseks			
- Horisontaalne soojusvoog (sein)	0,25	4,0	21,0
- Soojusvoog üles (lagi)	0,1	10,0	21,0
Sise- ja väliskesk. temperatuuride vahe, $\theta_{s1}-\theta_{s2}$			36,0 K

Liituvate tarindite soojuslähivused	
1. liituv tarindi soojuslähivus, U_1	0,0988 W/m ² K
2. liituv tarindi soojuslähivus, U_2	0,0990 W/m ² K
Liituvate tarindite arvutusulatus (arvutusmudelid)	
1. liituv tarindi arvutusulatus, l_{i1} (sisemõõdud)	1236 mm
2. liituv tarindi arvutusulatus, l_{i2} (sisemõõdud)	1104 mm
Kogu arvutusulatus üldmõõt l_{ig} (üldised sisemõõdud)	2340 mm
Tarindite liitekohaga arvutusulatust läbiv soojusvool, Φ	9,67 W
Liituvate tarindite arvutusulatuse keskmine soojuslähivus, U	0,11 W/m ² K
Madalaim sisepinna temperatuur	18,30 °C
Tarindite liitekohaga arvutusulatuse soojuserikadu ja joonsoojuslähivused	
Liituvate tarindite arvutusulatuse soojuserikadu (2D arvutusest), L_{2D}	0,269 W/(m·K)
Liituvate tarindite arvutusulatuse soojuserikadu (1D, sisemõõdud), $U_1 \cdot x_{i1} + U_2 \cdot x_{i2}$	0,231 W/(m·K)
Liituvate tarindite arvutusulatuse soojuserikadu (1D, üldised sisemõõdud), $U_1 \cdot x_{i1} + U_2 \cdot x_{i2}$	0,231 W/(m·K)
Tarindite liitekohaga joonsoojuslähivus Ψ_1 (sisemõõdud)	0,04 W/(m·K)
Tarindite liitekohaga joonsoojuslähivus Ψ_{ig} (üldised sisemõõdud)	0,04 W/(m·K)
Tarindite liitekohaga sisepinna minimaalne temperatuurindeks f_{Rsi}	0,92

Eestis on elamute tarindite liitekohtade temperatuurindeksi piirsuuruseks $f_{Rsi} \geq 0,80$.
Eestis on elamute akende temperatuurindeksi piirsuuruseks $f_{Rsi} \geq 0,70$.

Liitekohaga sõlm

Temperatuurivälja joonis

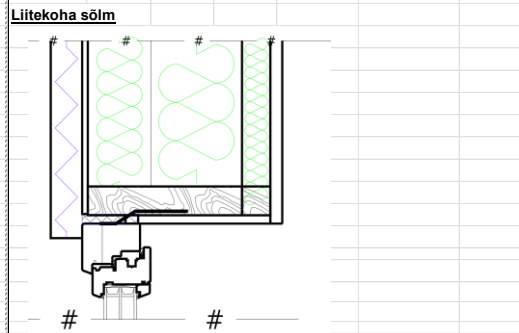
Tarkvara: THERM 7.8
 Kuupäev: 30.10.2023
 Autor: Anette Põldsepp

Tarkvara: THERM 7.8
 Kuupäev: 30.10.2023
 Autor: Anette Põldsepp

Välissein VS2 / Aken (ülemine osa)

Välissein VS2 / Aken (ülemine osa)

Lähteandmed	$R_{s, m^2 \cdot K/W}$	$h_s, W/(m^2 \cdot K)$	$\theta, ^\circ C$
Välispind (välisõhk)	0,04	25,0	-15,0
Välispind (pinnas)	0	1000	-15,0
Sisepind. Joonsoojusläbivuse arvutuseks			
- Horisontaalne soojusvoog (sein)	0,13	7,7	21,0
- Soojusvoog üles (lagi)	0,1	10,0	21,0
- Soojusvoog alla (põrand)	0,17	5,9	21,0
Sisepind. Külmasilla kriitilise hindamiseks			
- Horisontaalne soojusvoog (sein)	0,25	4,0	21,0
- Soojusvoog üles (lagi)	0,1	10,0	21,0
Sise- ja väliskesk. temperatuuride vahe, $\theta_s - \theta_e$			36,0 K



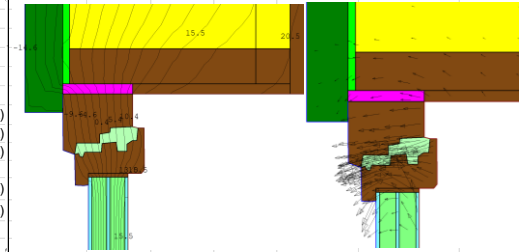
Liituvate tarindite soojusläbivused

1. liituv tarindi soojusläbivus, U_1	0,5108 W/m ² K
2. liituv tarindi soojusläbivus, U_2	0,0990 W/m ² K

Temperatuurivälja joonis

Liituvate tarindite arvutusulatus (arvutusmudelid)

1. liituv tarindi arvutusulatus, l_{t1} (sisemöödud)	1107 mm
2. liituv tarindi arvutusulatus, l_{t2} (sisemöödud)	1104 mm
Kogu arvutusulatus üldmõõt l_{t0} (üldised sisemöödud)	2211 mm



Tarindite liitekohta arvutusulatust läbiv soojusvool, Φ
Liituvate tarindite arvutusulatuse keskmine soojusläbivus, U
Madalaim sisepinna temperatuur

Φ	25,47 W
U	0,29 W/m ² K
Temperatuur	13,10 °C

Tarindite liitekohta arvutusulatuse soojuserikadu ja joonsoojuslät

Φ_{2D}	0,630 W/(m·K)
Φ_{1D}	0,708 W/(m·K)
Φ_{1D}	0,675 W/(m·K)
Φ_{1D}	0,675 W/(m·K)
Ψ_1 (sisemöödud)	0,04 W/(m·K)
Ψ_{t0} (üldised sisemöödud)	0,04 W/(m·K)

Tarindite liitekohta sisepinna minimaalne temperatuurindeks f_{Rsi}
 Eestis on elamute tarindite liitekohtade temperatuurindeksi piirsuuruseks $f_{Rsi} \geq 0,80$.
 Eestis on elamute akende temperatuurindeksi piirsuuruseks $f_{Rsi} \geq 0,70$.

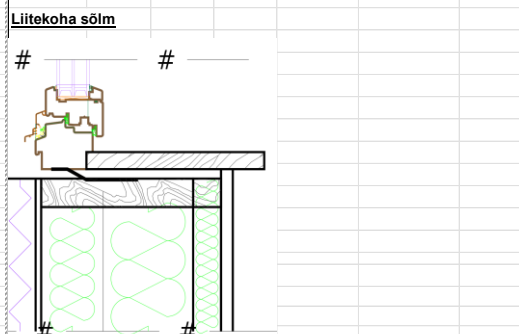
Tarkvara: THERM 7.8
 Kuupäev: 30.10.2023
 Autor: Anette Põldsepp

Tarkvara: THERM 7.8
 Kuupäev: 30.10.2023
 Autor: Anette Põldsepp

Välissein VS2 / Aken (alumine osa)

Välissein VS2 / Aken (alumine osa)

Lähteandmed	$R_{s, m^2 \cdot K/W}$	$h_s, W/(m^2 \cdot K)$	$\theta, ^\circ C$
Välispind (välisõhk)	0,04	25,0	-15,0
Välispind (pinnas)	0	1000	-15,0
Sisepind. Joonsoojusläbivuse arvutuseks			
- Horisontaalne soojusvoog (sein)	0,13	7,7	21,0
- Soojusvoog üles (lagi)	0,1	10,0	21,0
- Soojusvoog alla (põrand)	0,17	5,9	21,0
Sisepind. Külmasilla kriitilise hindamiseks			
- Horisontaalne soojusvoog (sein)	0,25	4,0	21,0
- Soojusvoog üles (lagi)	0,1	10,0	21,0
Sise- ja väliskesk. temperatuuride vahe, $\theta_s - \theta_e$			36,0 K



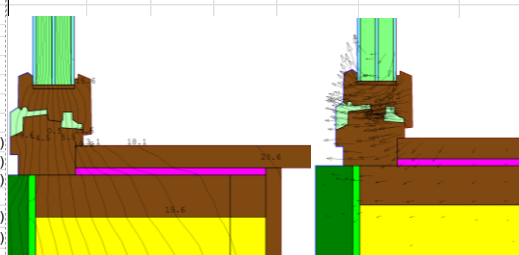
Liituvate tarindite soojusläbivused

1. liituv tarindi soojusläbivus, U_1	0,5187 W/m ² K
2. liituv tarindi soojusläbivus, U_2	0,0990 W/m ² K

Temperatuurivälja joonis

Liituvate tarindite arvutusulatus (arvutusmudelid)

1. liituv tarindi arvutusulatus, l_{t1} (sisemöödud)	1010 mm
2. liituv tarindi arvutusulatus, l_{t2} (sisemöödud)	1104 mm
Kogu arvutusulatus üldmõõt l_{t0} (üldised sisemöödud)	2104 mm



Tarindite liitekohta arvutusulatust läbiv soojusvool, Φ
Liituvate tarindite arvutusulatuse keskmine soojusläbivus, U
Madalaim sisepinna temperatuur

Φ	23,25 W
U	0,26 W/m ² K
Temperatuur	11,00 °C

Tarindite liitekohta arvutusulatuse soojuserikadu ja joonsoojuslät

Φ_{2D}	0,543 W/(m·K)
Φ_{1D}	0,646 W/(m·K)
Φ_{1D}	0,633 W/(m·K)
Φ_{1D}	0,630 W/(m·K)
Ψ_1 (sisemöödud)	0,02 W/(m·K)
Ψ_{t0} (üldised sisemöödud)	0,02 W/(m·K)

Tarindite liitekohta sisepinna minimaalne temperatuurindeks f_{Rsi}
 Eestis on elamute tarindite liitekohtade temperatuurindeksi piirsuuruseks $f_{Rsi} \geq 0,80$.
 Eestis on elamute akende temperatuurindeksi piirsuuruseks $f_{Rsi} \geq 0,70$.

Tarkvara:	THERM 7.8
Kuupäev:	06.11.2023
Autor:	Anette Põldsepp

Välissein VS1 / Välissein VS2 / Vahelagi VL1

Lähteandmed	$R_{s, m^2 \cdot K/W}$	$h_s, W/(m^2 \cdot K)$	$\theta, ^\circ C$
Välispind (välisõhk)	0,04	25,0	-15,0
Välispind (pinnas)	0	1000	-15,0
Sisepind. Joonsoojuslähivuse arvutuseks			
- Horisontaalne soojusvoo (sein)	0,13	7,7	21,0
- Soojusvoo üles (lagi)	0,1	10,0	21,0
- Soojusvoo alla (põrand)	0,17	5,9	21,0
Sisepind. Külmasilla kriitilise hindamiseks			
- Horisontaalne soojusvoo (sein)	0,25	4,0	21,0
- Soojusvoo üles (lagi)	0,1	10,0	21,0
Sise- ja väliskesk. temperatuuride vahe, $\theta_s - \theta_e$			36,0 K

Liituvate tarindite soojuslähivused

1. liituv tarindi soojuslähivus, U_1	0,0990 W/m ² K
2. liituv tarindi soojuslähivus, U_2	0,0484 W/m ² K

Liituvate tarindite arvutusulatus (arvutusmudelid)

1. liituv tarindi arvutusulatus, l_{1i} (sisemõõdud)	1104 mm
2. liituv tarindi arvutusulatus, l_{1e} (sisemõõdud)	2472 mm
Kogu arvutusulatus üldmõõt l_{ig} (üldised sisemõõdud)	3596 mm

Tarindite liitekohta arvutusulatus läbiv soojusvool, Φ

Liituvate tarindite arvutusulatus soojuserikadu (2D arvutusest), L_{2D}	9,85 W
Liituvate tarindite arvutusulatus soojuserikadu (1D, sisemõõdud), $U_1 \times l_{1i} + U_2 \times l_{1e}$	0,04 W/m ² K
Madalaim sisepinna temperatuur	20,40 °C

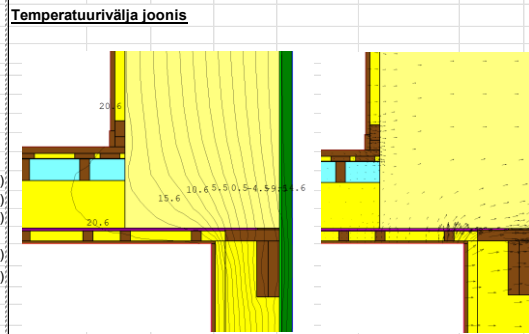
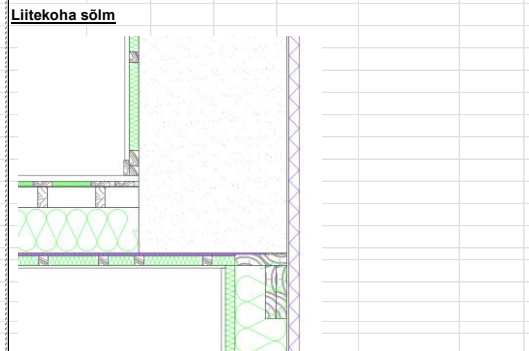
Tarindite liitekohta arvutusulatus soojuserikadu ja joonsoojuslähivused

Liituvate tarindite arvutusulatus soojuserikadu (2D arvutusest), L_{2D}	0,150 W/(m·K)
Liituvate tarindite arvutusulatus soojuserikadu (1D, sisemõõdud), $U_1 \times l_{1i} + U_2 \times l_{1e}$	0,274 W/(m·K)
Liituvate tarindite arvutusulatus soojuserikadu (1D, üldised sisemõõdud), $U_1 \times l_{1i} + U_2 \times l_{1e}$	0,229 W/(m·K)
Liituvate tarindite arvutusulatus soojuserikadu (1D, üldised sisemõõdud), $U_1 \times l_{1i} + U_2 \times l_{1e}$	0,230 W/(m·K)
Tarindite liitekohta joonsoojuslähivus Ψ_1 (sisemõõdud)	0,05 W/(m·K)
Tarindite liitekohta joonsoojuslähivus Ψ_{ig} (üldised sisemõõdud)	0,05 W/(m·K)
Tarindite liitekohta sisepinna minimaalne temperatuurindeks f_{Rsi}	0,98

Eestis on elamute tarindite liitekohtade temperatuurindeksi piirsuuruseks $f_{Rsi} \geq 0,80$.
Eestis on elamute akende temperatuurindeksi piirsuuruseks $f_{Rsi} \geq 0,70$.

Tarkvara:	THERM 7.8
Kuupäev:	06.11.2023
Autor:	Anette Põldsepp

Välissein VS1 / Välissein VS2 / Vahelagi VL1



Tarkvara:	THERM 7.8
Kuupäev:	11.03.2024
Autor:	Anette Põldsepp

Välissein VS1 / Sokkel

Lähteandmed	$R_{s, m^2 \cdot K/W}$	$h_s, W/(m^2 \cdot K)$	$\theta, ^\circ C$
Välispind (välisõhk)	0,04	25,0	-15,0
Välispind (pinnas)	0	1000	-15,0
Sisepind. Joonsoojuslähivuse arvutuseks			
- Horisontaalne soojusvoo (sein)	0,13	7,7	21,0
- Soojusvoo üles (lagi)	0,1	10,0	21,0
- Soojusvoo alla (põrand)	0,17	5,9	21,0
Sisepind. Külmasilla kriitilise hindamiseks			
- Horisontaalne soojusvoo (sein)	0,25	4,0	21,0
- Soojusvoo üles (lagi)	0,1	10,0	21,0
Sise- ja väliskesk. temperatuuride vahe, $\theta_s - \theta_e$			36,0 K

Liituvate tarindite soojuslähivused

1. liituv tarindi soojuslähivus, U_1	0,0990 W/m ² K
2. liituv tarindi soojuslähivus, U_2	0,0818 W/m ² K

Liituvate tarindite arvutusulatus (arvutusmudelid)

1. liituv tarindi arvutusulatus, l_{1i} (sisemõõdud)	1110 mm
2. liituv tarindi arvutusulatus, l_{1e} (sisemõõdud)	2100 mm
Kogu arvutusulatus üldmõõt l_{ig} (üldised sisemõõdud)	3210 mm

Tarindite liitekohta arvutusulatus läbiv soojusvool, Φ

Liituvate tarindite arvutusulatus soojuserikadu (2D arvutusest), L_{2D}	10,89 W
Liituvate tarindite arvutusulatus soojuserikadu (1D, sisemõõdud), $U_1 \times l_{1i} + U_2 \times l_{1e}$	0,09 W/m ² K
Madalaim sisepinna temperatuur	19,50 °C

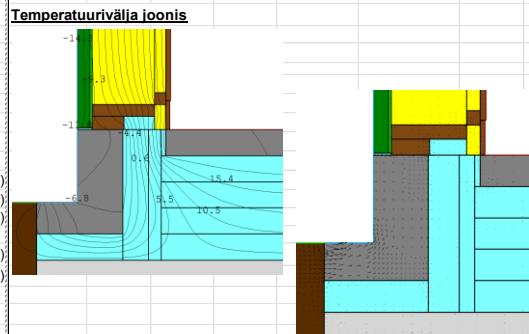
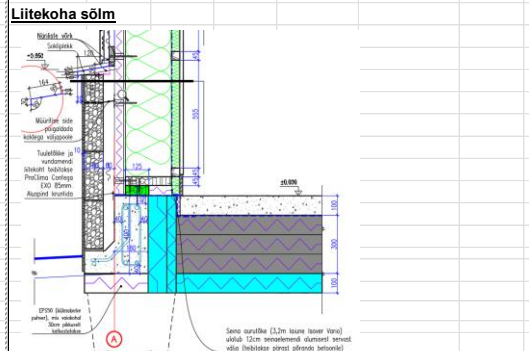
Tarindite liitekohta arvutusulatus soojuserikadu ja joonsoojuslähivused

Liituvate tarindite arvutusulatus soojuserikadu (2D arvutusest), L_{2D}	0,302 W/(m·K)
Liituvate tarindite arvutusulatus soojuserikadu (1D, sisemõõdud), $U_1 \times l_{1i} + U_2 \times l_{1e}$	0,303 W/(m·K)
Liituvate tarindite arvutusulatus soojuserikadu (1D, üldised sisemõõdud), $U_1 \times l_{1i} + U_2 \times l_{1e}$	0,282 W/(m·K)
Liituvate tarindite arvutusulatus soojuserikadu (1D, üldised sisemõõdud), $U_1 \times l_{1i} + U_2 \times l_{1e}$	0,282 W/(m·K)
Tarindite liitekohta joonsoojuslähivus Ψ_1 (sisemõõdud)	0,03 W/(m·K)
Tarindite liitekohta joonsoojuslähivus Ψ_{ig} (üldised sisemõõdud)	0,03 W/(m·K)
Tarindite liitekohta sisepinna minimaalne temperatuurindeks f_{Rsi}	0,95

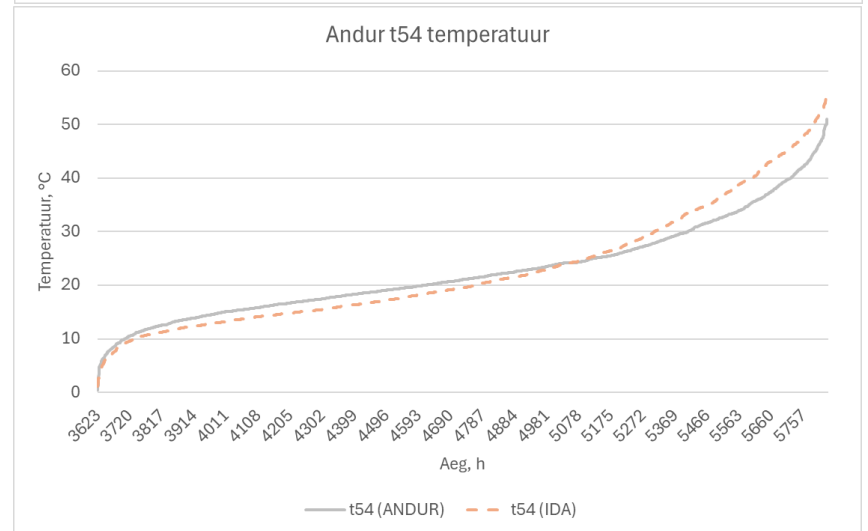
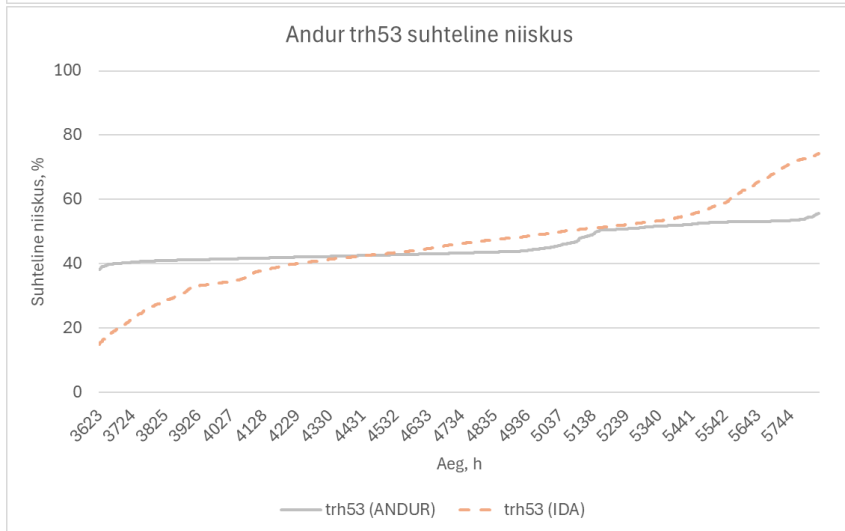
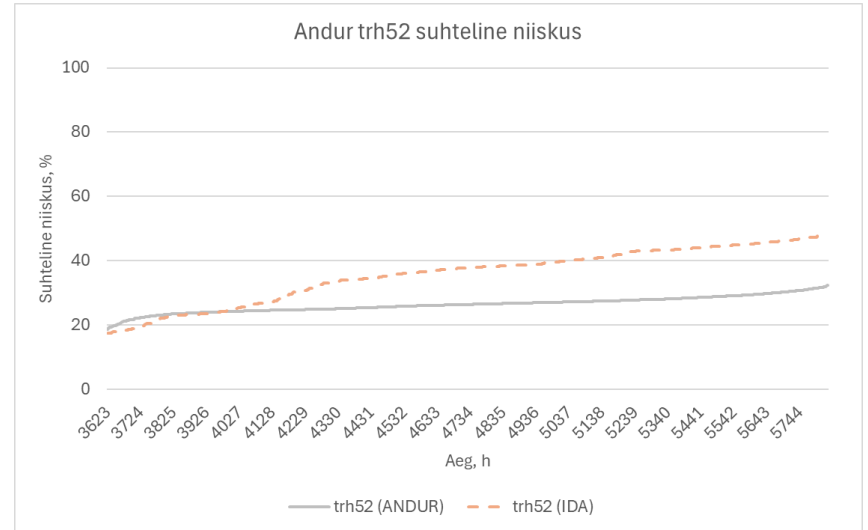
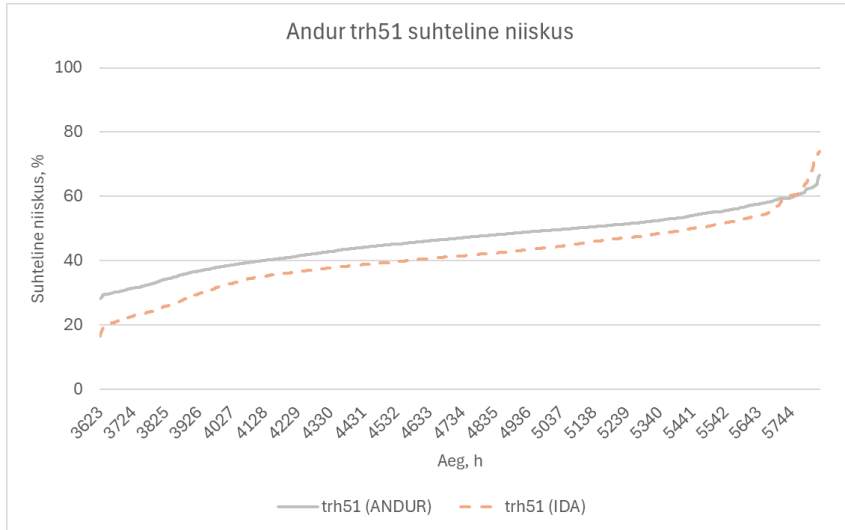
Eestis on elamute tarindite liitekohtade temperatuurindeksi piirsuuruseks $f_{Rsi} \geq 0,80$.
Eestis on elamute akende temperatuurindeksi piirsuuruseks $f_{Rsi} \geq 0,70$.

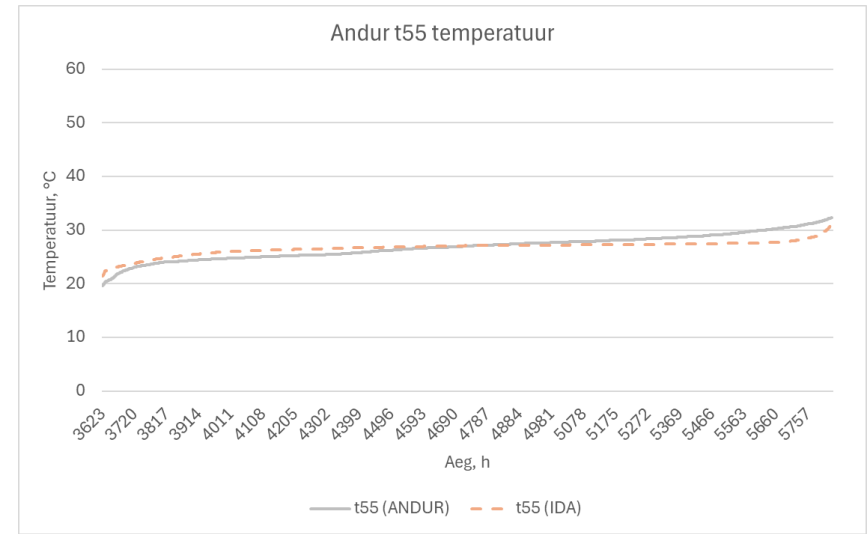
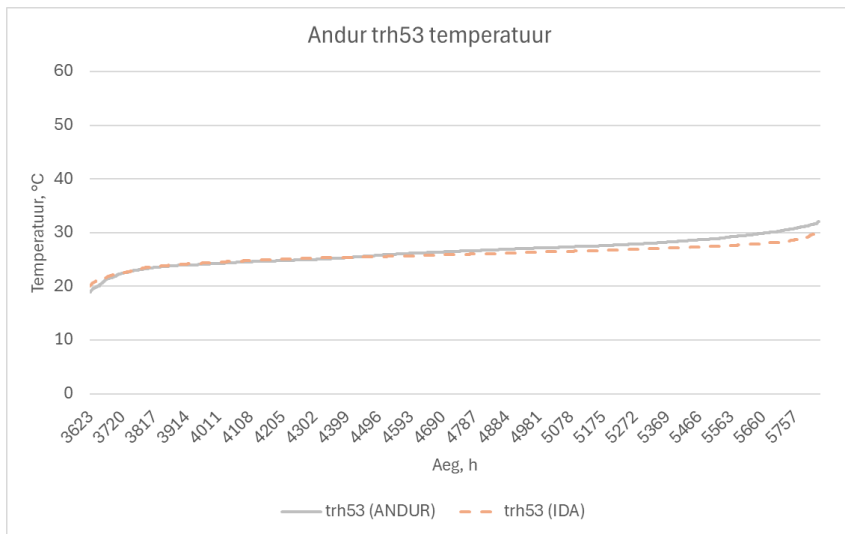
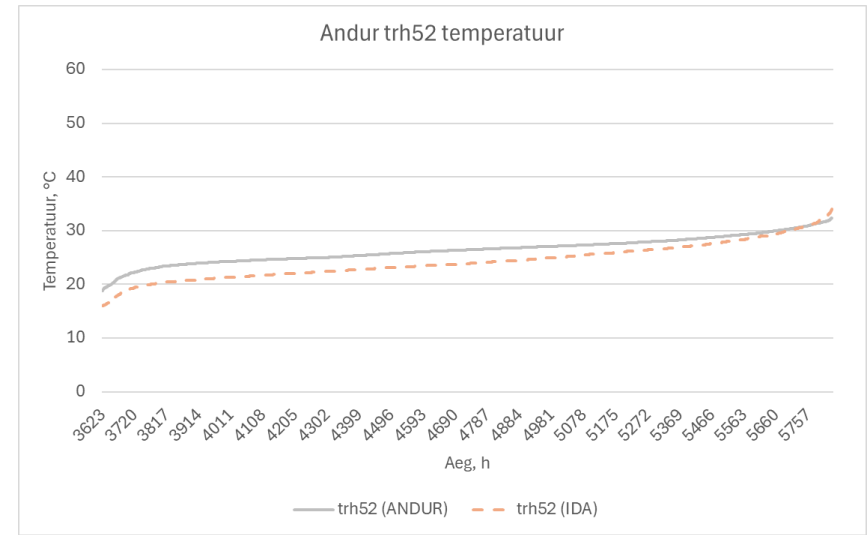
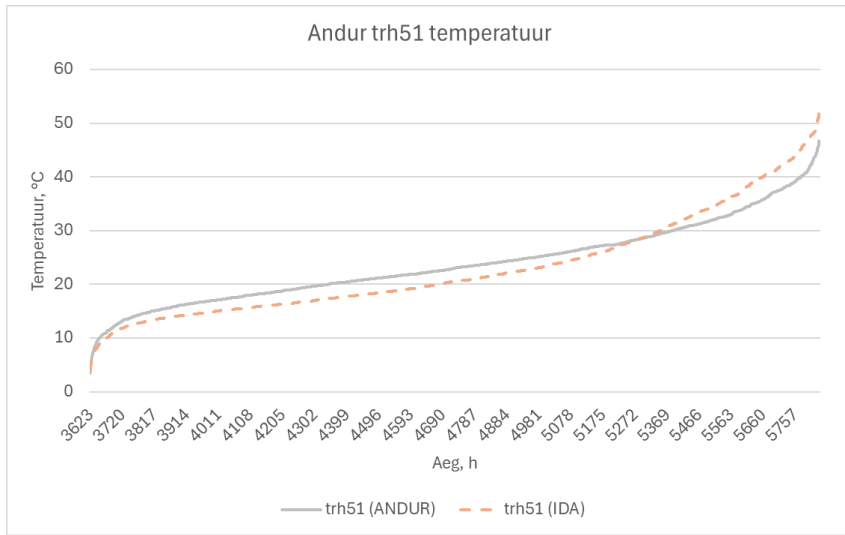
Tarkvara:	THERM 7.8
Kuupäev:	11.03.2024
Autor:	Anette Põldsepp

Välissein VS1 / Sokkel

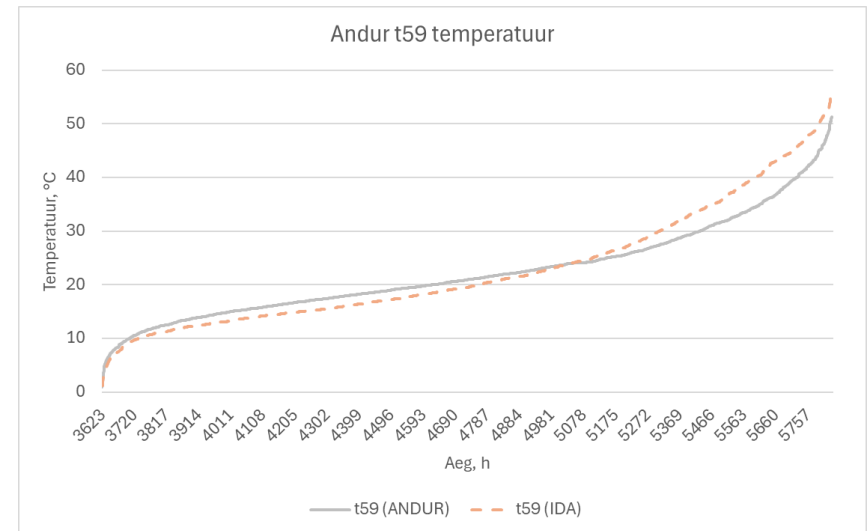
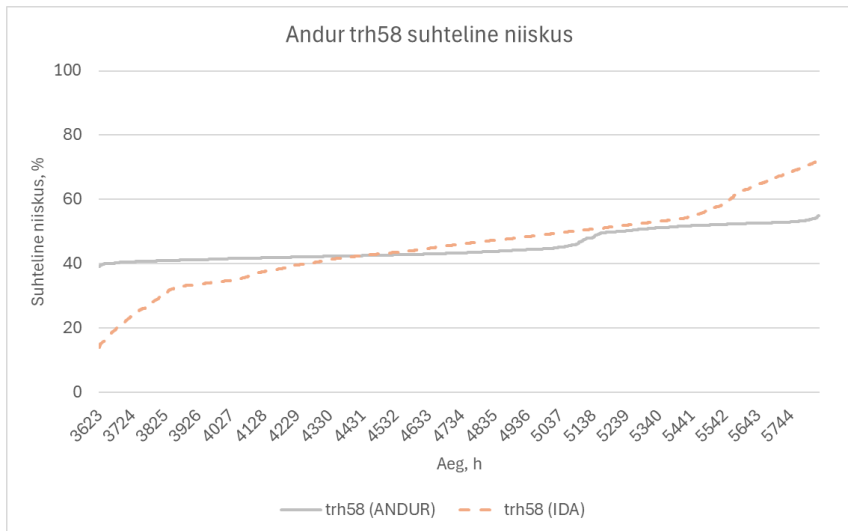
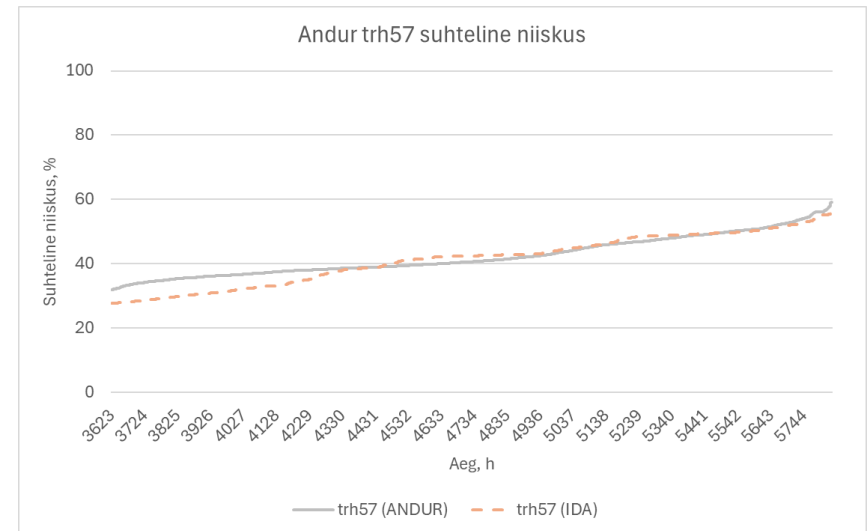
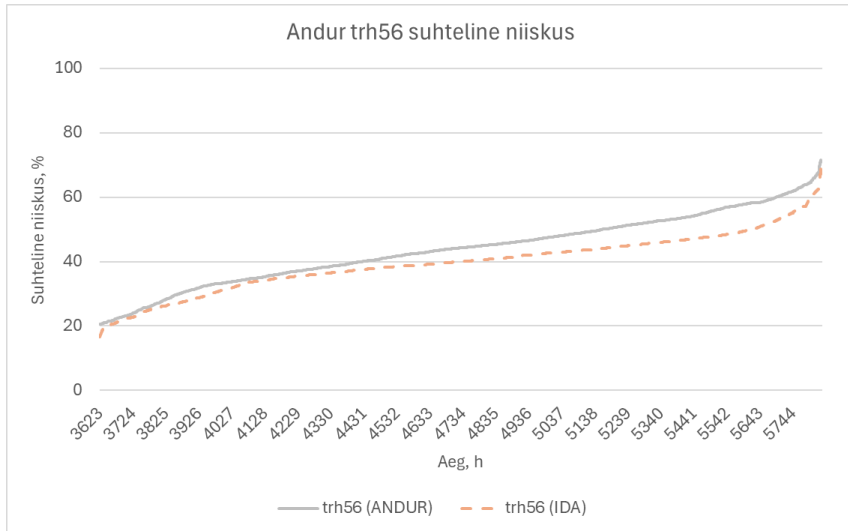


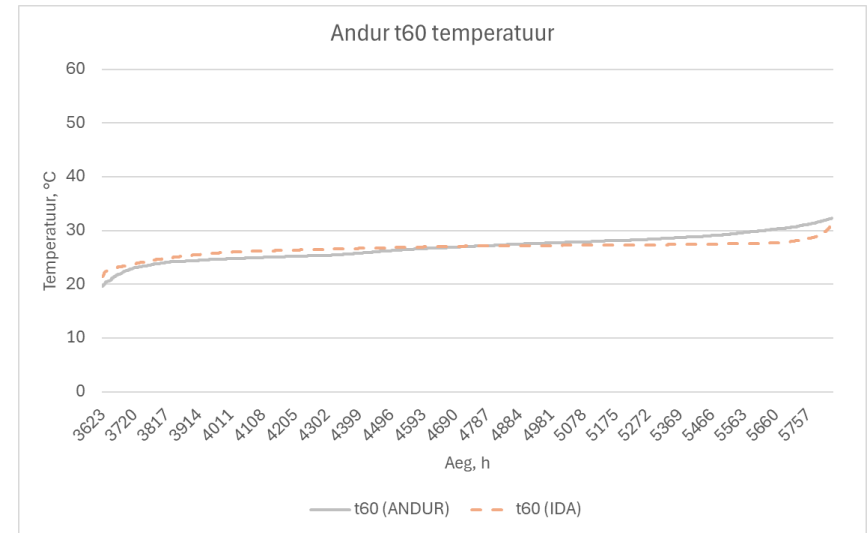
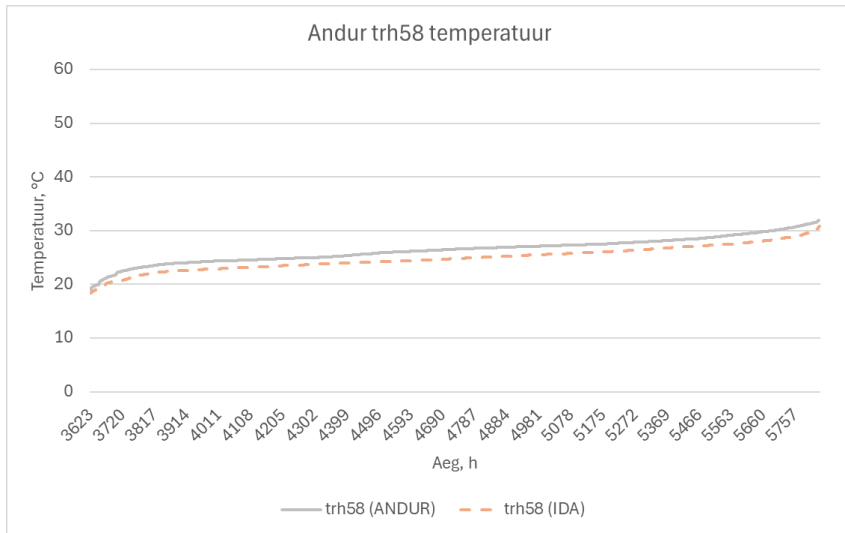
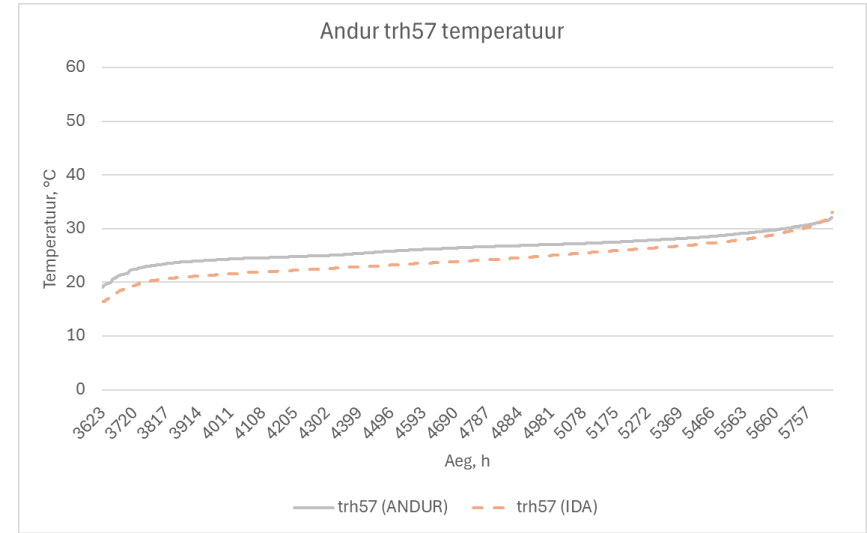
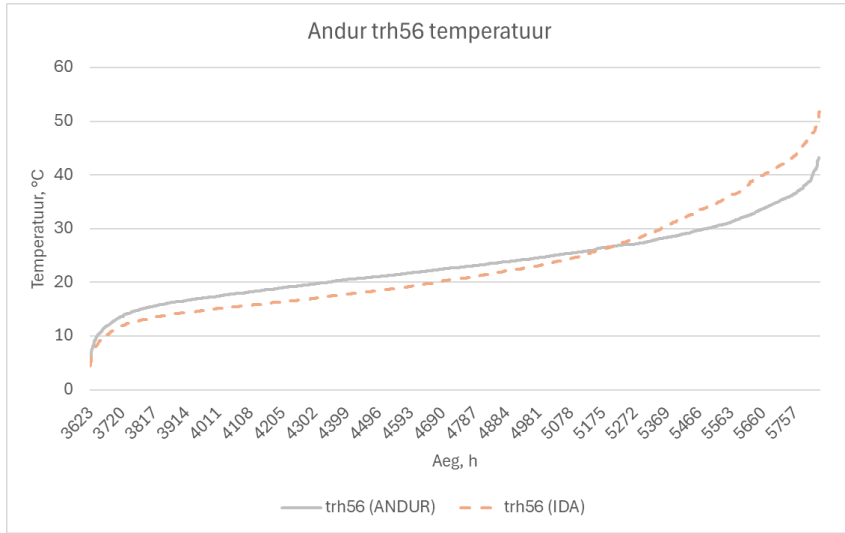
Lisa 3 Katusekonstruktsiooni KL1 kalibreerimistulemused



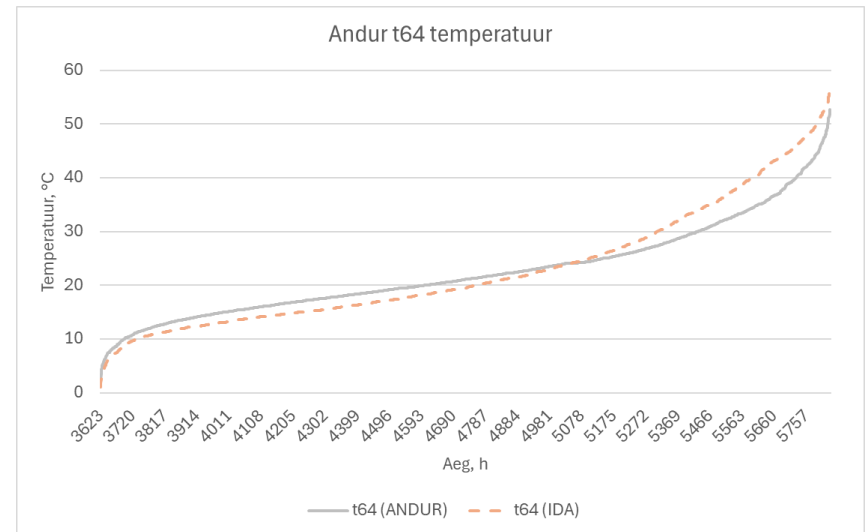
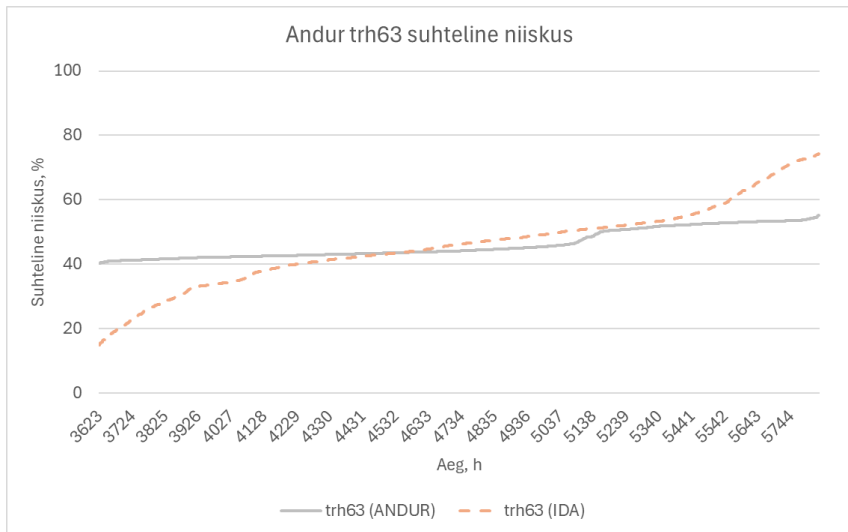
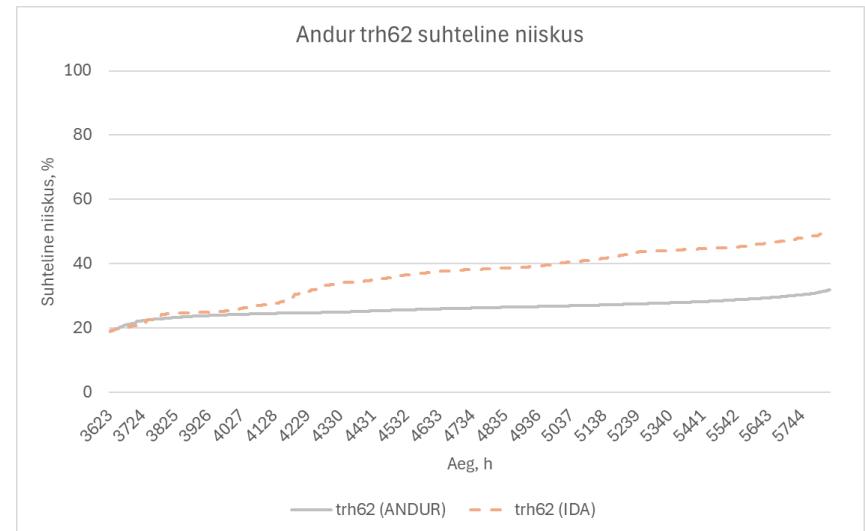
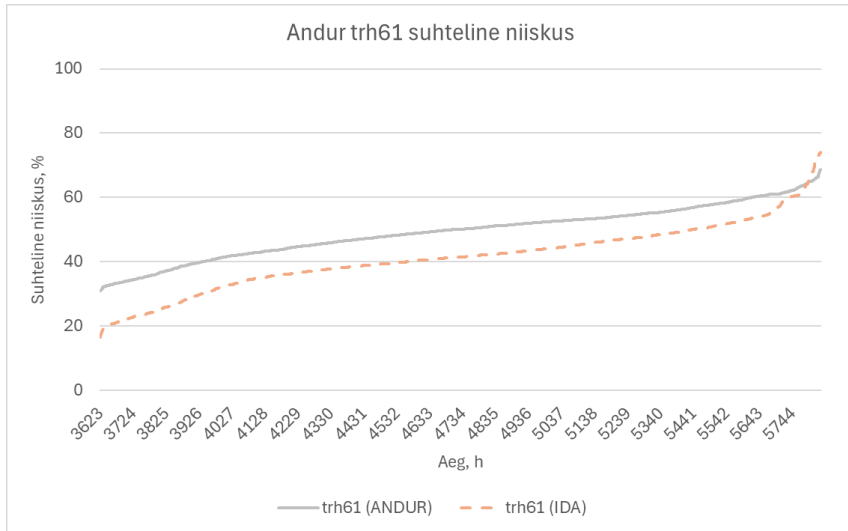


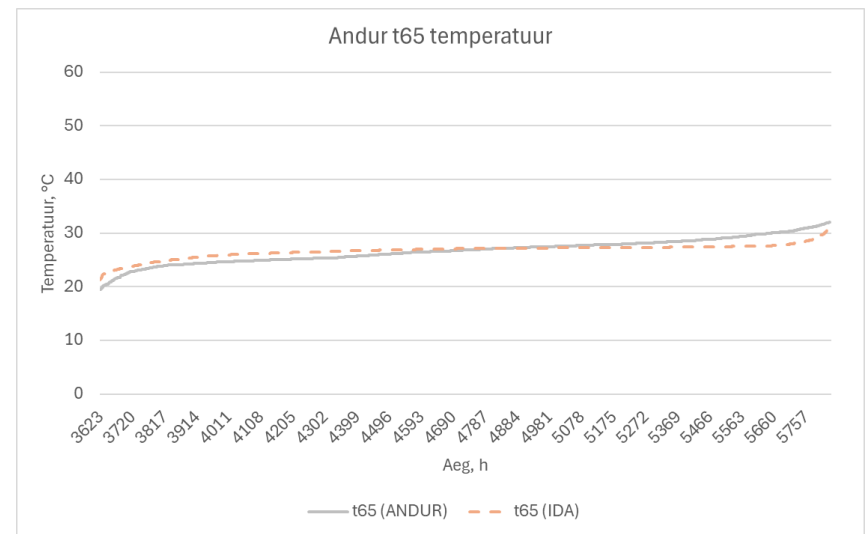
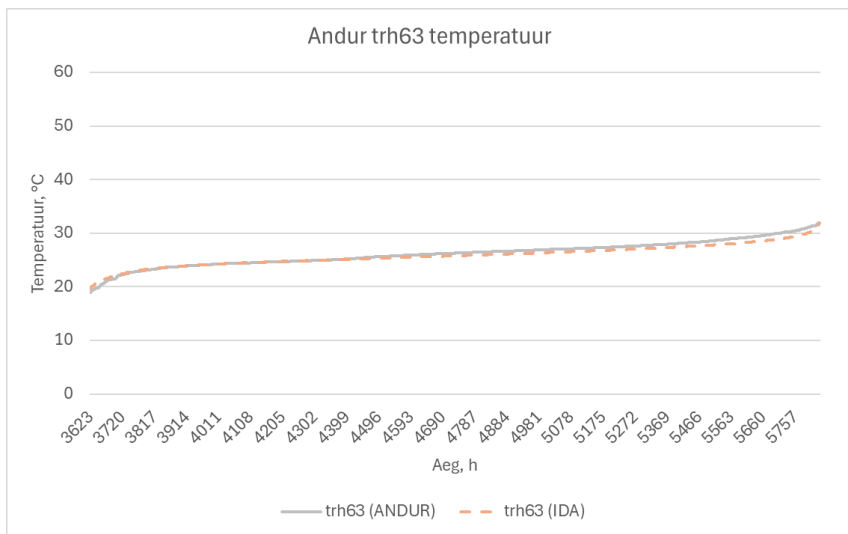
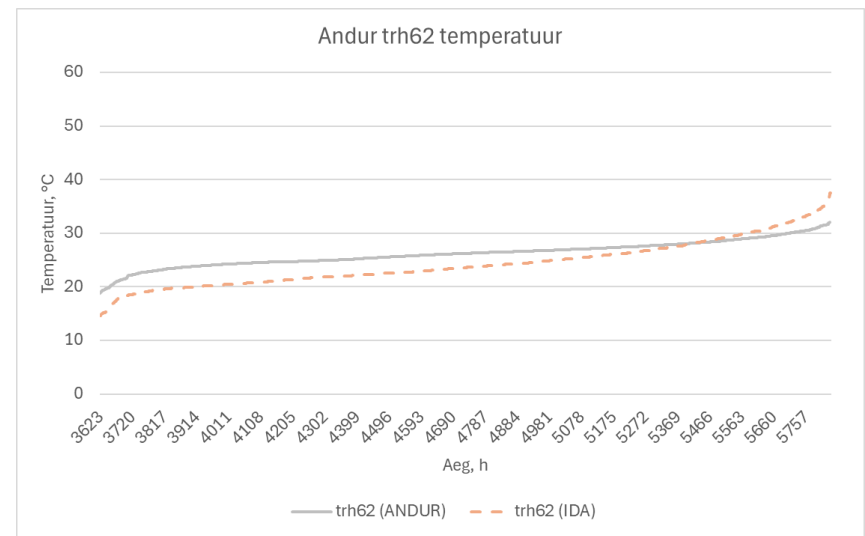
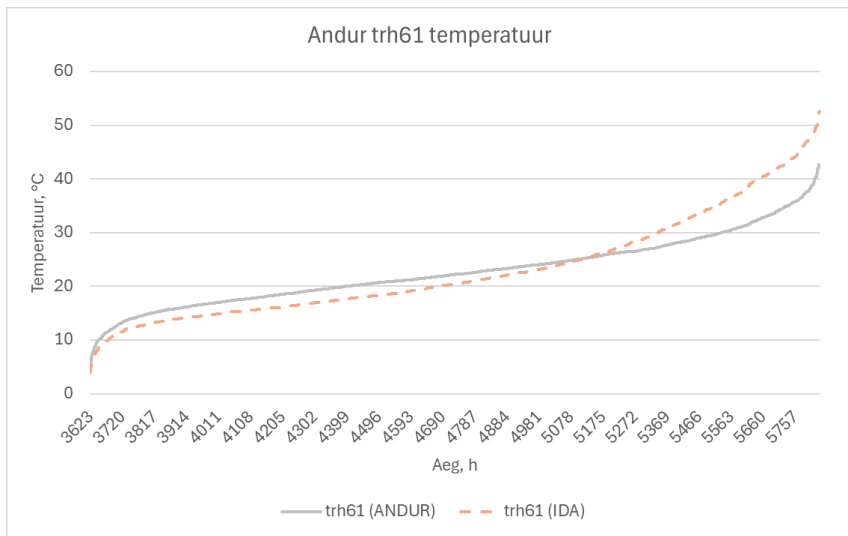
Lisa 4 Katusekonstruktsiooni KL2 kalibreerimistulemused





Lisa 5 Katusekonstruktsiooni KL3 kalibreerimistulemused





Lisa 6 Co-heating test tulemused juhtimisskeemita

