



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND  
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**SUVISE ÜLEKUUMENEMISE VÄLTIMINE JA  
PÄEVAVALGUSE NÕUETE TAGAMINE KEILA  
KOOLI NÄITEL**

**AVOIDING OVERHEATING AND ENSURING DAYLIGHT  
REQUIREMENTS ON THE EXAMPLE OF KEILA SCHOOL**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Sten Uritam

Üliõpilaskood 176443EAAM

Juhendaja: Martin Kiil, doktorant

Tallinn 2020

# AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

"25" mai 2020.

Autor: Sten Uritam

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

"25" mai 2020.

Juhendaja: Martin Kiil

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

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

Mina, Sten Uritam, (sünnikuupäev: 06.10.1991)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose  
Suvised ülekümnemise vältimine ja päevavalguse nõuete tagamine Keila Kooli näitel,

mille juhendaja on Martin Kiil,

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

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

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

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

---

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

(allkirjastatud digitaalselt)

25.05.2020

**TalTech ehituse ja arhitektuuri instituut**  
**LÕPUTÖÖ ÜLESANNE**

**Üliõpilane:** Sten Uritam, 176443EAAM  
**Õppekava, peeriala:** EAAM11/11 - Hoonete energiatõhusus  
**Juhendaja:** Doktorant, Martin Kiil, +372 5189963

**Lõputöö teema:**

Suvised ülekuumenemise vältimine ja päevavalguse nõuete tagamine Keila Kooli näitel.  
(inglise keeles) Avoiding Overheating and Ensuring Daylight Requirements on the Example of Keila School

**Lõputöö põhieesmärgid:**

1. Analüüsida suvised ülekuumenemise kontrollarvutuse vastavust määrusele nr 63 „Hoone energiatõhususe miinimumnõuded“.
2. Analüüsida päevavalgusteguri vastavust standardile EVS 894:2008+A2:2015
3. Pakkuda välja lahendused rahuldamiseks mõlemat analüüsitud nõuet samaaegselt

**Lõputöö etapid ja ajakava:**

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjanduse ülevaade ja meetodika	22.03.2020
2.	Hoone dünaamilise simulatsioonimudeli koostamine ning simulatsioonide läbiviimine	12.04.2020
3.	Tulemuste analüüs ning lahenduste välja töötamine kordussimulatsioonidega	25.04.2020
4.	Töö kokkuvõtte koostamine ning vormistus	18.05.2020

**Töö keel:** ..... **Lõputöö esitamise tähtaeg:** ".....".....201....a

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

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

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

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

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

# SISUKORD

EESSÕNA .....	8
SISSEJUHATUS .....	9
KIRJANDUSE ÜLEVAADE .....	11
1 TEOREETILISED ALUSED .....	12
1.1 Koolihoonete sisekliima .....	12
1.2 Hoone paiknemine kinnistul .....	12
1.3 Arhitektuurne lahendus / fassaadide kujundamine .....	14
1.4 Sisekliima .....	18
1.5 Päevavalgus.....	21
1.6 Ruumide valgustatus.....	23
2 METOODIKA.....	25
2.1 Uuritav objekt .....	26
2.1.1 Hoone konstruktsioonid.....	27
2.2 Simulatsiooni mudeli koostamine .....	29
2.2.1 Kasutatav tarkvara .....	29
2.2.2 Väliskliima andmestik .....	29
2.2.3 Mudeli loomine.....	29
2.3 Tsoonide info .....	31
2.4 Kasutusprofiilid.....	33
2.4.1 Valgustusvõimsuse vähendamine .....	34
2.4.2 Ventilatsiooni õhuvooluhulkade muutmine .....	35
2.4.3 Öine ventileerimine .....	35
2.4.4 Klaaside parameetrid ja akna sügavus fassaadis .....	36
2.4.5 Väline varjestus .....	36
2.5 Kõrvalhoone mõju.....	37
2.6 Päevvalgusteguri arvutamine.....	38
3 TULEMUSED JA ANALÜÜS .....	40
3.1 Algparameetritel põhinevad tulemused .....	40
3.2 Parameetrite muutmise mõju .....	41
3.2.1 Klaasi parameetrite muutmine .....	41
3.2.2 Päikeseläbivusteguri mõju päevvalgustegurile .....	42
3.2.3 Valguspaigaldise installeeritud võimuse vähendamine .....	44
3.2.4 Ventilatsiooni õhuvooluhulkade mõju .....	44
3.2.5 Öine jahutamine ventilatsiooniga.....	45

3.2.6 Akende sügavuse mõju ülekuumenemisele .....	46
3.2.7 Akende sügavuse mõju päevavalgustegurile .....	47
3.2.8 Välise varjestuse mõju ülekuumenemisele .....	48
3.2.9 Välise varjestuse mõju päevavalgustegurile .....	49
3.2.10 Kõrvalhoone mõju .....	50
3.3 Väljapakutav lahendus .....	51
3.4 Töö puudused, edasi arendamise võimalused .....	55
KOKKUVÕTE .....	57
SUMMARY .....	59
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	61
LISAD .....	64
Lisa 1 Tüüpklassiruumi valgustugevusarvutused .....	65

## EESSÕNA

*„Energiasäästlik tüpomorfoloogia on üks olulisemaid võtmeid energiatõhususe hoone projekteerimisel. See ei saa tugineda ainult arhitekti ruumivisioonil vaid pikem erinevate lahenduste energiasimulatsioonidel. Projekteerimismeetod peab muutuma intuiivsünteesivalt loogilis-analüütiliseks“ [1]*

Autor tänab magistritöö valmimisel kõiki jõu ja nõuga abiks olnud isikuid. Personaalsed tänusõnad töö juhendajale Martin Kiilile motivatsiooni tõstmise ning hoidmise eest.



## SISSEJUHATUS

Ülemaailmne soojenemine ning CO<sub>2</sub> kontsentratsiooni tõus on tänasel päeval teemad, mis on ajendiks erinevate kliimakokkulepete, arengukavade ning regulatsioonide välja töötamiseks. Globaalse kliimamuutuse välisõhutemperatuuri tõusu hoidmiseks alla 2°C on Euroopa Komisjon koostanud teatise, mille üks eesmärkidest on aastaks 2050 vähendada energiatarbimist 41% võrreldes 2005-2006. a. tipukasutusega [2]. Euroopa Liidu direktiivis 2010/31/EL [3] on välja toodud, et hoonete energiatarbimine moodustab ligi 40% kogu primaarenergia kasutusest, mis annab suure potentsiaali nii ökoloogilise jalajälje vähendamisele kui ka kulude kokkuhoiule.

Hoone tehnosüsteemide eksploatatsiooni kulusid saab väikese vaevaga vähendada, hoides ruumi õhutemperatuuri kütteperioodil ettenähtust madalamal või kasutada suveperioodil jahutusüsteemide asemel akende avamist. Kuid tegemist ei ole jätkusuutlike lahendustega ja samuti ei tohiks sisekliima kannatada kulude kokkuhoiupoliitika tõttu. Toimivate kulutõhusate lahenduste rakendamiseks ning energia kasutuse vähendamiseks tuleb arvestada hoone eripäraga juba projekteerimise algfaasis, kus vajalikke muudatusi saab teha „paberil“ ehk tänapäeva mõistes kolmemõõtmelises ehitise infomudelil. Iga järgmine samm hoone kasutuselevõtu suunas on üha kulukam ja hilistes staadiumites osaliselt võimatu.

Käesolev lõputöö keskendub projekteerimisfaasis oleva Keila Kooli juurdeehituse lõunafassaadile kui ka põhjaküljes olevatele klassiruumidele. Õppehoone laiendus kavandatakse ilma aktiivjahutuse ja mehaanilise ventilatsiooni jahutuseta. Ruumide ülekuumenemise vältimiseks on vaja kasutada varjestust või madala päikeseläbivusteguriga klaase. Teatud olukordades võib eelnimetatud võtete kasutamine muuta ruumides päevavalguse tagamise keeruliseks. Seetõttu on projekteerimise staadiumis võimalik teha nii tellijale kui ka projekteerijatele ettepanekuid projekti parendamiseks ning pakkuda välja lahendusi võimalike probleemide lahendamiseks seoses suvise ülekuumenemise ning päevavalgusteguriga

Uurimustöö eesmärk on teha ettepanekud fassaadi optimeerimisele päevavalgusteguri ning suvise ülekuumenemise nõuete alusel lähtuvalt läbiviidud analüüsi tulemustest. Hoone lõunaküljele on paigutatud klaasfassaadiga koridorid, kuhu ei ole planeeritud välist varjestust, mille puudumine võib tekitada ülekuumenemist. Seda eriti vahetundide ajal, kus koridoris viibib korraga suur hulk õpilasi. Samuti võib kitsas ning heledates toonides koridor tekitada valgusräigust liigse ereduse näol. Põhjaküljes asetsevates klassiruumides on oht liiga madalale keskmisele päevavalgustegurile

sügavate ruumide tõttu, kusjuures nõuete täitmisel peab arvestama välja töötatud akende paiknemist fassaadis. Põnevama arhitektuurse lahenduse saavutamiseks on aknad paigutatud nii horisontaalselt kui ka vertikaalselt ja välditud ühtset rütmi.

Uurimustöö tulemusena välja pakutavad lahendused peavad arvestama keskmise päevavalgusteguriga  $mDF > 2\%$ , kui ka suvisest ülekuumenemisest tingitud kraadtundide arvuga, mis peab jääma mittelehoonetel alla  $100^{\circ}Ch$  ajavahemikul 1.mai-15 juuni ning 15.august-30.september [4].Uurimustöö eesmärkide saavutamiseks analüüsitakse koolihooneassaadilahendust simulatsiooniprogrammi IDA Indoor Climate & Energy (IDA ICE) abil. Samuti viiakse läbi dünaamilised simulatsioonid erinevate varjestuslahendustega ning aknaklaasi omadustega. Suvise ülekuumenemise vältimiseks uuritakse valgustusvõimuse vähendamise ning ventilatsiooni õhuvooluhulkade suurendamise mõju. Uurimistöö tulemustest lähtuvalt pakub autor välja lahenduse, millega täita suvise ülekuumenemise päevavalgusteguri nõuded.

## KIRJANDUSE ÜLEVAADE

2000 aastate algusest on järjest enam hakatud kasutama ruumide aktiivseks jahutamiseks kliimaseadmeid, mis tekitab probleeme energiatasakaalule jahutuse tipukoormuse ajal. 2010 aastal vastuvõetud Euroopa Liidu direktiiv 2010/31/EL suunab võtma kasutusele strateegiaid, millega vähendada hoonete ülekuumenemist kasutades hoonevälist varjestust ning muid passiivseid jahutusmeetodeid [3]. Viimasele toetudes on Eesti Vabariigis välja töötatud „Hoonete energiatõhususe miinimumnõuded“ [4] ning „Hoone energiatõhususe arvutamise meetodika“ [5], mis sätestavad suvise ruumitemperatuuri kontrollarvutuste nõuded ning piirväärtused vastavalt hoonetüüpidele.

Energiatõhusa hoone saavutamiseks peab olema tihe koostöö tellija, arhitektide, sisekliima tagamise süsteemide inseneride ning energiatõhususe spetsialistide vahel juba eskiisi etapis, et suudetaks välja töötada parimad valikud hoone paiknemisele krundil, selle mahuline suurus ning kuju, mis on n.ö. energiatõhususe püramiidi alustaladeks [1]. Järgnevates etappides on energiatõhususe ning sisekliima tagamiseks tähtsal kohal fassaadide kujundamine, mis tugevalt mõjutab hoone jahutuskulusid ning ruumide päevavalgustegurit.

Energiatõhususe arvutamise meetodika järgselt on haridushoonete kasutusaeg 15.augustist kuni 15.juunini [5], ehk suvevaheajal hoonet ei kasutata. Sellest tulenevalt ei ole majanduslikult otstarbekas antud kasutusprofiiliga hoonetesse paigaldada aktiivjahutusseadmeid ning tekkinud liigsoojus tuleks viia välja ventilatsiooni abiga. Olenemata vähesest kasutusest suvisel ajal, ei tasu kevadist päikese intensiivsust ja suvelõpu madalamat päikesenurka alahinnata, mis võivad tekitada liigseid soojuskoormusi ruumides, eriti suurte klaaspindadega koolihoonetes. Fassaadide kujundamise eesmärk, seda eriti varajases projekti staadiumis, on jahutuskooormuse vähendamine ja seeläbi hoone energiatõhususe tõstmine. Üks võimalikest lahendustest on akende väline varjestamine või aknaklaaside päikeseteguri vähendamine.

Varjestuse abil hoitakse ära otsene päikesekiirgus, mis on soojal perioodil ruumide ülekuumenemise peamiseks põhjustajaks, ning vähendatakse valgusräigusest tekitatud ebamugavustunnet [6] [7] [8]. Teisest küljest välise varjestuse kasutamine või klaaside päikeseteguri langetamine alandab päevavalguse taset ruumis ning suurendab tehniliku valgustuse kasutamist. Viimane lisab omakorda ruumidesse vabasoojust ja tõstab hoone elektrienergiatarvet [6] [9].

# 1 TEOREETILISED ALUSED

## 1.1 Koolihoonete sisekliima

Koolihoonete kasutajad, kelleks peamiselt on õpilased, ei oska alati tähelepanu pöörata ruumide sisekliimale. Küll aga on sellest mõjutatud nii töövõime kui ka õppetulemused. Vähene ruumide õhustatus ning liiga kõrge või madal õhutemperatuur ruumis mõjuvad tööülesannete täitmisel pärssivalt ning võivad olla ohuks ka tervisele [10]. Eestis kasutusel olevad koolimajad on peamiselt ehitatud eelmise sajandi lõpus, mistõttu on nendes hoonetes puudulik ventilatsioon ja amortiseerunud küttesüsteemid. Riigi Kinnisvara AS poolt tellitud „Õppeasutuste sisekliima seireprogrammi“ tulemustest selgub, et süsihappegaasi tase ületab kõikides koolides soovituslikku piirmäära 1200 ppmi, tõustes kohati isegi 5000 ppm juurde. [11]

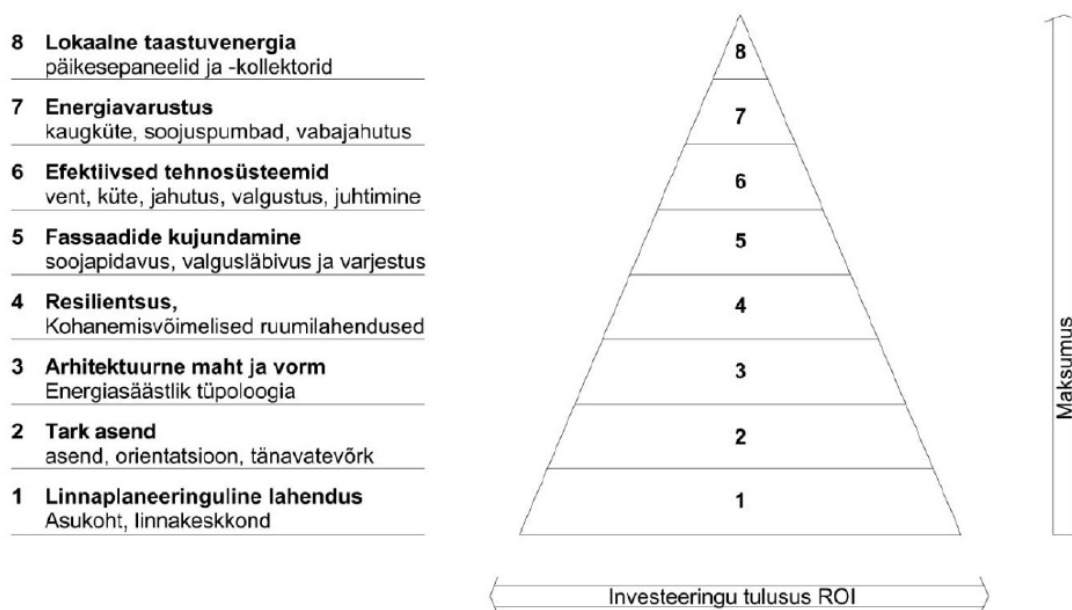
Aastatel 2005-2006 korraldati Tervisekaitseinspeksiooni plaani alusel sisekliima uuring koolides. Uuringu valimisse kaasati 158 koolihoonet, mis moodustas ca 25% kõikidest Eesti Vabariigi koolidest nendel aastatel. Õhupuhtuse kontrollide läbiviimisel mõõdeti õhus CO<sub>2</sub> taset, mida käsitleti peamise kvaliteedinäitajana. Uuritavatest objektidest 81,5% puudus mehaaniline ventilatsioon, mis teeb ruumide korrapärase ventileerimise keerukaks. 40 uuritud klassiruumi olid varustatud mehaanilise ventilatsiooniga, kuid neist 26 ruumis ületati CO<sub>2</sub> piirmäära – põhjusteks peamiselt otseste kulude kokkuhoiduga seotud probleemid nagu näiteks ventilatsioonisüsteemi hooldus ja käitamine. [12]

Olemasolevate koolihoonete seisukorda saab muuta paremaks rekonstrueerimise teel, rajades sinna sisekliima tagamiseks kaasaegsed tehnosüsteemid. Küll aga on majanduslikult otstarbekam läbi töötada võimalikud variandid ning probleemid projekteerimise staadiumis enne hoone ehitamist. Tervisekaitseinspeksiooni uuringust selgunud ekspluatatsioonikulude kokkuhoidmise aspekt tuleb koolihoone planeerimise käigus arvesse võtta ning leida võimalused tervisliku sisekliima tagamiseks soodsamate lahendustega. Käesolev lõputöö keskendub Keila Kooli juurdeehituse suvise ülekuumenemise ning päevavalgusteguri nõuete tagamisele võimalikult passiivsete meetodidega. Eesmärk on vähendada kulu aktiivsele jahutamisele või seda tervenisti vältida, säilitades päevavalgusteguri nõuded.

## 1.2 Hoone paiknemine kinnistul

Vähese energiakasutuse ning mugava sisekliimaga hoone saavutamise kulg algab juba linnaplaneerimise etapis. Kuivõrd linnaplaneerimisel ei keskenduta energiatõhususele,

määrab hoonete paiknemine planeeringu alal nii päikese, tuule kui ka välisest müra-  
tingitud mõju. Ehitiste orientatsioonist, korruselisusest, ruumide sügavusest ning  
hoonete vahelisest kaugusest sõltub efektiivne päikesevalguse kasutamine  
päevavalgusteguri näol ning sügistalvisel ajal küttekulude vähendamisega madalalt  
liikuva päikese abiga [1]. Energiatõhusate hoonete planeerimise kohta koostatud juhend  
arhitektidele ning projekteerijatele [1] annab suunised, millest lähtuda juba varajastes  
staadiumites. Juhend lähtub energiatarbimise kavandamise püramiidist (Joonis 1.1),  
mille kihid alumisest kuni ülemiseni iseloomustavad hoone kavandamise komponentide  
investeeringu tulususe (ROI – *return on investment*) osakaalu võrreldes nende  
maksimumusega.



Joonis 1.1 Energiatõhususe kavandamise püramiid [5]

Püramiid iseloomustab selgelt linnaplaneeringulise lahenduse tähtsust hoonete  
planeerimisel. Otsuste tegemine selles faasis mõjutab kogu kvartali või arenduse  
energiatarbimist. Esimeses etapis tehtud valikud peavad olema hästi planeeritud, sest  
on kõige suuremaks mõjutajaks hoonete elukaarekuludes.

Linnaplaneeringu mõju hoonete energiatarbimisele ning ruumide sisekliimale võib  
avalduda erinevalt – kütte- ja jahutusvajaduse kui ka loomuliku päevavalguse näol.  
Hoonete paiknemisest tingitud päikesevalguse kasutamist on analüüsinud H.Voll ja  
M.Thalfeldt et al. [13]. Läbiviidud töös uuriti naaberhoonestuse kauguse mõju  
viiekorruselise hoone insolatsiooni nõuete täitmisele ning keskmisele  
päevavalgustegurile, tagades samal ajal hoone energiatarbimise miinimumnõudeid.  
Autorite poolt on välja toodud, et mõlema nõude täitmiseks tihedalt asustatud alal ning

Tallinna laiuskraadil võib osutub keeruliseks ülesandeks, seda eriti liginullenergia hoonetes – põhjuseks just hea soojusisolatsiooniga majad, mis on tundlikumad ülekuumenemisele. Analüüsi tulemused näitavad, et lähihoonestuse mõju keskmisele päevavalgustegurile on suurem kui insulatsioonile – esimese kriteeriumi nõuetekohaseks täitmiseks nõuab suuremat vahemaad hoonete vahel. Ühest küljest mõjutab see hoonestusala maksimaalset kasutust, piirates hoonete kõrguse, kauguse ning ka arvu krundil. Teisest küljest tekitab keskmise päevavalgusteguri tagamine ruumides kõrgema ülekuumenemise riski, mistõttu peab kasutama aktiivjahutusseadmeid või välist varjestust. [13]

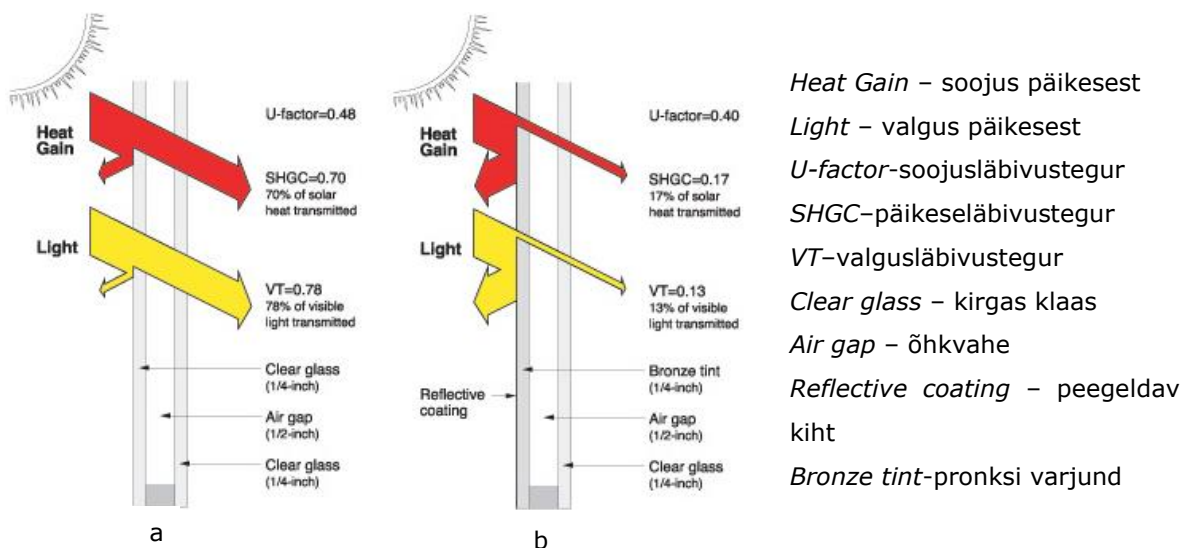
### **1.3 Arhitektuurne lahendus / fassaadide kujundamine**

Hoones paiknevate ruumide planeerimisel üritatakse ära kasutada iga ruutmeeter võimalikult efektiivselt. Kompaktsete lahendust leidmine erikujulise plaanilahendusega hoonete puhul võib osutada keeruliseks. Valgustusele kuluva energiakulu vähendamiseks oleks mõislik paigutada tööruumid rohkem päevavalgusega kaetud aladele – akende lähedusse – ning tehnilised ruumid, tualetid, šahtid pigem hoone sisemusse. Elektrikulu ei ole siinjuures ainus muutuja võrrandis – suurte akendega ruumides on suur oht suvisele ülekuumenemisele päikesekiirguse tõttu, seda eriti lõuna- ning läänepoolsetes külgedes.

Akendele mõeldud välise varjestuse puudumisel tekitab päikese otsene kiirgus suure soojuskoormuse ning valgusräigusega ebamugavustunde viibimistsoonis. Suurte klaaspindadega büroohonete puhul on vaatluste põhjal täheldatud, et päikselise ilmaga kasutatakse lõuna- ning läänepoolsetel külgedel akna täies ulatuses ruloosid või eettetõmmatud ribikardinaid. Päevavalgusest ning heast vaatest hoolimata eelistatakse kaetud avatäidetega ruumi ning tehislisku valgust. See on otsene viide päikesest tekitatud ebamugavustundele [14].

Passiivsete arhitektuursete lahendustega on võimalik eelnimetatud olukordasid leevendada või vältida. Kõige lihtsam ning enam kasutatav lahendus on tumendatud klaaside kasutamine või olemasolevate hoonete puhul täiendav aknaklaaside kiletamine, mis vähendab klaasi päikesekiirguse läbivustegurit  $g$ . Mida madalama päikesekiirguse läbivusteguriga klaas on, seda vähem siseneb aknale langevast päikesekiirgusest ruumi. Klaasi omadusi iseloomustab ka valgusläbivustegur  $T_{vis}$ , mis näitab kui suur osa nähtavast valgusest jõuab läbi klaasi ruumi. Eelnevad kaks näitajat on omavahel mõningal määral korrelatsioonis [15], kus liiga madala päikeseläbivusteguriga klaaside kasutamine võib põhjustada ebapiisava loomuliku

valguse ruumides või vastupidi. Sellest tulenevalt on ka soovitatud võimalusel kasutada päikesekiirguse blokeerimiseks varjestust. Allolev Joonis 1.2 kujutab kahte sarnase soojuslähivusega klaasi. Vasakpoolne on kirka klaasi ja madala päikesekiirguse lähivusteguriga, seevastu paremal on paketi välimine klaas toonitud ning lisatud peegeldav kiht.



Joonis 1.2 Kõrge (a) ning madala (b) päikeselähivusteguriga klaaspaketid [24]

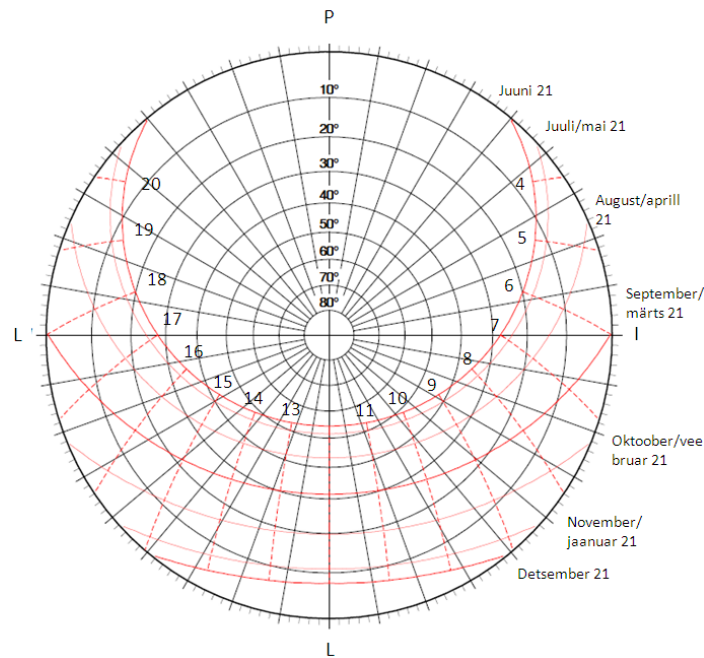
Valguslähivuse ja päikeselähivusteguri korrelatsiooni tõttu ei soovitata valida tugevalt toonitud ning peegeldavaid klaase, mille päikeselähivustegur langeb alla 25%. Sellisel juhul tunnevad enamus ruumis viibijatest väljavaadet ebapiisavaks ning samuti võib tekkida peegeldusest tingitud valgusräigust naaberhoonetele. [16]

Päikesekiirguse blokeerimine mõjutab otseselt keskmist päevavalgustegurit. Seejuures ülekuumenemise vältimiseks toonitud klaaspakettide kasutamisest väiksema mõjuga päevavalgustegurile on välise varjestuse kasutamine [17]. Varjestusel on eelnimetatud eelis, kuid puudusena seevastu piirab väljavaadet aknast. Otsese päikesekiirguse varjestamiseks on võimalik kasutada sisemisi kui ka välimisi lahendusi. Sisemised rulood või ribikardinad on päikesevalgusest tingitud räiguse tõrjumiseks efektiivsed, kuid ei takista päikesest tulenevat soojust ruumi ning pigem tõstavad ruumitemperatuuri kui langetavad. [15]

Välimisi varjestuslahendusi on mitmeid, mida saab ka omavahel kombineerida prima tulemuse saavutamiseks. Varjestuse tüübi valikul lähtutakse hoone asukohast, paiknemisest krundil ning arhitektuursest lahendusest. Enamkasutatavad lahendused on välised lamellid, välised sirmid, topelfassaad, kombineeritud varjestusega või

isevarjestav fassaad [15]. Konkreetsete hästi toimivate lahenduste väljatöötamine sõltub akende suuruselt ning nende orientatsioonist ilmakaarte suhtes.

Alloleval joonisel (Joonis 1.3) on kujutatud päikesediagrammi Tallinna laiuskraadil [18], mis on aluseks hoone varjestuse kavandamisel. Diagrammilt on näha, et hoone põhja poolsesse külge paistab päike kuni kella 07.00-ni hommikul alates 21. märtsist kuni 21. septembrini, mis tõttu ei ole selle hoone külje varjestamine vajalik ning lisaks osutub madal päikese tõttu ka keerukaks.

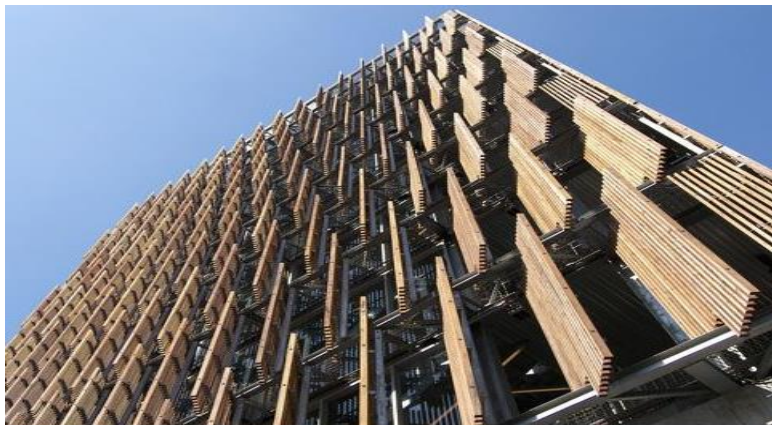


Joonis 1.3 Päikesediagramm laiuskraadil 59° [17]

Hoone lääne- ning idakülje varjestuse lahendused on päikese liikumise tõttu sarnased. Madala päikese varjestamine laiade akendega on keeruline, mistõttu on soovituslik planeerida nendesse külgedesse kõrged ning kitsad avad. Sirmide või lamellide kasutamisel sobivad vertikaalse paigutusega varjed või kombineeritult horisontaalse lahendusega, mis tekitab tagurpidi „L“-kuju [15]. Efektiveks lahenduseks on ka nurga all olevad vertikaalsed sirmid, mida on võimalik paigaldada nii statsionaarseid kui ka



dünaamilisi, mis on juhitud vastavalt päikese nurgale. Käesolevas töös kasutab autor idaküljel paiknevate akende varjestamist eelnimetatud statsionaarset lahendust.



Joonis 1.4 Vertikaalsete sirmide lahendus. Melbourni linnavalitsuse hoone [34]

Lõunakülge mõjutab päike kõige rohkem ning seda kogu aasta vältel. Arhitektuurselt tuleks lähtuda madala ning laia akna kavandamisega, mida on lihtsam varjestada. Varjestuselementidena sobivad horisontaalse paigutusega välissirmid ning teatud juhtudel ka kombineerimine vertikaalsete elementidega. [15] Eelpool mainitud varjestuslahendusi on linnapildis mitmeid, millest kaks on järgnevalt välja toodud. Olenemata vertikaalsete sirmide sobivusest pigem ida- või läänesuunal, toob autor välja Eestis, Viru Maakohu Jõhvi kohtumaja fassaadilahenduse. Arhitektuurselt on sobitatud kogu hoone perimeetrile vertikaalsed sirmid, mis sissekäigu juures presenteerivad end kui postid. Maitsekas sümbioos on sidunud nii tehnoloogilise lahenduse kui ka väljapaistva arhitektuurse lahenduse.

Horisontaalselt paigutatud sirmid on hoone lõuna küljel enamlevinud lahendus siin pool ekvaatorit. Päikese liikumise trajektoorist tulenevalt pakuvad need head varjestust, kuid samas ei langeta päevalgustegurit väga intensiivselt [19]. Seda tüüpi välisvarjestust on kasutatud ka ühel silmapaistvamal kontorihoonel, Sõpruse pst 157, mis on ühtlasi esimene *Green Building* kontseptsioonile vastav büroohoone Eestis [20].



Joonis 1.5 Vasakul Sõpruse pst 157, mille lõunakülg varjestatud horisontaalsete sirmidega [31] ja paremal Jõhvi kohtumaja, mille varjestuslahendusena kasutatud vertikaalseid sirme (paremal) [32]

R.Simsoni poolt läbiviidud doktoritöös [17] analüüsiti varjestuse mõju ülekuumenemisele ning päevavalgustegurile erinevate eluhoonete ja ilma aktiivjahutuseta mitteleuhoonete näitel. Elupindade jaoks töötati välja sirmide laiused, mis annaksid märkimisväärse tulemuse ülekuumenemise vältimisel - efektiivse tulemuse saavutamiseks peab lõuna fassaadil olema varjestuse pikkuse suhe varjestuse kõrgusse akna alumisest servast suurem kui 0,7. Sama number kehtib ka ida- ning lääne suunale kavandatavate vertikaalsete sirmidega, kuid nende puhul kasutada kõrguse asemel laiust sirmist kuni akna kaugeima servani. [17]

#### **1.4 Sisekliima**

Hoonete energiatõhusus sõltub sisekliima tagamiseks kasutatavate tehnosüsteemide energiakasutusest. Tänapäeval, kus enamus inimesi veedavad ligi 90% oma ajast siseruumides – kontoris, koolis või kodus – on mugava ning nõuetekohase sisekliima tagamine esmatähtis. Ruumi õhutemperatuuri, õhustuse või valgustuse arvelt kokkuhoidmine võib küll vähendada jooksvaid ekspluatatsioonikulusid, kuid mitmed uuringud on tõestanud, et pikaajalised mõjud on nii majanduslikult kui ka tervislikult kahjulikumad [21].

Hoonete planeerimisel peab arvestama inimeste heaoluga sisekeskkonnas ning sisekliima parameetrite valikul lähtutakse ruumide kasutusotstarbest. Näiteks siseõhu temperatuuri määramisel peab arvestama inimese füüsilise aktiivsusega ning tegevuse eripäraga. Lisaks õhutemperatuurile on ka teisi parameetreid, millest sõltub mugavustunne ning tervislik sisekliima. Peamised sisekliima komponendid, mis seda võivad mõjutada jagunevad kuueks, kuid sõltuvad omakorda mitmetest erinevatest parameetritest [14]:

- Soojuslik sisekliima
- Õhu kvaliteet ning puhtus
- Valgus
- Müra ja vibratsioon
- Ionisatsioon
- Elektromagnetlained

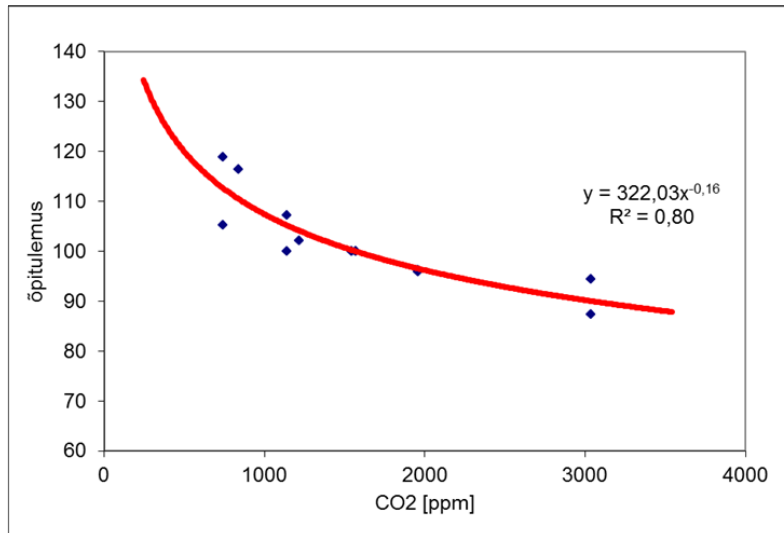
Esimest nelja komponenti tunnetavad inimesed vahetult oma organitega – kuulevad, näevad, tunnevad - küll aga viimased kaks parameetrit kuuluvad mõjurite hulka, mis tekitavad inimeses halba enesetunnet või halvemal juhul haigestumisi [10]. Hoonete planeerimisel tuleb siiski kõiki eelnimetatud arvesse parameetreid võtta, et saavutada mugav sisekliima ning tagada ruumis viibiva isiku tervis.

Tervisliku ning mugava sisekliima loomiseks on tehtud mitmeid uuringuid ning analüüse, et panna paika ruumi parameetrid, mis rahuldaksid suuremat osa ruumis viibijaid. Sisekliima hindamisel lähtutakse standardist EVS-EN 16798 mis täpsustab sisekliima seadeväärtused [22]. Eelnimetatud standard jagab sisekliima nelja erinevasse klassi:

Tabel 1.1 Sisekliima klasside kirjeldus

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

Riigi Kinnisvara AS toetusel Tallinna Tehnikaülikooli poolt läbiviidud uuringus [10] käsitleti kuue büroohoone ning kuue koolimaja sisekliimat, eesmärgiga hinnata sisekliimast tingitud tööviljakuse vähenemist, toetudes eelnevatele kvantitatiivsete uuringute tulemustele. Uuringus osalenud hoonete ventilatsioonimäära hinnati CO<sub>2</sub> kontsentratsiooni järgi õhus. Ainult ühes koolihoones jäi õhustuse määr sisekliima I ja II klassi piiridesse, seevastu büroohonetes ei täheldatud probleeme isegi mitte loomuliku ventilatsiooni korral. Ebapiisavast ventilatsioonist tingitud tööviljakuse langus on märkimisväärne ning osades koolides võrreldav üle aastase maha jäämisega õppetööst. Allolev joonis Joonis 1.6 kirjeldab süsihappe kontsentratsiooni ja õpitulemuste seost, mis oli läbi viidud uuringus tööviljakuse hindamise aluseks. [10]

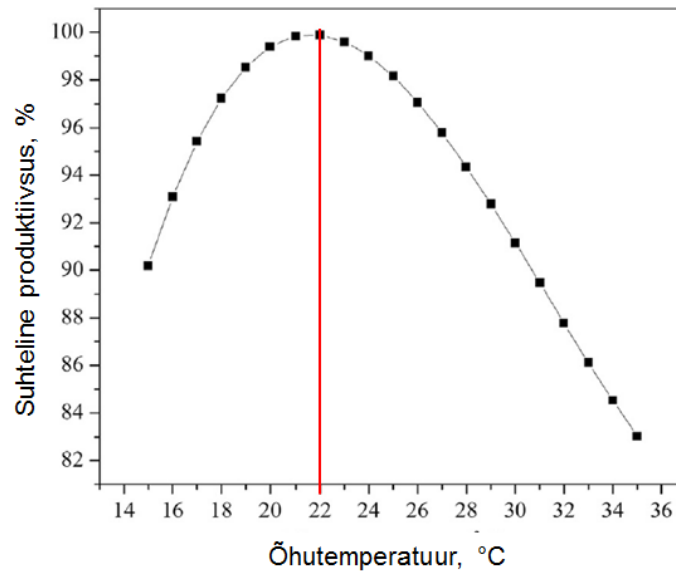


Joonis 1.6 Süsihappegaasi kontsentratsiooni ja õpitulemuse seos

Soojusliku sisekliima hindamisel märkimisväärset produktiivsuse langust ei täheldatud. Klassiruumide temperatuuri lühiajaliste mõõtmiste käigus täheldati mõningast ülekuumenemist, seda peamiselt kevadisel perioodil. Pikaajaliste mõõtmistulemuste analüüs näitas, et temperatuur jäi I ja II sisekliima klassi piiridesse. Kahe väljatoodud kontori mõõtmistulemused näitasid tugevat ülekuumenemist, seda eriti kütteperioodil. Üks uuritud kontoritest paiknes hoone teisel korrusel ning teine üheksandal korrusel. [10]

Töökeskonna sisekliimat tunnetavad kõik erinevalt – ebapiisav ventilatsioon mõjutab küll tugevalt tööviljakust, kuid tunnetuslikult tekitab ebamugavustunnet just liiga soe või jahe õhutemperatuur. Soojusolukorra tunnetus tekib mitme erineva teguri koostoimel ning oleneb ka indiviidist, mistõttu on väga raske leida õiget temperatuuri. Küll aga on erinevad uuringud välja toonud, et kõige optimaalsem ruumitemperatuur istuva töö juures on ca 22°C [10] [14].

Kontoritöötajate produktiivsust erinevate siseõhu temperatuuride juures on uurinud ka T. Kershaw ja D. Lash [23]. Nende uuringus kasutatud temperatuuri ning suhtelise produktiivsuse graafik oli aluseks ka RKASi toetusel Tallinna Tehnikaülikoolis läbiviidud uuringu majanduslikule analüüsile.



Joonis 1.7 Õhutemperatuuri ja suhtelise produktiivsuse seos [10]

Uuringu tulemustest selgub, et kütteperioodil esinenud ülekuumenemine on peamiseks tööviljakuse languse põhjuseks kontoripindadel. Sisetemperatuuridest ning suhtelise tööviljakuse seose abil arutati välja majanduslik kaotus tööandjale. Teise korruse kontoris esines vähem temperatuurist tingitud tööviljakuse langust, mis jäi aasta lõikes keskmiselt 18h inimese kohta. Üheksanda korruse kontori tööviljakus langes natuke rohkem, jäädes 28,8 h/a. [10]

Eeltoodud seosed suhtelise produktiivsuse ning sisekliima parameetrite vahel viitavad selgelt, et väljatöötatud sisekliima standarditel on kindel alus ruumi seadepunktide määramisel. Tööviljakuse vähenemine kehvast ventileerimisest on omajagu kõrgem kui õhutemperatuuri nihkumine soovitatust, kuid sellegipoolest peab tähelepanu pöörama ka ruumide ülekuumenemise vältimisele.

### 1.5 Päevavalgus

Ruumi õhuvahetusele ning temperatuurile lisaks on üks tähtsamatest sisekliima komponentidest valgus - elektromagnetkiirgus, mis tekitab inimese silmas valgusaistingu. Küll aga võib olla tehnilik valgus oma olemuselt ohtlik, mõjutades inimest, kes on pikalt viibinud puuduliku spektraalkoostisega valguse käes, võimalikke haigusnähtude ägenemist. Sagedateks juhtudeks on südame- ja vererõhuhaigused, vanaduslik dementsus, depressioon ning muud psühholoogilised haigused [24].

Päevavalgus mõjutab inimese füüsilist ning vaimset tervist positiivselt ning on vajalik bioloogilise rütmi tasakaalus hoidmiseks [25]. Hoonete planeerimisel oskuslikult päevavalguse kavandamine vähendab tehniliku valguse kasutamist, mis tagab ka madalamad kulud valgustusele kui ka suvisel perioodil jahutusele. Päevavalgus koosneb hajuskiirgusest ning otsesest päikesekiirgusest, mis on erinevate omadustega, kuid mõlemad mängivad suurt rolli ruumi üldises valgustuses. [18]

Päevavalgustegur näitab ruumisisesest ja -välise horisontaalse valgustustiheduse suhet. Ruumisisesest üldist valgustihedust iseloomustatakse keskmise päevavalgusteguriga. Ruumide valgustatust loetakse piisavaks kui keskmine päevavalgustegur on üle 2%, mida kõrgemaks väärtus läheb, seda rohkem on ka valgustatust. Küll aga peab valgusräiguse vältimiseks arvestama, et oleks tagatud ka valguse ühtlus ruumis. Nii madalama päevavalgusteguriga kui ka parema ühtlusteguriga ruum võib osutada paremini valgustatuks kui vastupidises olukorras. Keskmine päevavalgustegur arvutatakse [25]:

$$\bar{D} = \frac{TA_w\theta}{A(1-R^2)} \quad (1.1)$$

kus

T – klaaside hajuv valguse tegur, mis sisaldab määrumise mõju;

$A_w$  – kogu akna klaasitud ala  $m^2$ , mis asub tööpinnast kõrgemal;

$\theta$  – nähtava taeva nurk (kraadides);

A – lae, põranda ja seinte kogupindala koos akendega ( $m^2$ );

R – sisepindade (A) peegeldustegurite kaalutud keskmine (Valgete lagede ja keskmise peegelduvusega ruumide puhul võib võtta väärtuseks 0,5).

Päikesevalguse sissepääs ruumidesse peab olema kontrollitav tsoonides, kus inimesed püsivalt viibivad, näiteks töökohtadel, mis paiknevad välisseinte vahetus läheduses. Läbimõttlemata lahendus võib tekitada valgusräigusest ning liigsoojusest tulenevalt ebamugavustunnet ruumis viibijale. Päikese valguse kontrollimine võib toimuda nii varjutamise kui ka korrektse ruumide paigutusega, mis vähendab võimalikku ohtu. [25]

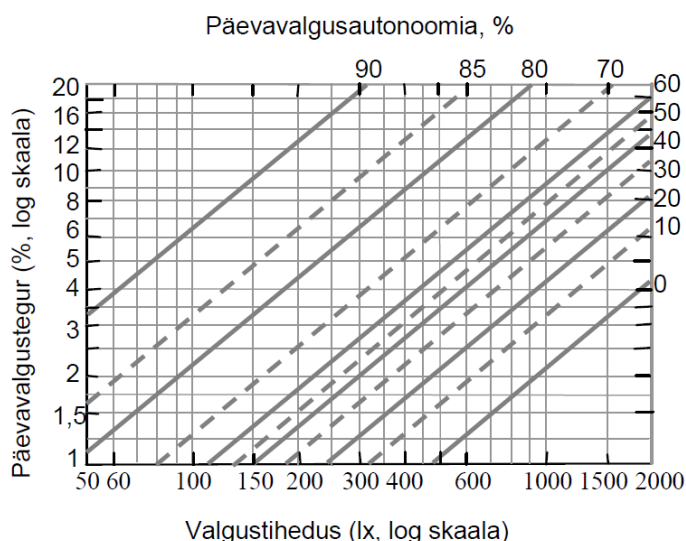
Käesoleva lõputöö uuritava objekti klassiruumid paiknevad hoone põhjaküljel ning Eesti laiuskraadile omaselt võivad jääda need ruumid väheselt valgustatuks loomuliku valguse poolt. Ruumide keskmise päevavalgusteguri hindamiseks antud magistritöös viiakse läbi päevavalgusteguri analüüs simulatsioonprogrammi abil ning tehakse ettepanekud lähtuvalt standardist EVS-894:2008+A2:2015 „Loomulik valgustus elu- ja

bürooruumides". Eelnimetatud standardi järgi peavad klassiruumid vastama vähemalt keskmisele päevvalgustegurile 2% [25].

### 1.6 Ruumide valgustus

Päevvalguse kvaliteedi hindamiseks ruumis kasutatakse ka päevvalgusautonoomiat, mis hindab tehniliku valguse kasutamise vajalikkust ning aega kui sisemine valgustihedus ruumis on kõrgem kui määruste või standarditega ette nähtud [18]. Eestis kasutatakse töökoha valgustatuse reguleerimiseks määrust nr 176 [26], mille ülesehitamisel on toetunud standardile EVS-EN 12464 [27]. Eelnimetatud standard seab kvaliteedi- ning kvantiteedi nõuded siseruumides olevatele töökohtadele, kus klassiruumides peab olema saavutatud valgustihedus vähemalt 300 lx.

Päevvalgusautonoomiat Tallinnas kujutab Joonis 1.8 [16], kus on omavahel seotud nii päevvalgustegur ning valgustihedus. Kasutades standardites ning määrustes väljatoodud väärtusi klassiruumide päevvalgusteguri ( $D=2\%$ ) ning valgustustiheduse (300lx) kohta, näitab Joonis 1.8, et sellistel tingimustel oleksid nõuded täidetud ligi 40% tööajast. Kui ruumides saavutada kõrgem päevvalgustegur, näiteks 3, oleks nõuetekohane valgustihedus tagatud ligi 65% tööajast. Vaadeldes seda elektervalgustuse kasutamise seisukohast langeks tehniliku valgustuse kasutamine 60%-lt 35%-ni, mis tähendab umbes 41% väiksemat elektrienergia kulu valgustusele.



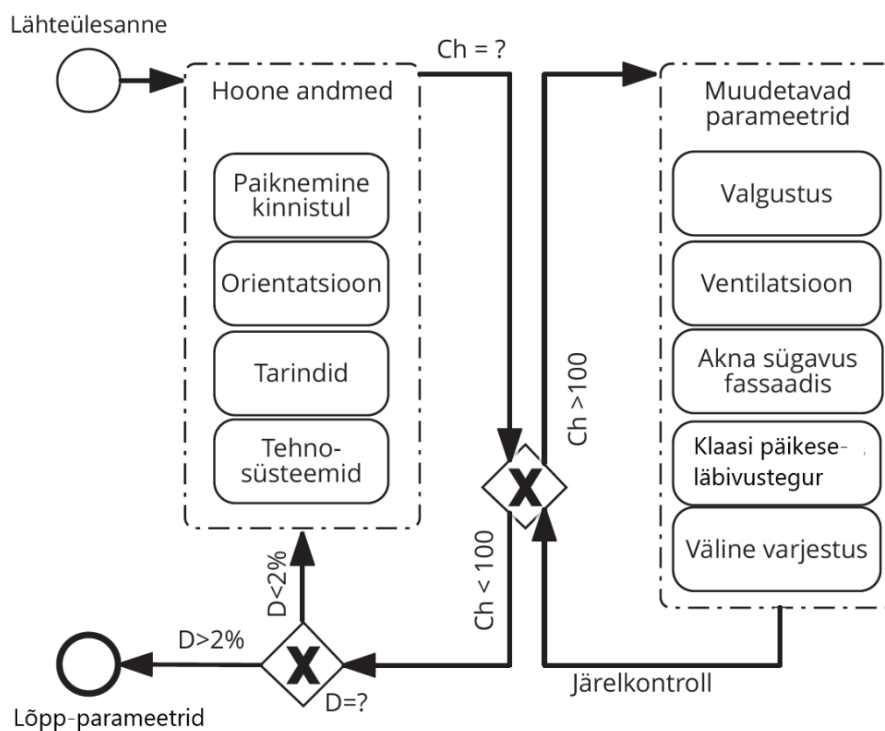
Joonis 1.8 Aastane päevvalgusautonoomia Tallinnas kell 9.00-17.00 [22]

2014 aastal viidi läbi uuring Tallinna Linnavalitsuse juurdeehituse varjestamiseks [19], mille eesmärk oli pakkuda välja võimalikud varjestuslahendused juurdeehituse sisekliima parandamiseks. Uuring hõlmas erinevate välisvarjestuste mõju päevavalgustegurile ning päevavalgusanatoomiale. Simulatsiooni mudelis kasutati sarnaselt käesolevale tööle vertikaalseid ning horisontaalseid ribisid ning lisaks nende kombinatsiooni kui ka topelfassaadisüsteemi, mille kanga läbipaistvuse teguriks valiti 0,3. Uuringu tulemustest selgus, et välise varjestuse kasutamine vähendab päevavalgusautonoomiat ning on seotud otseselt varjestuse efektiivsusega. Kõige enam mõjutab tulemusi topelfassaadi kasutus, mille puhul väheneb päevavalgusautonoomia järsult ruumi keskmises osas ning langeb ruumi tagumises otsas nulli lähedale, kui teiste lahenduste puhul jäid väärtused 28% ja 15% vahemikku. [19]



## 2 METOODIKA

Koolihoone ülekuumenemise vältimiseks ning nõuetekohase päevavalguse tagamiseks koostatud dünaamiline simulatsioonimudel sisaldab lähteandmeid eelprojektist [28] (konstruktsioonid, arhitektuurne lahendus, paiknemine kinnistul) ning nõudeid, mis tulenevad eelnimetatud hoonete energiatõhususe määrustest [4] [5]. Hoone fassaadi ning tehnosüsteemide optimeerimist alustatakse suvise ülekuumenemise nõudest.



Joonis 2.1 Protsessi skeem, kus D tähistab keskmist päevavalgustegurit ning Ch ülekuumenemisest tingitud kraadtundide arvu

Käesoleva lõputöö lähteülesandeks on Keila Kooli juurdeehituse päevavalgusnõuete tagamine ning suvise ülekuumenemise vältimine, mille alusandemeteks on Projektibüroo OÜ poolt koostamisel eelprojekti staadiumis „Keila Pargi 2 koolihoone laienduse ehitusprojekt“, töö nr. 2029.

Suvise ülekuumenemise hindamisel lähtutakse mitteeluhoonetele seatud piirtemperatuurist  $+25^{\circ}\text{C}$ , mida ei tohi ületada 100 kraadtunni ulatuses perioodil 1. mai kuni 30. september, millest on välja jäetud koolivaheaeg 16.juuni kuni 14.august [4]. Kraadtundide summa saadakse simulatsiooniarvutuse põhjal saadud tunnipõhistest siseõhutemperatuuridest. Iga tunni keskmisest siseõhutemperatuurist lahtutakse maha piirtemperatuur  $+25^{\circ}\text{C}$ , nendest väärtustest suuremad kui 0,0 summeeritakse

kontrollperioodil, mille kogusumma ei tohi ületada piirväärtust 100 kraadtundi [29]. Simulatsiooni järgsete analüüside tulemuste põhjal hindab autor muudetavate parameetrite vajalikkust, mis on kujutatud Joonis 2.9. Lõunasuunas paiknevate ruumide ülekuumenemise vältimiseks on vaja kasutada tõenäoliselt meetmete kombinatsioone või kõiki meetmeid.

## 2.1 Uuritav objekt

Käesoleva lõputöö uuritavaks objektiks on Keila Kooli õppehoonele projekteeritav laiendus. Projekteeritava hoone laienduse eel- ning põhiprojekt koostatakse ettevõttes, kus autor töötab, mis andis tõuke seda uurida lähemalt ning võimalusel teha ettepanekuid lähtuvalt töö tulemustest.

Olemasolev hoone koosneb kolmest erineval ajal ehitatud osast, millest vanim kuulub kultuurimälestiste hulka - hoone valmis aastal 1929, olles Eestis ainulaadne Vabadussõjas langenutele ehitatud mälestusmärk. Hetkel paikneb seal Keila algkool. Eelmise sajandi keskpaigas ehitatud Keila Ühisgümnaasiumi osa ning algkooli ühendab 1960-ndatel valminud 4-korruseline silikaattelistest hoone. Hoonete kompleks asetseb Pargi tänavaga paralleelselt, peasissepääsudega lõunapoolsel küljel.



Joonis 2.2 Olemasoleva koolihoone paiknemine kinnistul Pargi tänaval, Keila linnas, Harjumaal

Juurdeehitus hakkab osaliselt paiknema olemasolevate hoonete taga. Uue ning olemasolevate hoonete ühendus luuakse kahe koridoriga. Projekteeritav uus hooneosa jaguneb kaheks suuremaks plokiks – söökla ja võimla osa ning klasside-koridori plokki. Kõik õppeklassid on paigutatud hoone põhjapoolsesse osasse. Kitsaste koridoride tõttu on lõunapoolsed aknad lahendatud klaasfassaadsüsteemina, et anda juurde avarust

ning valgust. Klasside-koridoride osas on ette nähtud kolmes erinevas suuruses horisontaalse ning vertikaalse paigutusega aknad, mis tekitavad kaootilise rütmi [28].



Joonis 2.3 Keila Kooli laienduse 3D illustratsioon [27]

Projekteeritava hoone küttesüsteem on efektiivse kaugkütte [4] baasil ning jaotus põrandküttena. Ventilatsiooni lahendusena kasutatakse kolme erinevat seadet, mis varustavad vastavalt klassiruumid-koridorid, võimla ja riietusruumid, köök ja söökla

Tabel 2.1 Koolihoone laienduse tehnilised andmed [28]

Hoone address	Pargi tn 2, Keila, Harjumaa
Kasutamise otstarve	12632 Põhikooli või gümnaasiumi õppehoone
Korruselisus	3
Kõrgus, m	14,5
Ehitalune pind, m <sup>2</sup>	2125,3
Hoone suletud brutopind, m <sup>2</sup>	5381,5
Hoone suletud netopind, m <sup>2</sup>	4834,5
Hoone köetav pind, m <sup>2</sup>	4834,5

### 2.1.1 Hoone konstruktsioonid

Keila Kooli juurdeehituse eelprojektis on lahendatud klasside-koridori plokk ning võimla plokk erinevate kandekonstruktsioonide lahendustega. Esimese kandekonstruktsiooni moodustavad täisbetoneeritud kergplokkidest kandvad seinad ning vahelagedes

monteeritavad raudbetoonist õõnespaneelid, klaasfassaad toestatakse raudbetoonpostide ja -taladega. Võimla kandekarkassi moodustavad monteeritavad postid, monteeritavad kolmekihilised raudbetoonelemendid, monteeritavad vahelaepaneelid ja liimpuittalad. Kõik välisseinad soojustatakse 300 mm kivivillaga, et tagada madal soojusjuhtivus (vt. Tabel 2.2) [28]. Katuslae monteeritavad raudbetoonist õõnespaneelid soojustatakse 550 mm vahtpolüstüreeniga

Tabel 2.2 Tarindite soojusjuhtivus [28]

<b>Tarind</b>	<b>W/(m<sup>2</sup>·K)</b>
Välissein	0,10
Katuslagi	0,08
Põrand pinnasel	0,08
Põrand välisõhu kohal	0,18
Välisuks	1
Aken	0,80
Aken (klaas / raam)	0,60 / 1,60

Külmasildade joonsoojuslähivuse väärtuse määramise puhul on lähtunud KredExi liginullenergia hoonete projekti raames koostatud piirdetarindite liitekohtade joonsoojuslähivuse kataloogist [30] ning eelnevates sarnastes projektides kasutatud väärtustest.

Tabel 2.3 Külmasildade joonsoojuslähivused

<b>Külmasild</b>	<b>W/(m·K)</b>
VS-VS, välisnurk	0,06
Aken-sein	0,04
Uks-sein	0,04
VS-katus	0,08
VS-põrand pinnasel	0,24
VS-VS, sisenuk	-0,06

Eelprojekti järgselt on ruumidesse ettenähtud PVC profiiliga 3-kordsed klaaspakett aknad. Klaasfassaadsüsteemi jaoks on valitud 3-kordse klaaspaketiga alumiiniumprofiil raamiga aknad. Hoone infiltratsiooni arvu ei ole muul viisil tõendatud, seega käesolevas töös lähtutakse õhulekkearvust 2,5 m<sup>3</sup>/(h·m<sup>2</sup>)

## **2.2 Simulatsiooni mudeli koostamine**

### **2.2.1 Kasutatav tarkvara**

Uurimisobjekti analüüsiks kasutatakse Rootsi ettevõtte poolt väljatöötatud dünaamilise energiasimulatsiooni programmi IDA ICE (EQUA Simulation AB) [31]. Eelnimetatud programm vastab määruse „Hoone energiatõhususe arvutamise meetoodika“ tingimustele ning on valideeritud nii Euroopa Liidu standarditele kui ka ASHRAE poolt [31]. IDA ICE võimaldab jagada hoone erinevateks tsoonideks ning anda neile vastavad sisendid ning parameetrid nagu siseõhu- või sissepuhkeõhu temperatuur, õhuvahetuse määr, vabasoojuste nagu inimeste, valgustuse ja seadmete arv ning soojuseraldus ruumis jne, millede alusel viiakse läbi dünaamiline energiasimulatsioon. Programmil on samuti võimekus viia läbi päevavalgusteguri arvutusi, mis käesolevas lõputöös on uurimisel.

### **2.2.2 Väliskliima andmestik**

Läbiviidud energiasimulatsioonides on kasutatud T.Kalamees ja J.Kurnitski poolt koostatud Eesti energiaarvutuste baasaastal põhinevat kliimafaili Estonian TRY (*Test Reference Year*). Testaasta koostamisel on kasutatud ajavahemikus 1970-2000 kliimaandmeid erinevatest Eesti linnadest ning sisaldab tunnipõhist andmestikku välisõhutemperatuuri, õhuniiskuse, päikesekiirguse, tuule suuna ning kiiruse kohta [32]. Testaasta kuud on valitud eelnimetatud perioodil kõige tüüpilisemad, millede üleminek ühelt teisele on tehtud sujuvaks.

### **2.2.3 Mudeli loomine**

Uuritava objekti energia simulatsioonimudeli loomise aluseks on võetud Projektibüroo OÜ poolt koostatud eelprojekti staadiumis olevad arhitektuurised plaanid, vaated ja lõiked *.dwg*-formaadis [28].

Mudeli ülesehitamisel on arvestatud olemasoleva koolimajaga ning lisatud hoone massiiv (*building body*), mis paikneb juurdeehituse suhtes lõunasuunas. Olemasolev hoone on oluliseks mõjutajaks päikesekiirgusest tekkiva ülekuumenemise vältimisel ning mõjutab keskmise päevavalgusteguri arvutusi. Hoone idaküljes paiknev võimalisöökla plokk on samuti lisatud simulatsiooni hoonemassiivina sisse, et arvestada selle varjestuse mõju koridoride osale.

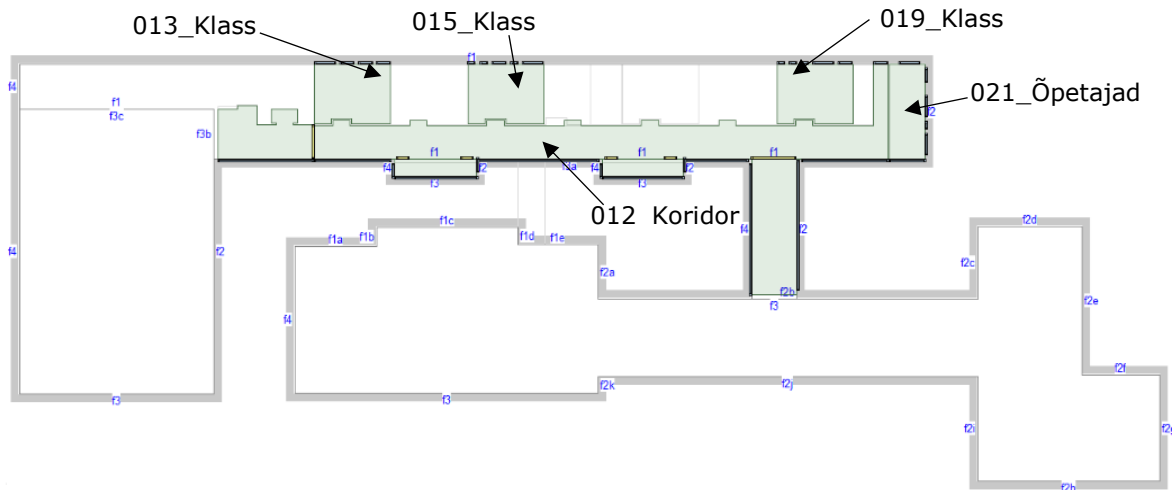
Päikese mõju hinnatakse käesolevas töös autori poolt välja valitud ruumidele. Simulatsioon sisaldab kaheksat klassiruumi, mille aknad on suunatud põhja ning

paiknevad kolmel erineval korrusel, et analüüsida erinevate tarindite – põrand pinnasel ja katuslagi - mõju ülekuumenemisele. Kaks hoone idaküljes paiknevat õpetajate tuba, mille põhifassaad on suunatud idasse, kuid millel lisaks on aknad ka põhja- ning lõunasuunda. Kõige suurema ülekuumenemise riskiga on koridorid ning nendega ühendatud galeriid, mille klaasfassaad on suunatud täielikult lõunasse. Kolme korruse koridorid on lisatud mudelisse, et hinnata erinevate tarindite mõju kui ka olemasoleva koolihoone varjustusest tingitud eeliseid või puuduseid. Samuti analüüsitakse, kuidas võivad mõjutada ülekuumenenud koridorid klassiruumide temperatuuri soojusülekanne mõjul. Nii simulatsioonis kui ka käesolevas töös kasutatavad ruumide tähised on kujul „013\_klass“. Tähise eesoleva koodi esimene number tähistab korrust, kusjuures 0 loetakse 1. korruseks. Ruumide nimetused on vastavalt kasutusotstarbele.

Tabel 2.4 Ruumide tabel

Ruumi kood	Ruumi nimetus	Põranda pindala, m <sup>2</sup>	Akna pindala, m <sup>2</sup>	WFR
012	Koridor	362,15	165,81	0,46
013	Klass	63	14,76	0,23
015	Klass	63,03	13,12	0,21
019	Klass	63,09	13,12	0,21
021	Õpetajad	47,31	32,70	0,69
108	Koridor	364,58	151,61	0,42
111	Klass	62,96	11,48	0,18
117	Klass	62,95	13,12	0,21
204	Koridor	387,57	181,50	0,47
207	Klass	62,96	13,12	0,21
211	Klass	62,93	11,48	0,18
213	Klass	62,94	13,12	0,21
215	Õpetajad	47,83	32,16	0,67

Joonis 2.4 on kujutatud simulatsiooni mudelisse lisatud esimese korruse plaan. Mudelisse on kaasatud 8 klassiruumi, 2 õpetajate tuba ning kõikide korruste koridorid.



Joonis 2.4 Simulatsioonimudeli esimene korrus



Joonis 2.5 Vaade põhjaküljele

Joonis 2.5 illustreerib, millised alad on simulatsioonimudelisse kaasatud. Osadel väljajäetud ruumidest võimla-söökla plokis on ette nähtud jahutussüsteem või puuduvad aknad välisfassaadil (nt tehnoruumid). Käesolevas töös ei ole nimetatud ruumide mõju uuritud ega nendega arvestatud.

### 2.3 Tsoonide info

Tsoonide parameetrite lisamisel ning kasutusprofiilide loomisel on kasutatud Eesti Vabariigi määruste nr.63 [4] ning nr.58 [5] ettekirjutatud väärtusi, mida rakendatakse

mitteelamute ja haridushoonete energiatõhususe miinimumnõuetele vastavuse tõendamiseks ning suvise ruumitemperatuuri kontrolli läbi viimiseks. Ruumide kütteseadmed on mudelis ideaalsete kütteelementidena (*ideal heater*), mille soojusväljastuse võimsus on tõstetud kõikides ruumides piisavalt kõrgele, et tagada simulatsioonides kiire ruumi soojenemine ning piisav soojusvõimsus. Aktiivjahutusseadmeid ega ventilatsiooni sissepuhkeõhu jahutamist esialgse meetmena ei kasutata – mudelis on välja lülitatud ventilatsiooniseadme jahutuspatarei (*cooling coil*). Tulenevalt energiatõhususe miinimumnõuetest on ventilatsiooni õhuvahetuseks määratud  $3 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$  ning ruumide ülekuumenemise vältimiseks on sissepuhke temperatuuriks  $+18^\circ\text{C}$ . Ruumide kütte ning jahutuse temperatuuri seadearvud tulenevad samuti määrusest, mille alusel ka suvist ülekuumenemist arvutatakse. Ruumide kütmise seadeväärtus on  $+21^\circ\text{C}$  ning jahutusel  $+25^\circ\text{C}$ .

Vabasoojuskooormuste määramisel on haridushoonetes eristatud ruume vastavalt kasutusotstarbele – nõupidamisruumid, arvutiklassid, klassiruumid ning muud ruumid. Käesolevas töös vaadeldakse klassiruumid ning „muid“ ruume, mille alla liigituvad õpetajate toad ning koridorid. Muude ruumide vabasoojuskooormused on valitud samad, mida kasutatakse simulatsioonides energiaarvutuste jaoks. Määruse poolt etteantud vabasoojuste võimsused käivad inimeste, seadmete ning valgustuse kohta  $\text{W}/\text{m}^2$  (Tabel 2.5).

Piirdetarindite konstruktsioonid koos eeltoodud soojuslähivustega on võetud arhitektuursest eelprojektist [28]. Siinkohal on tähtis sisestada mudelisse ka konstruktsioonide kihid, sest ruumide soojuslikku käitumist mõjutavad ka seinte, lagede ning põrandate massiivsusest tulenev soojusmahtuvus.

Infiltratsioon ehk läbi tarindite ebatiheduste, pragude kaudu liikuv kontrollimatu õhuvooluhulk sõltub materjalidest, väliskliimast kui ka õhurõhkude vahest. Olemasolevate hoonete õhulekkearvu saab tõendada rõhutestiga, mille korral paigaldatakse ühte hoone avasse, näiteks ukseavasse, seade, millega tekitatakse hoones ala- või ülerõhk ning mõõdetakse läbi seadme liikuvad õhuvoolu hulka. Kui välispiirete õhuleket ei ole mõõdetud või tõendatud muul viisil peab uute hoonete puhul kasutama väärtust  $2,5 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$  [5], mida on ka käesolevas uurimistöös kasutatud. Kasutatud lähteandmed koos akende ning klaaside parameetritega on välja toodud allolevas tabelis Tabel 2.5.



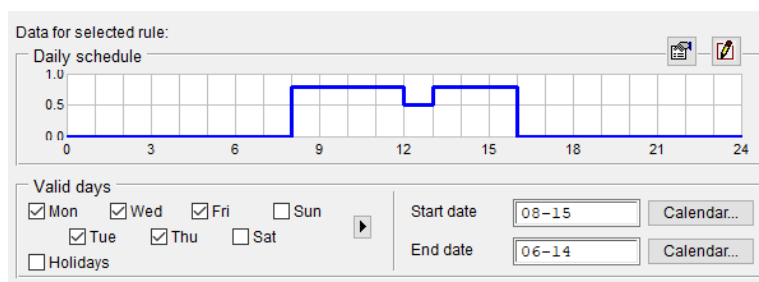
Tabel 2.5 Simulatsiooni lähteparameetrid

Simulatsiooni lähteparameetrid		
	Klassiruum	Muu ruum
Inimesed W/m <sup>2</sup>	35	14
Seadmed W/m <sup>2</sup>	12	8
Valgustus W/m <sup>2</sup>	15	12
Seadeväärtus kütmiseks, °C	21	
Seadeväärtus jahutamiseks, °C	25	
Õhuvooluhulk l/(s·m <sup>2</sup> )	3	
Ventilatsiooni soojustagastus, %	70	
Klaaside päikeseläbivustegur <i>g</i> , -	0,68	
Klaaside valgusläbivustegur <i>T<sub>vis</sub></i> , -	0,74	
Raami osakaal aknast, %	0,15	
Akende sügavus fassaadis, m	0,0	

## 2.4 Kasutusprofiilid

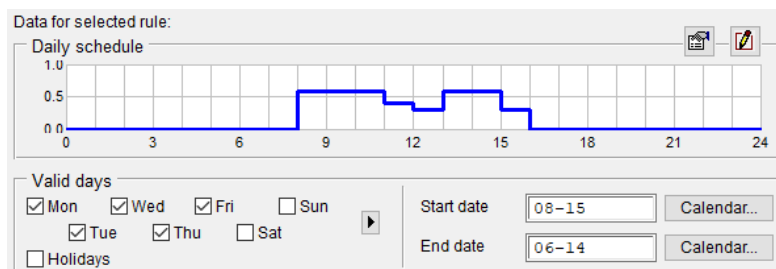
Hoonete suvise ülekuumenemise kontrolli puhul tuleb arvesse võtta vabasoojuseid seadmetelt, valgustusest ning inimestest. Koolihoonete puhul eeldatakse, et hoonet kasutatakse 15.augustist kuni 15. juunini, nende vahelist perioodi käsitletakse vaheajana, kus õpilasi koolis ei viibi, ei kasutata seadmeid, valgustust ning samuti ei vaja hoone nii palju ventileerimist. Sellel perioodil on kasutusaste 0,1. Dünaamilistes simulatsioonides tuleb kasutada energiatõhususe arvutamise meetodikas [5] väljatoodud kasutusprofiile, mis määravad eelnimetatud vabasoojuskoormuste kasutuse ööpäeva lõikes, 1 tunnise täpsusega.

Hoone kasutusotstarbe kohaselt on haridushoonete kasutusaeg viis päeva nädalas, ajavahemikul 8.00-16.00. Klassiruumide suvise ülekuumenemise kontroll viiakse läbi joonisel Joonis 2.6 oleva kasutusastme profiiliga, mis on aluseks seadmetelt, valgustusest ning inimestelt tuleva vabasoojuse arvutamiseks [5].



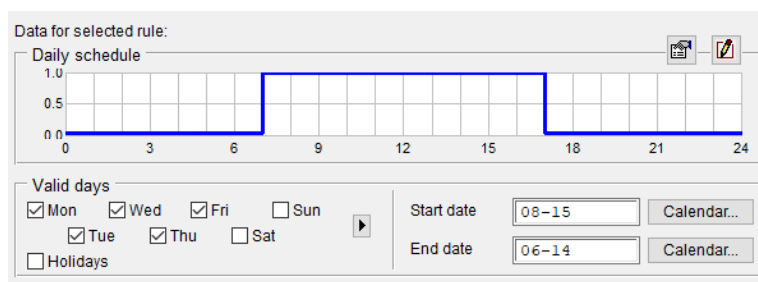
Joonis 2.6 Koolihoone kasutusprofiil suvise ülekuumenemise simuleerimisel

Hoone energiatõhususe arvutamise meetodika käsitleb selgelt klassiruumide profiili ning nõudeid suvise ülekuumenemise arvutustes, kuid ei ole täpsustatud muude ruumide detailseid kasutusastmeid. Siinkohal kasutab autor muude ruumide simuleerimisel energiaarvutusteks mõeldud haridushoone kasutusprofiili. [5]



Joonis 2.7 Muude ruumide kasutusprofiil

Ventilatsiooni töötamise puhul peab arvestama, et seade lülitub ettenähtud režiimi üks tund enne kasutusaja algust ning lülitub kasutusvälisesse režiimi üks tund pärast hoone kasutusaja lõppu. Kasutusaja väline töökoormus on 0,1, mida rakendatakse ka koolivaheaegadel 15. juuni kuni 15. august.



Joonis 2.8 Ventilatsiooniseadme kasutusprofiil

### 2.4.1 Valgustusvõimsuse vähendamine

Analüüsi alustatakse valgustuse võimsuse vähendamisega. Määruse nr. 58 [5] järgne valgustuse võimsus on oluliselt kõrgem võrreldes valgustitega, mida tänapäeval kasutatakse. Sellest tulenevalt on lubatud energiaarvutuste juures kasutada madalamaid väärtuseid, kui on teostatud vajalikud valgusarvutused, millega tõendatakse tüüpruumi valgustiheduse nõuete täitmine [5]. Euroopa valgustusstandard EN 12464-1 [27] sisaldab soovituslikke valgustustiheduse ning -ühtluse projekteerimise väärtusi, millest on lähtutud ka Eesti Vabariigi määruse nr 176 [26] koostamisel. Haridushoone klassiruumides tagatud valgustustihedus peab ületama 300 lx ning ühtlus ehk pinna vähima ja keskmise valgustustiheduse suhe, vähemalt 0,6. Käesolevas töös kasutab autor valguspaigaldise installeeritud võimsust 5 W/m<sup>2</sup>, mille saavutamine on

tõendatud projektijärgsete valgusarvutustega (Lisa 1 Tüüpklassiruumi valgustugevusarvutused)

#### **2.4.2 Ventilatsiooni õhuvooluhulkade muutmine**

Töö algparameetrites välja toodud ventilatsiooni õhuvooluhulk  $3 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$  on määrusejärgne [4] minimaalne õhustuse määr haridushoonetes. Suvise ülekuumenemise arvutustes eeldatakse suuremat inimeste arvu ruutmeetri kohta, mis annab aluse ka ventilatsioonimäära tõstmisele. Käesolevas töös kasutab autor ruumide ventilatsiooni õhuvooluhulga tõstmisel väärtust  $4,2 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ . Nimetatud vooluhulk on standardis [22] kasutatud väärtus klassiruumide puhul ning samuti lisatud ka peagi valmiva sisekliima määruse eelnõusse [33].

#### **2.4.3 Öine ventileerimine**

Energiatõhususe tõstmiseks lülitatakse ventilaatorid töövälisel ajal madalama õhuvooluhulga peale, millega väheneb nii elektrikulu ventilaatorite tööks kui ka energia õhu jahutamiseks või soojendamiseks. Hoonetes, kuhu ei ole rajatud jahutussüsteemi, kasutatakse aga öist ruumide ventileerimist kui ühe jahutusmeetodina. Eestis on üldiselt öised välisõhutemperatuurid madalamad kui siseõhutemperatuurid, eriti ruumides, mis kipuvad üle kuumenema ning on suure massiivsusega. Sellise meetmega jahutatakse öösel maha ruumi tarindid, mis päevasel perioodil talletavad endasse ülekuumenemisest tekkinud energia. Käesolevas töös uuritakse öise ventileerimise mõju ruumide ülekuumenemisele, hinnates seda kraadtundidega.

Öise ventileerimise analüüsi jaoks kasutab autor simulatsiooniprogrammis IDA ICE valmis töötatud ventilatsiooniseadme makrot (*Night Ventilation Control*) ehk eelkirjeldatud sisendite ning väljundite juhtimist. Selle protseduuriga muudetakse ventilaatorite töörežiimi, langetatakse kütmise seadeväärtust ning tõstetakse jahutamise seadeväärtust. Öise ventilatsiooni sisselülitamine kasutusvälisel ajal toimub ainult siis kui välisõhutemperatuur on väljapuhke õhust vähemalt  $2^\circ\text{C}$  madalam, et vältida olukorda, kus sissepuhkeõhk on soojem kui ruumitemperatuur. Samuti piiratakse liigset ruumide mahajahutamist – kui välisõhutemperatuur langeb alla  $+12^\circ\text{C}$ , lülitatakse ventilaatorid tavarežiimi. Käesolevas töös öise ventileerimise simulatsioonides on soojustagasti välja lülitatud ja selle mõju ega juhtimist ei uuritud.

#### 2.4.4 Klaaside parameetrid ja akna sügavus fassaadis

Akende sügavust fassaadis on võimalik muuta nii ida- kui ka põhjaküljel. Lõunas paiknev klaasfassaadi tagasiaste mõjutab tugevalt arhitektuurset lahendust, mistõttu seda seal ei rakendata. Põhja- ning idaküljel paiknevate ruumide akende sügavuse mõju hinnatakse 0,15 m ja 0,3 m puhul võrreldes fassaadi tasapinnas olevate akendega.

Uuritaval objekti eripärast tulenevalt on klaaside soojusläbivus ja päikeseläbivustegur suure osakaaluga ülekuumenemise kui ka kütmise seisukohalt. Lõunaküljel paikneva klaasfassaadi lahendus peab võtma arvesse nii suvise ülekuumenemise vältimist kui ka talvist küttekoormust. Käesolevas töös on kasutatud kahe erineva U-arvuga ning kolme erineva päikeseläbivusteguriga klaasi – kirkas, keskmine, päikesekaitseklaas. Klaaside soojusläbivusteks on valitud 0,6 W/(m<sup>2</sup>·K) ja 1,1 W/(m<sup>2</sup>·K). Täpsemad parameetrid on välja toodud allolevas tabelis.

Tabel 2.6 Klaaspakettide omadused

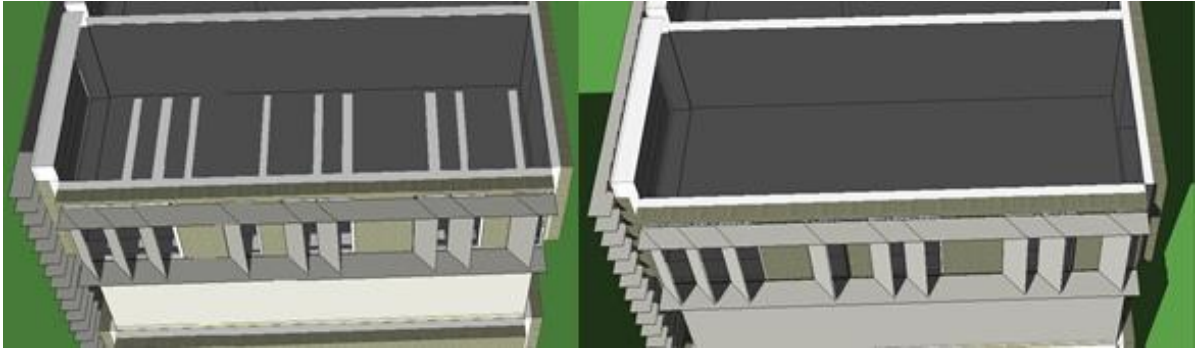
Klaaspaketi tähistus	U-klaas, W/(m <sup>2</sup> ·K)	G, -	Tvis, -
A1	0,6	0,68	0,74
A2	0,6	0,45	0,7
A3	0,6	0,3	0,5
A4	1,1	0,68	0,74
A5	1,1	0,45	0,7
A6	1,1	0,3	0,5

Klaaspakettide valikul on lähtutud hetkel laialdaselt kasutatavate klaaside ligilähedastest omadustest, mida on võimalik projektis ette näha.

#### 2.4.5 Väline varjestus

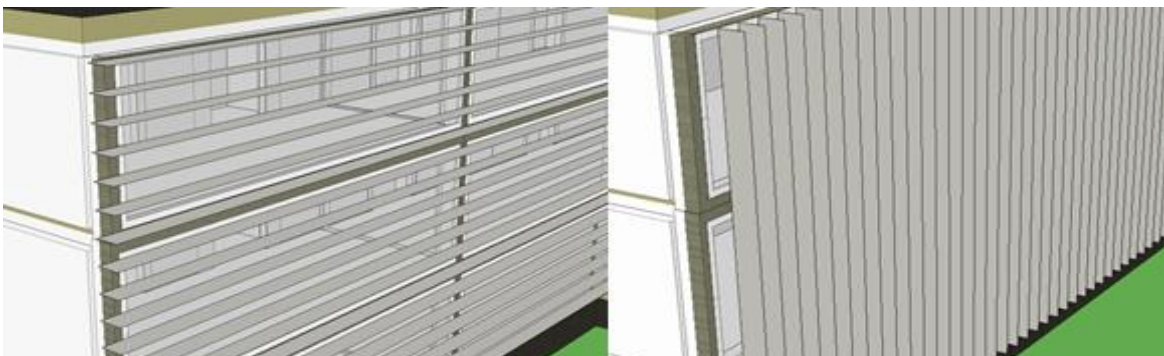
Uuritava objekti klassiruumide aknad paiknevad kõik eranditult hoone põhjaosas, mistõttu nendele ruumidele välist varjestust ei kavandatud. Põhja poolsesse külge paistab madal ida- ning läänepäike väikese osa aastast, mistõttu ei ole seda külge tarvis varjestada. Varjestuslahendusi kasutatakse hoone ida- ning lõunaküljel.

Õpetajate toad, mille aknad jäävad kolme ilmakaarde – põhi, lõuna, ida – jäetakse varjestamata põhjakülge. Idaosas madala päikese varjamiseks kasutatakse nii horisontaalse- kui ka vertikaalse varjestuse kombinatsiooni, kus horisontaalsed sirmid on 45-kraadise nurga all, osutades kirdesuunas. Sellise meetodiga varjestatakse nii hommikune madal- kui ka ennelõunane kagusuunast paistev päike.



Joonis 2.9 Varjestuslahendus idaküljel 21.juunil. Vasakul kell 08:00, paremal 09:45

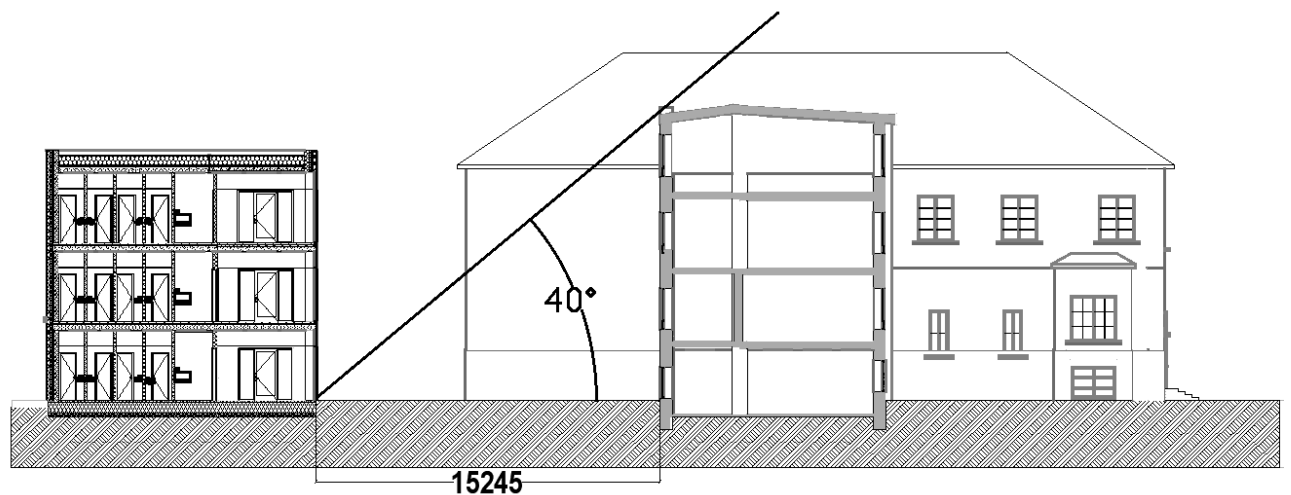
Lõunasuunas oleva klaasfassaadi varjestusena kasutakse kahte erinevat väliste sirmide varianti, mis võiks potentsiaalselt langeda kokku ka arhitektuurse lahendusega. Varjestus on üles ehitatud 50 cm laiade sirmidega, mis paiknevad üksteisest 50 cm kaugusel. Sirmid asetsevad fassaadiga risti, mis tagab ka parema väljavaate ruumist. Materjali läbipaistvustegur on valitud 0.



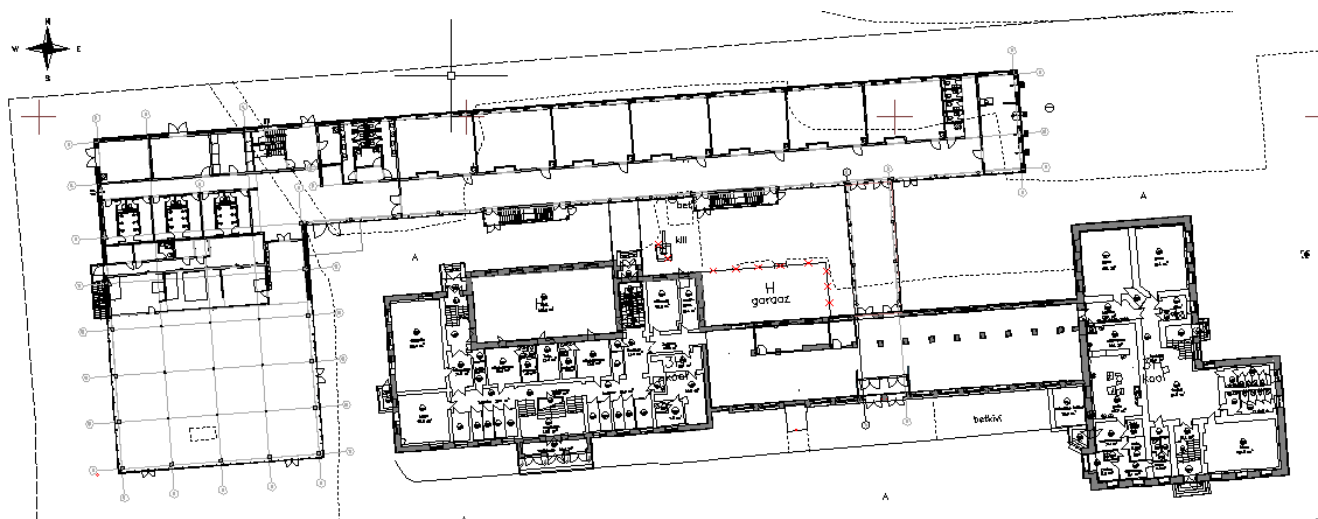
Joonis 2.10 Varjestuse variandid lõunafassaadil

## 2.5 Kõrvalhoone mõju

Olemasolev hoone koosneb kolmest osast, millest keskmine, olles kõige madalam ja pikem, varjestab juurdeehitatavat hoonet kõige vähem. Tulenevalt kahe hooneosa vahelisest kaugusest, hakkab vana hooneosa varjestama uut ainult siis, kui päikese kõrgusnurk on madalam kui  $40^\circ$ . Joonis 1.3 Päikesediagramm laiuskraadil  $59^\circ$  alusel on uus hoone täiesulatuses mõjutatud päikesest alates aprillist kuni augusti lõpuni.



Joonis 2.11 Uue ning olemasoleva hoone lõige



Joonis 2.12 Esimese korruse plaan

Ida poolne hooneosa astub kogu plokist välja ning mõjutab uut hoonet ainult hommikutundidel ning madala päiksega sügis-talvisel perioodil.

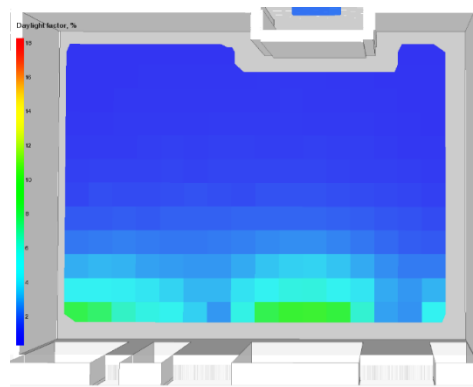
## 2.6 Päevavalgusteguri arvutamine

Käesolevas töös viiakse keskmise päevavalgusteguri väärtuste saamiseks läbi simulatsioonid programmiga IDA ICE, mis kasutab päevavalguse arvutamiseks Eesti energiaarvutuste baasaastal põhinevat kliimafaili Estonian TRY. [34] Päevavalguse modelleerimiseks peab programmi sisestama klaase puudutava informatsiooni ning siseviimistlusmaterjalide peegeldustegurid [34]. Põhiliste sisepindade soovituslikud peegeldustegurid on: [27]

- Lagedel 0,7 kuni 0,9,
- Seintel 0,5 kuni 0,8,
- Põrandal 0,2 kuni 0,4.

Lisaks siseviimistlusele kasutab tarkvara modelleerimisel maapinna ning kõrvalasuvate hoonete peegeldustegureid, mis on käesolevas töös vastavalt 0,2 ning 0,5.

Tarkvaras vaikeväärtusena seatud päevavalguse arvutuse raster on sobilik ka käesoleva töö läbiviimiseks. Arvutuspiirkond paikneb 0,80 m kõrgusel põrandapinnast ning 0,50 m kaugusel seinadest. Soovituslik päevavalgusmudeli rastri samm klassruumides on 0,25 – 0,50 m, millest autor kasutab modelleerimise kiiruse eesmärgil kõige suuremat - 0,50 m. Joonis 2.13 on kujutatud ruumi 111\_Klass päevavalguse modelleerimisel kasutatavat rastrit, mida rakendatakse ka teiste ruumide puhul.



Joonis 2.13 Päevavalgusteguri modelleerimisel kasutatav raster

## 3 TULEMUSED JA ANALÜÜS

Käesolevas peatükis antakse ülevaate uurimistöös läbiviidud simulatsioonide tulemustest ja tuuakse välja kasutatud parameetrite tundlikkus, mis mõjutavad päevavalgustegurit ning ülekuumenemist. Tulemustest ning analüüsist lähtuvalt pakub autor välja võimalikult optimaalsed lahendused probleemkohtade parendamiseks.

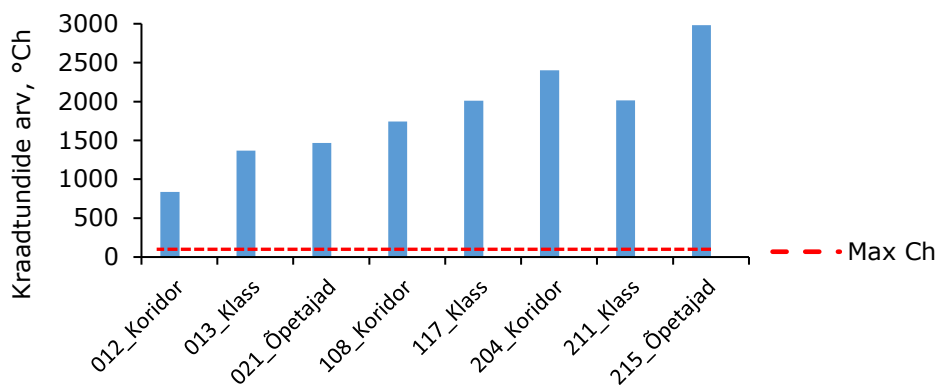
Järgnevalt on tulemuste ning analüüsi käigus käsitletavate ruumide valik tehtud ülekuumenemise nõuete alusel, mis jäävad kõige ebasoodsamatesse tingimustesse. Igalt korruselt on valitud üks klassiruum, toetudes eeltoodud tingimustele. Õpetajate tubadest tuuakse välja esimese ning kolmanda korruse ruumid ning koridoride osas kõik kolm korrust.

### 3.1 Algpameetritel põhinevad tulemused

Algpameetritega simulatsioonides on kasutatud Keila Kooli laienduse eelprojektis [28] väljatöötatud arhitektuurset lahendust ning tüüpkonstruktsioonidele vastavaid parameetreid, mööndusega klaaspakettide omaduste osas. Kasutatud klaaspaketid on suurema päikese- ning valgusläbivusteguriga kui eelprojektis [28] ettenähtud, mis annab võimaluse tööde käigus jõuda optimaalseima lahenduseni. Tsoonide vabasoojuskooormuste ja kasutusprofiilide sisestamisel on lähtutud hoone energiatõhususe arvutamise metoodikast [5] ning ventilatsiooni õhuvoolu hulgana kasutatud energiatõhususe miinimumnõuetes väljatoodud minimaalsest määrast 3l/s [4].

Ülekuumenemise kontrolli tulemusena selgus, et mitte üheski ruumis ei ole tagatud 100 kraadtunni nõue. Kõige vähem ülekuumenenud ruum on esimese korruse koridor, mille tulemus jäi 836 kraadtunni juurde ning tulemuselt halvimaks osutus kolmanda korruse õpetajate tuba 2980 °C·h. Esimese ning viimase korruse ruumide suur erinevus on tingitud kõrvalhoone mõjust, mille täpsem ülevaade on punktis 3.2.10.





Joonis 3.1 Ülekuumenemise nõude kontroll alparameetritega

### 3.2 Parameetrite muutmise mõju

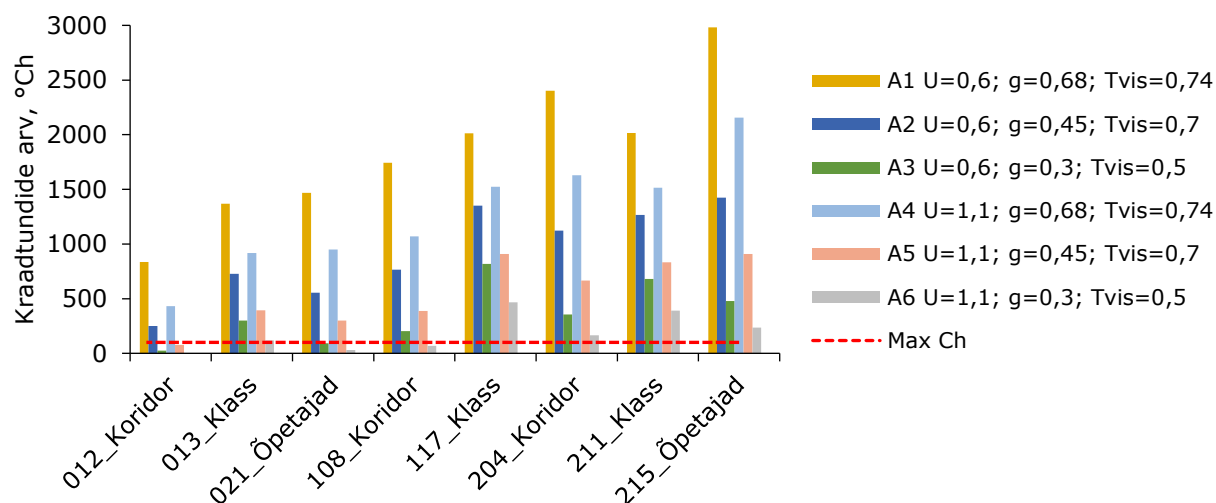
Järgnevalt on analüüsitud erinevate parameetrite muutmise mõju ülekuumenemisele ning päevavalgustegurile. Muudetavad parameetrid hõlmavad endast valgustuse võimsust, ventilatsiooni seadete muutmist, akende sügavuste muutmist ning erinevate klaaspakettide kasutamist. Täpsem ülevaade kasutatavatest seadetest on leitav peatükist 2.4.

#### 3.2.1 Klaasi parameetrite muutmine

Autor alustas ülekuumenemise vähendamise analüüsi akende parameetrite muutmisega, võttes arvesse, et antud muudatuse tegemine projektis on lihtne. Akende valiku puhul kasutati kahe erineva soojusläbivusega klaaspakette, et hinnata, kas antud olukorras kehvema  $U$ -arvuga avatäide vähendab ülekuumenemist. Mõlema variandi puhul kasutati ka 3 erinevat  $g$ -arvu, mis mõjutab päikeseläbivustegurit ning samas arvestati valgusläbivusteguriga, mis selliste klaaside puhul on saavutatavad.

Joonis 3.2 kujutab läbiviidud simulatsioonides kasutatud klaaspakettide puhul kraadtundide arvu. Tulemustest selgub, et  $g$ -arvu vähendamisega väheneb ka ruumide ülekuumenemine, kus kõige parema tulemuse saavutab väärtusega 0,3. Suurte sisemiste vabasoojuskoormuste tõttu on antud olukorras jahutamise seiskohalt mõistlikum valida suurema soojusjuhtivusega klaas ( $1,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ). Kehvema soojusjuhtivusega klaasi valik mõjutab energiatõhususarvu, mida käesoleva uurimistöökäigus ei uurita. Võrreldes simulatsioone esialgse akna paketi A1 ning samade

näitajatega, kuid kehvema soojuslähivusega paketiga A4 on vähenenud ruumide kraadtundide arv 24-48%.



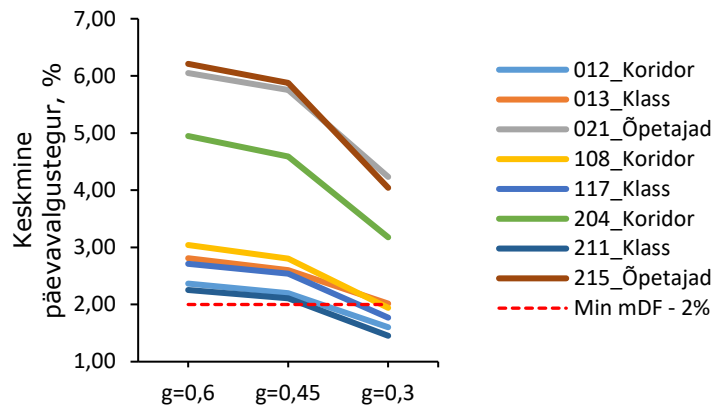
Joonis 3.2 Erinevate klaaspakettide mõju ülekuumenemisele

Päikeselähivusteguri 0,3 kasutamine vähendab vaid kolmes väljatoodud ruumidest kraadtundide arvu piisavalt, et täita kehtiva määruse nõuet 100 kraadtundi [4]. Küll aga loetakse eelnimetatud klaasi võrdlemisi tumedaks, millest tingituna võib ruumis viibija lugeda väljavaadet ebapiisavaks. Seda on analüüsitud peatükis 1.3.

### 3.2.2 Päikeselähivusteguri mõju päevalgustegurile

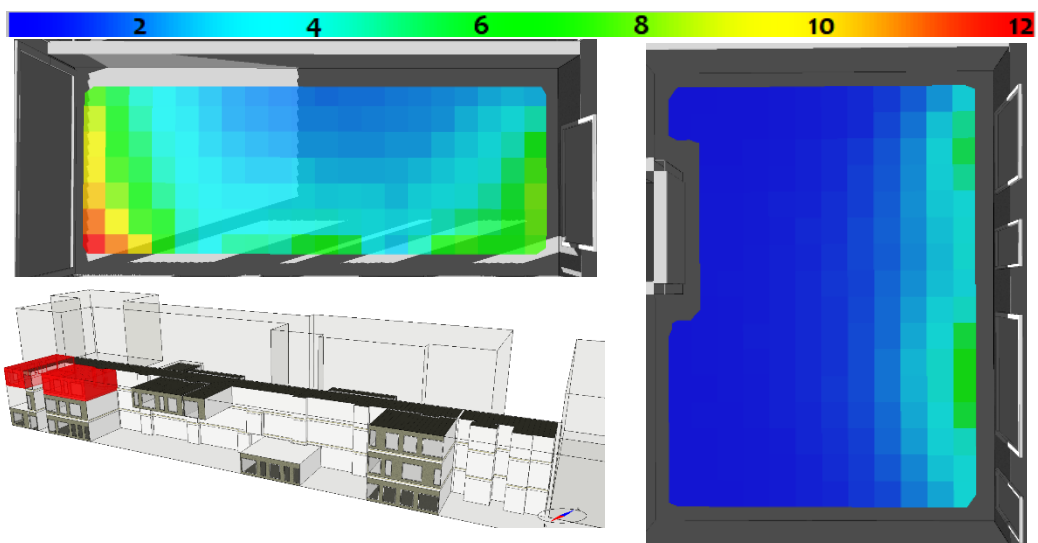
Eelnevalt kasutatud klaaside parameetrite mõju ruumide keskmisele päevalgustegurile on presenteeritud Joonis 3.3. Kõige kõrgema  $g$ -arvu puhul on modelleerimisse kaastatud ruumides keskmise päevalgusteguri nõue täidetud, mis on standardi EVS 894 [25] järgi minimaalselt 2%. Seevastu kõige madalama päikeselähivusteguri puhul kukub väärtus alla soovitusliku väärtuse.

Keskmise päevalgusteguri nõude tagamine on kõige keerulisem põhjaküljel asuvates klassiruumides ning samuti on madalale päikeselähivustegurile ( $g=0,3$ ) tundlikud esimese ning teise korruse koridorid, mis on mõjutatud kõrvalasuvast hoone varjestavast efektist. Õpetajate toad, mille aknad avanevad põhja, ida, ning lõunasuunda, on kõrge keskmise päevalgusteguriga (6,21% ja 6,05%). Lisaks akende



Joonis 3.3 Klaaside parameetrite mõju päevavalgustegurile

paiknemisele erinevatesse suundadesse, on nende ruumide akna ning põrandapinna suhe (*WFR* – *window to floor ratio*) teiste omast kõrgem, tuues võrdleva näitena ruumi 215\_Õpetajad, mille *WFR* on 67% ning ruumi 211\_Klass 18%. Klassiruumide madalad päevavalgustegurid on mõjutatud ka ruumide sügavusest, mille tulemusena päevavalgus ei ulatu ruumi tagumisse otsa ning selle tulemusena keskmine väheneb.



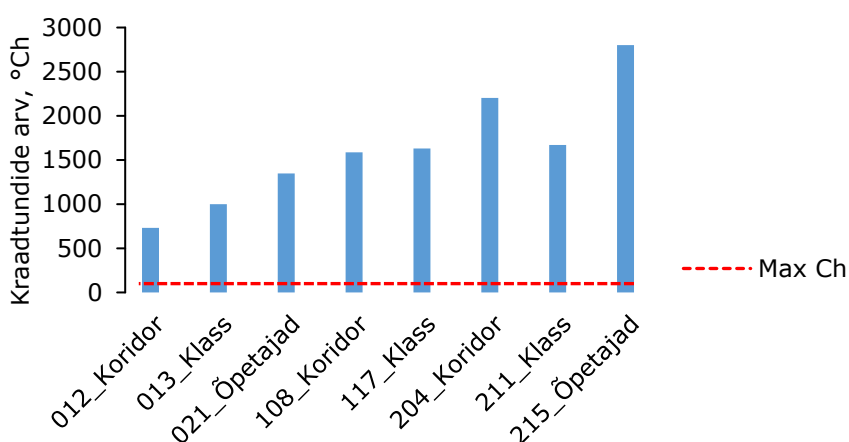
Joonis 3.4 Keskmine päevavalgustegur  $g=0,3$  puhul. Vasakul ruum 215\_Õpetajad, paremal 211\_Klass

Joonis 3.4 joonistub välja eelnevalt võrreldud kahe ruumi erinevustest tingitud mõju keskmisele päevavalgustegurile. Klassiruumis on akende vahetusläheduses nõuded täidetud, kuid ülejäänud 2/3 ruumist on alla soovitud tulemusena.

### 3.2.3 Valguspaigaldise installeeritud võimuse vähendamine

Käesoleva meetodiga muudeti valgustite erivõimsust kõikides ruumides  $5 \text{ W/m}^2$  juurde, et vähendada valgustusest tulenevat vabasoojuskoormust. Võimsuse vähendamise eelduseks olid valgustugevuse arvutused, mis tõendavad ruumide piisava valgustatuse ka madalama väärtuse korral (vt. Lisa 1 Tüüpklassiruumi valgustugevusarvutused).

Kõige efektiivsema tulemuse andis erivõimsuse vähendamine ruumis klassiruumis 013\_Klass, kus meede muutis kraadtundide arvu 369 võrra, mis on 27% esialgsest olukorrast. Kõige vähem mõjutas kõnealune meetod koridorides ning õpetajate tubades - keskmiselt 10% ning 7%. Joonis 3.5 on välja toodud meetme rakendamisejärgsed tulemused ruumide kaupa.

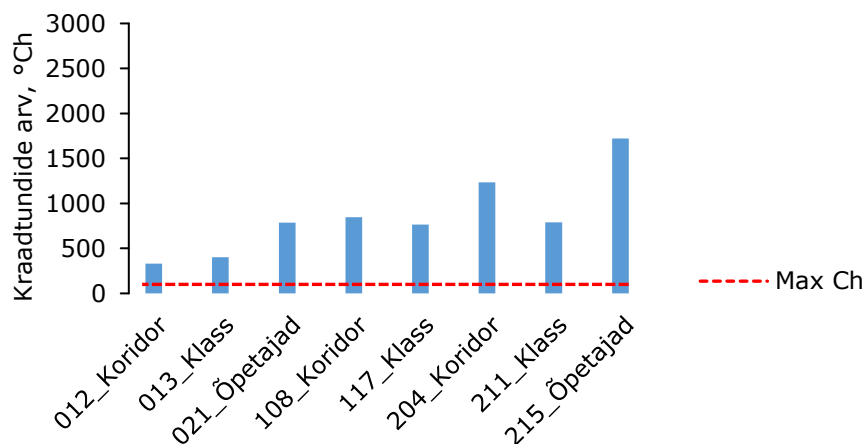


Joonis 3.5 Valgustusvõimsuse mõju ülekuumenemisele

Koridoride ning õpetajate tubade (021\_Õpetajad, 215\_Õpetajad) vähene mõjutatus valgustusvõimsuse vähendamisel tuleneb lõunapoolsest paiknemisest. Valgustusest tingitud vabasoojus on kogu võimsusest väikese osakaaluga, kuna enamuse moodustab päikesest tulenev soojus.

### 3.2.4 Ventilatsiooni õhuvooluhulkade mõju

Ventilatsiooni õhuvooluhulkade muutmisel võeti arvesse ruumis viibivate inimeste arvu ning kasutati õhuvahetusmäära  $4,2 \text{ l/s}\cdot\text{m}^2$ , mis on esialgsest  $3 \text{ l/s}\cdot\text{m}^2$  ligi 40% kõrgem õhustuse määr. Õhuvooluhulkade suurendamisest tingitult väheneb kraadtundide arv keskmiselt 55% joonisel Joonis 3.6 välja toodud ruumides.

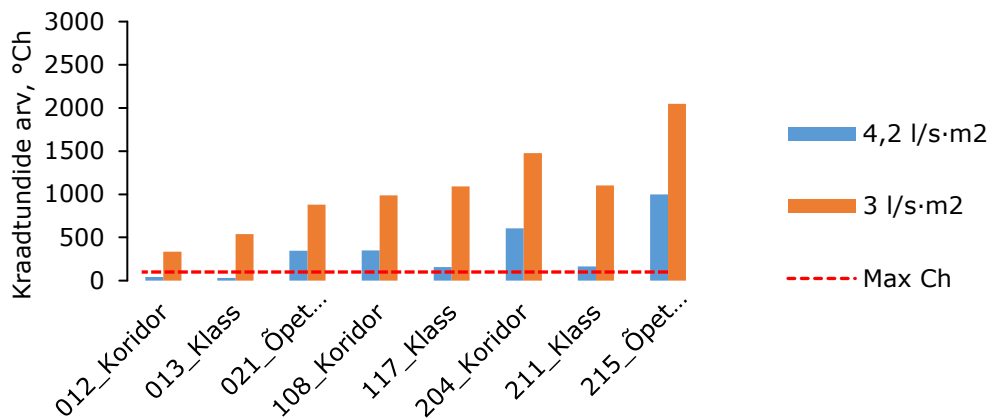


Joonis 3.6 Õhuvooluhulkade suurendamise mõju ülekuumenemisele

Protsentuaalselt mõjutas õhuvooluhulkade suurendamine kõige rohkem klassiruumi, kus muutus oli vahemikus 61-70%. Õpetajate tubades keskmine muutus jäi 44% juurde, kusjuures 3. korruse ruumi kraadtundide muutus oli ligi kaks korda suurem kui 1. korruse oma – vastavalt 1258 °C·h ning 684 °C·h. Eelnev tuleneb sellest, et viimase korruse õpetajate tuba on rohkem avatud päikesele kui esimese korruse oma, mida osaliselt varjab olemasolev koolihoone (Joonis 2.12). Õhustusmäära suurendamine on võrdlemisi efektiivne meede, kuid mõjutab elektrienergia kasutust hoones negatiivselt ning tuleks enne rakendamist võtta arvesse ka kulud energiale.

### 3.2.5 Õine jahutamine ventilatsiooniga

Õist ventileerimist simuleeriti kindlate parameetrite järgi, mida on kirjeldatud punktis 2.4.3. Käesolevas töös kasutati õise ventileerimise õhuvooluhulkadena kahte erinevat varianti. Esimesena viidi läbi simulatsioon, mille korral sissepuhke õhuvooluhulk oli määrusejärgne [5] 3 l/s·m<sup>2</sup> ning teisel juhul kasutati kõrgendatud väärtust 4,2 l/s·m<sup>2</sup>. Samad väärtused olid omistatud ka tavarežiimis töötavale ventilatsioonile. Õise ventileerimise kasutamisel ei kasutatud ventilatsiooni sissepuhkeõhu jahutamist. Läbiviidud simulatsioonid on kõrvutatud omavahel Joonis 3.7.



Joonis 3.7 Õise ventileerimise mõju ruumide ülekuumenemisele

Õhuvooluhulka  $3 \text{ l/s}\cdot\text{m}^2$  kasutati ka algparameetrites ülekuumenemise simuleerimisel. Võrreldes esialgse olukorraga, vähendab sama õhuvooluhulgaga õise ventilatsiooni kasutamine kraadtundide arvu keskmiselt 46%. Kõige enam on sellest mõjutatud 1. korruse koridor (012\_Koridor) ning klassis (013\_Klass), kus vähenes kraadtundide arv 61%. Kõige väiksem on muutus 3.korruse õpetajate toas (215\_Õpetajad) – 31%.

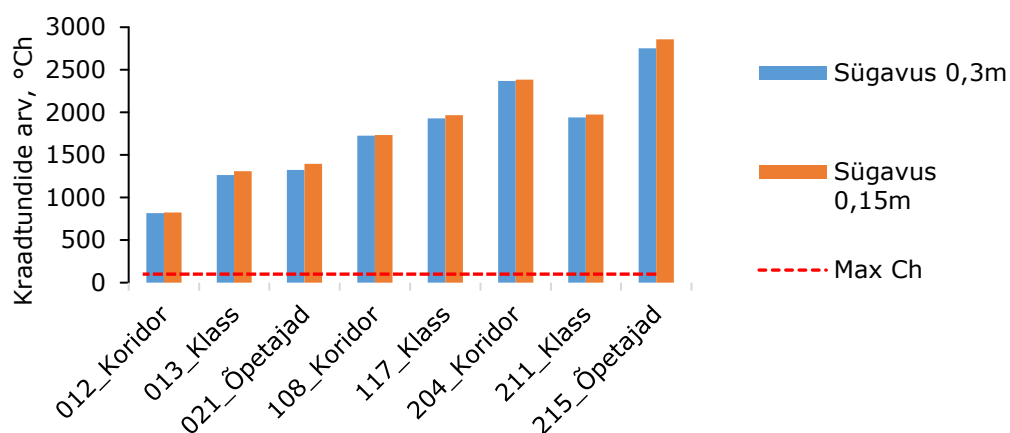
Suurema õhuvooluhulgaga,  $4,2 \text{ l/s}\cdot\text{m}^2$ , on tulemused väga head, kusjuures õpetajate toas (215\_Õpetajad) saavutati kaks korda parem tulemus – kraadtundide arv vähenes 67% ehk  $1983 \text{ }^\circ\text{Ch}$  võrra. Kõige paremad tulemused saavutati samuti esimesel korrusel, kus koridoris (012\_Koridor) ja klassiruumis (013\_Klass) saavutati käesoleva meetmega tulemus, mis täidab suvise ruumitemperatuuri nõuete tingimused ( $<100 \text{ }^\circ\text{Ch}$ ).

Suvised ülekuumenemise vähendamisel on õine ventileerimine väga efektiivne, arvestades, et ventilatsiooni sissepuhkeõhu temperatuuri töötlemisel ei kasutatud jahutuspatareid. Küll aga tuleks lisaks analüüsida suvise ülekuumenemise efektiivsuse mõju elektrienergia kasutusse, mida käesolevas töös ei uurita.

### 3.2.6 Akende sügavuse mõju ülekuumenemisele

Akende sügavuse mõju hindamisel liigutati aknaid fassaadi välispinnalt sügavamale  $0,15 \text{ m}$  ja  $0,30 \text{ m}$ . Meetme eesmärk oli tekitada akende sisseasted fassaadis, mille tulemusel saavutatakse varjestus arhitektuurse lahendusega. Kasutatav lahendus oli rakendatav ainult ruumides, kus olid eraldiseisvad aknad – klassiruumid ning õpetajate toad.

Lõunaküljel olev klaasfassaad jäi muutmata. Joonis 3.8 on välja toodud kahe kasutatud sügavuse mõju kraadtundidele.

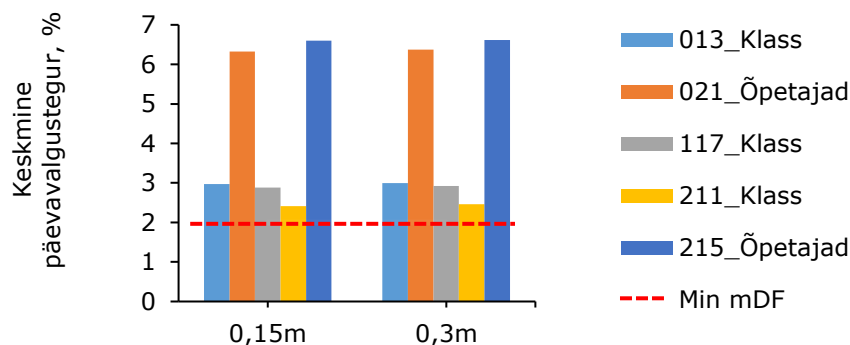


Joonis 3.8 Akende sügavuse mõju ülekuumenemisele

Omavahelises võrdluses saavutab 0,30 m sügavusega sisseaste paremad tulemused, kuid siiski annab väga marginaalse kasu kraadtundide vähendamisel. Kõige parem tulemus saavutatakse 1. korruse õpetajate toas (021\_Õpetajad), kus kraadtunde alandatakse 10% ning kõige väiksem mõju oli klassiruumidele – 4%. Meetmete omavahelises võrdluses on 0,30 m kasutamine ligi 2 korda efektiivsem kui 0,15 m, tuues näiteks esimese korruse õpetajate toa (021\_Õpetajad), kus esimese meetme puhul langes kraadtundide arv 144 (10%) ning teise puhul 75,3 (5%). Samasugused osakaalud kehtivad ka teiste ruumide puhul. Käesoleva uurimisobjekti puhul võib väita, et akende sügavuse muutmise mõju ülekuumenemisele on niivõrd väike, et pigem tuleks lähtuda arhitektuursest kontseptsioonist või joonkülmasildade mõjust välisseina soojuslähivusele.

### 3.2.7 Akende sügavuse mõju päevalgustegurile

Akende sügavuse muutmisega fassaadis tekitatakse juurde aknapõsed, mis mõjutavad päevalgustegurit. Heledates toonides aknapõsed mõjuvad päevalgustegurile positiivselt, kuna peegeldavad ruumi enam loomulikku valgust. Käesolevas analüüsis on hinnatud akende sügavuse mõju päevalgustegurile kahe erineva sügavuse korral – 0,15 m ja 0,30 m. Saadud tulemused on presenteeritud joonisel Joonis 3.9



Joonis 3.9 Akende sügavuse mõju päevavalgustegurile

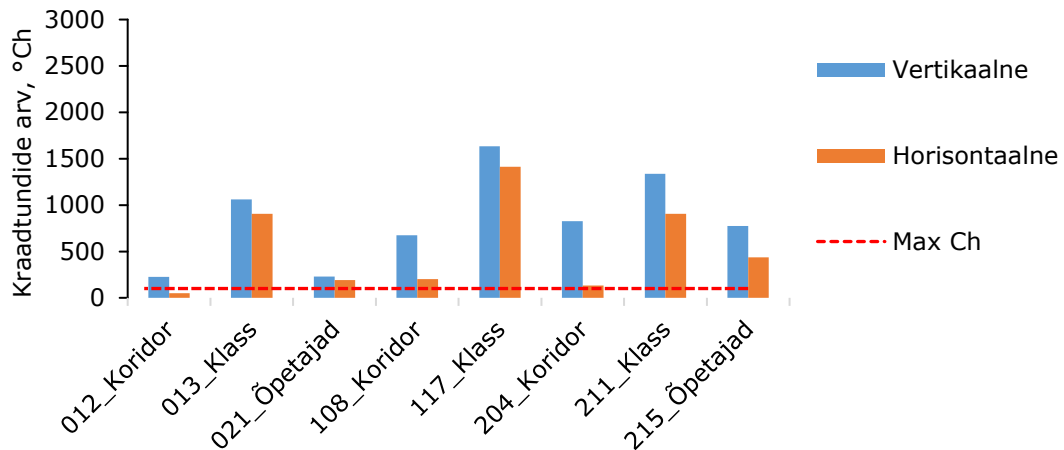
Võrreldes esialgse olukorraga, kus aknad on fassaadi tasapinnas, mõjutab sügavuse lisamine keskmist päevavalgustegurit pigem positiivselt, mõjutades enam idaosas paiknevaid õpetajate tubasid pisut rohkem kui põhjaküljel paiknevaid klassiruumide. Õpetajate toas tõsteti 0,30 m sügavuse puhul keskmise päevavalgusteguri protsenti keskmiselt 0,37 protsendipunkti võrra ning klassiruumides 0,20 protsendipunkti võrra. Meetodi kasutamine on kraadtundide mõjule sarnane, jäädes marginaalseks. Käesolevas töös analüüsitud ruumidele ei oma akende sügavus fassaadis olulist mõju keskmise päevavalgusteguri parendamisel ja ülekuumenemise vältimisel ning lähtuvalt sellest edasistes analüüsides selle parameetri muutmise mõju teiste meetmetega ei käsitleta.

### 3.2.8 Väliste varjestuse mõju ülekuumenemisele

Käesolevas uurimustöös kasutati ülekuumenemise vältimiseks ühe meetmena välist varjestust, mis blokeeriks ruumidesse siseneva otsese päikesekiirguse. Läbiviidud simulatsioonides uuriti lõunaküljel paikneval klaasfassaadil kahte erinevat tüüpi varjestuslahendust. Klaasfassaad varjestati 0,5 m sirmidega, mille omavaheline kaugus samuti 0,5 m, kusjuures esimese lahendusena nähti ette vertikaalsed ning teisena horisontaalsed sirmid (Joonis 2.10). Idakülje varjestamisel kasutati horisontaalse ning vertikaalse varjestuse kombinatsiooni – horisontaalne varjestus 0,5 m, mille vahele paigutati 45 kraadise nurga all olevad vertikaalsed sirmid.

Joonis 3.10 on kujutatud ruumide kaupa kraadtundide arv vastavate varjestuslahenduste puhul. Mõlemad lahendused annavad märkimisväärse muutuse kraadtundide vähendamisel, kuid horisontaalsed sirmid lõunaküljel on siiski





Joonis 3.10 Varjestuse mõju ülekuumenemisele

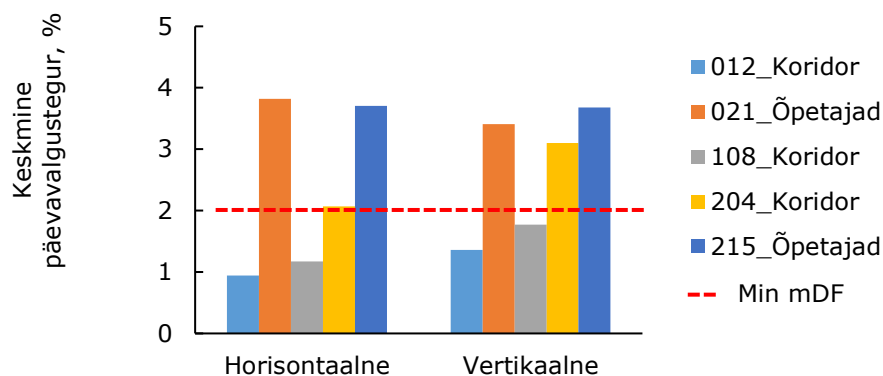
efektiivsemad. Madal ida- ja läänesuunaline päike on paremini varjestatud vertikaalsete sirmidega, küll aga keskpäevase päikese puhul on tõhusamaks lahenduseks horisontaalsed sirmid.

Horisontaalsete sirmide korral vähendati koridoride kraadtundide arvu keskmiselt 92%. Kõige parem tulemus saavutati kolmandal korrusel, kus koridori (204\_Koridor) kraadtundide arv langes 94% ehk 2270 °C·h võrra. Sellega viidi kogu perioodi ülekuumenemine 132 °C·h juurde. Esimese korruse koridoris (012\_Koridor) saavutati horisontaalse varjestusega tulemus 48 °·Ch, mis vastab ka suvise ülekuumenemise nõuetele mitteeluhoonetes. Õpetajate tubades langes ülekuumenemine keskmiselt 86%, kus esimese korruse ruumi kraadtundide arv viidi 191 °C·h juurde.

Põhjaküljel paiknevatele klassiruumidele välist varjestust ette ei nähtud, kuid need olid siiski tugevalt mõjutatud lõuna- ning idaküljes kasutatud lahendustest. Koridoride ülekuumenemise kestuse ning maksimaalsete temperatuuride langetamise mõju muutis klassiruumide kraadtundide arvu 3. korrusel 55%, teisel korrusel 30% ning esimesel 34%. Märkimisväärne mõju on tingitud ruumide vahelisest soojusülekandest, mida täpsemalt käesolevas uurimistöös ei käsitleta. Siseseinte konstruktsioonina on kasutatud 240 mm Columbia kivi, soojuslähivusega  $U=1,71 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ .

### 3.2.9 Väliste varjestuse mõju päevalgustegurile

Uurimistöös kasutatud varjestuse lahendused on ettenähtud ainult lõunaküljel olevale klaasfassaadile ning ida ilmakaarde avanevatele õpetajate tubade akendele. Joonis 3.11 on välja toodud ainult need ruumid, mille päevalgustegurit väline varjestus mõjutab ehk koridorid ning õpetajate toad.



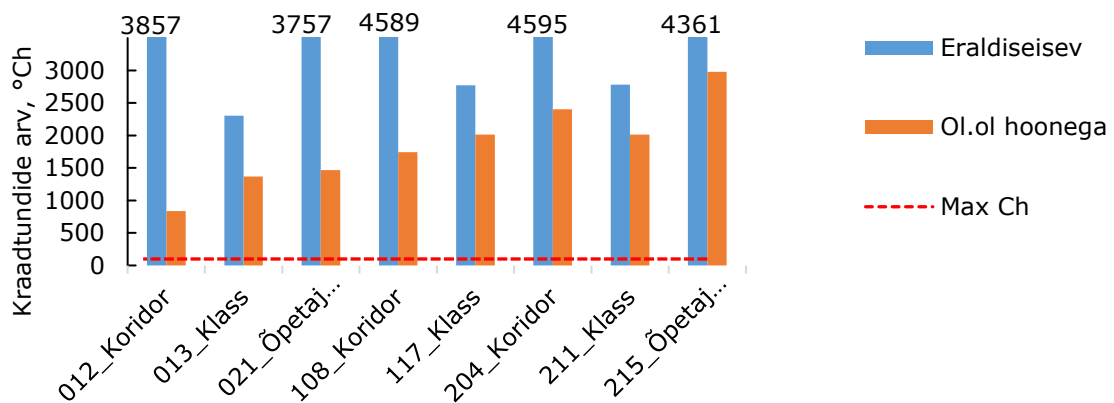
Joonis 3.11 Varjestuse mõju päevvalgustegurile

Protsentuaalselt mõjutab horisontaalne varjestus kõige enam lõunapoolsete akendega koridore, kus keskmine vähenemine oli 60%. Sellega madaldati esimese- ning teise korruse koridorides keskmist päevvalgustegurit liiga palju ning tulemus ei vasta 2% nõudele. Kolmanda korruse koridori (204\_Koridor) väärtus jääb piiri peale (2,07%), kuid õpetajate toad (021\_Õpetajad, 215\_Õpetajad) on hästi valgustatud mõlemal korrusel. Õpetajate tubades on madalam langus (keskmiselt 38,5%) tingitud suurest aknapinna suhtest põranda ruutmeetri kohta. Samuti annab heale tulemusele kaasa põhjaküljel olev aken, millele varjestust ette ei nähtud.

Varjestuse kasutamine antud tingimustel on kindlasti kasulik kõikide ruumide ülekuumenemise vältimisel, kuid keskmise päevvalgusteguri vaatenurgast tuleks kaaluda lisaks staatilistele sirmidele ka dünaamilisi lahendusi. Keskmise päevvalgusteguri simuleerimine toimub ühtlase pilvkattega ilma korral kui ruumid ei ole mõjutatud otsesest päikesekiirgusest. Staatiliste sirmide kasutamine sellises olukorras vähendab hajuvalguse pääsemist ruumidesse ning madaldab keskmist päevvalgustegurit.

### 3.2.10 Kõrvalhoone mõju

Keila Kooli laienduse koridori-klasside plokk on projekteeritud olemasoleva koolihoone taha (Joonis 2.12), mis varjestab osaliselt koridore ning õpetajate tubasid. Käesoleva töö raames uuriti olemasoleva hoone mõju uue hooneosa ülekuumenemisele. Läbiviidud simulatsiooni tulemused on kõrvutatud esialgse olukorraga Joonis 3.12:



Joonis 3.12 Kõrvalhoone mõju ülekuumenemisele

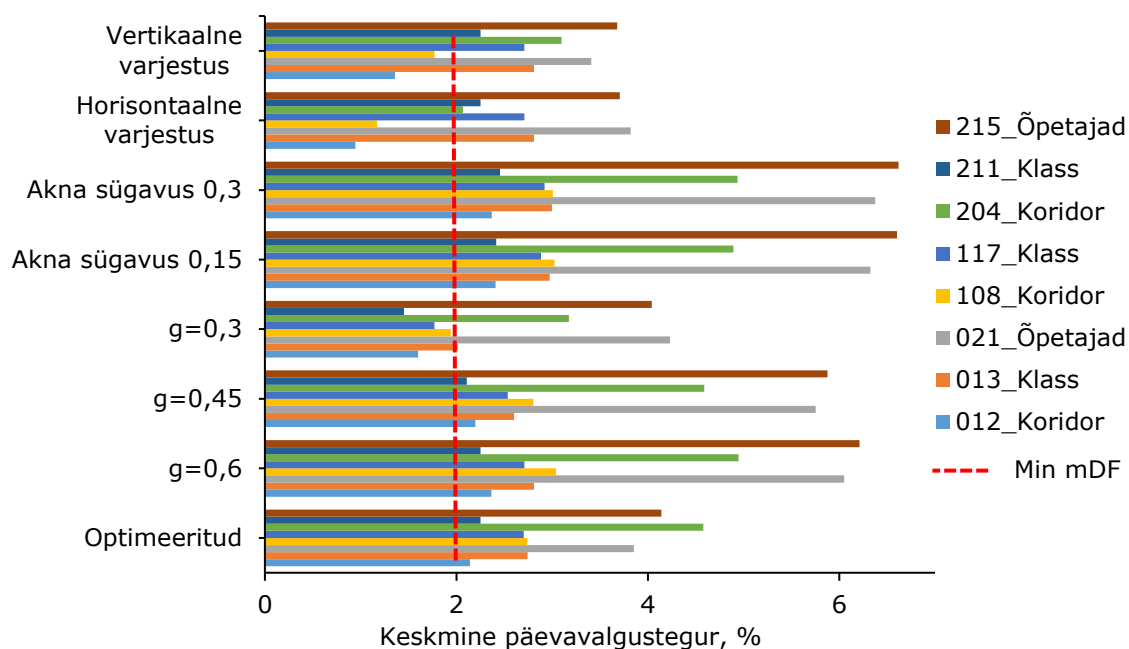
Joonis 3.12 kujutatud „eraldiseisev“ kujutab olukorda, kus olemasolevat hoonet simulatsioonimudelisse ei ole lisatud. Läbiviidud analüüs viitab väga tugevale seosele kõrvalhoonestuse ja ülekuumenemise vahel. Kõige rohkem on mõjutatud sellises olukorras esimese korruse ruumid, mis on enam varjestatud kõrvalhoonest kui kolmanda korruse omad. Esimese korruse koridoris (012\_Koridor) tõusis kraadtundide arv 361%, mis on viimase korruse koridori (204\_Koridor) tõusust (91%) ligi 4 korda kõrgem. Samuti on mõjutatud põhjaküljel olevad klassiruumid, mille ülekuumenemise suurenemise tõus on tingitud ruumidevahelisest soojusülekandest.

Mitteeluhoonetele, sealhulgas ka haridushoonetele, ei ole kehtestatud insulatsiooninõudeid, seetõttu ei arvestata otsese päikesekiirguse vajaduse saavutamise planeeritavates hoonetes. Küll aga ei tasuks mööda vaadata kõrvalpaiknevate hoonete mõjust ruumide ülekuumenemise arvutamisel. Käesoleva töö simulatsioonidest selgub, et esimese korruse õpetajate tuba (021\_Õpetajad) on suvise ülekuumenemise arvutamise perioodi vältel mõjutatud päikesest 3977 kW ning ilma kõrvalhooneta 5498 kW, mis on 38% kõrgem.

### 3.3 Väljapakutav lahendus

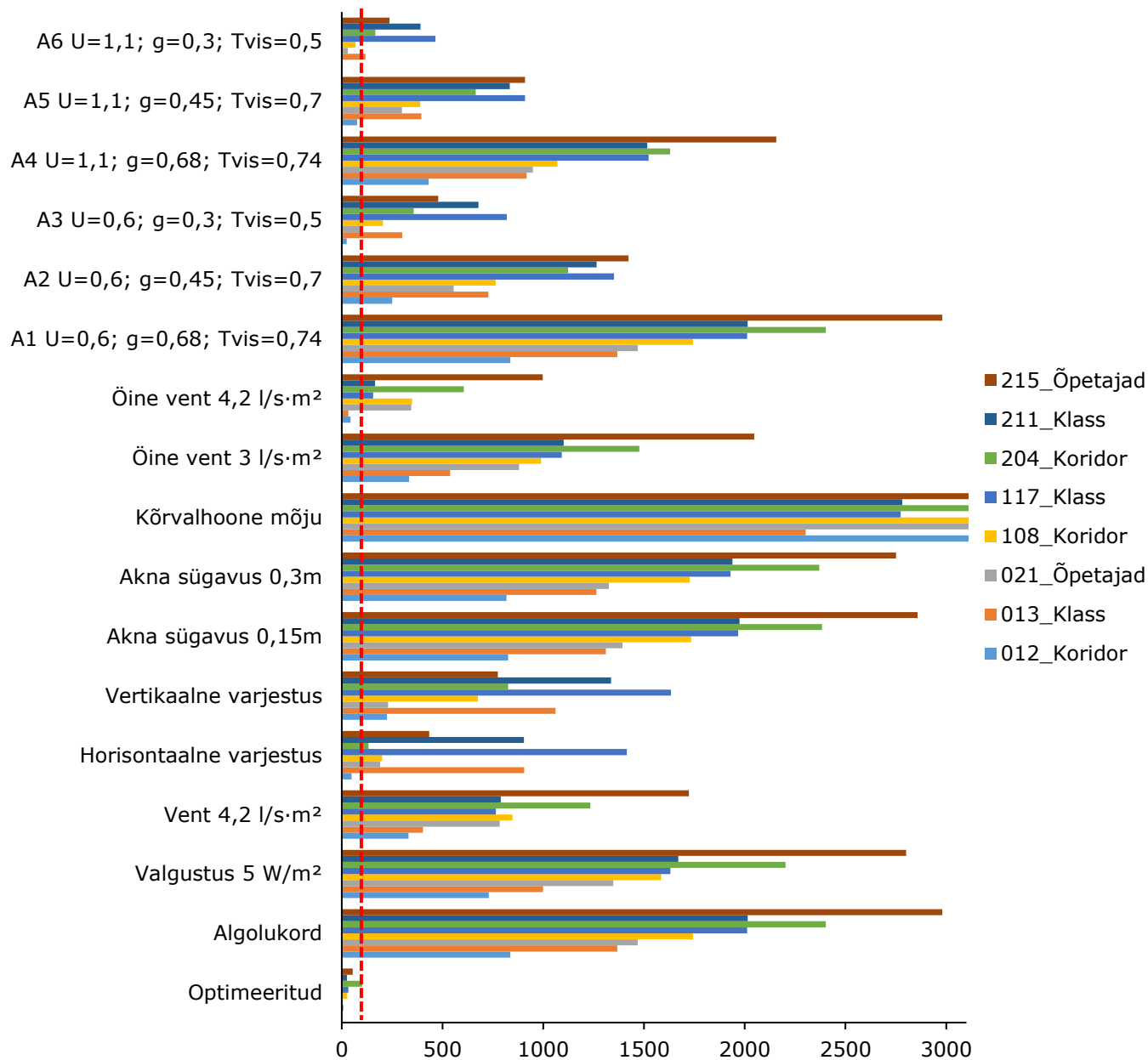
Käesolevas alapeatükis annab autor ülevaate koondtulemustest ning pakub välja võimaliku lahenduse päevalgusteguri ning ülekuumenemise nõuete täitmiseks lähtuvalt eelnevalt läbiviidud analüüsist. Uurimustöö käigus kasutatud meetodid ei andnud eraldiseisvalt piisavat efekti, et vältida kõikide ruumide ülekuumenemist ega taganud hoone energiatõhususe miinimumnõuete [4] järgset piirväärtust 100 °Ch. Varjestuse kasutamine ning *g*-arvu vähendamine viisid mõningates ruumides

kraadtundide arvu alla soovitu, kuid ei lahendanud kõikide ruumide ülekuumenemise probleemi või viisid keskmise päevalgusteguri liiga madalale. Joonistel Joonis 3.13 ja on Joonis 3.14 kujutatud kasutatud lahenduste koondtulemusi kraadtundide ning keskmise päevalgusteguri kohta.



Joonis 3.13 Kasutatud lahenduste mõju keskmisele päevalgustegurile

Enamus kasutatud lahendustest, mõjutasid keskmist päevalgustegurit negatiivselt, kuid samas annavad positiivse resultaadi kraadtundide vähendamisel. Akende sügavuse muutmine fassaadi tasapinnas oli ainus käsitletud meetod, mis muutis mõlemat parameetrit marginaalselt aga siiski soovitud suunas. Õpetajate toad (021\_Õpetajad, 215\_Õpetajad) paiknevad hoone idaosas ning aknad avanevad kolme erinevasse ilmakaarde – ida, lõuna, põhi – mis teeb need ruumid hästi valgustatuks ning vähem tundlikuks erinevate meetodide kasutamisel.



Joonis 3.14 Kasutatud lahenduste mõju ülekuumenemisele

Optimeeritud tulemuste saavutamiseks viis autor läbi seitse erinevat simulatsiooni, mis sisaldasid erinevaid kombineeritud lahendusi. Parameetrite valikul lähtuti eelnevast analüüsist – meetodid, mis mõjutasid keskmist päevavalgustegurit, võeti kasutusele ainult nendes ruumides, kus nende mõju ei viinud tulemust alla soovitud 2%. Parameetrite muutmisel alustati valgustusvõimsuse vähendamisest, mille järel vähendati klaaside päikseläbivustegurit vastavalt ruumide paiknemisele. Seejärel lisati õpetajate tubadele väline varjestus idapoolsele fassaadile, suurendati ventilatsiooni õhuvooluhulka ning lisati õine jahutus ventileerimise teel, millega vähendati klassiruumide ülekuumenemist alla 100 C·h. Õpetajate toa ning koridoride

optimeerimisel pidi ette nägema erinevatesse ilmakaartesse erinevaid päikseläbivusteguriga klaase. Optimeerimisülesande saavutamiseks kasutatud parameetrid on järgnevad:

- Valgustus 5W
- Ventilatsiooni õhuvooluhulk  $4,2 \text{ l/s}\cdot\text{m}^2$ ,
- Õine ventileerimine  $4,2 \text{ l/s}\cdot\text{m}^2$ ,
- Aken põhja suunda – A1  $U=0,6\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ ;  $g=0,68$ ;  $T_{\text{vis}}=0,74$
- Aken lõuna suunda – A2  $U=0,6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ;  $g=0,45$ ;  $T_{\text{vis}}=0,7$
- Aken ida ja lääne suunda – A3  $U=0,6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ;  $g=0,3$ ;  $T_{\text{vis}}=0,5$
- Ida küljel vertikaalse ja horisontaalse varjestuse kombinatsioon

Optimeerimisülesande koondtulemused kraadtundide kohta on toodud tabelis Tabel 1.1 ja päevavalguse tulemused tabelis Tabel 3.2. Kombineeritud lahenduse kasutamine täidab kõikides ruumides kriteeriume: keskmine päevavalgustegur  $>2\%$  ning suvine ülekuumenemine  $<100\text{Ch}$ , eeldusel, et ruumide ega ventilatsiooni sissepuhkeõhk ei ole jahutatud.

Tabel 3.1 Optimeeritud lahenduse mõju kraadtundidele

Ruum	Algolukord, Ch	Optimeeritud, Ch	Muutus, Ch	Muutus, %
012_Koridor	836	0	836	100%
013_Klass	1367	8	1359	99%
021_Õpetajad	1469	3	1466	100%
108_Koridor	1743	27	1715	98%
117_Klass	2011	33	1978	98%
204_Koridor	2401	100	2301	96%
211_Klass	2014	25	1989	99%
215_Õpetajad	2980	54	2926	98%

Optimeeritud lahenduse puhul on kõige suurema kraadtundide arvuga kolmanda korruse koridor (204\_Koridor), mis on 100 C·h piiril. Võrreldes teiste korruste koridoridega, varjestab seda ruumi kõrvalhoone kõige vähem, soodustades ülekuumenemist. Kõikide klasside ning õpetajate tubade suvise ülekuumenemise analüüsi tulemused vastavad hoone energiatõhususe miinimumnõuetes [4] sätestatud piirväärtusele.

Tabel 3.2 Optimeeritud lahenduse mõju keskmisele päevavalgustegurile

Ruum	Algolukord, mDF %	Optimeeritud, mDf %	Muutus, pp	Muutus, %
012_Koridor	2,37	2,14	-0,22	-9,47
013_Klass	2,81	2,81	0	0
021_Õpetajad	6,05	3,85	-2,20	-36,28
108_Koridor	3,04	2,74	-0,30	-9,90
117_Klass	2,71	2,71	0	0
204_Koridor	4,95	4,58	-0,37	-7,44
211_Klass	2,25	2,25	0,00	0
215_Õpetajad	6,21	4,14	-2,07	-33,30

Koolihoone suvise ülekuumenemise vältimiseks pidi kaasama meetodid, mis mõjutavad ka keskmist päevavalgustegurit – klaaside päikeseläbivusteguri vähendamine ning välise varjestuse kasutamine idafassaadil. Kõige enam mõjutas nimetatud meetodide kasutamine õpetajate tubasid (021\_Õpetajad, 215\_Õpetajad), sest nendes ruumides pidi vähendama lõuna- ja idaküljel päikesest tulenevat soojuskiirgust. Küll aga on õpetajate tubades suured aknad, mis avanevad kolme erinevasse ilmakaarde ja sellest tulenevalt säilib heal tasemel keskmine päevavalgustegur. Klassiruumide suvise ülekuumenemise vähendamiseks välist varjestust ega madalama *g*-arvuga klaase ei kasutatud – keskmine päevavalgustegur jäi samale tasemele.

### 3.4 Töö puudused, edasi arendamise võimalused

Käesolevas magistritöös uuriti võimalusi suvise ülekuumenemise vältimiseks, säilitades päevavalgusteguri nõuded. Uuritud lahendused hõlmasid ventilatsiooni õhuvooluhulkade suurendamist, valgustusvõimsuse vähendamist, välise varjestuse kasutamist ja klaaside parameetrite mõju päevavalgustegurile ning ülekuumenemisele. Üksikute meetodide kasutamine ei saavutanud magistritöö ülesandes püstitatud eesmärki ja nõuete täitmiseks kasutati kombineeritud lahendust. Ventilatsiooni õhuvooluhulkade suurendamine ja valgustite võimsuse vähendamine mõjutavad elektrienergia kasutust, kuid optimeerimisülesande käigus ei uuritud muudetavate parameetrite mõju hoone energiatõhususarvule. Samuti suureneb energiakulu ruumide kütmiseks kui kasutada madala päikeseläbivusteguriga klaase. Magistritöö edasiarendamise võimalusena võiks uurida nende tegurite mõju kogu hoone energiabilanssi ning leida optimaalne lahendus, mis arvestab energiakulu kui ka ruumide suvist ülekuumenemist. Tarnitava energia vähendamiseks võiks uurida PV-paneelide kasutust. Koolihoone põhifassaad on põhja-lõuna suunaline, mis annab eelise

paigaldada neid katusele või kasutada varjestuselementidena. Käesolevas töös ei ole uuritud tarindite massiivsuse ning konstruktsioonide soojustuse mõju suvise ülekuumenemise vähendamisel. Uuritud töös täheldas autor kõrgete temperatuuridega koridoride mõju klassiruumide ülekuumenemisel. Ühe võimaliku lahendusena võiks uurida koridoride ning klassiruumide vaheliste seinade soojustamist, et vähendada soojusülekannet. Positiivse mõju korral saab vähendada klassiruumide öist ventileerimist või selle sootuks ära jätta.



## KOKKUVÕTE

Olemasolevate koolihoonete uuringutest selgub, et õppeasutuste sisekliima on kehv. Peamisteks põhjusteks on välja toodud tehnosüsteemide puudumine või nende kulukas ekspluatatsioon. Uute hoonete planeerimisel tuleb selliste olukordade teke vältida ning läbi töötada võimalikud lahendused „paberil“ ja ehitise kolmemõõtmelises infomudelil projekteerimistööde käigus.

Käesoleva lõputöö uurimisobjektiks oli projekteerimisfaasis olev Keila Kooli juurdeehitus. Uurimustöö eesmärk oli teha ettepanekud fassaadi ja tehnosüsteemide optimeerimisele päevavalgusteguri ning ülekuumenemise nõuete alusel, lähtuvalt läbiviidud analüüsi tulemustest. Uurimustöö tulemusena välja pakutavad lahendused peavad arvestama standardijärgse keskmise päevavalgusteguriga  $mDF > 2\%$ , kui ka määrusepõhise suvisest ülekuumenemisest tingitud kraadtundide arvuga, mis haridushoonetel peab jääma alla  $100\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$  ajavahemikul 1. mai kuni 30. september, millest on välja arvatud suvevaheaeg ehk 16. juuni kuni 14. august. Uurimustöö eesmärgi saavutamiseks analüüsiti uuritava objekti erinevaid lahendusi simulatsiooniprogrammi IDA Indoor Climate & Energy (IDA ICE) abil.

Uurimustöö analüüsi kaasati 13 ruumi, millest hiljem valiti välja ülekuumenemise nõuete alusel 8 kõige kriitilisemat. Esialgsete parameetrite kasutamisel oli ruumides keskmine ülekuumenemine ca  $1800\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ , millest kõige kriitilisemaks osutus kolmanda korruse õpetajate tuba väärtusega  $2980\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ . Ülekuumenemise vähendamiseks kasutatud meetodid ei andnud eraldiseisvalt piisavat efekti, et täita energiatõhususe miinimumnõudeid, seejuures mõne ruumi jaoks toimiv lahendus vähendas keskmist päevavalgustegurit alla  $2\%$ . Mõlema magistritöös uuritud nõude täitmiseks töötas autor välja kombineeritud lahenduse.

Optimeerimisülesande tulemusena vähendati valgustuse erivõimsust  $5\text{ W/m}^2$ -ni, suurendati ventilatsiooniõhuvoolu hulka  $4,2\text{ l/s}\cdot\text{m}^2$ -ni, lisati õine ventileerimine passiivse jahutusmeetodina, muudeti klaaside päikeseläbivustegurit vastavalt fassaadi suunale ilmakaarte suhtes ning lisati horisontaalse- ja vertikaalse varjestuse kombinatsioon idafassaadile. Ruumide ventileerimiseks ettenähtud õhutemperatuur oli piiratud ainult kütte seadeväärtusega  $+18\text{ }^{\circ}\text{C}$  ning õhu jahutamist ei kasutatud.

Eelnimetatud meetodid tagasid ruumides nõuetekohase ülekuumenemise piirtaseme ning vähendasid kraadtunde keskmiselt  $99\%$ . Hoone põhjaküljel paiknevate klassiruumide ülekuumenemine oli tugevalt mõjutatud koridorist, mille klaasfassaad

avanes lõunasuunda. Kõikide klassiruumide optimeerimisel oli esmatähtis viia madalaks koridoride temperatuur ning ida osas paiknevate õpetajate tubade ülekuumenemise vältimiseks lisada väline varjestus.

Keskmise päevavalgusteguri analüüs viidi läbi kõikide analüüsitud parameetrite muutmisel, mis seda võisid mõjutada. Kasutatud lahendustest oli kõige suurema mõjuga horisontaalne varjestus, mis vähendas esimese korruse koridoris päevavalgustegurit 60%. Positiivse mõjurina avaldus akende sügavuse muutmine fassaadis, mille tulemusel keskmine päevavalgustegur marginaalselt tõusis heledate aknapõskede abil. Läbiviidud analüüsist selgub, et õpetajate toad, mille aknad avanevad põhja-, ida- ja lõunasuunda, ei ole tundlikud uuritud lahendustele ning säilitavad igas olukorras vähemalt 3,4 %-lise päevavalgusteguri taseme. Seevastu vajavad hoolikat lähenemist klassiruumid, mis nõuetekohaseks täitmiseks vajavad klaaside valgusläbivustegurit  $T_{vis}$  vähemalt 0,7.

Läbiviidud uurimistöö kinnitab vajadust läbi töötada erinevad lahendused, et vältida hiljem ebasoodsaid sisekliima tingimusi ja üleliigset tehnosüsteemide eksploatatsioonikulu. Ülekuumenemise vähendamiseks ei piisa ainult klaaside päikeseläbivusteguri vähendamisest või välise varjestuse kasutamisest, mis võivad mõjuda ebasoodsalt ruumide loomulikule valgustatusele. Töö autor leiab, et optimaalsete kompromisslahenduste saavutamiseks on esmatähtis, et koostöö kõigi projekti osapoolte vahel algaks juba eskiisi koostamisel ning säiliks kuni tööde valmimiseni. Käesoleva lõputöö põhjal leiab autor, et suvise ruumiõhuperatuuri kontrollarvutus koolimajades ilma päevavalgusteguri analüüsita ei ole korrektne.

## SUMMARY

Studies on existing school buildings show that educational establishments have poor indoor climate. The main reasons indicated are a lack of utility systems or their costly operation. The emergence of such situations should be prevented when planning new buildings, and possible solutions should be worked out "on paper" and in a building information model during design works.

The object of research for this thesis was the extension for Keila School, which is in its design phase. The aim of the research was to make proposals for optimising the façade and utility systems, based on the daylight factor and overheating requirements, according to the results of the conducted analysis. The proposed solutions must take into account the standard average daylight factor  $mDF > 2\%$  as well as the regulation-based number of degree hours caused by summer overheating, which in the case of educational buildings must remain under  $100\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$  between 1 May and 30 September, excluding the summer holidays, i.e., 16 June to 14 August. To achieve this, various solutions were analysed for the studied object using a simulation programme IDA Indoor Climate & Energy (IDA ICE).

The analysis of the research involved 13 rooms, of which 8 of the most critical were later chosen based on the overheating requirements. Using the primary parameters, the average overheating in the rooms was ca  $1800\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ , the most critical of which turned out to be the teachers' room on the second floor with a value of  $2980\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ . The individual methods used for reducing overheating did not give sufficient effect to fulfil the minimum energy efficiency requirements, while the solution effective for some rooms lowered the average daylight factor below  $2\%$ . For meeting both requirements studied in this Master's thesis, the author developed a combined solution.

As a result of the optimisation task, lighting power was reduced to  $5\text{ W/m}^2$ , ventilation airflow was increased to  $4.2\text{ l/s}\cdot\text{m}^2$ , night ventilation was added as a passive cooling method, the solar heat gain coefficient (SHGC) of windows was adjusted according to the direction of the façade in relation to cardinal points, and a combination of horizontal and vertical shading was added to the eastern façade. The air temperature for ventilating the rooms was limited only by the heating setpoint temperature of  $+18\text{ }^{\circ}\text{C}$  and no air cooling was used.

The abovementioned methods ensured the required overheating limit level in the rooms and reduced the degree hours by  $99\%$  on average. Overheating in the classrooms on

the northern side of the building was heavily influenced by the corridor with a glass façade facing south. The primary objective in optimising all classrooms was to reduce the temperature in the corridors and to add external screening to prevent the overheating of the staff rooms in the eastern part of the building.

The analysis of the average daylight factor was conducted by changing all analysed parameters which could affect it. Of the used solutions, horizontal shading had the greatest effect, reducing the daylight factor in the ground floor corridor by 60%. Changing the depth of the windows in the façade had a positive impact increasing the average daylight factor marginally with the help of light window reveals. The analysis shows that the staff rooms with windows facing to the north, east and south are not sensitive to the studied solutions and maintain a daylight factor at least 3.4% under any circumstances. Whereas classrooms needing windows with visible transmittance factor  $T_{vis}$  of at least 0.7 for meeting the requirements, need careful consideration.

This research confirms the need for working through various solutions in order to later avoid unfavourable indoor climatic conditions and excessive operating costs of the utility systems. To reduce overheating, it is not enough to only lower the solar factor of the windows or use external shading, which may have a negative impact on the natural illumination of the rooms. The author finds that to achieve optimal compromise solutions, it is essential that a cooperation between all parties of the design project is created already at the drafting stage and is maintained until all works are completed. Based on this thesis, the author finds that summer overheating calculations in school buildings are incorrect without an analysis of the daylight factor.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] R. Murula, A. Tihhonov, J. Kurnitski ja M. Thalfeldt, Energiatõhususe juhendmaterjal ja meetodika peaprojekterijatele ja arhitektidele, Tallinn, 2017.
- [2] E. Komisjon, „Energia tegevuskava aastani 2050,“ 2010.
- [3] E. L. Teataja, „Euroopa Parlamendi ja Nõukogu Direktiiv 2010/31/EL,“ Euroopa Liidu Väljaannete Talitus, 2010.
- [4] Hoone energiatõhususe miinimumnõuded, Tallinn: Ettevõtlus- ja infotehnoloogiainister, 2019.
- [5] Hoone energiatõhususe arvutamise meetodika, Tallinn: Majandus- ja taristuminister, 2019.
- [6] T. Muneer, M. Knez, H. Köster ja E. J. Gago, „Natural light controls and guides in buildings. Energy saving for electrical lighting, reduction of cooling load,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014.
- [7] M. Thalfeldt, E. Pikas, J. Kurnitski ja H. Voll, „Window model and 5 year price data sensitivity to cost-effective façade solutions for office buildings in Estonia,“ *Energy*, nr 135, pp. 685-697, 2017.
- [8] N. Nasrollahi ja E. Shokri, „Daylight illuminance in urban environments for visual comfort and energy performance,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, kd. 66, pp. 861-874, 1 12 2016.
- [9] M. Kiil, R. Simson, F. de Luca, M. Thalfeldt ja J. Kurnitski, „Overheating and daylighting evaluation for free-running classroom designs,“ *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 352 012059, 2019.
- [10] Sisekliima, õpitulemus, tööviljakus, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2015.
- [11] „Õppeasutuste sisekliima seireprogramm,“ SA Eesti Mükoloogiauringute Keskus.
- [12] Tervisekaitseinspeksioon, „Sisekliima uuring koolides“.
- [13] H. Voll, M. Thalfeldt, F. De Luca, J. Kurnitski ja T. Olesk, „Urban planning principles of nearly zero-energy residential buildings in Estonia,“ *Management of Environmental Quality: An International Journal*, kd. 27, nr 6, pp. 634-648, 2016.
- [14] H. E. Abel, Hoonete energiatarve ja sisekliima, Tallinn, 2010.
- [15] J. Kurnitski, M. Thalfeldt, T. Kalamees, H. Voll, A. Uutar ja A. Rosin, Madal- ja liginullenergiahooned. Büroohonete põhilahendused eskiis- ja eelprojektis, Tallinn: Riigi Kinnisvara AS Ja Tallinna Tehnikaülikool, 2012.

- [16] H. Voll, Passiivsete arhitektuuriliste jahutusmeetmete kasutamine ühiskondlike hoonete kavandamisel. Innovatiivne lähenemine energiakokkuhoiule, Tallinn, 2014.
- [17] R. Simson, Overheating Prevention and Daylighting in Buildings without Mechanical Cooling, Tallinn, 2019.
- [18] H. Voll, Hoonete planeerimine ja fassaadide kujundamine, Tallinn : Tallinna Tehnikaülikooli kirjastus, 2011.
- [19] F. de Luca, H. Voll ja L. Veski, „Tallinna Linnavalitsuse hoone. Soovitused Tallinna Linnavalitsuse juurdeehituse varjestamiseks,“ Tallinn, 2014.
- [20] „Sõpruse 157,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://sopruse157.ee/>. [Kasutatud Aprill 2020].
- [21] Olemasolevate hoonete sisekliima hindamise juhend, Tallinna Tehnikaülikool, 2016.
- [22] 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, 2019.
- [23] T. Kershaw ja D. Lash, „Investigating the productivity of office workers to quantify the effectiveness of climate change adaptation measures,“ *Building and Environment*, kd. 69, pp. 35-43, 1 11 2013.
- [24] T. Tamm, Valgustustehnika, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli kirjastus, 2009.
- [25] EVS 894:2008+A2:2015 - Loomulik valgustus elu- ja büroorumides, 2015.
- [26] Töökohale esitatavad töötervishoiu ja tööohutuse nõuded, määrus nr 176, Vabariigi Valitsus.
- [27] EVS-EN 12464-1:2011 Valgus ja valgustus. Töökohavalgustus. Osa 1: Sisetöökohad, 2011.
- [28] Keila, Pargi tn 2 koolihoone laienduse ehitusprojekt, Projektibüroo OÜ, 2020.
- [29] Liginullenergia eluhooned. Suvise ruumitemperatuuri kontrollarvutuse juhend, Tallinn, 2018.
- [30] Liginullenergia eluhooned. Piirdetarindite liitekohtade joonsoojuslähivuste kataloog, Kredex AS.
- [31] „EQUA Simulation AB,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.equa.se/en/ida-ice/validation-certifications>. [Kasutatud Aprill 2020].
- [32] T. Kalamees ja J. Kurnitski, „Estonian test reference year for energy calculations,“ 2006.

- [33] Hoone sisekliimale esitatavad nõuded, Tallinn, (Valmimisel).
- [34] Valgustustiheduse ja nõudluspõhise valgustuse energiasimulatsiooni juhend.
- [35] „Signa System, Inc,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://signasystem.net/signa-system/retrofit-alternative/>. [Kasutatud April 2020].
- [36] „OÜ Fund Ehitus,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.fundehitus.ee/et/>. [Kasutatud Aprill 2020].
- [37] „Inhabitat,“ Aprill 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://inhabitat.com/>.

# LISAD


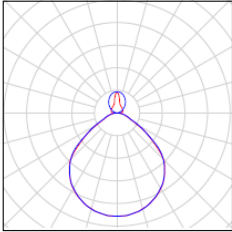

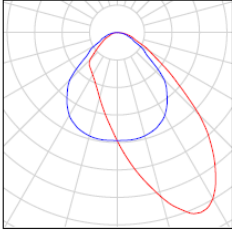


## Lisa 1 Tüüpklassiruumi valgustugevusarvutused

Keila Pargi tn 2 koolihoone laienduse  
ehitusprojekt  
Territoorium 1 / Hoone 2 / Korrus 1 / Klassiruum / Kokkuvõte

23.03.2020

SILMAN 

Tükkide arv	Valgusti (Helendus)		
6	TRILUX GmbH & Co. KG - LuceoS D2-L CDP 6500-830 01 ETDD Helendus 1 Varustatus: 1xLED Ekspluatatsiooni kasutegur: 100% Lambi valgusvoog: 5100 lm Valgusti valgusvoog: 5100 lm Võimsus: 41.0 W Valgusviijakus: 124.4 lm/W  Kolorimeetrilised andmed 1xLED: CCT 3000 K, CRI 100		
1	TRILUX GmbH & Co. KG - LuceoS D2-L CDP-A 5000-830 01 ETDD Helendus 1 Varustatus: 1xLED Ekspluatatsiooni kasutegur: 100% Lambi valgusvoog: 4800 lm Valgusti valgusvoog: 4800 lm Võimsus: 37.0 W Valgusviijakus: 129.7 lm/W  Kolorimeetrilised andmed 1xLED: CCT 3000 K, CRI 100		

Lambi kogu valgusvoog: 35400 lm, Valgusti kogu valgusvoog: 35400 lm, Koguvõimsus: 283.0 W, Valgusviijakus: 125.1 lm/W

Erivõimsus: 4.68 W/m<sup>2</sup> (Ruumi põhipind 60.51 m<sup>2</sup>),  
Erivõimsus: 5.23 W/m<sup>2</sup> = 1.41 W/m<sup>2</sup>/100 lx (Töötasandi pindala 54.08 m<sup>2</sup>)

Kasutus: 340 - 540 kWh/a maksimaalselt 2150 kWh/a

Energiakulu parameetrid ei arvesta valgusstseene ja nende hämardusolekuid.

### Klassiruum (39), Valgustustihedused [lx]

