



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

***KONTORIRUUMI JAHUTUSKOORMUSTE
ARVUTUSE MÄÄRAMATUS IDA ICE TARKVARA
NÄITEL
OFFICE ROOM COOLING LOAD CALCULATION
UNCERTAINTY ON THE BASIS OF IDA ICE SOFTWARE
MAGISTRITÖÖ***

Üliõpilane: Andres Saidlo

Üliõpilaskood 144434EAKI

Juhendaja: Martin Kiil, Nooremteadur

Tallinn 2020

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

25. mai 2020

Autor: Andres saidlo
 / allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

25. mai 2020

Juhendaja: Martin Kiil
 / allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Andres Saidlo (sünnikuupäev: 23.04.1995)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Kontoriruumi jahutuskoormuste arvutuse määramatus IDA ICE tarkvara 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.

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

/ allkirjastatud digitaalselt /

25.05.2020

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Andres Saidlo, 144434EAKI (nimi, üliõpilaskood)
Õppekava, peaeriala: EAKI02/15 – Hoonete Sisekliima (kood ja nimetus)
Juhendaja(d): Nooremteadur, Martin Kiil, 5189963 (amet, nimi, telefon)
Konsultant: Henri Sarevet, Energiatõhususe spetsialist (nimi, amet)

Lõputöö teema:

(eesti keeles) *Kontoriruumi jahutuskoormuste arvutuse määramatus IDA ICE tarkvara näitel*

(inglise keeles) *Office room cooling load calculation uncertainty on the basis of IDA ICE software*

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Hinnata ruumi orientatsiooni mõju jahutuskoormusele muutes ükshaaval erinevaid ruumi parameetreid (päikesekiirgus)
2. Hinnata ning võrrelda erinevate parameetrite muutmise mõju bürooruumi jahutuskoormuse muutumisele
3. Leida määrava tähtsusega parameetreid büroo ruumi dünaamilise simulatsiooni mudeli koostamisel jahutuskoormuste arvutamise seisukohast

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Esmase plaani koostamine	29.01.20
2.	LÜ täitmine, IDA ICE faili koostamine, protsessipuu koostamine	05.02.20
3.	Baasruumi parameetrid	14.02.20
4.	Esmased simulatsioonid	21.02.20
5.	Kirjanduse ülevaade	06.03.20
6.	Metoodika	20.03.20
7.	Simulatsioonid	03.04.20
8.	Esialgset tulemusid	10.04.20
9.	Lõputöö 75% esitamine juhendajale	20.04.20
10.	Lõputöö esitamine	25.05.20
11.	Ettekande ja plakati koostamine	29.05.20
12.	Retsensendi küsimuste läbi töötamine	29.05.20

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

Üliõpilane: Andres Saidlo / allkirjastatud digitaalselt / 25. mai 2020a

Juhendaja: Martin Kiil / allkirjastatud digitaalselt / 25. mai 2020a

Konsultant: Henri Sarevet / allkirjastatud digitaalselt / 25. mai 2020a

Programmijuht: Martin Thalfeldt..... ".....".....2020a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse

SISUKORD

EESSÕNA	7
Lühendite ja tähiste loetelu	8
SISSEJUHATUS	9
Kirjanduse ülevaade.....	11
1. JAHUTUSVAJADUS	13
1.1 SISEKLIIMA	13
1.2 LIIGSOOJUS.....	14
2. METOODIKA.....	17
2.1 PROTSESS	17
2.1.1 Kirjeldus	17
2.2 TÜÜPRUUM	18
2.2.1 Mõõtmed.....	19
2.2.2 Välised parameetrid.....	20
2.2.3 Sisemised parameetrid.....	22
2.3 VÕRDLUSPARAMEETRID	24
2.3.1 Fancoil valiku samm	24
2.3.2 Jahutustala valiku samm	25
2.3.3 Hinnang valiku sammule	26
3. SIMULATSIOONID	27
3.1 MÕÕTMED	27
3.1.1 Akna mõõtmed	27
3.1.2 Akna asukoht tarindis	32
3.1.3 Ruumi mõõtmed	37
3.1.4 Varjestus	47
3.2 TARINDID	57
3.2.1 Seinad	58
3.2.2 Aken.....	60
3.3 SEADEARVUD.....	63
3.3.1 Ventilatsioon õine jahutus	63
3.4 ARVUTUSPARAMEETRID	66
3.4.1 Kuupäev 15.....	66
3.5 ANALÜÜS.....	72
KOKKUVÕTE	79
SUMMARY.....	83
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	86

EESSÕNA

Uurimistöö teema pakkusid välja Martin Kiil ja Henri Sarevet seoses praktilise projekteerimistöö käigus tekkinud küsimustele. Töö koostati Tallinnas. Põhilisteks töövahenditeks uurimistöö koostamisel olid jahutuskoormuste dünaamilist simulatsiooni võimaldav programm IDA-ICE ning tulemuste analüüsiks tabelarvutusprogrammi Microsoft Excel.

Autor tänab Martin Kiili ning Henri Sareveti konstruktiivse kriitika, mõistva suhtumise, väga hea teema ning isikliku huvi eest teema vastu. Autor tänab ka doktorant Karl-Villem Võsa parameetriliste simulatsioonide koostamise konsultatsiooni osas Autor tänab ka peret ning ülejäänud lähedasi, kes kannatasid ära minu iganädalased magamata ööd ning ärajäänud peod. Õnneks aitas sellele kaasa mõnel määral ka ringi möllav koroonaviirus. Lisaks soovin tänada tööandja AS Infragate Eesti meeskonda mõistva suhtumise eest uurimistöö koostamise pingelisematel nädalatel.

Läbiviidud simulatsioonide tulemused tekitasid uurimistöö autoris teema vastu täiendavat huvi. Kui tulevikus peaks läbi viidama täiendavaid parameetrite analüüse jahutuskoormuse mõjule, siis on töö autor valmis nõu ja jõuga abiks olema ning on kindlasti huvitatud saadud tulemustest.

Uurimistööga uuriti erinevate parameetrite muutmise mõju jahutuskoormusele üksiku tubakontori jahutuskoormustele. Tulemused näitavad, et määravaimaks parameetrik on aken. Kõik ülejäänud uuritud parameetrid omasid samuti mõju. Seetõttu tuleks kindlasti viia läbi arvutused dünaamilise arvutusega. IDA-ICE kasutatava 15. arvutuskuupäeva mõju vähendamiseks tuleks arvutusperiood valida vähemalt maist septembrini.

Võtmesõnad: jahutukoormus, kontoriruum, parameetiline, varjestus, 15. kuupäev, dünaamiline, päikesegeomeetria, magistritöö

Lühendite ja tähiste loetelu

U – tarindi soojusläbivustegur, $W/(m^2 \cdot K)$

WWR – akna pindala suhe välistarindi pindalasse (ingl k *Window to wall ratio*), %

g – päikesekiirguse koguläbivustegur

T – päikese otsekiirguse läbivustegur

T_{vis} – valgusläbivustegur

a – ruumi laius, m

b – ruumi sügavus, m

h – ruumi kõrgus, m

h_w – akna kõrgus, m

b_w – akna laius, m

z – akna alumise ääre kõrgus põrandapinnast, m

f_w – akna raami osakaal akna pindalast, %

t_{dmin} – ööpäevane minimaalne kuiva termomeetri temperatuur, °C

t_{dmax} – ööpäevane maksimaalne kuiva termomeetri temperatuur, °C

t_{wmax} – ööpäevane maksimaalne märja termomeetri temperatuur, °C

t_j – jahutuse seadeaarv, °C

t_{jp} – temperatuur jahutuspatareis soojusvahetuspinnal, °C

t_{sp} – ventilatsiooni sissepuhke temperatuur, °C

$\phi_{seadmed}$ – soojuskoormus seadmetest, W

$\phi_{valgustus}$ – soojuskoormus valgustusest, W

SISSEJUHATUS

Maailmas toimub globaalne soojenemine. Pariisi kokkuleppega on seatud eesmärgiks hoida globaalne keskmine temperatuuritõus tunduvalt alla 2°C võrreldes tööstusrevolutsioonieelse ajaga [1]. Kliimaprobleemi lahendamiseks on Euroopa Liit võtnud endale kohustuse välja arendada vähese CO₂ heitmega, säästlik ning konkurentsivõimeline energiasüsteem. Võrdlusaastaks on võetud 1990. aasta. Aastaks 2030 on Euroopa liidu liikmetel kohustus vähendada heitmeid 40% võrra ning energiatarvet 32,5% võrra. Aastaks 2050 on eesmärk energiatõhususe meetmetega jõuda kliimanetraalsuseni [2].

Euroopa Liidu energia lõpptarbimisest moodustab peaaegu 50% kütte- ning jahutusenergia, millest 80% on kasutuses hoonetes. Seega on Euroopa liidu kliimaeesmärkide saavutamine tihedalt seotud hoonefondi renoveerimisega kasutades energiatõhusaid lahendusi [2]. Eestis on eesmärgiks vähendada kasvuhoonegaase 2050. aastaks 80% võrra võrreldes 1990. aasta tasemega. Hoonete energiatarve moodustas Eestis 2010 aasta seisuga 50% kogu energiatarbest. Hoonete energiatarbe vähendamine sõltub hoonete kujust, fassaadilahendustest, soojustamisest, tarindi lahendustest ning tehnosüsteemidest.

2016 aasta seisuga on keskmise temperatuuri kasv Eestis ligi 2 °C. Maailmas oli see näitaja 0,8°C [3]. Seega Eestis on kliimamuutuste mõju täiesti reaalne. Keskmise temperatuuri kasvuga kaasneb ka teatav vajadus võimsamate jahutussüsteemide järele.

Jahutussüsteem tuleb Eestis projekteerida uutele ja oluliselt rekonstrueeritavatele mitteeluhoonetele, kus 1. juunist 31. augustini ületatakse jahutuse seadeväärtust rohkem kui 100 kraadtundi. Erandiks on haridushooned, kus ruumitemperatuuri kontroll viiakse läbi 15. mais 15. juunini ning 15. augustist 30. septembrini. Büroohoonete jaoks on määruse järgne jahutuse seadeväärtus 25°C [4]. Tänapäeva Eestis projekteeritakse büroohoonetele reeglina jahutussüsteem. Sellega tagatakse ruumides parem sisekliima. Uuringutega on tõestatud hea sisekliima ning tööefektiivsuse vaheline seos. Hea sisekliima üheks põhiteguriks on operatiivne õhutemperatuur, mida otseselt mõjutab jahutussüsteem [5].

Päikesegeomeetria, tarindite soojusmahtuvuse ning soojuskoormuste konvektiivseks ning kiirguslikuks jaotumise tõttu teostatakse jahutussüsteemi lõppelementide ning külmajaamade dimensioneerimine dünaamilise arvutusega. Päikesegeomeetria tõttu

sõltub hoone eri fassaadide jahutuskoormuse tipu aeg fassaadi ilmakaarest. Külmaaja dimensioneerimiseks tuleb leida selline ajahetk, kus kõigi ruumide jahutuskoormuste liitmisel saadakse suurim väärtus. Sellise arvutuse keerukusest tingituna on külmajaamade dimensioneerimiseks dünaamiline arvutus vältimatu. Jahutuse lõppelementide dimensioneerimine üksiku ruumi jaoks on seotud reeglina vaid ühe ilmakaare päikesegeomeetriaga. Erandiks on nurgatoad.

Käesolev töö keskendub üksiku tubakontor tüüpi ruumi jahutusvõimsuste analüüsile. Lõputöö eesmärgiks on analüüsida erinevate parameetrite mõju üksiku kontoriruumi jahutusvõimsusele IDA-ICE simulatsioonitarkvara näitel. Lõputöös uuritakse erinevaid ruumi- ja akende kujusid, varjestuslahendusi, tarindeid, öise ventilatsiooni olemasolu ning IDA-ICE vaikeväärtuseks võetava 15. kuupäevade mõju jahutuskoormusele. Erinevate parameetrite mõju võrdluseks on toodud jahutuse lõppelementide valikusamm. Lõputöö tulemusena valmib hinnang, millised parameetrid on IDA-ICE mudeli koostamisel kõige olulisemad üksiku ruumi jahutusvõimsuste arvutamise seisukohalt Eesti kliimatingimustes. Saadud fassaadianalüüsi tulemusi võrreldakse ka varasemalt teostatud uuringutes saadud tulemustega.

Lõputöö esimeses peatükis antakse ülevaade, kuidas toimub jahutuskoormuste määramine. Teise peatükis antakse ülevaade lõputöö lähteandmetest ning kirjeldatakse metoodikat, kuidas lõputöös simulatsioone läbi viiakse. Kolmandas peatükis esitletakse teostatud simulatsioone, nende alusel loodud graafikuid ja tabeleid ning analüüsitakse saadud tulemusi.

Kirjanduse ülevaade

Uurimusi, mille raames oleks analüüsitud jahutuskoormuste määramatust üksiku parameetri muutmise seisukohalt Eesti kliima või sarnase kliima jaoks pole läbi viidud. Samas on Eestis läbi viidud uurimusi, mille teemad on seotud büroohoonete tehnosüsteemide energiatarbe ning fassaadide analüüsiga [6] [7] [8]. Samamoodi ei leidnud autor ka väliskirjandusest uurimusi, mis keskenduks üksikute parameetrite muutmise mõju analüüsile just üksiku ruumi jahutusvõimsuse analüüsi seisukohalt. Leitud jahutuskoormustega seotud uuringud keskenduvad pigem hoonete kogu jahutusvõimsusele, mis fassaadide eriajaliste soojuskoormuste tõttu ei võrdu kõigi jahutuse lõppelementide võimsuste summaga. Nagu ka Eesti kirjanduses on väliskirjanduses WWR analüüsiga seotud uuringuid [9]. Võrdlusallikaks on uuringutes reeglina tasuvusarvutused ning energiatarve.

Põhjalikuima Eesti kliima büroohoonete fassaadide ning energiakasutuse analüüsi on läbi viinud M. Thalfeldt 2016. aastal koostatud doktoritöös: „Külmas kliimas asuvate energiatarvivate büroohoonete fassaadi energia- ja majandusanalüüs“. Uurimuses on analüüsitud ning leitud büroohoonete disainiks mõistlikud fassaadilahendused Eesti kliima jaoks. Leitud on sobilikud akende suurusvahemikud vastavalt ilmakaarele ning akna tüübile. Suurusvahemiku leidmisel on arvestatud akende soojuslikke omadusi, erinevaid fassaadilahendusi, päevavalgusteguriga ning lahenduste kuluoptimaalsust. Töös pakutakse välja, et lõuna, ida ning lääne fassaadis võiks jääda WWR vahemikku 25...40%. Põhja fassaad võimaldab kasutada suuremat WWR [7]. M. Thalfeldt on uurinud ka erinevate varjestuslahenduste mõju jahutuskoormustele ning energiatarbele ida, lõuna ja lääne suunal. M. Thalfeldti saadud tulemused näitavad, et dünaamiline varjestus on efektiivsem kui staatiline varjestus kõigis suundades ning valitud varjestuslahendused on efektiivsemad lääne ja ida suunas võrreldes lõuna suunaga [10].

Jahutuskoormuste arvutamiseks vajalikku lähteinfot kirjeldab Eesti keeles hästi E. Abeli ja H. Volli kirjutatud raamat „Hoonete energiatarve ja sisekliima“. Raamat põhineb E. Abeli välja antud raamatul „Buildings and energy - a systematic approach“. Raamat annab ülevaate jahutuskoormuste arvutamise üldpõhimõtete kohta [11]. Jahutussüsteemide projekteerimisega seotud dünaamilise arvutusega lähteandmeid leiab määruste „Hoonete energiatarvete miinimumnõuded“ ning „Hoonete energiatarvete arvutamise metoodika“ suvise ruumitemperatuuri kontrolli osast [4], [12]. Lisaks leiab projekteerimisjuhiseid Kredexi juhendmaterjalidest ning Riigi Kinnisvara nõuetest [13], [14].

Rahvusvaheliselt on tehtud mitmeid fassaadide disaini ja optimeerimise analüüse. Näiteks F. Goia on uurinud Euroopa erinevatel laiuskraadidel paiknevate asukohtade jaoks sobivaid WWR osakaalusi. Üheks uuritavaks linnaks on Oslo, mille laiuskraad on ühtib enam vähem Tallinna omaga. Lõuna fassaadi WWR pakutakse välja 50...60%. Idas, läänes ja põhjas pakutakse välja optimaalseks WWR=40%. Tuleb välja tuua, et uuringus näidatakse päris kaalukat valgustuse energiatarbe vähenemist seoses suurema loomuliku valgusega ruumides [9]. ASHRAE jahutuse tipuvõimsuste erinevate kasutuses olnud arvutuse meetodikate võrdlust saab lugeda C. Mao artiklist[15]. Samuti on C. Mao kirjeldanud USAs jahutuse tipuvõimsuse arvutuse kohta leiduvat kirjandust [16]. R. Elghamry on kirjeldanud akende parameetrite (mööttude ja asukoha) muutumisest tulenevat mõju jahutuse energiatarbele, kütte energiatarbele, tarbitud energia hinnale ja CO₂ heitmetele [17].

1. JAHUTUSVAJADUS

1.1 SISEKLIIMA

Inimesed veedavad Eesti kliimavööndis tavaliselt üle 90% ajast ruumides [18]. Kuna palju aega veedetakse ruumides, siis on oluline, et nendes ruumides oleks tagatud hea sisekliima. Sisekliima peab olema kooskõlas ka ruumi kasutuseesmärgiga [11]. Sisekliimat määravad parameetrid on termiline sisekliima, õhu kvaliteet, valgus, müra, ionisatsioon ning elektromagnetväljad [8].

Ruumi termiline sisekliima sõltub ruumi operatiivsest temperatuurist, õhu liikumise kiirusest, tõmbusest ning õhu niiskusest. Operatiivse temperatuuri määravad ruumi õhu temperatuur ning ruumi pindade temperatuurid. Inimesed tunnetavad operatiivset temperatuuri [11].

Ruumis oleva temperatuuri määrab ruumi soojusbilanss [11]. Soojusbilansis osalevad elemendid on toodud alapeatükis 1.2. Kui ruumi sisenev soojusenergia on suurem sealt väljuvast (eemaldatavast) soojusenergiast, siis toimub temperatuuri kasv ja vastupidi. Kui ruumi siseneva ja väljuva energia summa on võrdne, siis temperatuur ei muutu [11]. Ruumi õhutemperatuuri tagamiseks rajatakse kütte- ja jahutussüsteeme. Ruumi õhutemperatuur hoitakse teatud vahemikus. Kui ruumi temperatuur langeb alla selle vahemiku alumise piiri (temperatuuri alumine seadeary), siis vajab ruum kütmist. Ületades ülemist piiri (temperatuuri ülemine seadeary) tuleb ruumi jahutada. Selliselt ei saa ka jahutus ja küte korraga töötada [11].

Ruumi õhu liikumise kiiruse määravad peamiselt ruumi ventilatsioon ja jahutus. Kõrge õhu liikumiskiirus ruumis võib tekitada tõmbustunnet. Tõmbustunne tekib kergemini, kui liikuva õhu temperatuur on madalam. Jahutus- ja ventilatsioonisüsteemide kavandamisel tule vältida tõmbustunde tekkimist. Eriti oluline on see büroohoonetes, kus suurem osa tööst toimub arvuti taga kindla koha peal. Tõmbustundest tekkiva ebameeldiva sisekliima vältimiseks on soovitatav büroohoonetes jahutuskoormused hoida alla 100 W/m^2 . [11], [18].

1.2 LIIGSOOJUS

Ruumi põhilised liigsoojuse allikad on [11]:

- Valgustus
- Seadmed
- Päikesekiirgus
- Inimesed

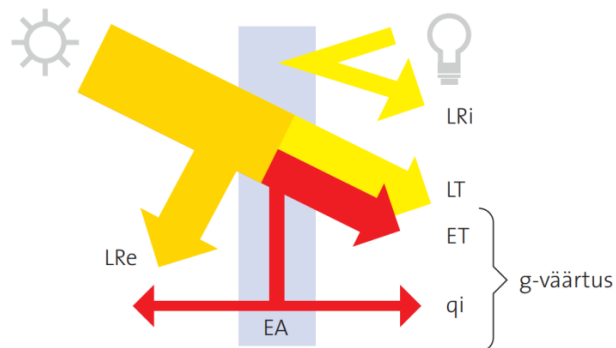
Täiendavalt osalevad ruumi soojusbilansis [11]:

- Ventilatsioon
- Infiltratsioon
- Soojusläbivus
- Tarindite massiivsus

Kõik eeltoodud elemendid osalevad ruumi soojusbilansis. Eesti kliimas on reeglina soojusläbivuse ja infiltratsiooni mõju jahutusvajadusele tühise suurusega, kuna välisõhu temperatuuri ning ruumis hoitava temperatuuri vahe on arvutusperioodil väike ning hooned on reeglina hästi soojustatud. Ventilatsiooni mõju jahutuskoormusele sõltub sellest, kas ventilatsiooni õhku jahutatakse. Jahutuseta ventilatsiooniõhk võib olla täiendav liigsoojuse allikas ruumile. Jahutatud õhk jahutab ruumi sõltuvalt sissepuhke õhukogusest ning ruumiõhu ja sissepuhutava õhu temperatuuride vahest. [11].

1.2.1.1 Päikesekiirgus

Päikesekiirgus jaguneb otseseks ja hajusaks päikesekiirguseks. Otsese päikesekiirguse kiired on kindla suunaga. Hajusa kiirguse kiired on mistahes suunaga. Hajuskiirgus tekib päikesekiirguse atmosfääri läbimisel. Nii otsese kui ka hajuskiirguse võimsused on tulenevalt päikesegeomeetriast ajas muutuvad suurused. Päikesekiirguse koguvõimsus sõltub pilvisusest. Seejuures on päikesekiirguse hajusvalguse osakaal ning võimsus pilvise ilmaga suurem. Päikesegeomeetriaga seotud teooriast ning päikesekiirguse trendidest Eestis saab täpsemalt lugeda Eesti kiirguskliima teatmikust[19].



Joonis 1 Päikesekiirguse liikumine läbi akna [20]

Joonisel 1 on näidatud, kuidas toimub päikesekiirguse liikumine läbi akna. Joonisel on toodud valguskiirgus kollasega ning päikese soojuslik kiirgus punasega. Aknale langevast kogukiirgusest osa peegeldub akna pinnalt (L_{re}). Osa kiirgusest neeldub

aknas. Aknas neeldunud kiirgusest osa satub tagasi väliskeskkonda ning osa ruumi põhiliselt konvektiivse soojusülekanedega (q_i). Päikesest ruumi tulenev soojuskoormus moodustub akent läbinud kiirgusest (ET) ning aknas neeldumisel ruumi lisanduvast konvektiivsest soojuskoormusest(q_i)[20].

1.2.1.2 Tarindid

Ruumi liigsoojuse allikatest tulenev soojus jaguneb kiirguslikuks ning konvektiivseks. Konvektiivse soojuskoormuse mõju on kohene. Selle tulemusel toimub ruumis oleva õhu segunemine. Kiirguslik soojusvahetus toimub pindade vahel. Seega soojendavad ruumi kiirguslikud soojuskoormused ruumi pindasid ning vastavad pinnad omakorda ruumi[18].

Ruumi tarindite soojenemine sõltub ri soojusmahtuvusest. Eri soojusmahtuvus sõltub piirde aktiivsest paksusest, eri soojussisaldusest ning tarindi materjali soojuseri juhtivusest. Kiirguslike soojuskoormuste ajas muutumise tõttu toimub päeval ruumi tarindite soojenemine päikesekiirguse ning teiste kiirguslike soojusallikate toimel ning jahtumine öösel[18].

1.2.1.3 Inimesed

Inimene toodab oma ainevahetuse käigus soojust. Inimeste soojusvahetus ruumiga käib põhiliselt konvektsiooni, kiirguse ja aurumisega. Ruumi temperatuuri mõjutavad konvektsioon ja kiirgus. Aurumine mõjutab ruumi niiskussisaldust. Inimese soojuseralduse suurus sõltub inimese ainevahetuse aktiivsusest ja riietusest. Inimese ainevahetuse aktiivsust nimetatakse metabolismiks. 1 met vastab rahulikus olekus oleva inimese ainevahetusele. Riietus mõõdetakse clo-des. 1 clo-le vastab soojustakistus $0,155 (m^2 \cdot K)/W$ [18].

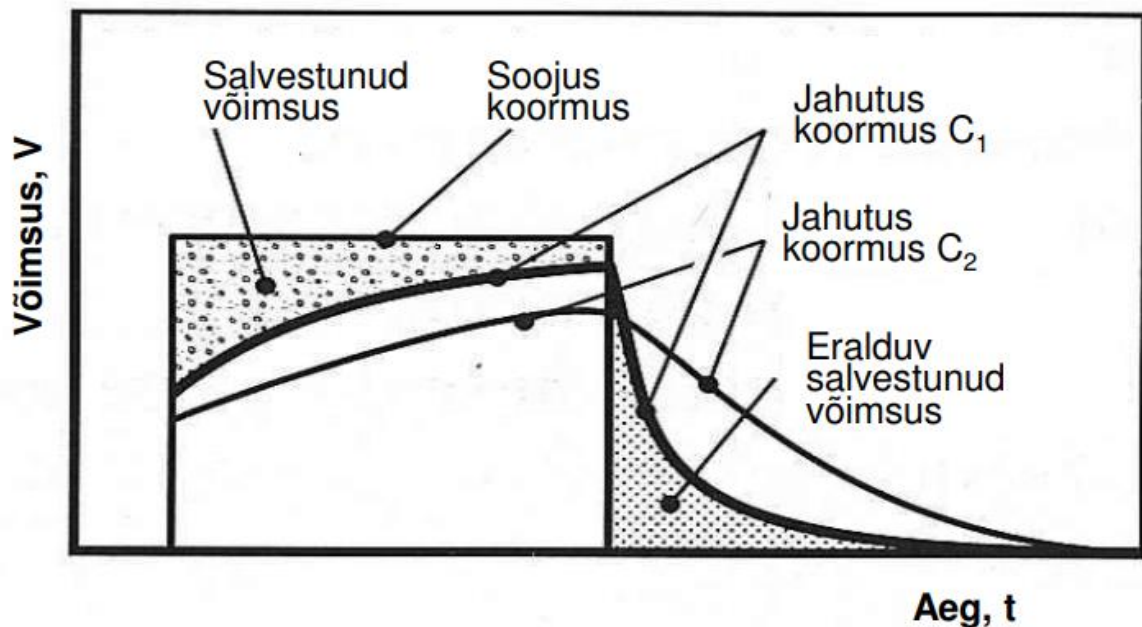
Jahutuskoormuse arvutamiseks võetakse inimeste soojuseraldus arvesse ruutmeetri peale teisendatud ühikuna. Näiteks käesolevas uurimistöös on arvestatud 0,2 inimesega ruutmeetri kohta, kes on riietatud 0,85 clo ja kelle metabolism on 1,2 MET. Vajalikke kasutusprofiile leiab Hoonete energiatõhususe arvutamise metoodikast [12], [14].

1.2.1.4 Valgustus ja seadmed

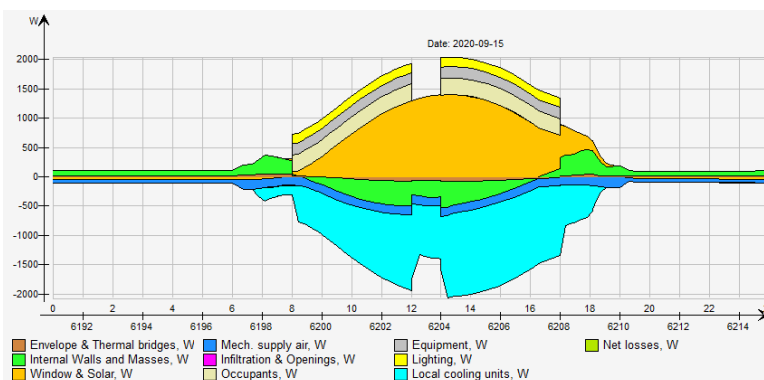
Valgustuse ja seadmete soojuseraldus võetakse reeglina arvesse ruumeetri peale jagatud ühikuna kasutades reaalselt soojuseraldust iseloomustavat kasutusprofiili. Vastavaid normväärtuseid ning kasutusprofiile on võimalik leida määruse „Hoonete energiatõhususe arvutamise metoodika“ suvise ruumitemperatuuri kontrolli tabelitest. Büroohonete jaoks pakutakse välja valgustuse võimsus pinnaühiku kohta $10 W/m^2$ ning seadmete jaoks $12 W/m^2$. Võib ka kasutada madalamaid valgustuse võimsuseid kui on valitud madala soojuseraldusega valgustid [11] [12].

1.2.1.5 Dünaamiline arvutus

Ruumi konvektiivsed soojuskoormused avaldavad ruumi temperatuurile kohest mõju. Kiirguslikud soojuskoormuste mõju avaldub viitega. Selle tõttu ei lange kokku ruumi soojuskoormuste tipp ning jahutuskoormuste tipp. Päikesegeomeetriast ning ruumi tarindite eri soojusmahtuvusest tulenev viiteaeg soojuskoormuste mõjule teeb jahutuskoormuste tipu käsitsi määramise väga keeruliseks. Leidub arvutusmeetodeid, kus kiirguslike mõjusid arvestatakse erinevate ajateguritega. Selliseid meetodeid on ASHRAE käsiraamatutes toodud mitmeid. Reeglina tuleks jahutuskoormused määrata dünaamilise arvutusega [21]. Alltoodud joonistel on näha, kuidas muutub ajas soojus ja jahutuskoormus ning millise dünaamikaga muutuvad jahutuskoormused tüüpruumis lõuna suunal. Jooniselt 3 on hästi näha, kuidas suurte soojuskoormuste tulemusel toimub soojuse salvestumise tarinditesse ning tarinditesse salvestunud soojus hakkab mõju avaldama hiljem, kui muud soojuskoormused on langenud.



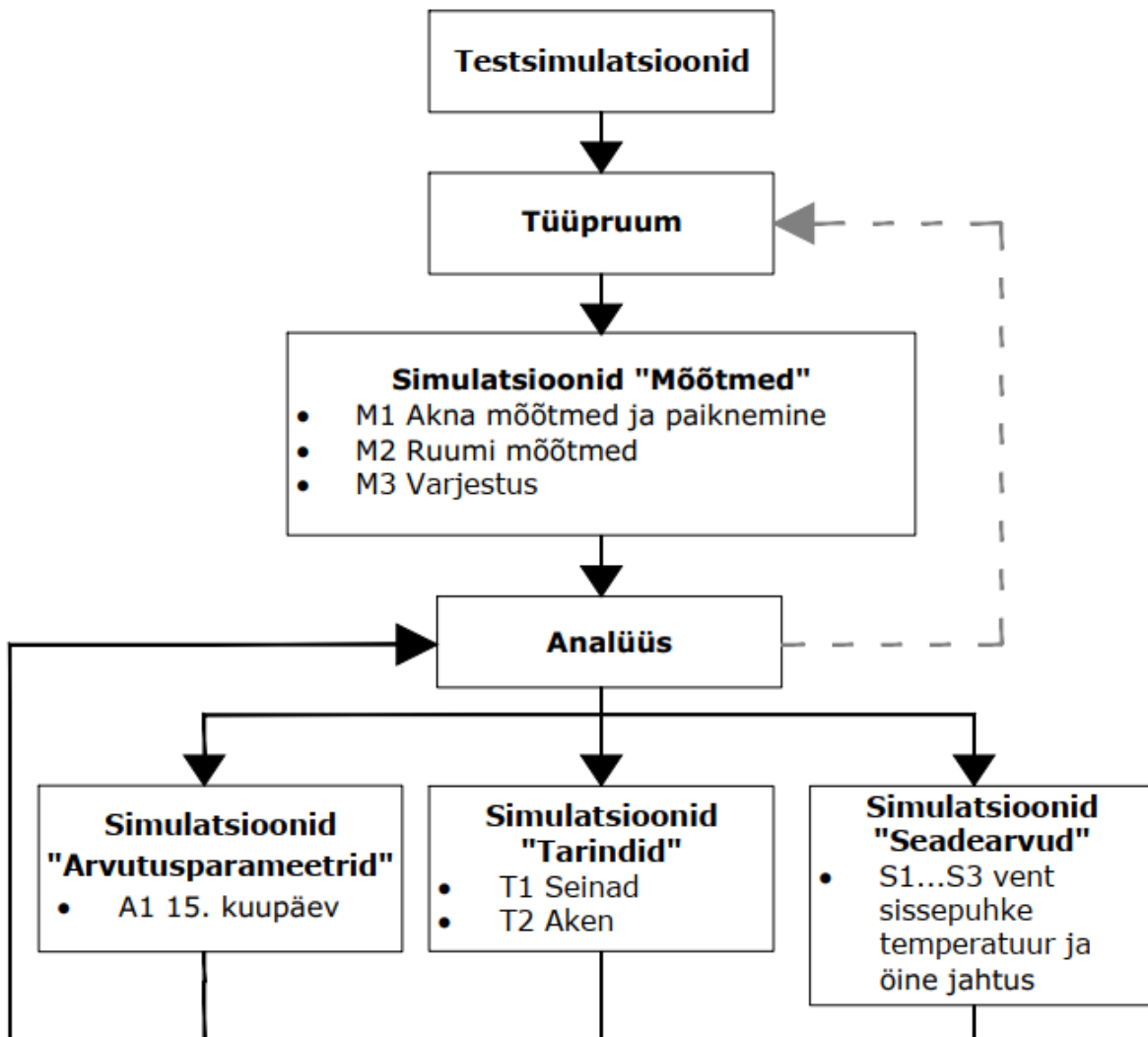
Joonis 2 Jahutuskoormuse ja soojuskoormuse dünaamika [21]



Joonis 3 Soojusbilanss tüüpruumis lõuna suunal

2. METOODIKA

2.1 PROTSESS



Joonis 4 Protsessipuu

2.1.1 Kirjeldus

Vastavalt testsimulatsioonidele, projekteerimis ning normdokumentidele koostati tüüpruum. Tüüpruumi põhjal hakati läbi viima mõõtmega seotud simulatsiooni. Mõõtmega seotud simulatsioonidega analüüsiga tuli ka välja detaile tüüpruumis, mida oli vaja täpsustada. Simulatsioonid tarindite ja seadearvudega viidi läbi kasutades muutuva WWR-ga mudelit. Arvutusparameetrite simulatsioonid viidi läbi kasutades tüüpruumi.

Simulatsioonid jaotati 4 kategooriasse:

- Mõõtmed [M]
- Arvutusparameetrid [A]
- Tarindid [T]
- Seadearvud [S]

Lisaks jaotati simulatsioonid alakategooriatesse, mis tähistati numbriga nt M1. Iga alakategooria sisaldab 2...7 eraldiseivat simulatsiooni (IDA-ICE mudelit). Üks simulatsioon IDA-ICE mudelis koosneb 8. erineva parameetriga ruumist, mis on asetatud IDA-ICE mudelisse nii, et need üksteist ei mõjutaks. Näiteks võib 1 mudel koosneda 8 erineva akna laiusega ruumist. Simulatsiooni läbiviimiseks kasutati IDA ICE funktsiooni *parametric run*. Selles seati muutujaks hoone orientatsioon, mida muudeti 16. erinevas suunas. *Parametric run*'i väljunditeks seati kõik programmis mõõdetavad jahutuskoormust iseloomustavad suurused ruumi põrandapinna ruutmeetri kohta. Tulemused kopeeriti *Excel*'i tabelarvutustarkvarasse, kus viidi läbi andmetöötlus. Simulatsioonide kohta koostati tabelid, millega iseloomutati muutuva parameetri mõju jahutuskoormusele ning orientatsiooni mõju jahutuskoormusele. Tabelitele lisati 100 W/m² piir, mis iseloomustab maksimaalset jahutuskoormust, millega on võimalik tagada mugavat sisekliimat [11]. Ühe simulatsiooniga saadi 16*8=128 olukorra tulemused, millega on ära iseloomutatud ruumiparameetri muutuste mõju kõigis põhi- ja vaheilmakaartes.

Enamus eraldiseivaid simulatsioone viidi läbi muutes ühte tüüpruumi parameetrit. Vajadusel muudeti ühe simulatsiooni jaoks veel mõnda tüüpruumi parameetrit, et laiendada simulatsioonist saadavaid tulemusi. Nt muudeti simulatsioonis M1-2 akna kõrgus tüüpruumi laiusega võrdseks selleks, et uurides akna kõrguse muutuse mõju saaks jõuda 100% akna pinnani välise tarindi pinnast.

2.2 TÜÜPRUUM

Tüüpruumi parameetrid valiti sellised, et need iseloomustaks väikest tubakontorit büroohoones.

2.2.1 Mõõtmed

Tabel 1 Tüüpruumi mõõtmed

Kirjeldus	Tähis	Väärtus	Ühik
Laius	a	4,0	m
Pikkus	b	4,0	m
Kõrgus	h	3,2	m
Akna kõrgus	h_w	1,6	m
Akna laius	b_w	3,0	m
Akna alumise kõrgus põrandapinnast	z	0,8	m
Akna pindala suhe seina pindalasse	WWR	37,5	%
Akna raami osakaal akna pindalast	f_w	10,0	%

Ruumi mõõdud (laius, pikkus ja kõrgus) valiti arvestusega, et nendega oleks lihtsam viia läbi mõõtmega seotud simulatsioone. Aken paigutati tüüpruumi välispiirde keskele. Akna laius valiti 2 korda suurem kõrgusest ning arvestati Martin Thalfedti 2016 aastal läbiviidud energiatõhusate büroohonete fassaadilahenduste uuringus välja toodud soovitusel, mille järgi võiks WWR lõuna-, ida-, ja läänesuunas olla maksimaalselt 40% [7]. Raami osakaal akna pindalast valiti 10%. Martin Thalfedti energiatõhusate büroohonete fassaadilahenduste uuringus on kasutatud raami osakaalu 15% [7]. Madalam valik peaks tagama konservatiivsemad tulemused. Enamuse läbi viidud arvutusolukordade raami osakaal oleks reaalsuses suurem.

2.2.2 Välised parameetrid

2.2.2.1 Tarindid

Tabel 2 Tüüpruumi tarindid

Tarind	Iseloomustus																		
Välissein	<p><i>Kihid(seest välja):</i></p> <ul style="list-style-type: none"> -Beton 150mm -Isolatsioon 195mm ($U=0,036 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$) -Beton 80mm <p>$U_{vs}=0,224 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$</p>																		
Sisesein	<p><i>Kihid:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> -Kipsplaat 26mm -Isolatsioon 30mm ($U=0,036 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$) -Kipsplaat 26mm 																		
Aken	<p><i>Klaasid:</i></p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 60%;"></td> <td style="text-align: right;">Pilkington</td> <td style="text-align: right;">Optifloat</td> </tr> <tr> <td>-kood</td> <td style="text-align: right;">Green</td> <td style="text-align: right;">(6gn-15Ar-S(3)6)</td> </tr> <tr> <td>-Soojusläbivus</td> <td colspan="2" style="text-align: right;">$U_{klaas}=1,1 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$</td> </tr> <tr> <td>-Päikesekiirguse koguläbivus</td> <td colspan="2" style="text-align: right;">$g=0,40$</td> </tr> <tr> <td>-Otsekiirguse osakaal</td> <td colspan="2" style="text-align: right;">$T=0,34$</td> </tr> <tr> <td>-Valgusläbivus-tegur</td> <td colspan="2" style="text-align: right;">$T_{vis}=0,66$</td> </tr> </table> <p><i>Raam:</i></p> <p>$U_{raam}=1,0 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$</p>		Pilkington	Optifloat	-kood	Green	(6gn-15Ar-S(3)6)	-Soojusläbivus	$U_{klaas}=1,1 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$		-Päikesekiirguse koguläbivus	$g=0,40$		-Otsekiirguse osakaal	$T=0,34$		-Valgusläbivus-tegur	$T_{vis}=0,66$	
	Pilkington	Optifloat																	
-kood	Green	(6gn-15Ar-S(3)6)																	
-Soojusläbivus	$U_{klaas}=1,1 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$																		
-Päikesekiirguse koguläbivus	$g=0,40$																		
-Otsekiirguse osakaal	$T=0,34$																		
-Valgusläbivus-tegur	$T_{vis}=0,66$																		

Tarindite soojuslik infona kasutati IDA-ICE baasandmeid. Valitud tüüpruumi välisseina lahendust (sandwich paneel) on kasutatud ka Martin Thalfeldti 2016 aasta fassaadiuuringus, kuna see on üks põhilisemaid büroohonetes kasutatavaid lahendusi [7]. Aknaklaasid valiti sellised, et need iseloomustaks tänapäeval ehitatavaid büroooneid. Hoone katuse ning põranda tarindi mõju ei uuritud. Ruumide paigutusega mudelis välistati põranda ja katuse mõju uurimistulemustele.

Infiltratsiooni õhuhulka on arvestatud konstandina. See arvutati vastavalt „Hoonete energiatõhususe arvutamise metoodika“ toodud õhulekkearvu baasväärtusele $q_{50}=2,5 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ ning korruselisust iseloomustavale parameetrile $x=15$ [12].

2.2.2.2 Geograafiline asukoht

Tabel 3 Tüüpruumi asukohainfo

Kirjeldus	Väärtus
Riik	Eesti
Piirkond	Tallinn-Harku
Pikkuskraad	59,38N
Laiuskraad	24,58E
Kõrgus merepinnast	33m

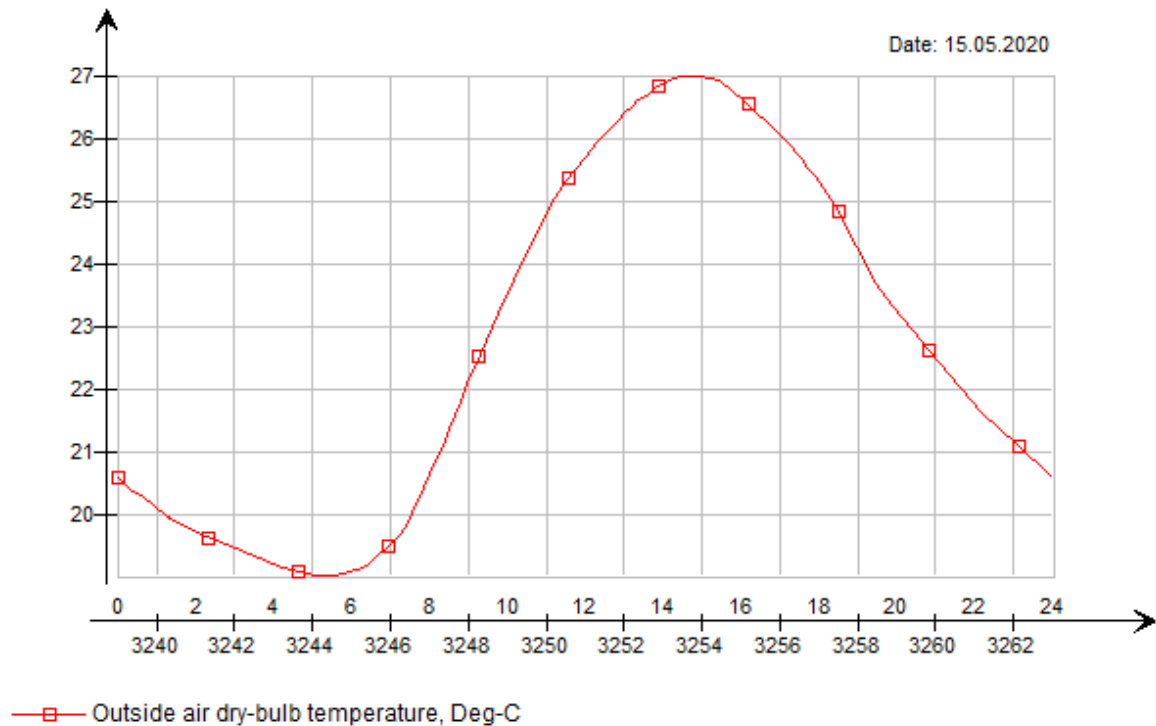
Tüüpruumi asukohana kasutati IDA-ICE programmi andmebaasis olevat Tallinn-Harku_260380 (ASHRAE 2013) asukohta.

2.2.2.3 Välisõhu temperatuur

Tabel 4 Tüüpruumi sünteetilise arvutuse lähteinfo

Kirjeldus	Tähis	Väärtus	Ühik
Ööpäeva minimaalne kuivtermomeetri temperatuur	t_{dmin}	19	°C
Ööpäeva maksimaalne kuivtermomeetri temperatuur	t_{dmax}	27	°C
Ööpäeva maksimaalne märja termomeetri temperatuur	t_{wmax}	19,5	°C

Tüüpruumi sünteetiliseks arvutusteks vajalik info määrati arvestades EVS 906:2018 toodud arvutusparameetreid $t = 27 \text{ °C}$, $RH = 50\%$ [22].



Joonis 5 Välisõhu arvutusliku kuivtermomeetri temperatuuri muutumine ööpäeva vältel kasutades sünteetilist arvutust vastavalt valitud lähteinfole

2.2.3 Sisemised parameetrid

2.2.3.1 Vabasoojused

Tabel 5 Tüüpruumi vabasoojused

Kirjeldus	Tähis	Väärtus	Ühik
Inimeste tihedus		0,2	in/m ²
Riietus		0,85	clo
Metabolism		1,2	MET
Seadmed	ϕ_{seadmed}	12	W/m ²
Valgustus	$\phi_{\text{valgustus}}$	10	W/m ²

Tüüpruumi vabasoojused seadmetest ja valgustusest valiti määruses „Hoonete energiatõhususe arvutamise meetodika“ toodud tüüpilise kasutuse andmetest [12]. Inimestest tuleneva vabasoojuse määramisel arvestati 1 inimesega 5 m² ruumi põrandapinna kohta. RKAS soovitude järgi tuleb kabinetiruumi tehnosüsteemide kavandamisel arvestada 4...7 m² põrandapinda ühe inimese kohta [14].

2.2.3.2 Tehnosüsteemide seadearvud

Tabel 6 Tüüpruumi iseloomustavad seadearvud

Kirjeldus	Tähis	Väärtus	Ühik
Jahutuse seadearv	t_j	25	°C
Jahutuse seadearv (kasutusvälisel ajal)	t_j	28	°C
Ventilatsiooni sissepuhke temperatuur	t_{sp}	20	°C
Temperatuur jahutuspatareis soojuvahetuspinnaal	t_{jp}	20	°C

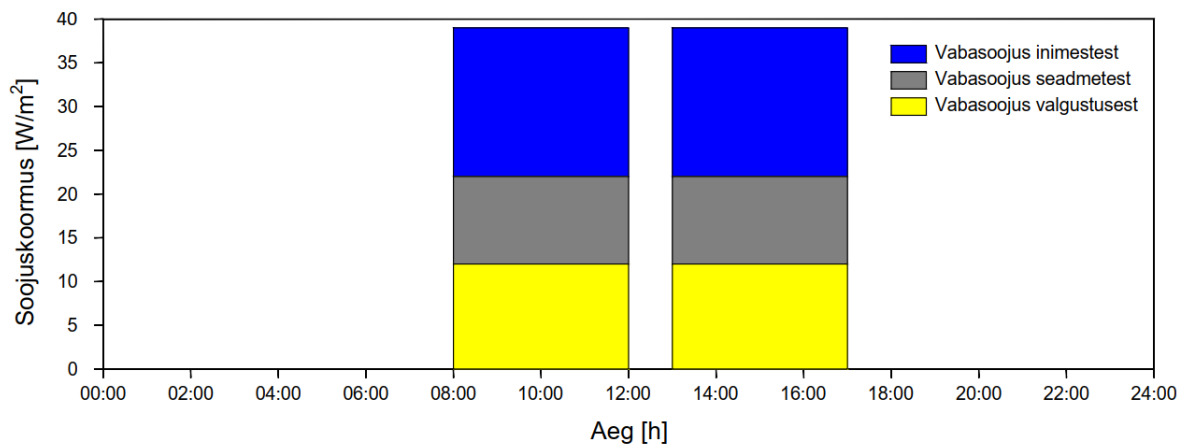
Jahutuse seadearv büroohonetele 25 °C on välja antud juhendmaterjalis „Energiatõhususe juhendmaterjal ja meetodika peaprojekteerijatele ja arhitektidele“[23]. Selleks, et simuleerida öist jahutuse väljalülitamist on antud öiseks jahutuse seadearvuks 28 °C. Selleks et simulatsiooni tulemused ei sisaldaks varjatud soojuse mõju on temperatuur jahutuspatarei soojusvaheti pinnal 20°C. Ventilatsiooni sissepuhke temperatuur on valitud 20 °C ventilatsiooni jahutuse osakaalu vähendamiseks.

2.2.3.3 Kasutusprofiilid

Tabel 7 Tüüpruumi kasutusprofiilid

Kirjeldus	Periood	Väärtus	Ühik
Seadmed, inimesed, valgustus	08:00-12:00	1	-
	12:00-13:00	0	-
	13:00-07:00	1	-
	17:00-08:00	0	-
Ventilatsioon	06:00-19:00	1	-
	19:00-06:00	0,3	-
Jahutus	06:00-07:00	28...25	°C
	07:00-18:00	25	°C
	18:00-19:00	25...28	°C
	19:00-06:00	28	°C

Tüüpruumi kasutusprofiilina seadmete, inimeste, valgustuse jaoks on kasutatud määruses „Hoone energiatõhususe arvutamise meetodika“ toodud suvise temperatuuri kontrolli kasutusandmeid tubakantori jaoks [12]. Ventilatsiooni- ning jahutussüsteem tööperioodina on arvestatud 06:00-19:00. Jahutussüsteemi üleminek öiselt temperatuurilt 28 °C päevasele 25 °C on mudelis teostatud ühtlaselt tunni aja jooksul. Ühtlane üleminek välistab mudelites olukorra, kus hommikul või öhtul ülemineku hetkel arvutab simulatsioon väga kõrge jahutusvajaduse.



Joonis 6 Vabasoojuste soojuskoormused ruumis vastavalt kasutusprofiilile

2.3 VÕRDLUSPARAMETRID

Simulatsiooni tulemuste võrdluseks reaalse projekteerimisprotsessiga on uuritud fancoilide ja jahutustalade valimissammused erinevatel temperatuurigraafikutel. Fancoilide valikusammud on valitud Chiller BOX tüüpi fancoilide järgi [24]. Jahutustalade valikusammud on võetud Haltoni valikuprogrammist [25]. Käesolevas punktis toodud tabelid on loodud tootjate andmete põhjal simulatsioonides saadud tulemuste võrdluseks. Tabeleid ei tohi mitte mingil juhul kasutada reaalseks seadmete valikuks. Täpsete sammudega ning toodete võimsustega tutvuda konkreetse tootja kodulehel.

2.3.1 Fancoil valiku samm

Allpool tabelites on toodud Chiller'i BOX tüüpi *fancoil*'ide valikusammud temperatuurigraafikutel 14°C/17°C ja 7°C/12°C. Temperatuurigraafikul 14°C/17°C on madalaimaks valikusammuks 50W. Suuremate seadmete korral samm suureneb. Temperatuurigraafikul 7°C/12°C on madalaimaks valikusammuks 100W. Suuremate seadmete korral samm suureneb. Kohati võib mõlema temperatuurigraafiku juures toodete vahele jääda ka väiksem samm 10W seadmete eri kiiruste ja suuruste kombinatsioonide tõttu [24].

Tabel 8 Fancoili valikusamm sõltuvalt ruumi mõõtudest Chiller BOX põhjal

Ruumi sügavus, m	Ruumi laius, m	Ruumi pindala, m ²	Valikuvõimsuse samm (100W), W/m ²	Valikuvõimsuse samm (50W), W/m ²	Valikuvõimsuse samm (10W), W/m ²
3	4	12	8,3	4,2	0,8
3	6	18	5,6	2,8	0,6
3	8	24	4,2	2,1	0,4
3	10	30	3,3	1,7	0,3
4	4	16	6,3	3,1	0,6
4	6	24	4,2	2,1	0,4
4	8	32	3,1	1,6	0,3
4	10	40	2,5	1,3	0,3
5	6	30	3,3	1,7	0,3
5	8	40	2,5	1,3	0,3
5	10	50	2,0	1,0	0,2
6	6	36	2,8	1,4	0,3
6	8	48	2,1	1,0	0,2
6	10	60	1,7	0,8	0,2

Tabel 9 Fancoili valikusamm sõltuvalt ruumi pindalast Chiller BOX põhjal

Ruumi pindala, m ²	Valikuvõimsuse samm (100w), W/m ²	Valikuvõimsuse samm (50W), W/m ²	Valikuvõimsuse samm (10W), W/m ²
10	10,0	5,0	1,0
15	6,7	3,3	0,7
20	5,0	2,5	0,5
25	4,0	2,0	0,4
30	3,3	1,7	0,3
35	2,9	1,4	0,3
40	2,5	1,3	0,3
45	2,2	1,1	0,2
50	2,0	1,0	0,2
55	1,8	0,9	0,2
60	1,7	0,8	0,2

2.3.2 Jahutustala valiku samm

Halton võimaldab valida jahutustalasisid sammuga kuni 100mm. Toodete sammud võivad olla ka 300mm ja 600mm. Halton REX Integrated VAV jahutusvõimsus ühe meetri kohta ruumitemperatuuril 25°C ja külmakandja temperatuurigraafikul 14°C/17°C on reeglina üle 400 W/m. Kuna näitaja ei ole konstant (kasvab toote pikenedes ning õhuhulga kasvades), siis tabeli jaoks on antud suurus, millest enamus olukordi on suuremad. Näiteks saab valikuprogrammis saavutada madalamaid jahutuskooormusi meetri kohta, kui kasutada ebareaalselt väikseid õhukogused nagu 5 l/s. Tabelis on toodud

valikuvõimsuse samm teisendatuna ühikusse W/m^2 ruumi pindala kohta ning viidud läbi võrdlus eri ruumi mõõtude pindaladega [25].

Tabel 10 Jahutustala valikusamm sõltuvalt ruumi mõõtudest Halton Vario VAV põhjal

Ruumi sügavus, m	Ruumi laius, m	Ruumi pindala m^2	Valikuvõimsuse samm (300mm), W/m^2	Valikuvõimsuse samm (100mm)m W/m^2
3	4	12	10,0	3,3
3	6	18	6,7	2,2
3	8	24	5,0	1,7
3	10	30	4,0	1,3
4	4	16	7,5	2,5
4	6	24	5,0	1,7
4	8	32	3,8	1,3
4	10	40	3,0	1,0
5	6	30	4,0	1,3
5	8	40	3,0	1,0
5	10	50	2,4	0,8
6	6	36	3,3	1,1
6	8	48	2,5	0,8
6	10	60	2,0	0,7

Tabel 11 Jahutustala valikusamm sõltuvalt ruumi pindalast Halton Vario VAV põhjal

Ruumi pindala	Valikuvõimsuse samm (300mm), W/m^2	Valikuvõimsuse samm (100mm), W/m^2
10	12,0	4,00
15	8,0	2,67
20	6,0	2,00
25	4,8	1,60
30	4,0	1,33
35	3,4	1,14
40	3,0	1,00
45	2,7	0,89
50	2,4	0,80
55	2,2	0,73
60	2,0	0,67

2.3.3 Hinnang valiku sammule

Järgnevates simulatsioonides saab lugeda tühiseks võrreldes valikusammuga kõik muutused, mis jäävad alla $1 W/m^2$. Selle eelduseks on, et ruumide pindala jääb alla $50 m^2$, mis tubakontorite puhul reeglina peaks kehtima. Tuleb kindlasti arvestada, et simulatsioonid uurivad korraga vaid ühte parameetrit ning mitme parameetri koondmõju võib olla suurem.

3. SIMULATSIOONID

3.1 MÕÕTMED

Mõõtmeid iseloomustavate simulatsioonidega uuritavad parameetrid on: akna mõõtmed ja paiknemine, ruumi mõõtmed ning varjestuslahenduste mõju jahutuskoormusele. Simulatsioonide tulemusi näidatakse kahe graafikuga. Esimesel graafikul tuuakse välja parameetri muutmise ja orientatsiooni vahelise seos ning teises graafikus tuuakse välja muudetava mõõdu ning jahutuskoormuse vaheline seos. Jahutuskoormus on graafikutes toodud negatiivse märgiga kuna IDA-ICE soojusbilansis on jahutuskoormus negatiivse märgiga.

3.1.1 Akna mõõtmed

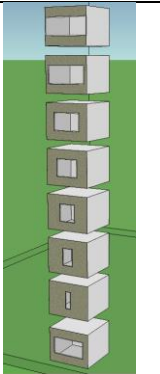
Akna mõõtude mõju uurimiseks teostati 3 parameetrilist simulatsiooni. Kõigis simulatsioonides jäi akna keskkohht välispiirde keskpunkti. Esimeses simulatsioonimudelil M1-1 muudeti akna laiust. Teises simulatsioonimudelil M1-2 muudeti akna laiust kasutades akna kõrgust $h_w=3,2\text{m}$. Kolmandas simulatsioonimudelil M1-3 muudeti akna kõrgust kasutades akna laiust $b_w=4,0\text{m}$.

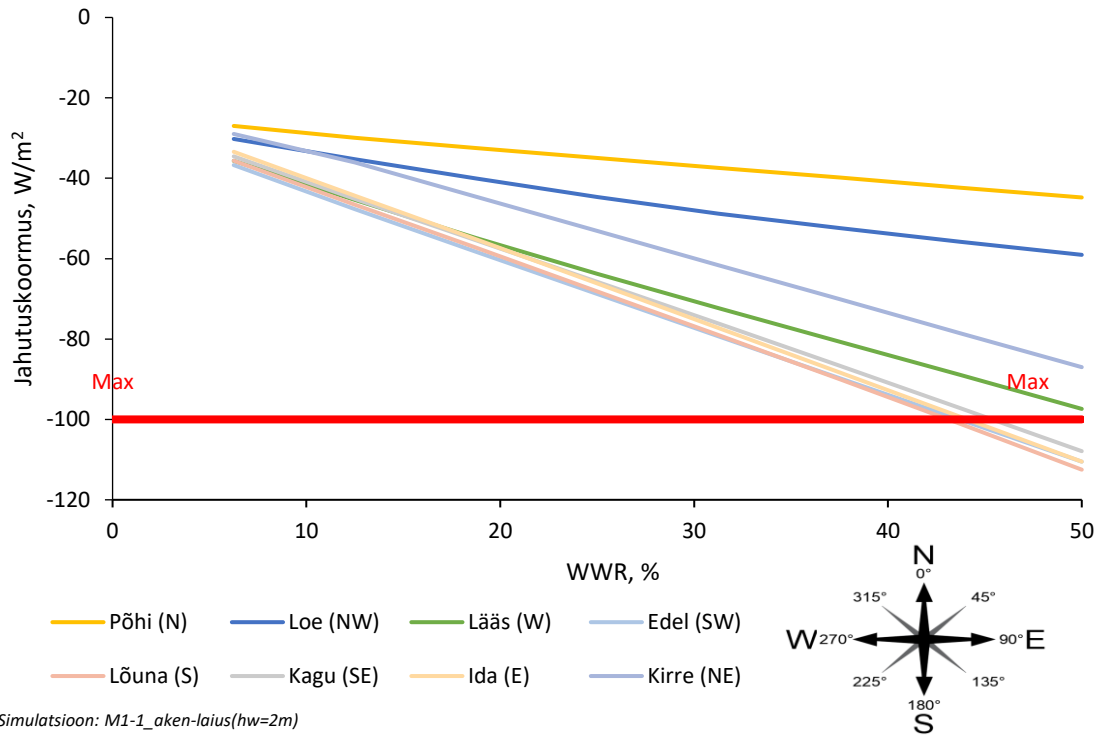
3.1.1.1 Akna laius ($h_w=1,6\text{m}$)

Simulatsioonimudelil M1-1 muudeti akna laiust vahemikus $0,5\text{...}4,0\text{m}$. Akna keskkohht jäi kõikides simulatsioonides samasse kohta. Tüüpruumi muid parameetreid ei muudetud.

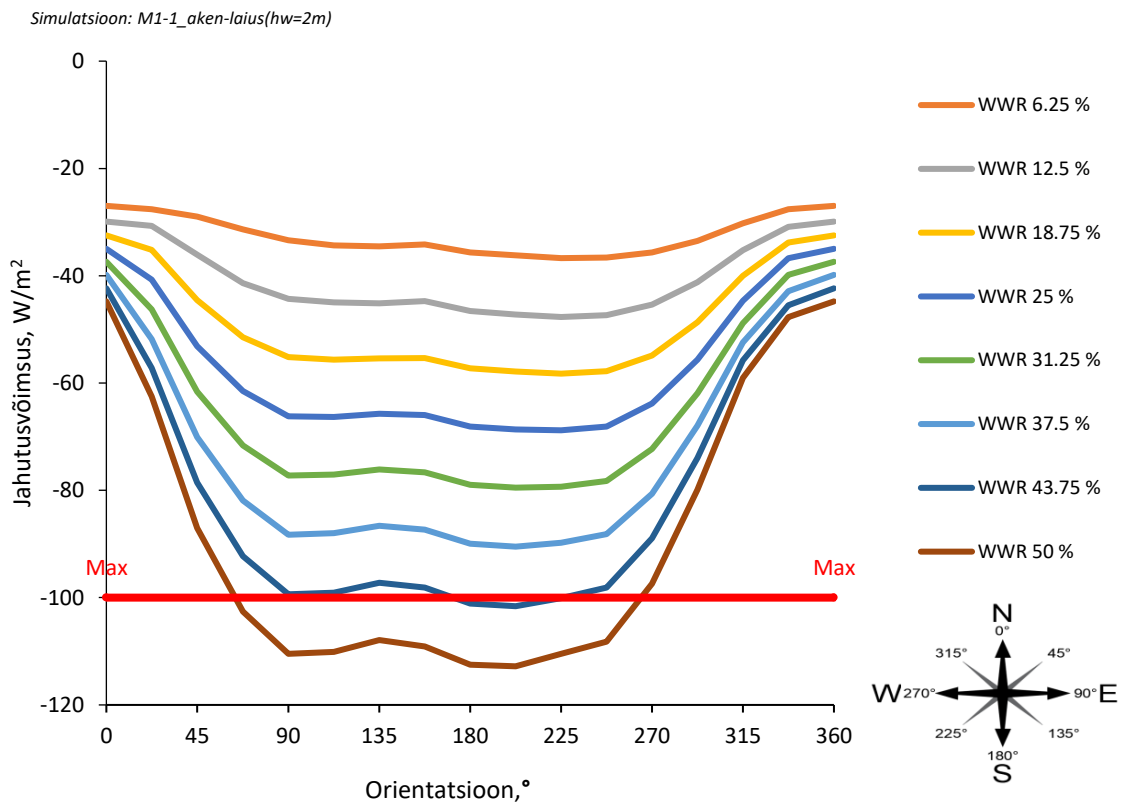
Tabel 12 Muudetavad parameetrid simulatsioonis M1-1

Nr	Akna laius, m	WWR, %
1	3,0	37,5
2	0,5	6,3
3	1,0	12,5
4	1,5	18,8
5	2,0	25,0
6	2,5	31,3
7	3,5	43,8
8	4,0	50,0





Graafik 1 Akna laiuse mõju jahutuskoormusele



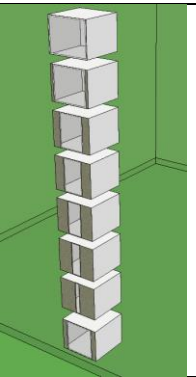
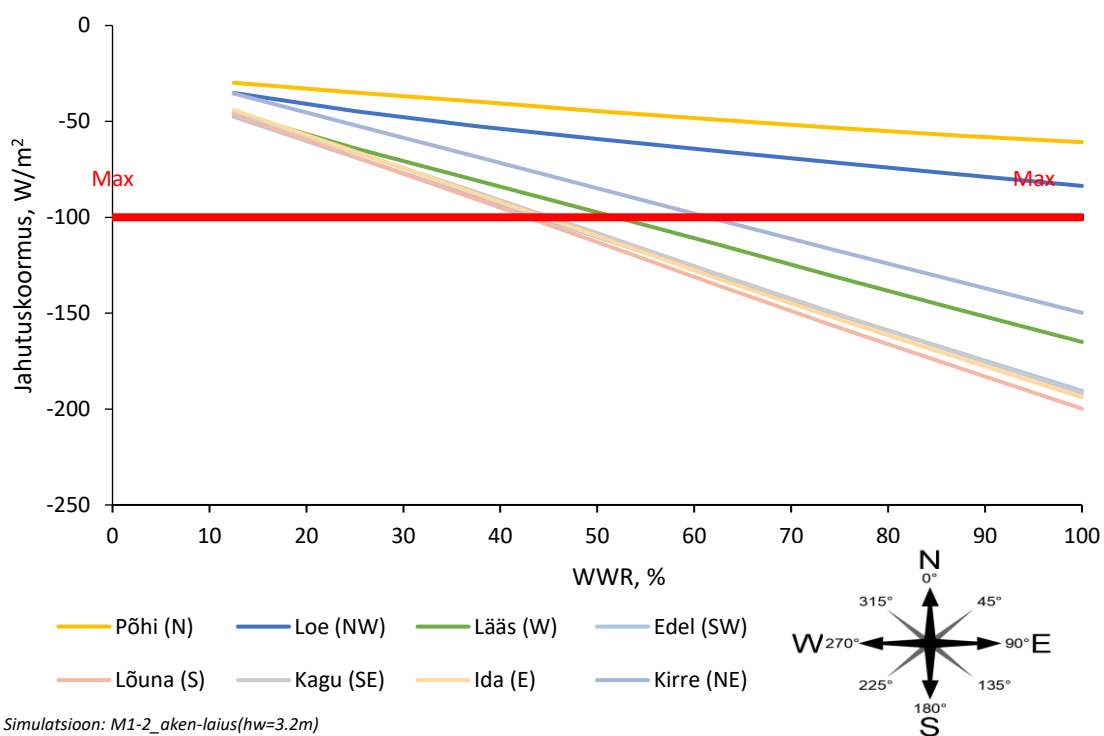
Graafik 2 Akna laiuse mõju jahutuskoormusele $h_w=1,6$ (orientatsioon)

3.1.1.2 Akna laius ($h_w=3,2m$)

Simulatsioonis M1-2 muudeti akna laiust vahemikus 0,5...4,0m. Akna keskkohat jäi kõikides simulatsioonides samasse kohta. Kasutati akna kõrgust $h_w=3,2m$ eesmärgiga jõuda akna ja välistarindi osakaaluni $WWR=100\%$.

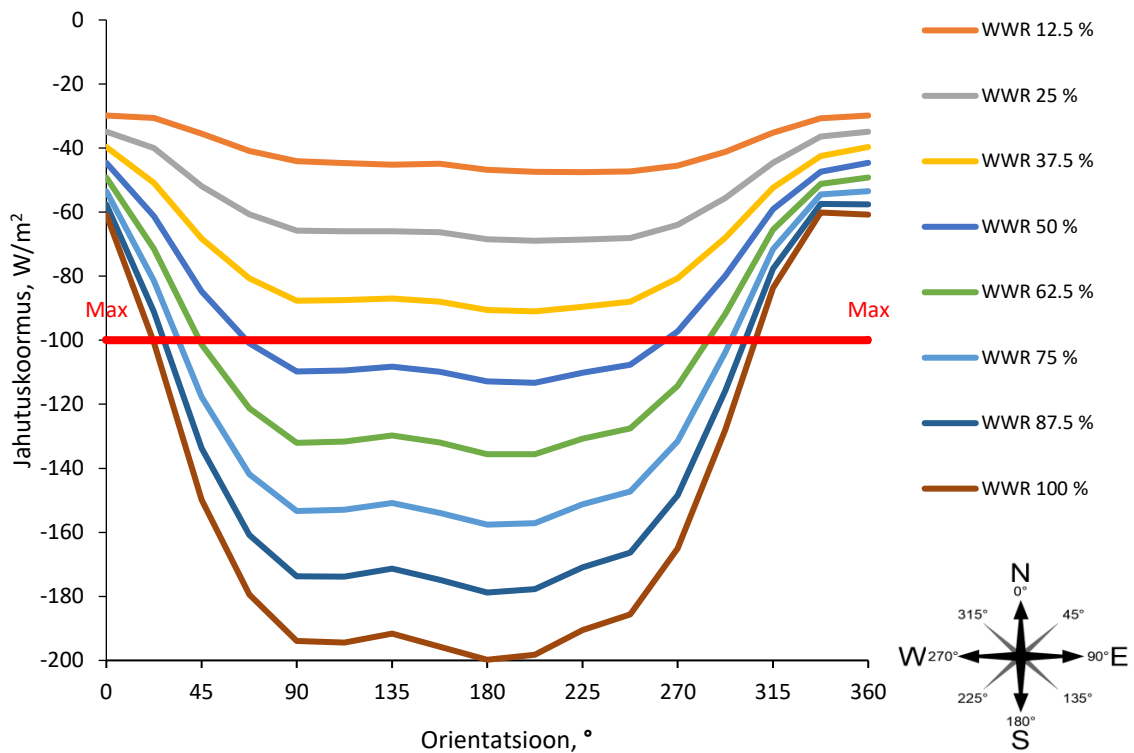
Tabel 13 Muudetavad parameetrid simulatsioonis M1-2

Nr	Akna laius, m	WWR [%]
1	3,0	75,0
2	0,5	12,5
3	1,0	25,0
4	1,5	37,5
5	2,0	50,0
6	2,5	62,5
7	3,5	87,5
8	4,0	100,0

Graafik 3 Akna laiuse mõju jahutuskoormusele $h_w=3,2$

Simulatsioon: M1-2_aken-laius(hw=3.2m)



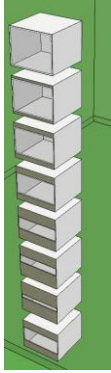
Graafik 4 Akna laiuse mõju jahutuskoormusele $h_w=3,2$ (orientatsioon)

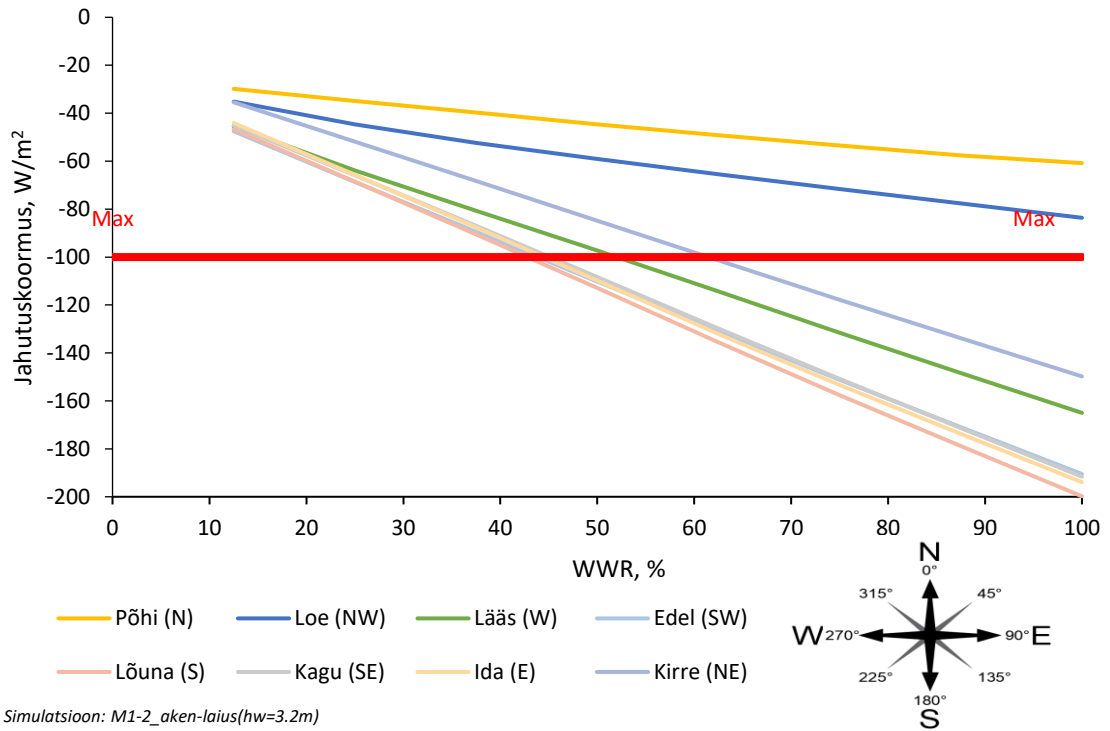
3.1.1.3 Akna kõrgus ($b_w=4,0m$)

Simulatsioonis M1-3 muudeti akna kõrgust vahemikus 0,8...3,2m. Kasutati akna laiust $b_w=4,0m$ selleks et jõuda akna ja välistarindi osakaaluni $WWR=100\%$.

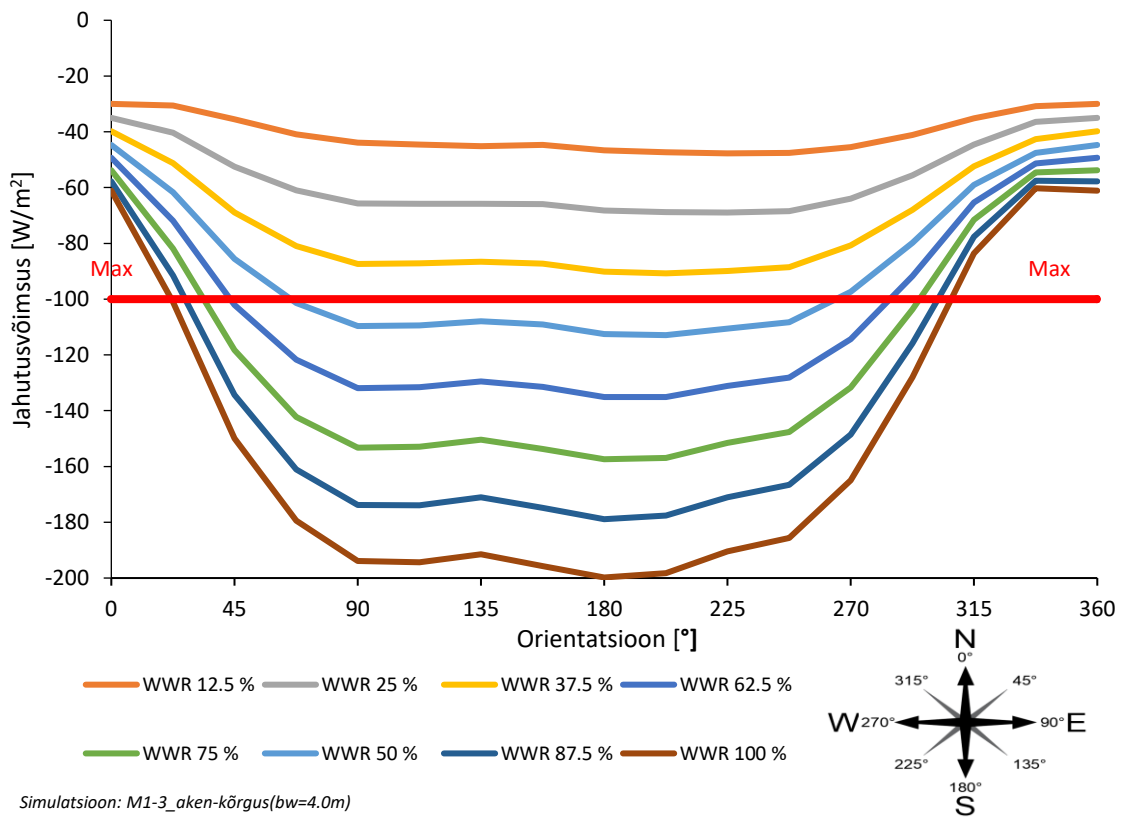
Tabel 14 Muudetavad parameetrid simulatsioonis M1-2

Nr	Akna kõrgus, m	WWR [%]
1	1,6	50,0
2	0,4	12,5
3	0,8	25,0
4	1,2	37,5
5	2,0	62,5
6	2,4	75,0
7	2,8	87,5
8	3,2	100,0





Graafik 5 Akna kõrguse mõju jahutuskoormusele $b_w=4,0$



Graafik 6 Akna kõrguse mõju jahutuskoormusele $b_w=4,0$ (orientatsioon)

3.1.1.4 Analüüs (akna mõõtmed)

Analüüsi tulemuste juures tuleb arvestada, et kõik parameetrilised simulatsioonid on läbi viidud konstantse akna raami osakaaluga 10%. Kõik akende mõõtmega läbi viidud simulatsioonid näitavad jahutuskoormuse lineaarset kasvu mõõtmete suurenedes. Lineaarse kasvu tõusunurga määrab orientatsioon. Suurimad tulemused saadi suunavahemikus 90...247,5 nurgakraadi. Suurimad jahutuskoormused saadi lõuna suunas. Seejuures on suunavahemiku 90...247,5 tulemused samas suurusjärgus. Lääne suuna jahutuse tipukoormused saadi väiksemad kui idasuunal. Samuti on märgata, et suunal 337,5 (NNE) on tulemused samasugused põhjasuunaga. Simulatsioonid M1-2 ja M1-3, milles muudeti akna kõrgust ja laiust nii, et WWR on vahemikus 13...100%, kattuvad peaaegu täielikult. Maksimaalne erinevus saadi kirde suunal $0,75 \text{ W/m}^2 < 1,00 \text{ W/m}^2$. Muudes suundades jääb erinevus alla $0,40 \text{ W/m}^2$.

Graafikutelt on ka näha, et $<100 \text{ W/m}^2$ nõuet sisekliima tagamiseks saab tagada lõuna, ida ja lääne suunas maksimaalselt 40% WWR korral. 100% klaasfassaadi saaks teha vaid edela ja põhja suunas, kus jahutuskoormused on sarnased. Jahutuskoormuste soojusliku mugavuse seisukohast ($<100 \text{ W/m}^2$) saaks 100% klaasfassaade teostada vahemikus 300...22,5 nurgakraadi.

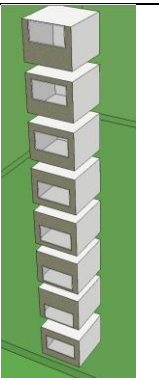
3.1.2 Akna asukoht tarindis

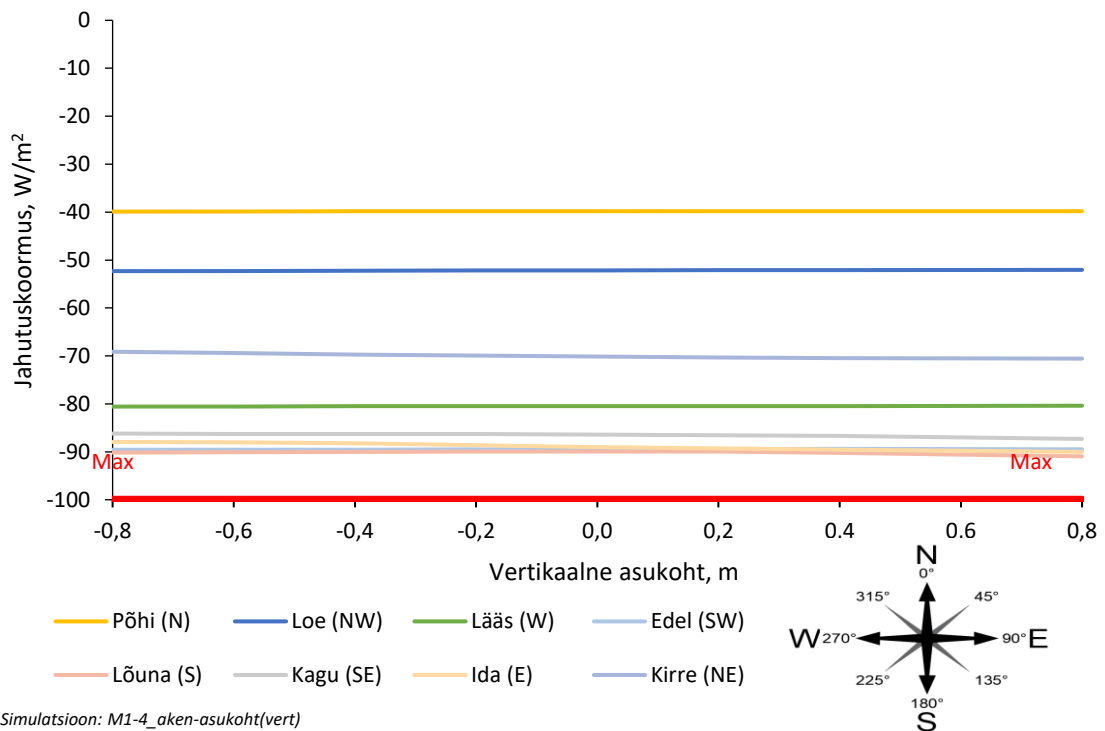
Akna asukoha mõju uurimiseks teostati 3 parameetrilist simulatsiooni. Esimeses simulatsioonis M1-4 uuriti akna vertikaalset ehk kõrguslikku paiknemist välistarindis. Teises simulatsioonis M1-5 uuriti akna horisontaalset ehk paiknemist tarindis nõ vasakult paremale. Kolmandas simulatsioonis M1-6 uuriti akna tarindis paiknemise sügavuse mõju.

3.1.2.1 Akna vertikaalne paiknemine

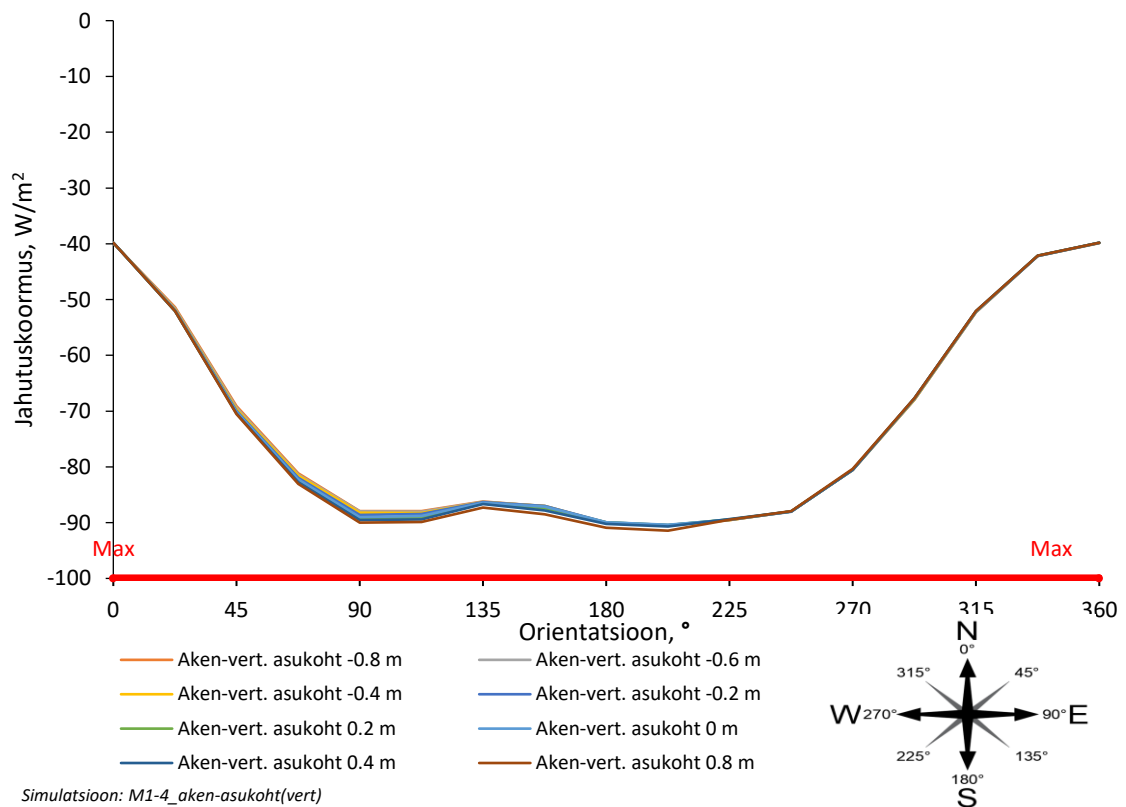
Simulatsioonis M1-4 muudeti akna kõrguslikku asukohta välistarindis. Tüüpruumi muid parameetreid ei muudetud.

Tabel 15 Muudetavad parameetrid simulatsioonis M1-4

Nr	Akna kaugus keskkohast, m	
1	0,0	
2	-0,8	
3	-0,6	
4	-0,4	
5	-0,2	
6	0,2	
7	0,4	
8	0,8	



Graafik 7 Akna kõrgusliku paiknemise mõju jahutuskoormusele (orientatsioon)



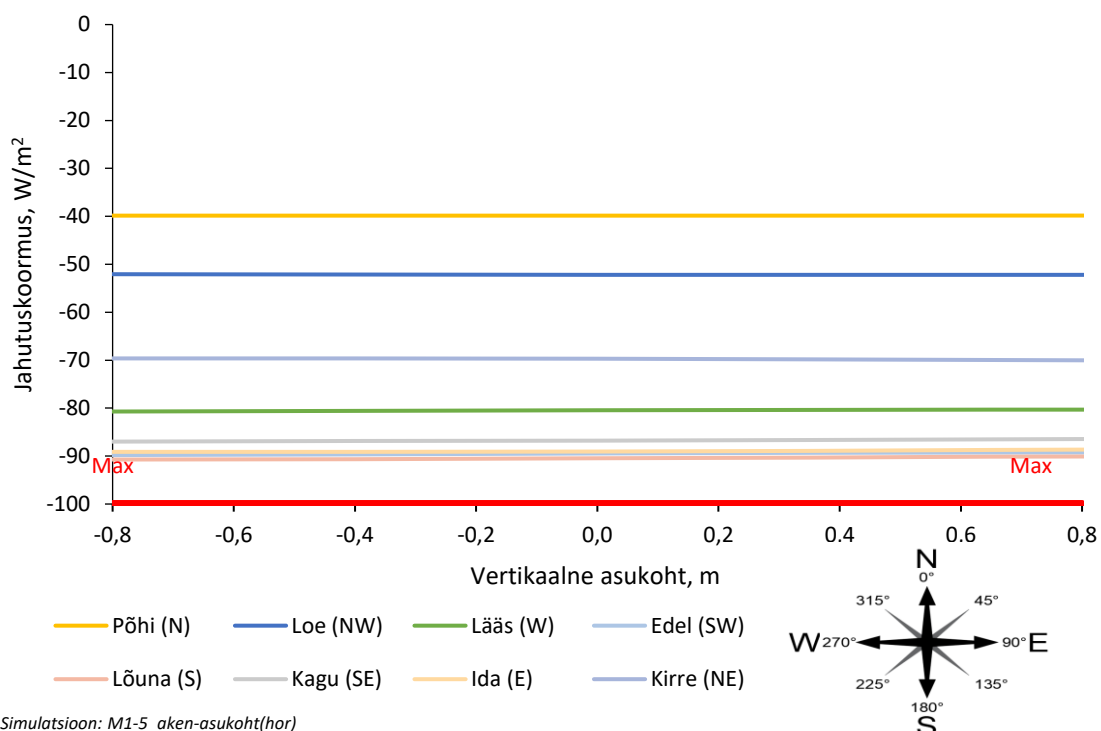
Graafik 8 Akna kõrgusliku paiknemise mõju jahutuskoormusele

3.1.2.2 Akna horisontaalne paiknemine

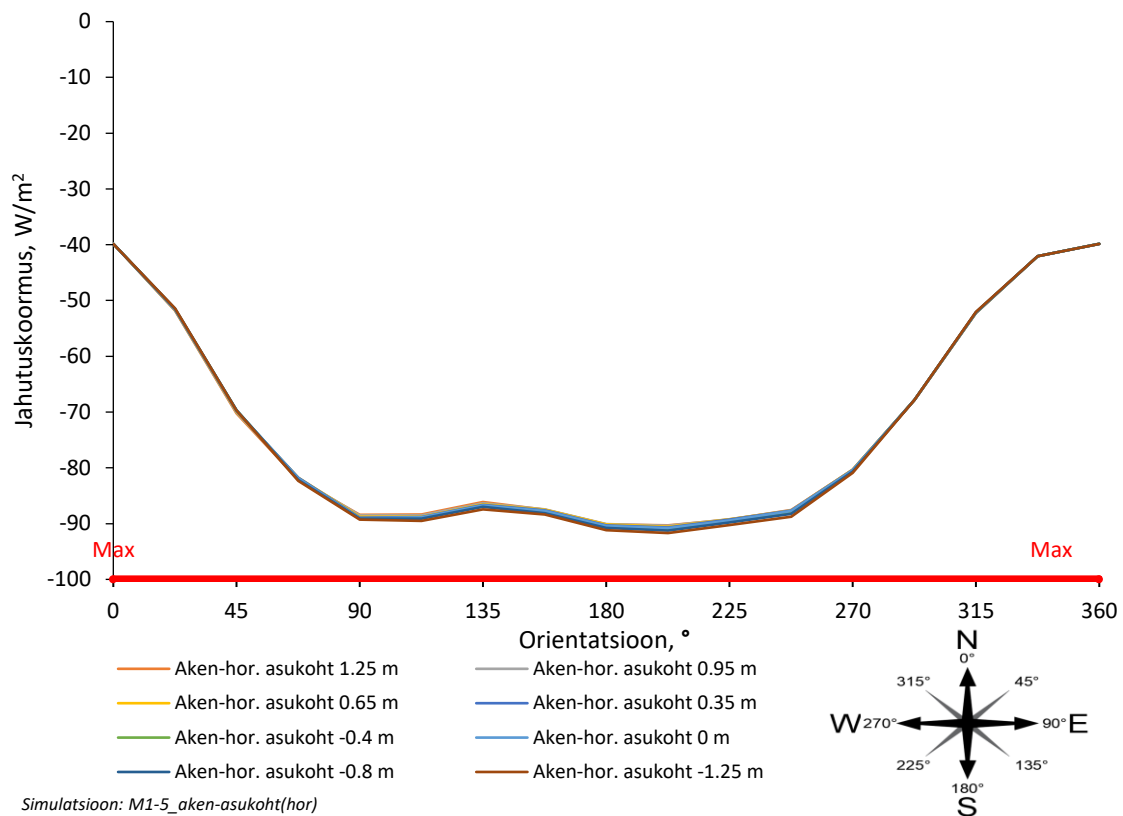
Simulatsioonis M1-5 uuriti akna horisontaalset ehk paiknemist tarindis nõ vasakult paremale. Teise simulatsiooni akna kõrguseks võeti 3,2m ning laiuks 1,5m. Selliste mõõtmetega on simulatsioonide akna pindala võrdne tüüpruumi akna pindalaga.

Tabel 16 Muudetavad parameetrid simulatsioonis M1-5

Nr	Akna hor. kaugust keskkohast, m
1	0,00
2	1,25
3	0,95
4	0,65
5	0,35
6	-0,40
7	-0,80
8	-1,25

Graafik 9 Akna horisontaalse paiknemise mõju jahutuskoormusele



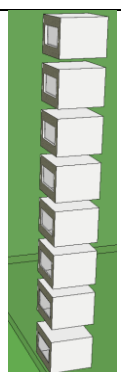
Graafik 10 Akna horisontaalse paiknemise mõju jahutuskoormusele (orientatsioon)

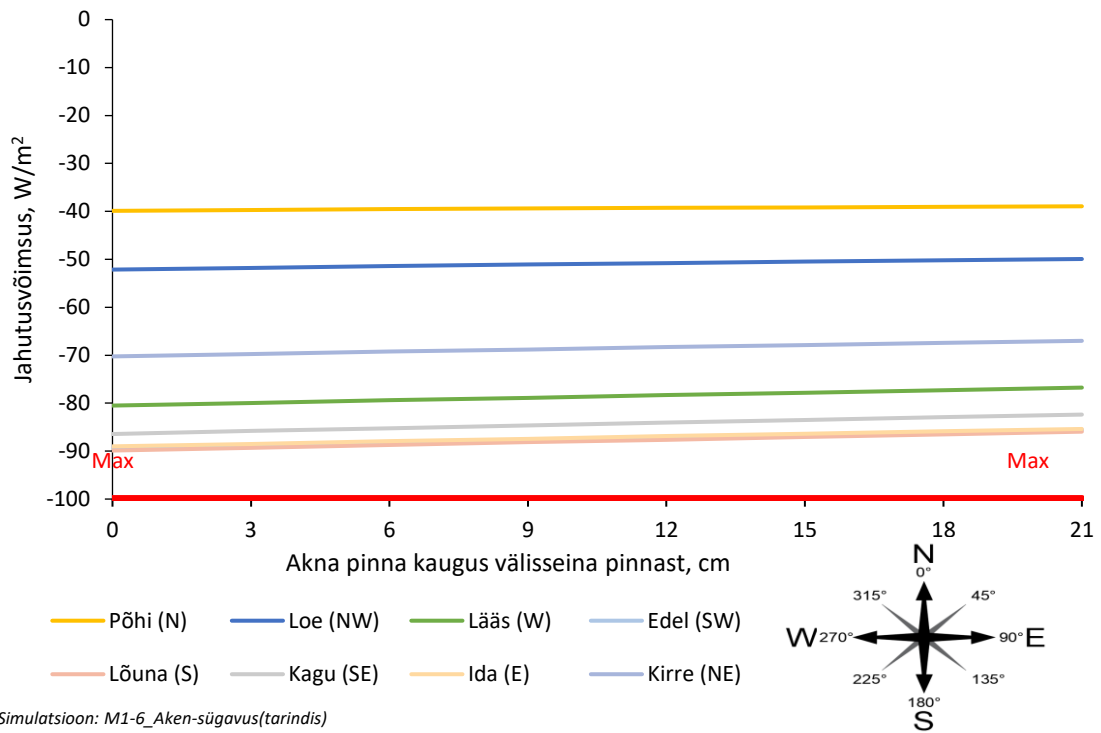
3.1.2.3 Akna sügavuslik paiknemine tarindis

Simulatsioonis M1-6 uuriti akna sügavuslikku paiknemist tarindis. Simulatsioonis muudeti akna sügavust tarindis vahemikus 0...21 cm. Muid parameetreid ei muudetud

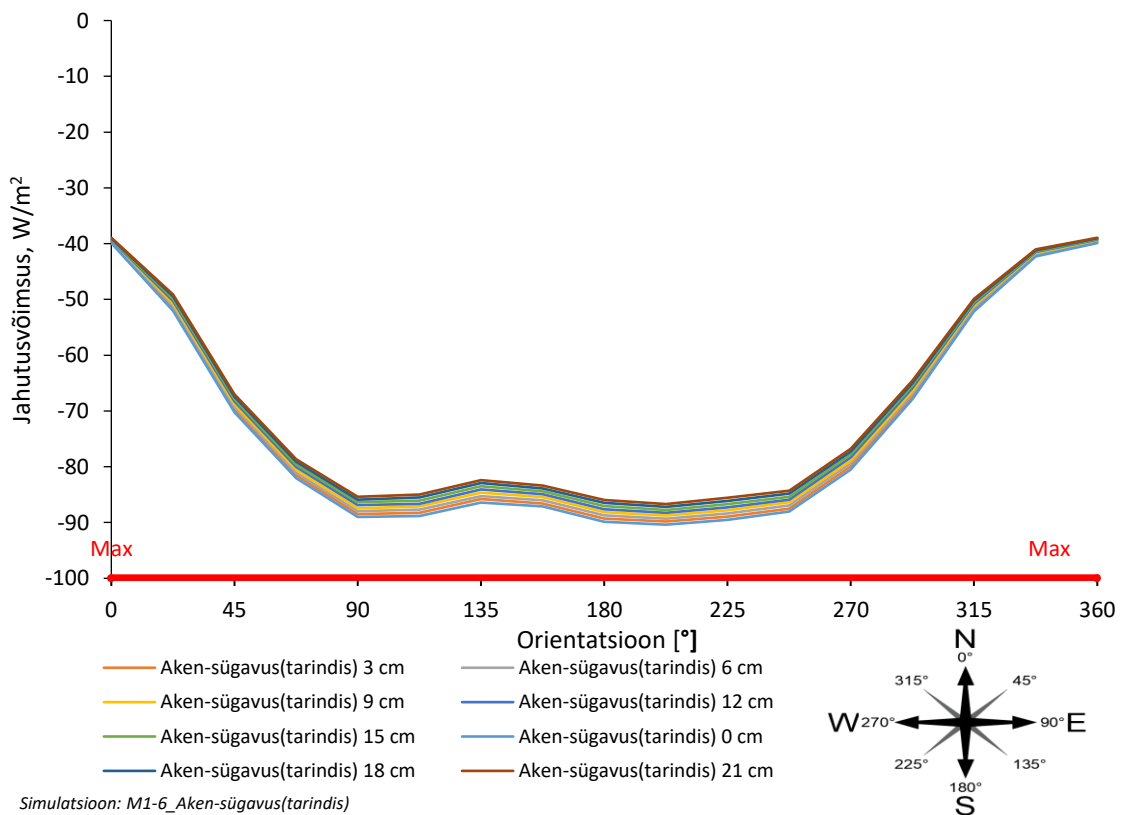
Tabel 17 Muudetavad parameetrid simulatsioonis M1-6

Nr	Akna sügavus tarindis [cm]
1	0
2	3
3	6
4	9
5	12
6	15
7	18
8	21





Graafik 11 Akna sügavusliku paiknemise mõju jahutuskoormusele



Graafik 12 Akna sügavusliku paiknemise mõju jahutuskoormusele (orientatsioon)

3.1.2.4 Analüüs (akna asukoht)

Akna vertikaalne (kõrguslik) paiknemine jahutuskoormuste maksimaalne muutumine ida suunas on $2,1 \text{ W/m}^2$ (2,3% tipukoormusest), kirde suunas $1,4 \text{ W/m}^2$ (1,4% tipukoormusest) ning lõuna suunas $1,0 \text{ W/m}^2$ (1,1% tipukoormusest). Põhja ja lääne suunal on vertikaalse paiknemise mõju olematu jäädes alla $0,3 \text{ W/m}^2$.

Akna horisontaalse paiknemise mõju suureneb lähenedes lõuna suunale. Maksimaalse ja minimaalse tulemuse erinevus saadi kagu suunal $1,4 \text{ W/m}^2$ (1,5% tipukoormusest), lõuna suunal $1,1 \text{ W/m}^2$ (1,2% tipukoormusest) ning edela suunal $1,0 \text{ W/m}^2$ (1,0% tipukoormusest). Muudes ilmakaartes on vertikaalse paiknemise mõju väiksem jäädes ka alla $1,0 \text{ W/m}^2$.

Akna sügavusliku paiknemise mõju on märgata kõigis ilmakaartes. õhja suunal on mõju väiksem. Ida, lõuna, lääne suundades on sügavuse mõju 0 ja 21 cm võrdluses enam vähem sama suur jäädes vahemikku $3,6..4,1 \text{ W/m}^2$ (4,0...4,7% tipukoormusest).

3.1.3 Ruumi mõõtmed

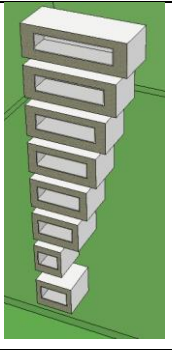
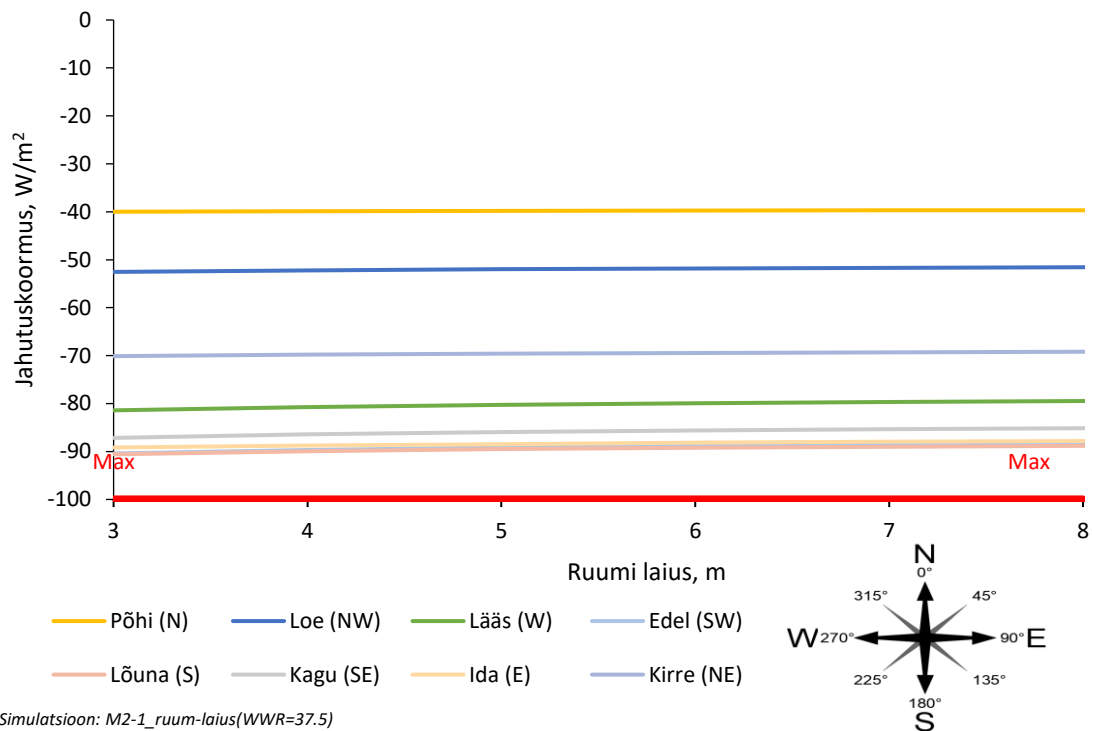
Ruumi mõõtmete uurimiseks teostati 5 parameetrilist simulatsiooni. Simulatsioonis M2-1 muudeti ruumi laiust kasutades tüüpruumi WWR ning üht suurt akent. Simulatsioonis M2-2 muudeti ruumi laiust kasutades tüüpruumi WWR ning mitmeid väikseid aknaid. Simulatsioonis M2-3 muudeti ruumi laius kasutades 2 korda suuremat WWR võrreldes tüüpruumiga ning üht suurt akent. Simulatsioonis M2-3 muudeti ruumi laius kasutades 2 korda suuremat WWR võrreldes tüüpruumiga ning mitmeid väikseid aknaid. Simulatsioonis M2-5 muudeti ruumi sügavust. Simulatsioonis M2-6 muudeti ruumi kõrgust konstantse WWRga.

3.1.3.1 Ruumi laius (WWR=37,5% üks suur aken)

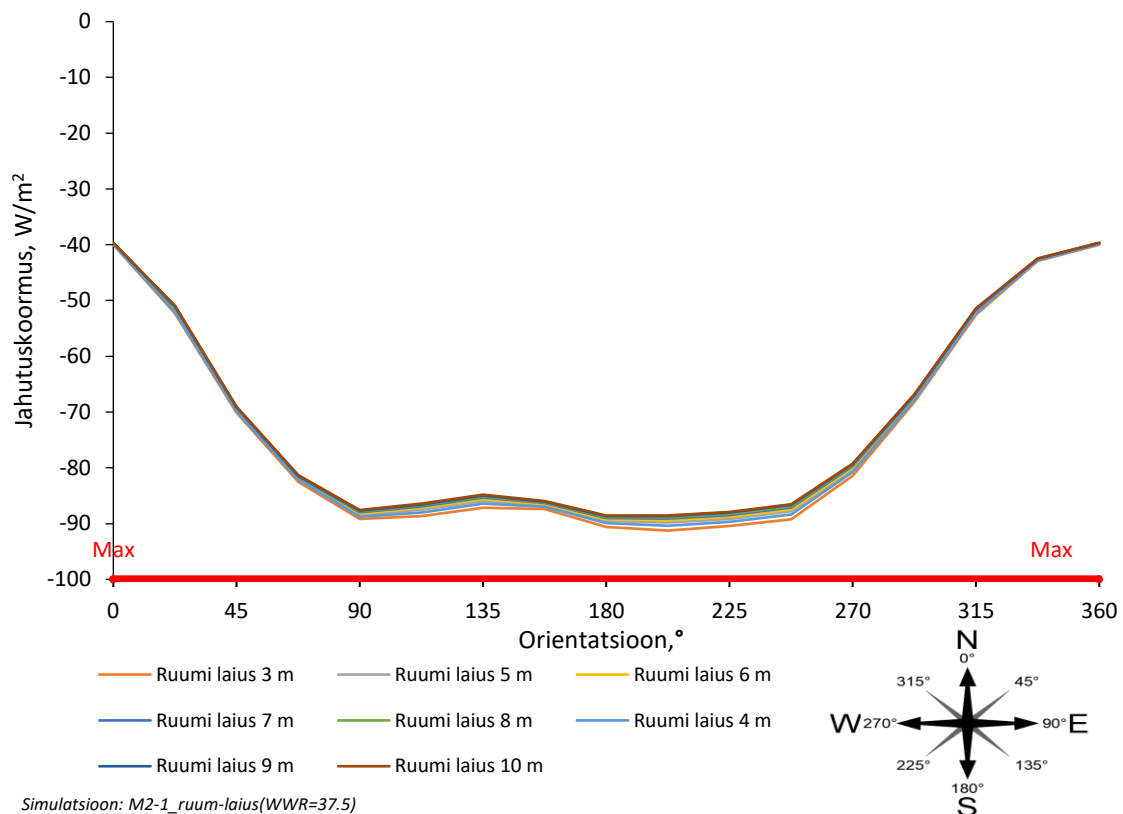
Simulatsioonis M2-1 muudeti ruumi laiust vahemikus 3...10m. Ruumi WWR jäi konstantseks. Selleks muudeti akna laiust nii, et akna keskkohht jäi alati ruumi välistarindi keskkohhta. Tüüpruumi muid parameetreid ei muudetud.

Tabel 18 Muudetavad parameetrid simulatsioonis M2-1

Nr	Ruumi laius, m
1	4,0
2	3,0
3	5,0
4	6,0
5	7,0
6	8,0
7	9,0
8	10,0

Graafik 13 Ruumi laiuse mõju jahutuskoormusele (orientatsioon)



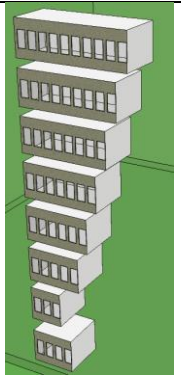
Graafik 14 Ruumi laiuse mõju jahutuskoormusele (orientatsioon)

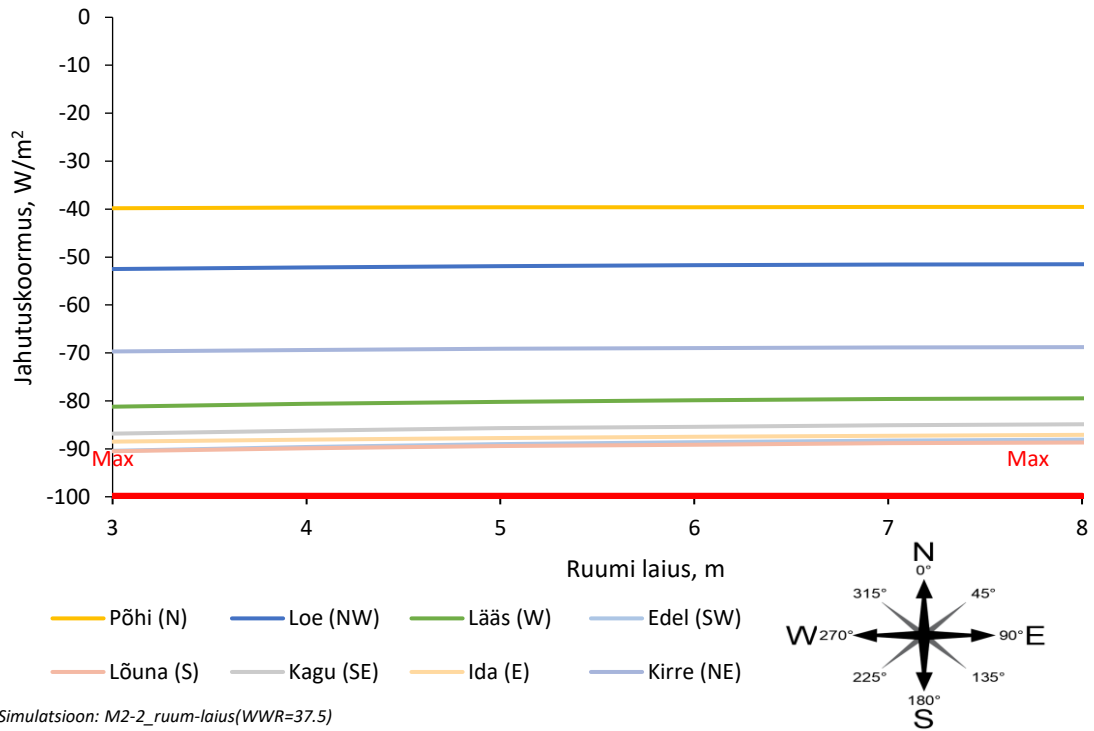
3.1.3.2 Ruumi laius (WWR=37,5% liigendatud aknad)

Simulatsioonis M2-2 muudeti ruumi laiust vahemikus 3...10m. Ruumi WWR jäi konstantseks. Selleks paigutati iga ruumi laiuse meetri kohta 1 aken mõõtudega 0,75mx1,60m, millega tagati WWR=37,5%. Akende raami osakaalu muutust käesolevas simulatsioonis ei arvestatud. Tüüpruumi muid parameetreid ei muudetud.

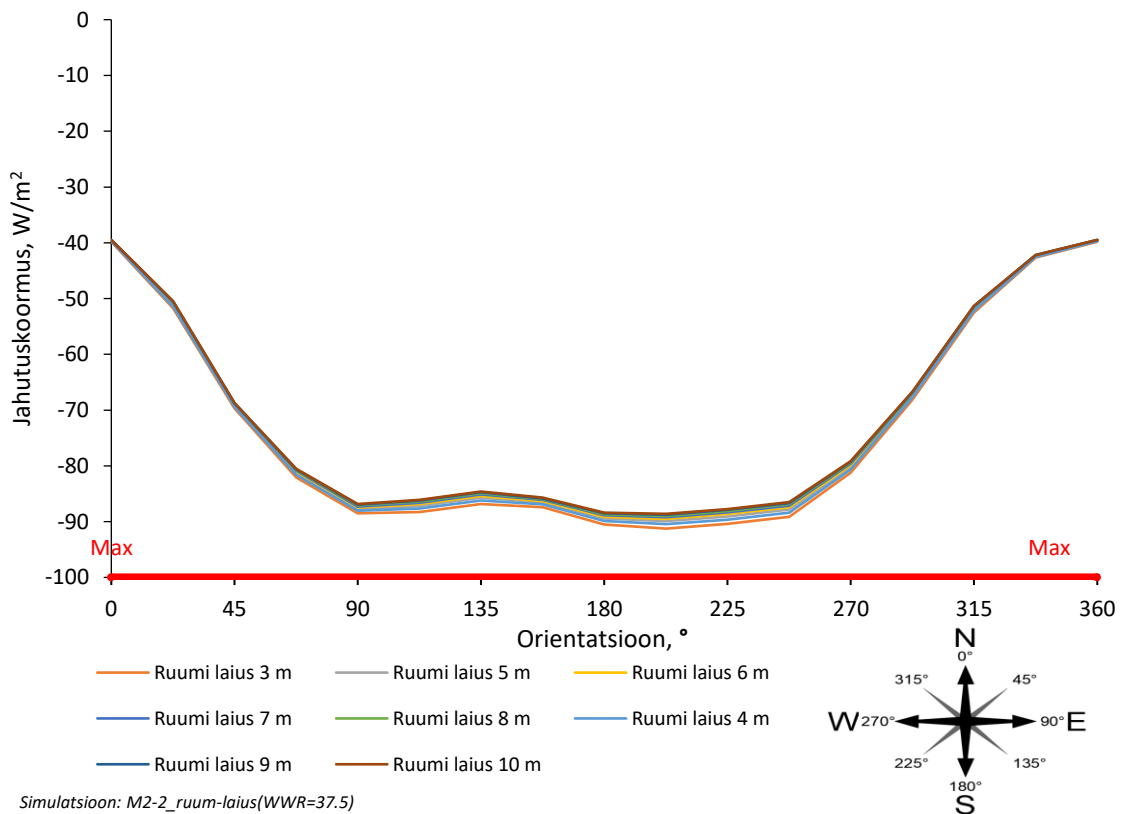
Tabel 19 Muudetavad parameetrid simulatsioonis M2-2

Nr	Ruumi laius, m	Akende arv
1	4,0	4
2	3,0	3
3	5,0	5
4	6,0	6
5	7,0	7
6	8,0	8
7	9,0	9
8	10,0	10





Graafik 15 Ruumi laiuse mõju jahutuskoormusele liigendatud akendega WWR=37,5%



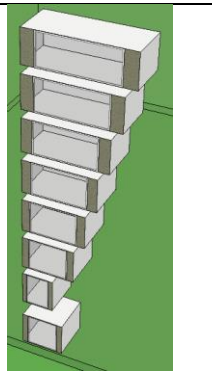
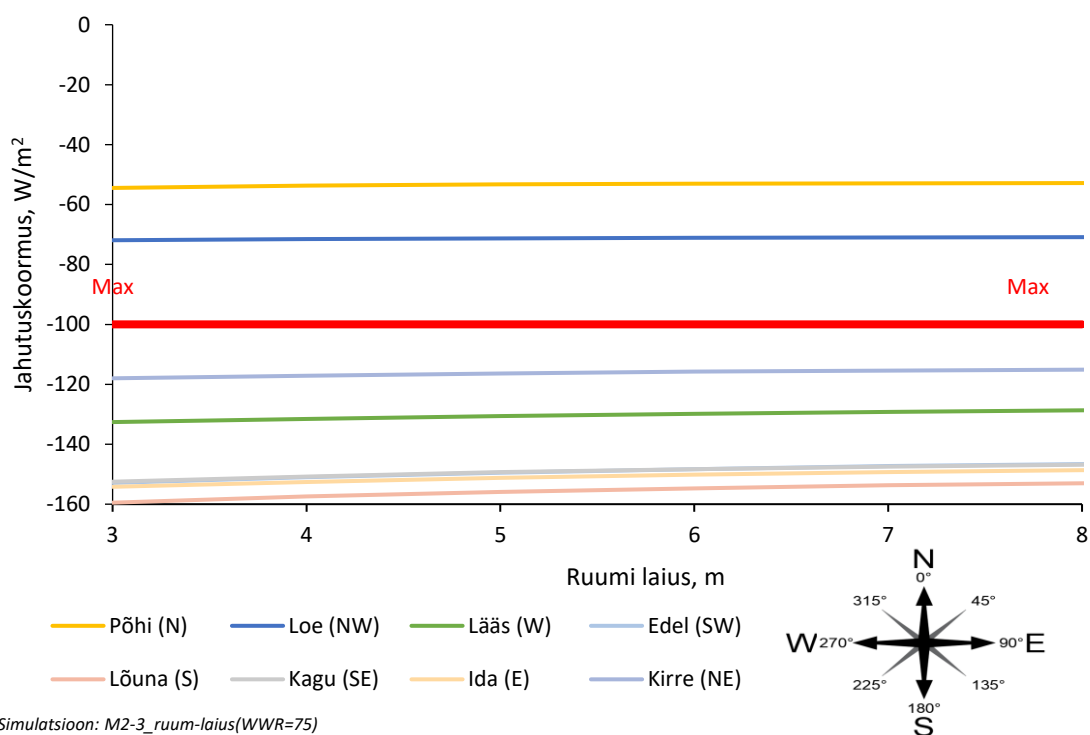
Graafik 16 Ruumi laiuse mõju jahutuskoormusele liigendatud akendega WWR=37,5% (orientatsioon)

3.1.3.3 Ruumi laius (WWR=75% üks suur aken)

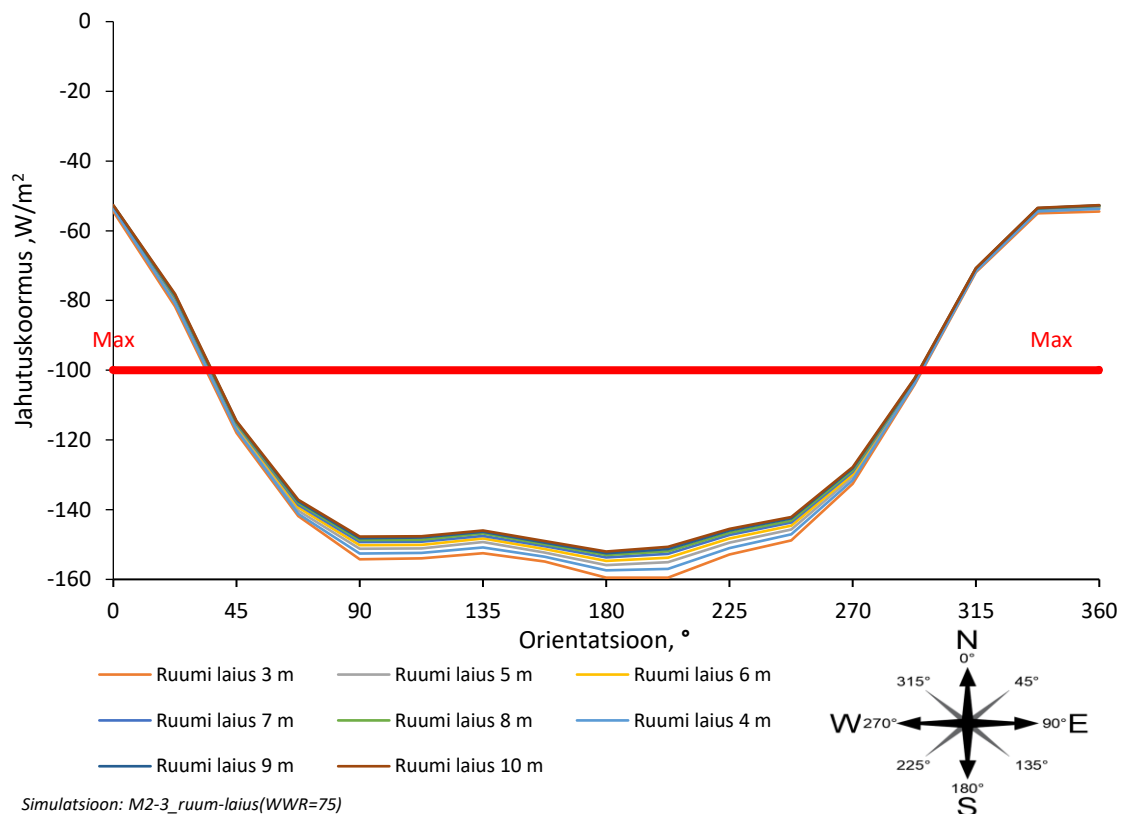
Simulatsioonis M2-3 muudeti ruumi laiust vahemikus 3...10m. Muudeti tüüpruumi WWR Ruumi WWR jäi konstantseks. Selleks paigutati iga ruumi laiuse meetri kohta 1 aken mõõtudega 0,75mx1,60m, millega tagati WWR=37,5%. Akende raami osakaalu muutust käesolevas simulatsioonis ei arvestatud. Tüüpruumi muid parameetreid ei muudetud.

Tabel 20 Muudetavad parameetrid simulatsioonis M2-3

Nr	Ruumi laius, m
1	4,0
2	3,0
3	5,0
4	6,0
5	7,0
6	8,0
7	9,0
8	10,0

Graafik 17 Ruumi laiuse mõju jahutuskoormusele ühe suure aknaga WWR=75%



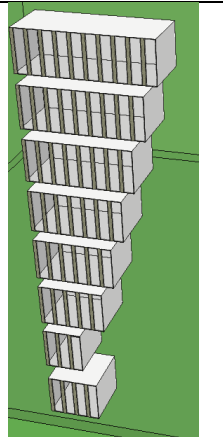
Graafik 18 Ruumi laiuse mõju jahutuskoormusele ühe suure aknaga WWR=75% (orientatsioon)

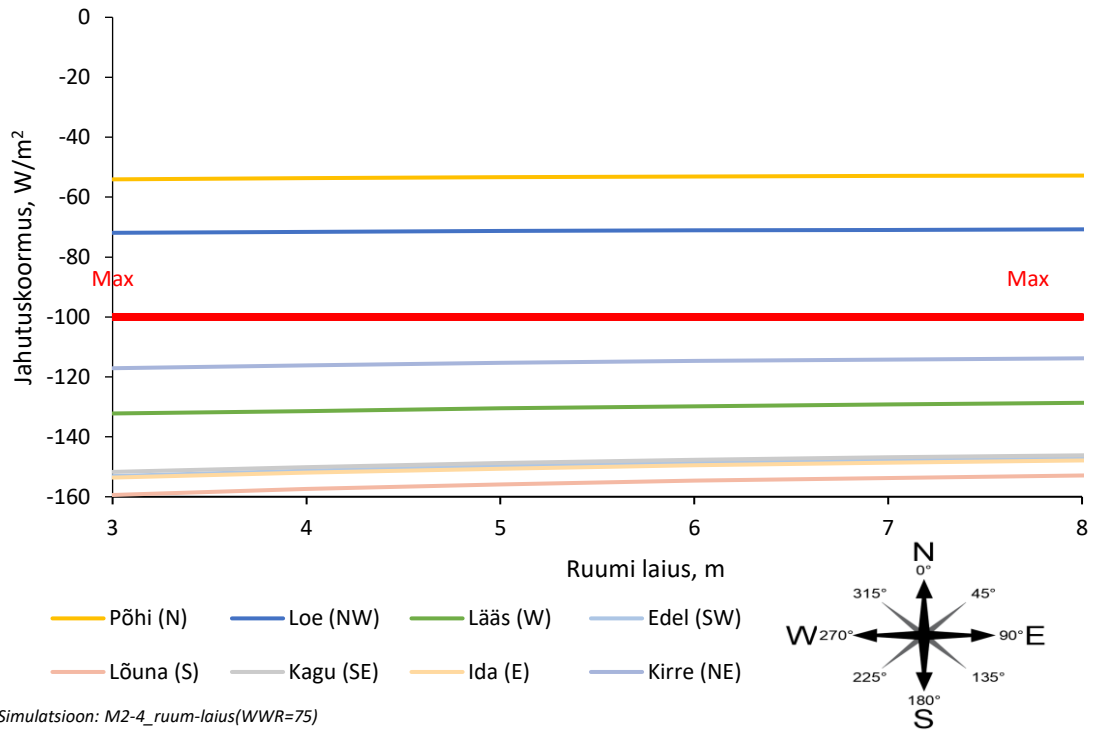
3.1.3.4 Ruumi laius (WWR=75% liigendatud aknad)

Simulatsioonis M2-4 muudeti ruumi laiust vahemikus 3...10m. Ruumi WWR jäi konstantseks. Selleks paigutati iga ruumi laiuse meetri kohta 1 aken mõõtudega 0,75m x 3,20m, millega tagati WWR=75%. Akende raami osakaalu muutust käesolevas simulatsioonis ei arvestatud. Tüüpruumi muid parameetreid ei muudetud.

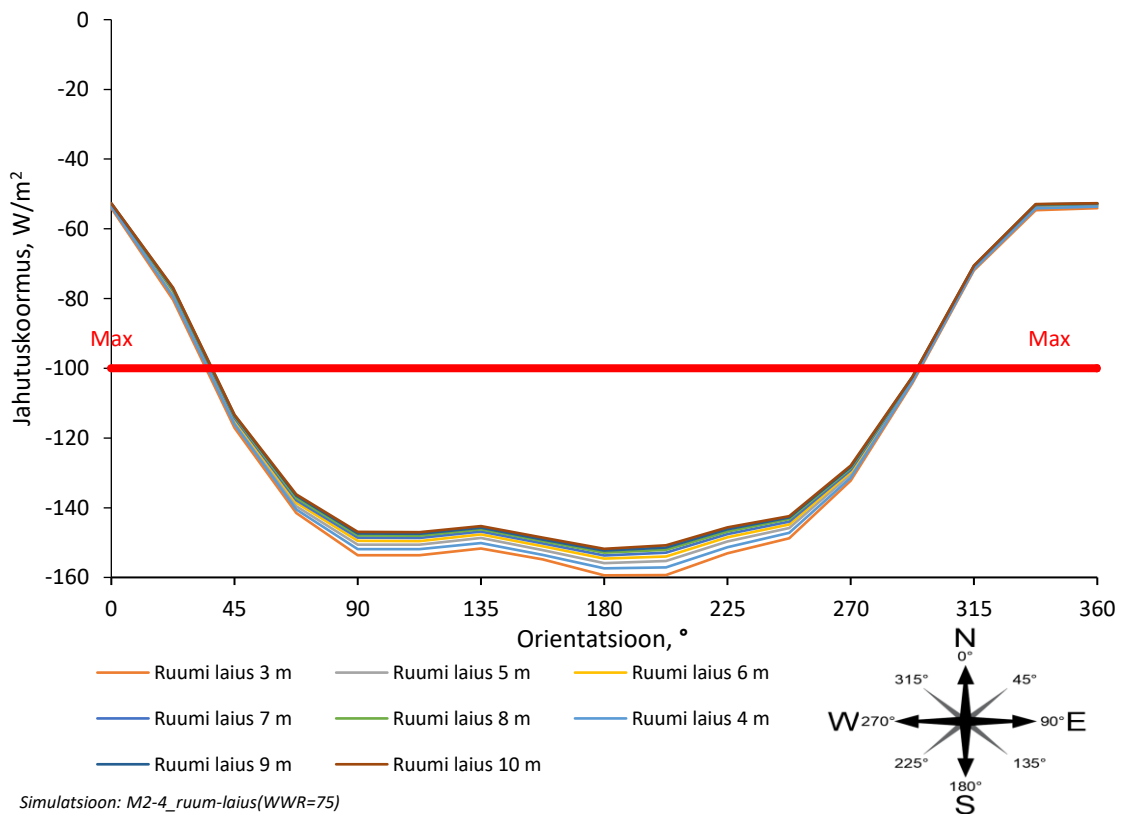
Tabel 21 Muudetavad parameetrid simulatsioonis M2-4

Nr	Ruumi laius, m	Akende arv
1	4,0	4
2	3,0	3
3	5,0	5
4	6,0	6
5	7,0	7
6	8,0	8
7	9,0	9
8	10,0	10





Graafik 19 Ruumi laiuse mõju jahutuskoormusele liigendatud akendega WWR=75%



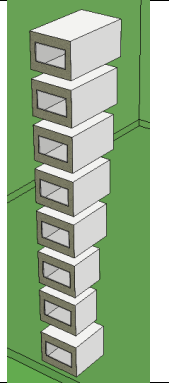
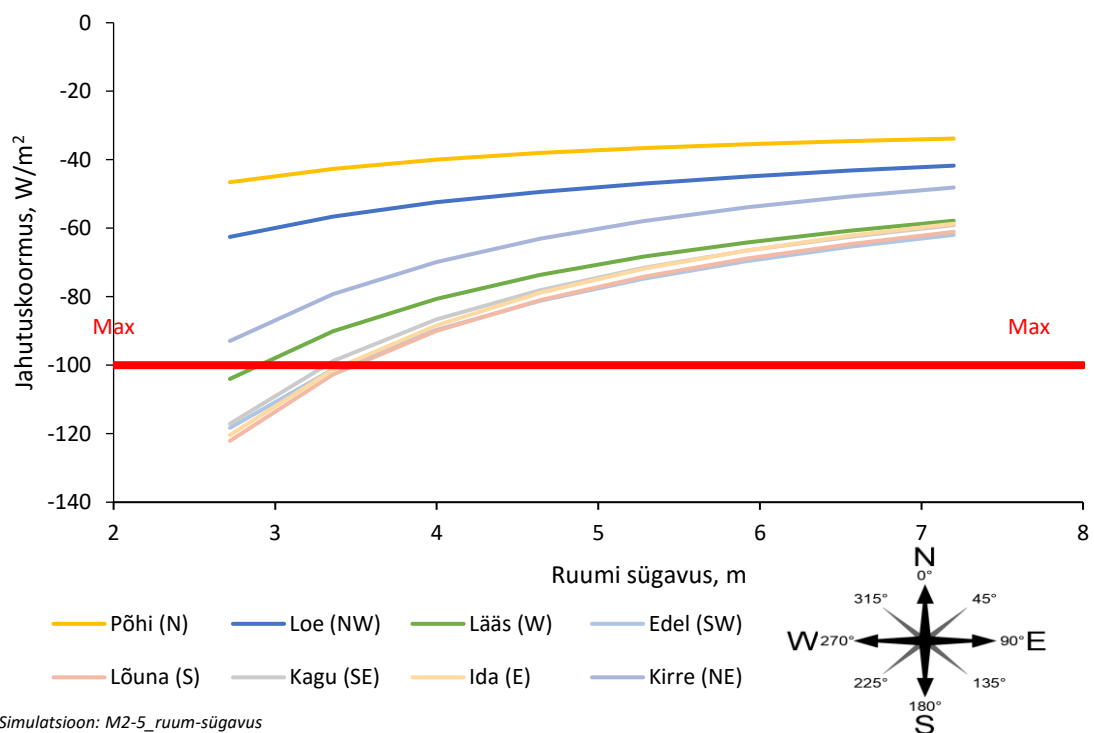
Graafik 20 Ruumi laiuse mõju jahutuskoormusele liigendatud akendega WWR=37,5% (orientatsioon)

3.1.3.5 Ruumi sügavus

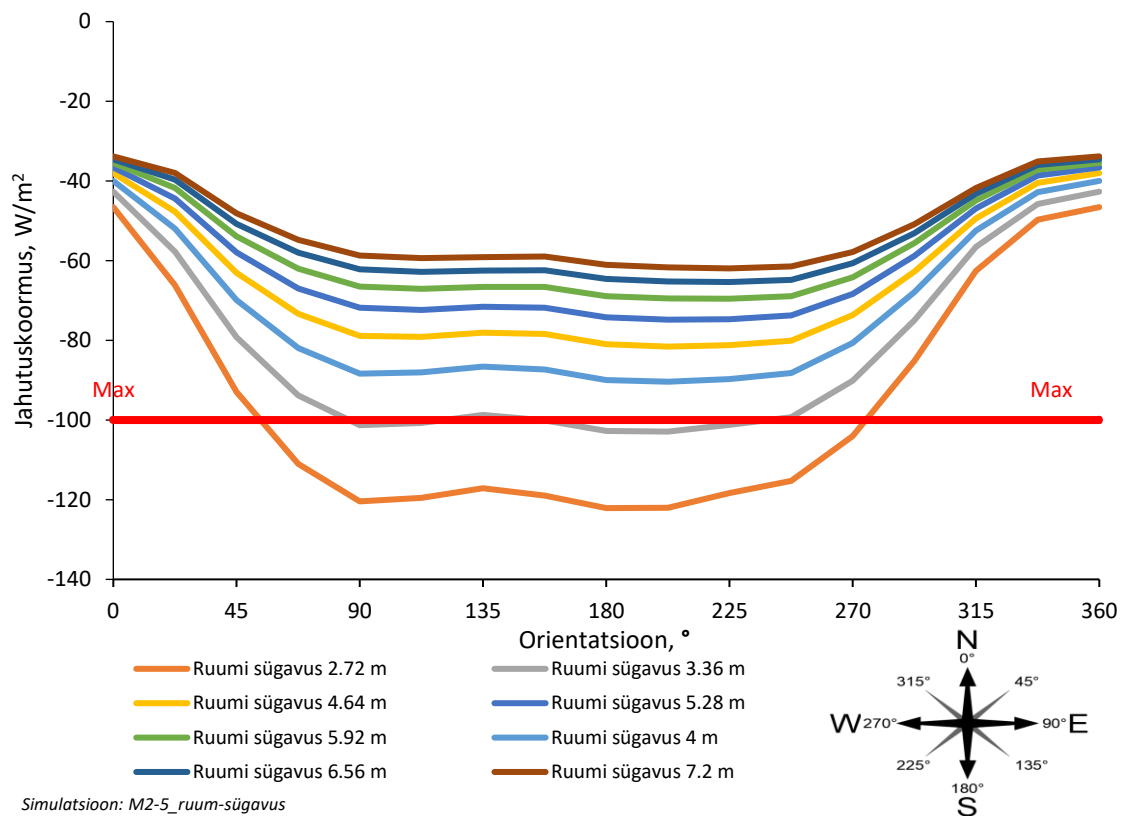
Simulatsioonis M2-5 muudeti ruumi sügavust vahemikus 2,72...7,2m. Ruumi sügavuse maksimaalne väärtus valiti 3 kordne akna ülemise ääre kõrgus. Valiti natuke suurem väärtus, kui projekteerimissoovitus loomuliku valguse tagamiseks 2,5 kordne sügavus. Tüüpruumi muid parameetreid ei muudetud.

Tabel 22 Muudetavad parameetrid simulatsioonis M1-4

Nr	Ruumi sügavus, m
1	4,00
2	2,72
3	3,36
4	4,64
5	5,28
6	5,92
7	6,56
8	7,20

Graafik 21 Ruumi sügavuse mõju jahutuskoormusele



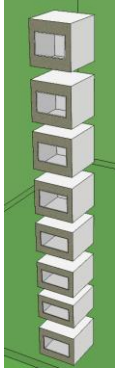
Graafik 22 Ruumi sügavuse mõju jahutuskoormusele (orientatsioon)

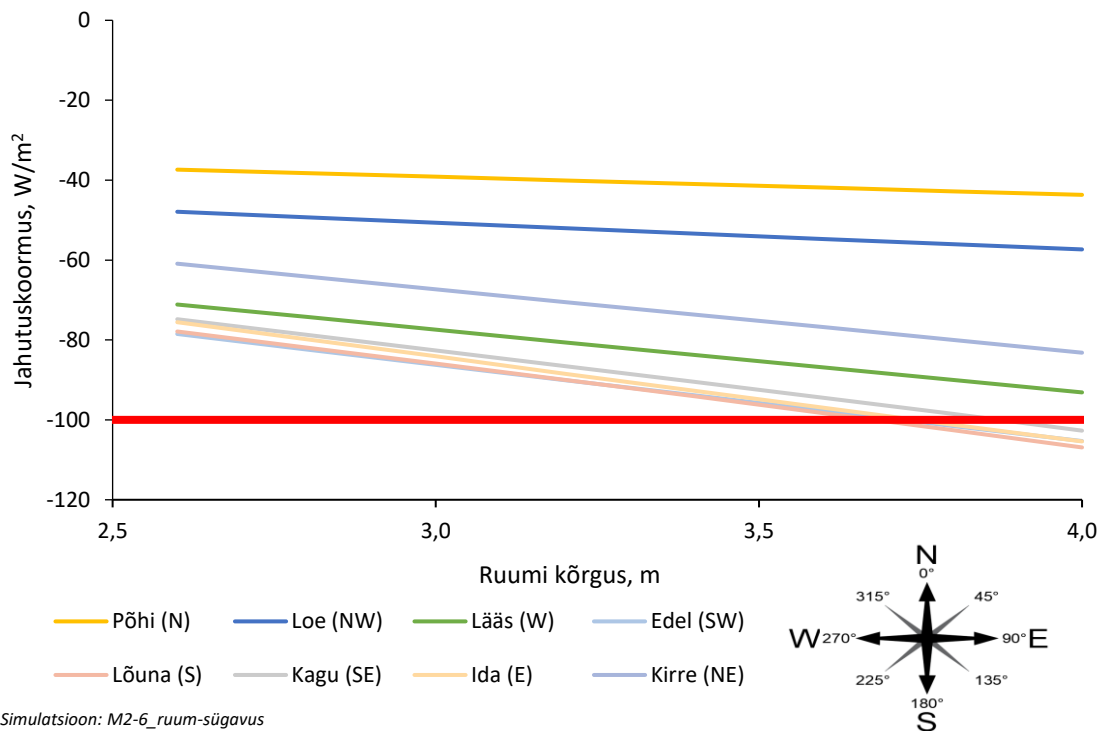
3.1.3.6 Ruumi kõrgus

Simulatsioonis M2-6 muudeti ruumi kõrgust vahemikus 2,60...4,0m. Ruumi kõrguse muutmisel muudeti akna kõrgust nii, et WWR=37,5%. Akna keskkohat jäi välistarindi keskkohata. Tüüpruumi muid parameetreid ei muudetud.

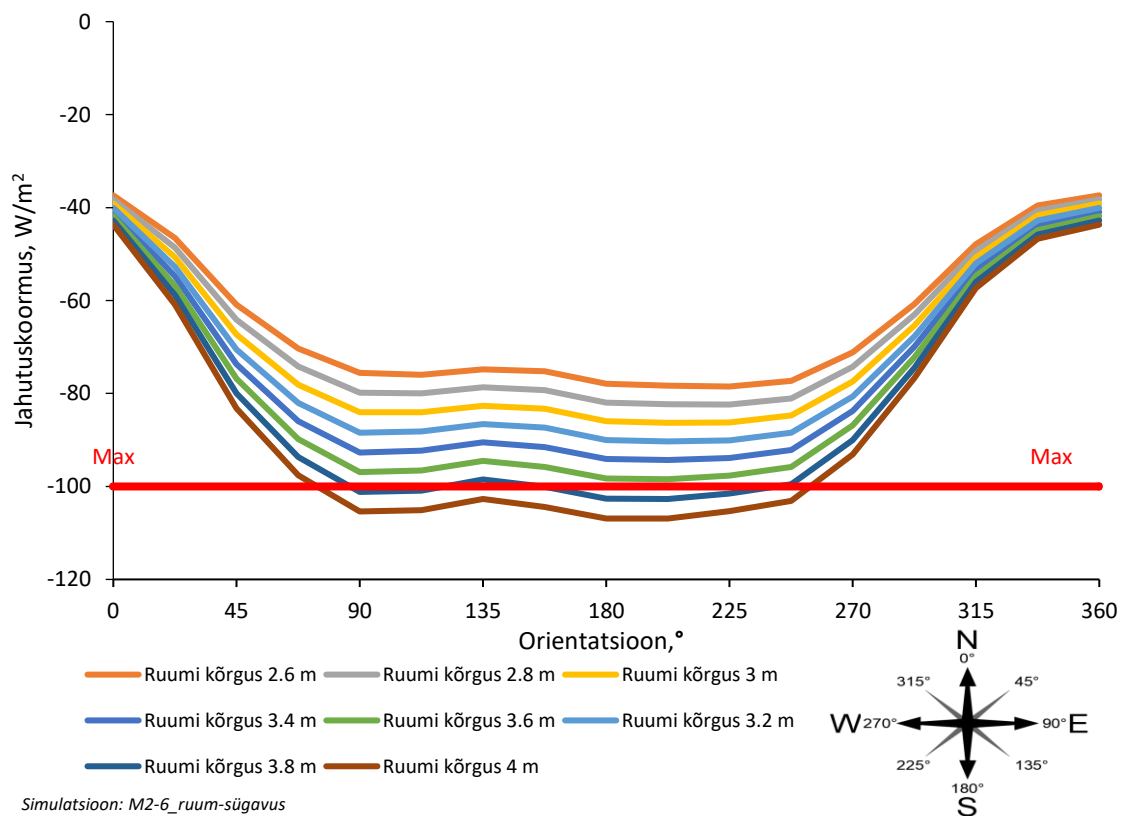
Tabel 23 Muudetavad parameetrid simulatsioonis M2-3

Nr	Ruumi kõrgus, m	Akna kõrgus, m
1	4,00	1,3
2	0,65	1,4
3	0,70	1,5
4	0,80	1,6
5	0,85	1,7
6	0,90	1,8
7	0,95	1,9
8	1,00	2,0





Graafik 23 Ruumi kõrguse mõju jahutuskoormusele



Graafik 24 Ruumi kõrguse mõju jahutuskoormusele (orientatsioon)

3.1.3.7 Analüüs (ruumi mõõtmed)

Analüüsi tulemuste juures tuleb arvestada, et kõik parameetrilised simulatsioonid on läbi viidud konstantse akna raami osakaaluga 10%. Ruumi kõrguse ja laiuse muutmine tingimusel, et WWR jääb samaks muudab jahutusvõimsust lineaarselt. Ruumi laiuse kasvades väheneb mõningal määral jahutusvõimsus. Ruumi sügavuse muutmine muudab jahutusvõimsust mittelineaarselt.

Ruumi laiuse simulatsioonides M2-1 ja M2-2 kasutati WWR=37,5% ja erinevat liigendust. Suurim jahutuskoormuste erinevus (väikseim ruum vs suurim ruum) on edela suunal: simulatsioonis M2-1(üks suur aken) 2,5 W/m² ja simulatsioonis M2-2(palju väikseid aknaid) 2,7 W/m². Simulatsioonide M2-1 ja M2-2 tulemused on praktiliselt ühtivad. Seega raami osakaalu arvestamata jättes liigendatusel märkimisväärne mõju puudub.

Ruumi laiuse simulatsioonide M2-3 ja M2-4 erinevus simulatsioonidest M2-1 ja M2-2 on kaks korda suurem WWR=75%. Suurim jahutuskoormuste erinevus on edela suunal: simulatsioonis M2-3(üks suur aken) 7,5 W/m² ja simulatsioonis M2-2(palju väikseid aknaid) 7,6 W/m². Ka M2-3 ja M2-4 võrdluses saadi, et liigenduse mõju on väike kui jätta arvestamata aknaraami osakaal. Võrreldes simulatsioone M2-1 ja M2-3 kasvab akna pindala 2 kordse kasvamisega jahutuskoormuste erinevuste muutumine 3 korda. Ruumi sügavuse simulatsiooni M2-5 tulemused eelnevad ülejäänud simulatsioonide tulemustest. Kui muudes mõõtmete simulatsioonides on näha parameetri muutmisel jahutusvõimsuse muutumise lineaarsust, siis ruumi sügavuse mõju on kõvera kujuga lähenedes sirgele, mida sügavam ruumiga on tegemist.

Ruumi kõrguse simulatsiooni M2-6 tulemused näitavad, et ruumi kõrguse muutmisel toimub jahutusvõimsuse muutmine lineaarselt.

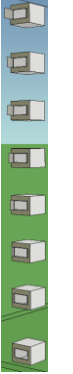








3.1.4 Varjestus

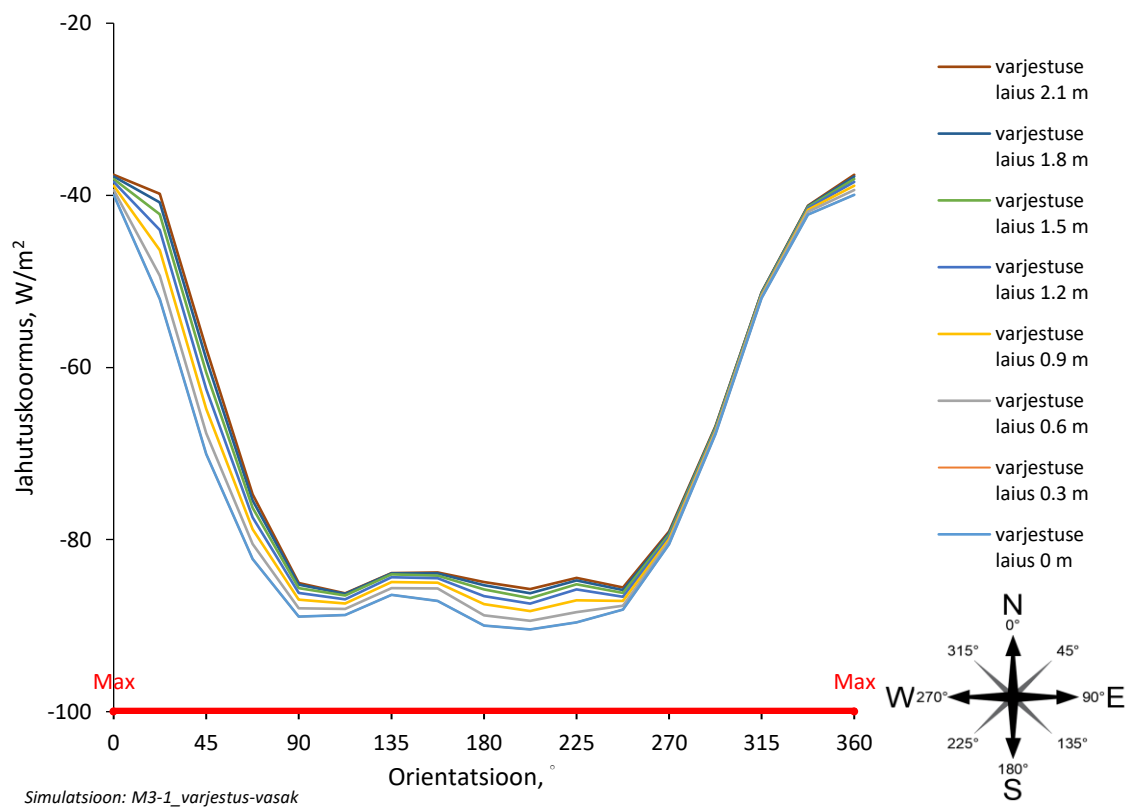
Varjestuse mõju uurimiseks teostati 6 parameetrilist simulatsiooni. Esimese ja teises simulatsioonis (M3-1 ja M3-2) paiknes varjestus fassaadi poolt vaadates akna vasakus küljes. Kolmandas ja neljandas simulatsioonis (M3-3 ja M3-4) paiknes varjestus fassaadi poolt vaadates akna paremas küljes. Neljandas ja viiendas simulatsioonis (M3-5 ja M3-6) paiknes varjestus akna kohal. Kõigi suunaliste varjestuste teostati kaks simulatsiooni. Esimeses uuriti varjestuse mõju, mille mõõdud ühtivad akna mõõtudega. Teises uuriti varjestuse mõju, mis on 2 korda suurema mõõduga aknast. IDA-ICE mudelis viidi ruumid üksteisest kaugemale, et vältida erinevatel kõrgustel paiknevate varjestuste mõju alumistele ruumidele.

3.1.4.1 Varjestus vasakul

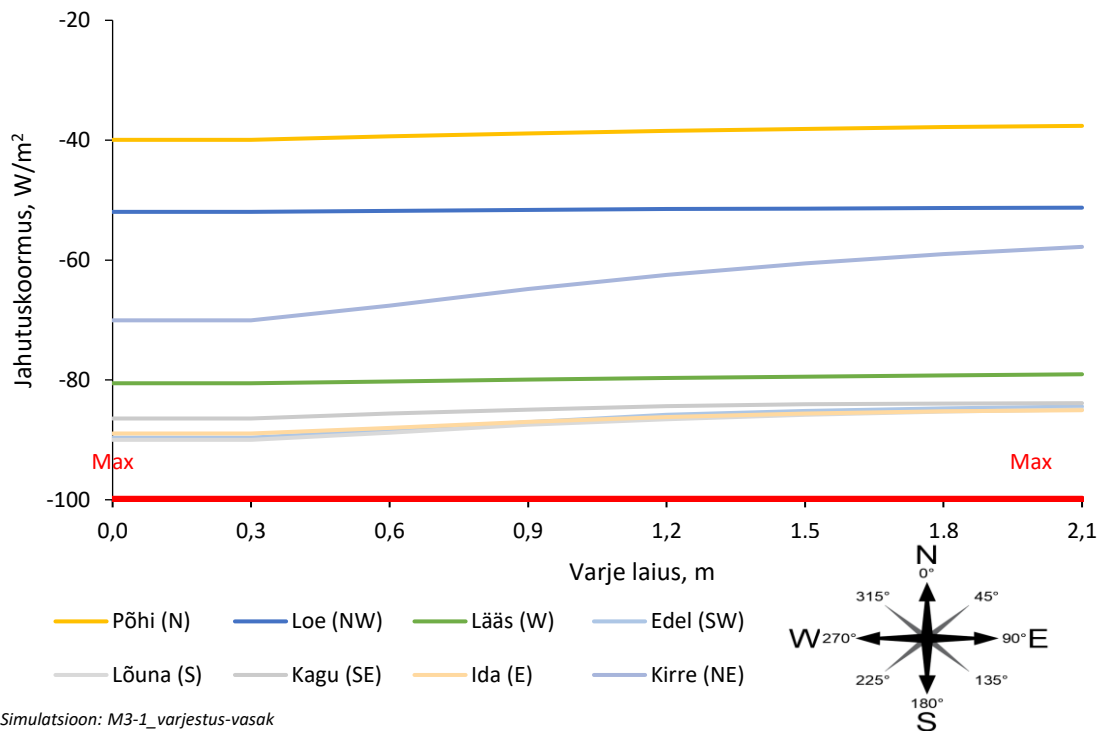
Simulatsioonis M3-1 muudeti aknast vasakul pool paikneva varjestuse laiust vahemikus 0,3...2,1m. Varjestuse kõrguseks valiti akna kõrgus. Tüüpruumi muid parameetreid ei muudetud.

Tabel 24 Muudetavad parameetrid simulatsioonis M3-1

Nr	Varjestuse laius, m	
1	0.0	
2	0.3	
3	0.6	
4	0.9	
5	1.2	
6	1.5	
7	1.8	
8	2.1	



Graafik 25 Aknast vasakul paikneva varjestuse mõju jahutuskoormusele (orientatsioon)



Graafik 26 Aknast vasakul paikneva varjestuse mõju jahutuskoormusele

3.1.4.2 Varjestus vasakul (kõrge)

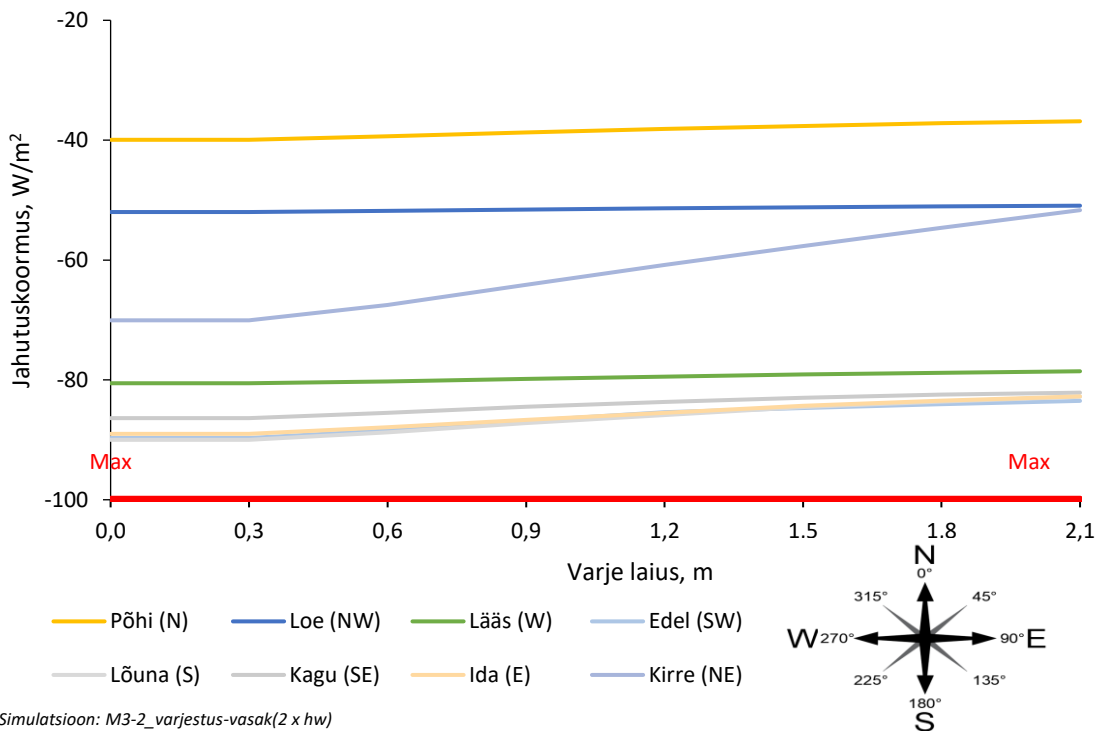
Simulatsioonis M3-2 muudeti aknast vasakul pool paikneva varjestuse laiust vahemikus 0,3...2,1m. Varjestuse kõrguseks valiti kahekordne akna kõrgus. Tüüpruumi muid parameetreid ei muudetud.

Tabel 25 Muudetavad parameetrid simulatsioonis M3-2

Nr	Varjestuse laius, m	
1	0,0	
2	0,3	
3	0,6	
4	0,9	
5	1,2	
6	1,5	
7	1,8	
8	2,1	



Graafik 27 Aknast vasakul paikneva kahekordse akna kõrgusega varjestuse mõju jahutuskoormusele (orientatsioon)



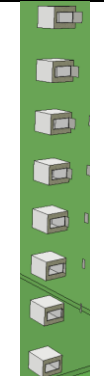
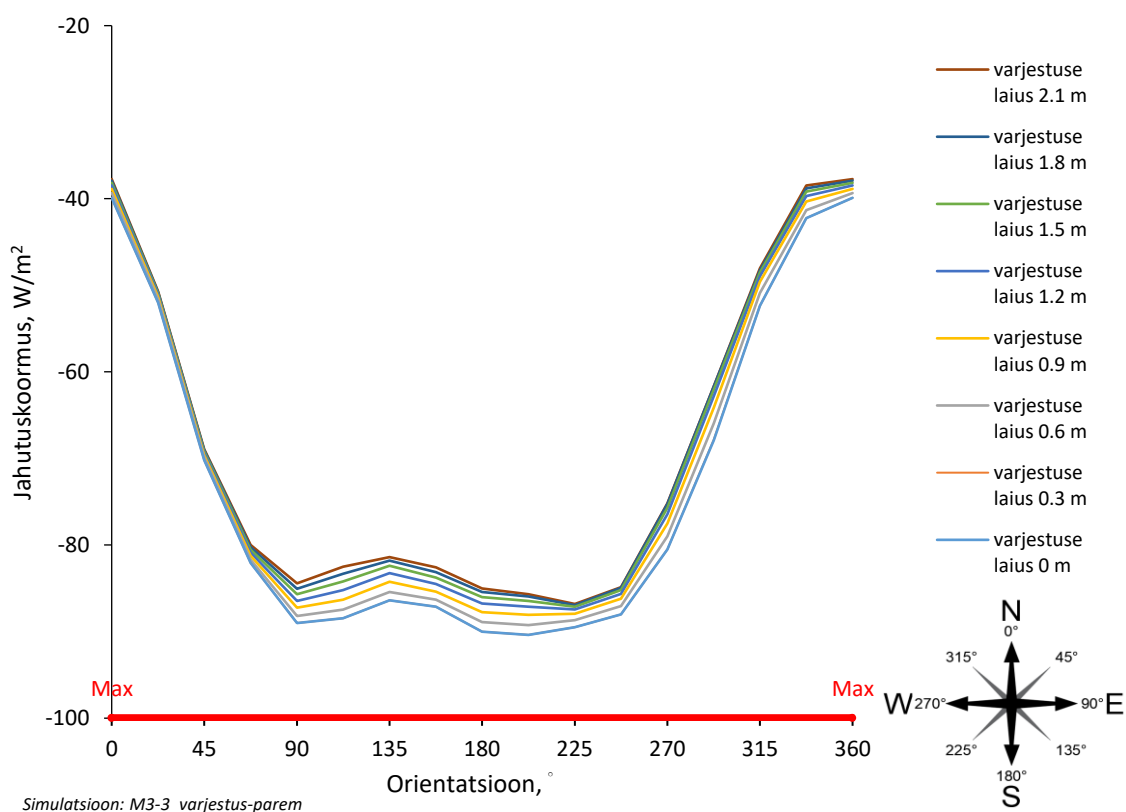
Graafik 28 Aknast vasakul paikneva kahekordse akna kõrgusega varjestuse mõju jahutuskoormusele

3.1.4.3 Varjestus paremal

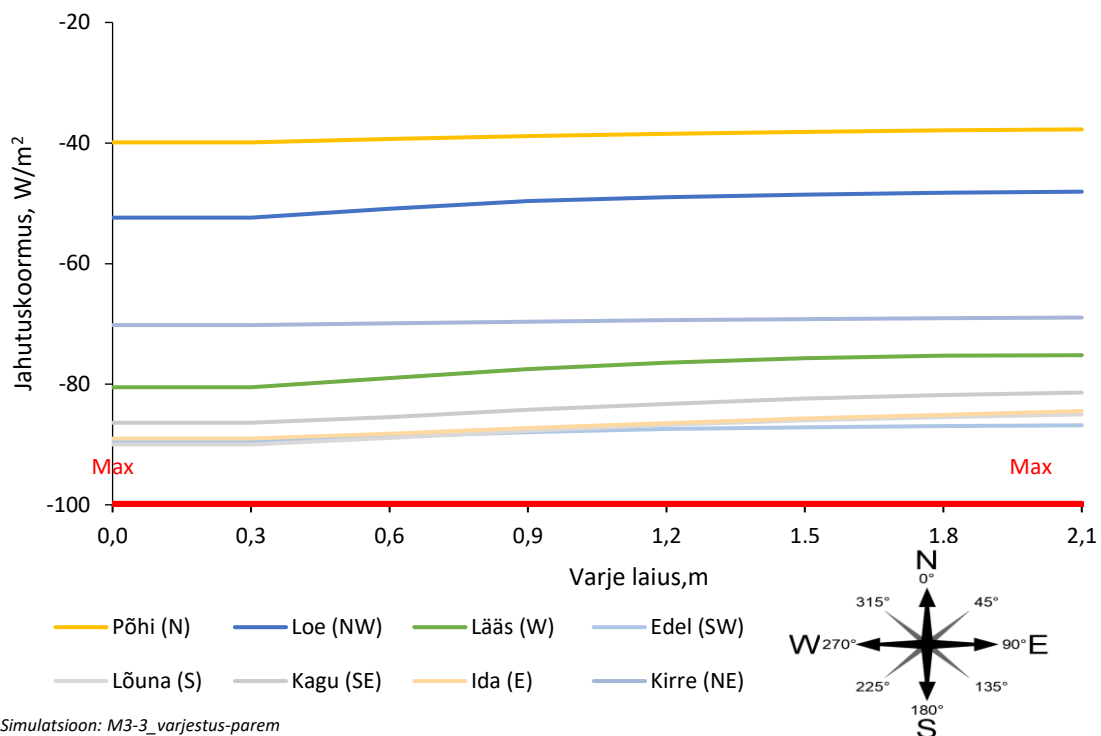
Simulatsioonis M3-3 muudeti aknast paremal pool paikneva varjestuse laiust vahemikus 0,3...2,1m. Varjestuse kõrguseks valiti akna kõrgus. Tüüpruumi muid parameetreid ei muudetud.

Tabel 26 Muudetavad parameetrid simulatsioonis M3-3

Nr	Varjestuse laius, m
1	0,0
2	0,3
3	0,6
4	0,9
5	1,2
6	1,5
7	1,8
8	2,1

Graafik 29 Aknast paremal paikneva varjestuse mõju jahutuskoormusele (orientatsioon)











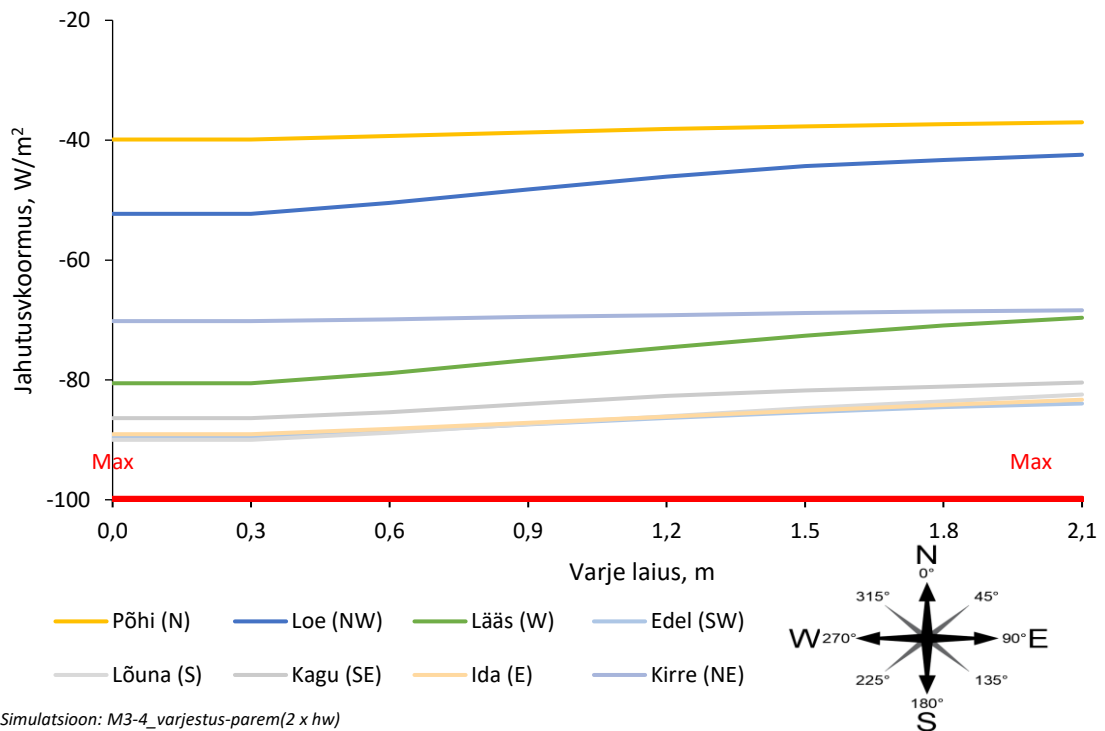
Graafik 30 Aknast paremal paikneva varjestuse mõju jahutuskoormusele

3.1.4.4 Varjestus paremal (kõrge)

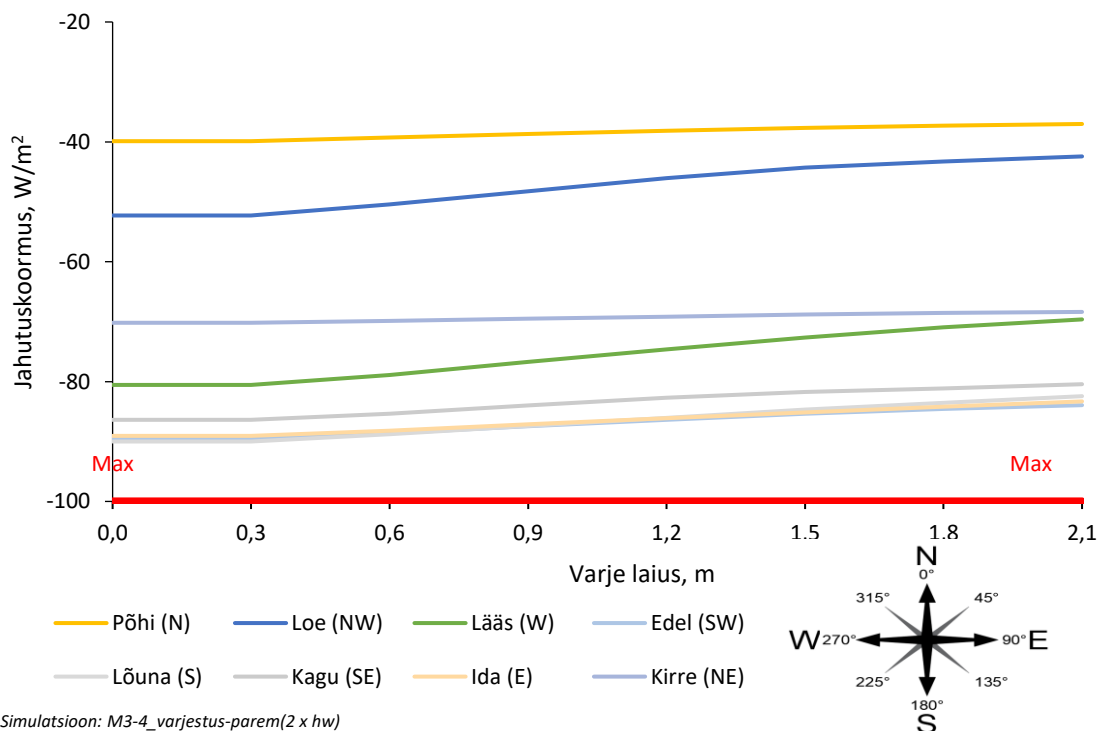
Simulatsioonis M3-4 muudeti aknast paremal pool paikneva varjestuse laiust vahemikus 0,3...2,1m. Varjestuse kõrguseks valiti kahekordne akna kõrgus. Tüüpruumi muid parameetreid ei muudetud.

Tabel 27 Muudetavad parameetrid simulatsioonis M3-4

Nr	Varjestuse laius, m	
1	0,0	
2	0,3	
3	0,6	
4	0,9	
5	1,2	
6	1,5	
7	1,8	
8	2,1	



Graafik 31 Aknast paremal paikneva kahekordse akna kõrgusega varjestuse mõju jahutuskoormusele (orientatsioon)



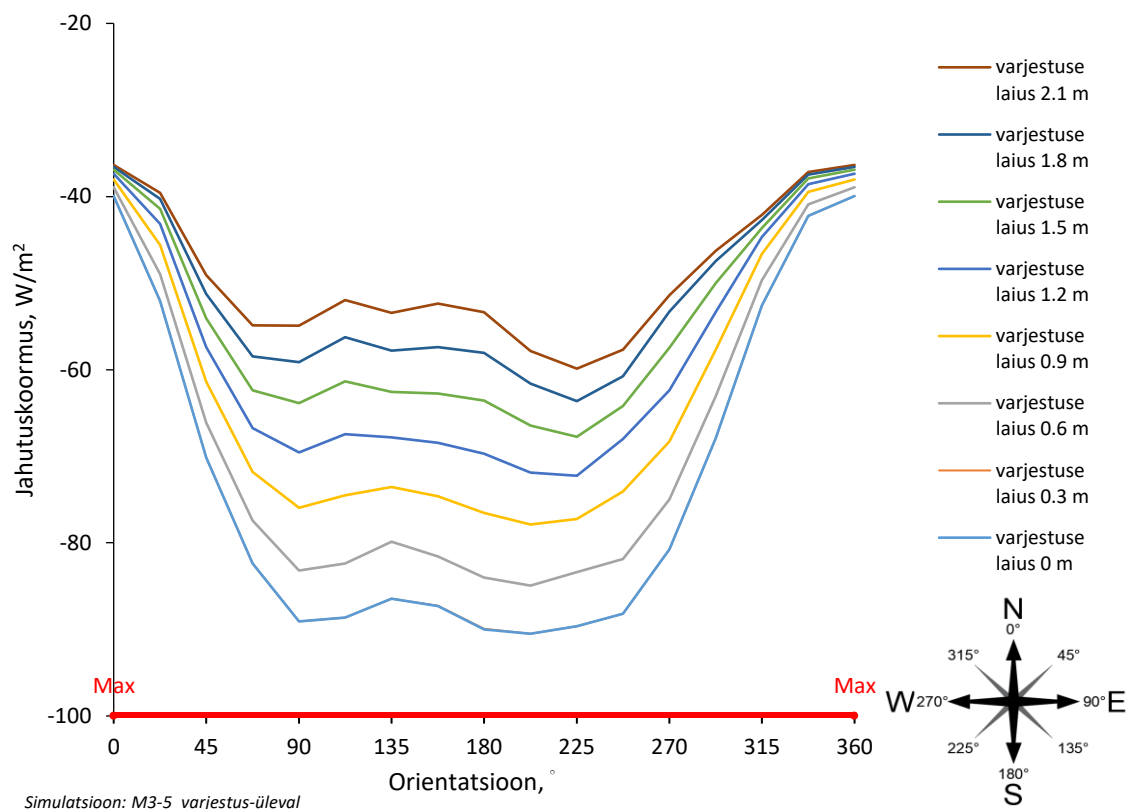
Graafik 32 Aknast paremal paikneva kahekordse akna kõrgusega varjestuse mõju jahutuskoormusele

3.1.4.5 Varjestus akna kohal

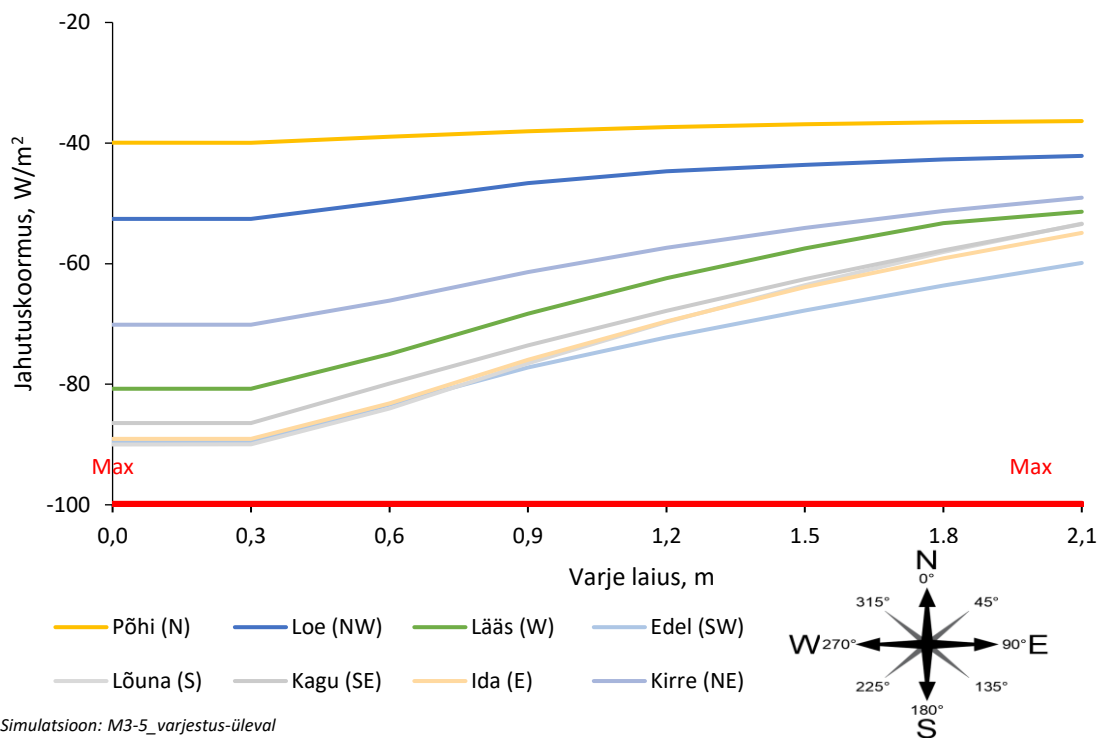
Simulatsioonis M3-5 muudeti aknast kohal paikneva varjestuse pikkust vahemikus 0,3...2,1m. Varjestuse laiuks valiti akna laius. Tüüpruumi muid parameetreid ei muudetud.

Tabel 28 Muudetavad parameetrid simulatsioonis M3-4

Nr	Varjestuse laius, m
1	0,0
2	0,3
3	0,6
4	0,9
5	1,2
6	1,5
7	1,8
8	2,1



Graafik 33 Aknast kohal paikneva varjestuse mõju jahutuskoormusele (orientatsioon)



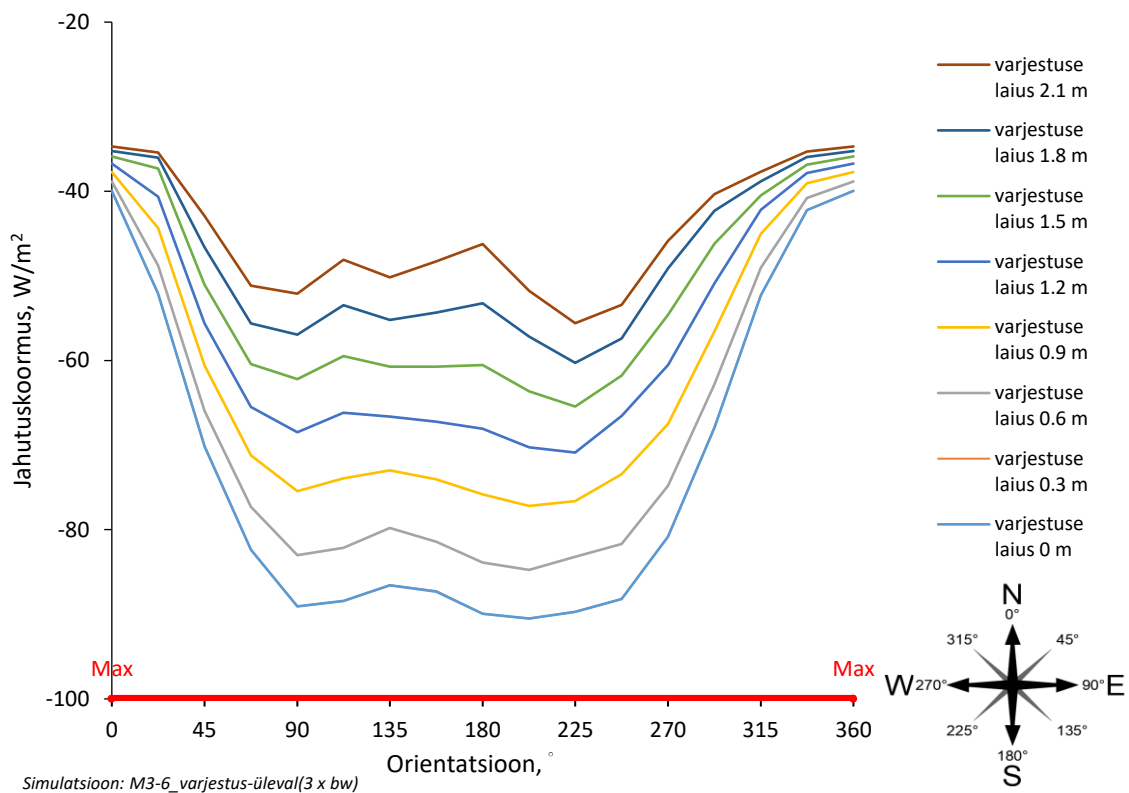
Graafik 34 Akna kohal paikneva varjestuse mõju jahutuskoormusele

3.1.4.6 Varjestus akna kohal (lai)

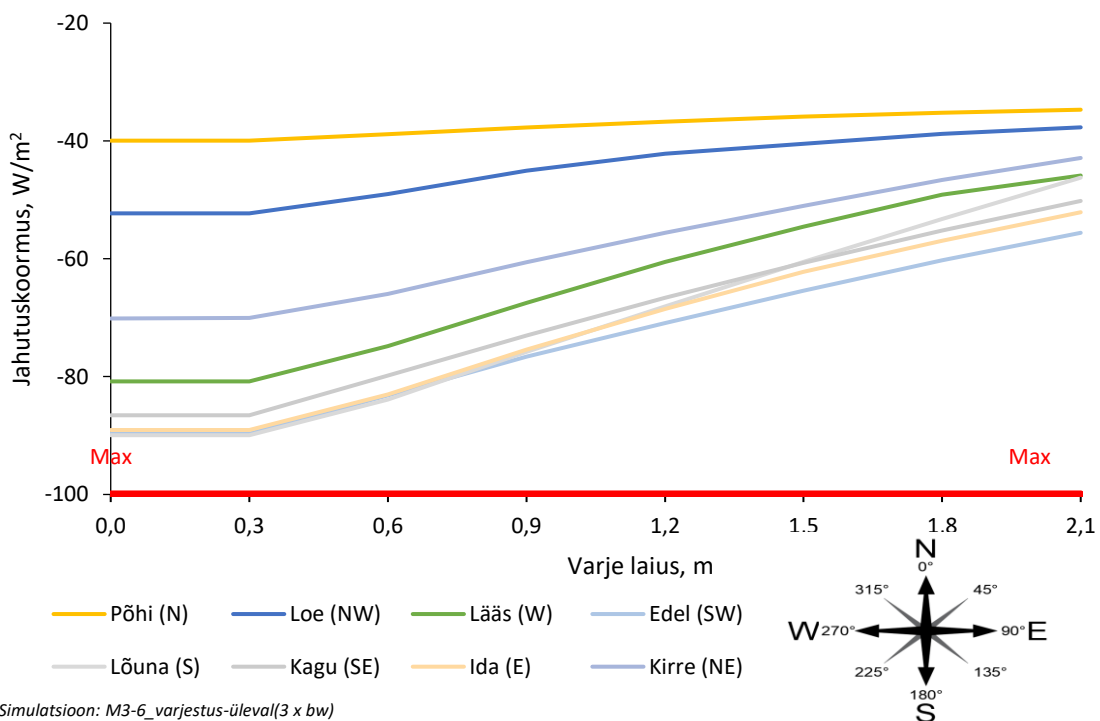
Simulatsioonis M3-5 muudeti aknast kohal paikneva varjestuse pikkust vahemikus 0,3...2,1m. Varjestuse laiuks valiti kolmekordne akna laius. Tüüpruumi muid parameetreid ei muudetud.

Tabel 29 Muudetavad parameetrid simulatsioonis M3-4

Nr	Varjestuse laius, m	
1	0.0	
2	0.3	
3	0.6	
4	0.9	
5	1.2	
6	1.5	
7	1.8	
8	2.1	



Graafik 35 Akna kohal paikneva kolmekordse akna laiuselise varjestuse mõju jahutuskoormusele (orientatsioon)



Graafik 36 Akna kohal paikneva kolmekordse akna laiuselise varjestuse mõju jahutuskoormusele

3.1.4.7 Analüüs (varjestus)

Kõikide parameetriliste simulatsioonide juures on näha, et 0,3 m laiune varjestus ei anna mingit efekti jahutuskoormuse vähendamise osas. Akna kohal paiknev varjestus vähendab jahutuskoormust efektiivsemalt. Kuna tulemused sõltub reaalsest akna kujust ning päikeseläbivusest, siis tuleks projekteerides kindlasti alati konkreetne varjestuse lahendus läbi arvutada.

Aknast vasakul pool paiknev varjestus avaldab arvestatavat mõju suunavahemikus 22,5...225°. Kõige rohkem avaldab aknast vasakul asuv varjestus mõju suunavahemikus 22,5...67,5°. Kirde suunal vähendab jahutuskoormust akna laiune 2,1m laiune varjestus 12,3 W/m² (17,5%) võrra jahutuskoormust ning aknast kahekordse akna kõrgusega varjestus 18,4 W/m² (26,2%). Kahekordse akna kõrgusega jahutuskoormust vähendav mõju on ca kolmandiku võrra suurem kui akna kõrguse varjestusega.

Aknast paremal pool paiknev horisontaalne varjestus avaldab arvestatavat mõju suunavahemikus 45...315°. Kõige rohkem avaldab aknast vasakul asuv varjestus mõju suunavahemikus 270...315°. Lääne suunal vähendab jahutuskoormust akna laiune 2,1m laiune varjestus 5,3 W/m² (6,6%) võrra jahutuskoormust ning kahekordse akna kõrgusega varjestus 15,3 W/m² (13,6%). Kahekordse akna kõrgusega varjestuse jahutuskoormust vähendav efekt on ca kolm korda suurem kui akna kõrguse varjestusega.

Akna kohal paiknev varjestus avaldab arvestatavat mõju suunavahemikus 45...315°. Kõige suurem on mõju suunavahemikus 45...315°. Tipp jääb lõunasse, kus akna laiune 2,1m laiune varjestus vähendab jahutuskoormust 36,6 W/m² (40,7%) võrra jahutuskoormust ning aknast mõlemalt poolt akna laiuse võrra üle ulatuv varjestus 43,7 W/m² (48,6%).

3.2 TARINDID

Tarindeid iseloomustavate parameetriliste simulatsioonidega uuritavad paremeetrid on: välissein, sisesein ning aken. Simulatsioonide tulemuste iseloomustamiseks on graafikud, milles võrreldakse jahutuskoormusi mõõtmete simulatsioonides saadud väärtustega. Võrdlusgraafikutes tähendab positiivne väärtus, et muudetud parameeter suurendab jahutuskoormust ning negatiivne väärtus, et jahutuskoormus langes.

3.2.1 Seinad

Seinade mõju uurimiseks viidi läbi 3 täiendavat parameetrilist simulatsiooni kasutades varasemalt mõõttude simulatsioonis kasutatud mudelit M1-3, kus muudeti akna kõrgust nii, et WWR muutus vahemikus 12,5%...100%. Simulatsioonis T1-1 uuriti väiksema massiivsusega konstruktsiooniga välisseina ning simulatsioonides T1-2 ja T1-3 suurema massiivsusega konstruktsiooniga siseseina mõju jahutuskooormusele.

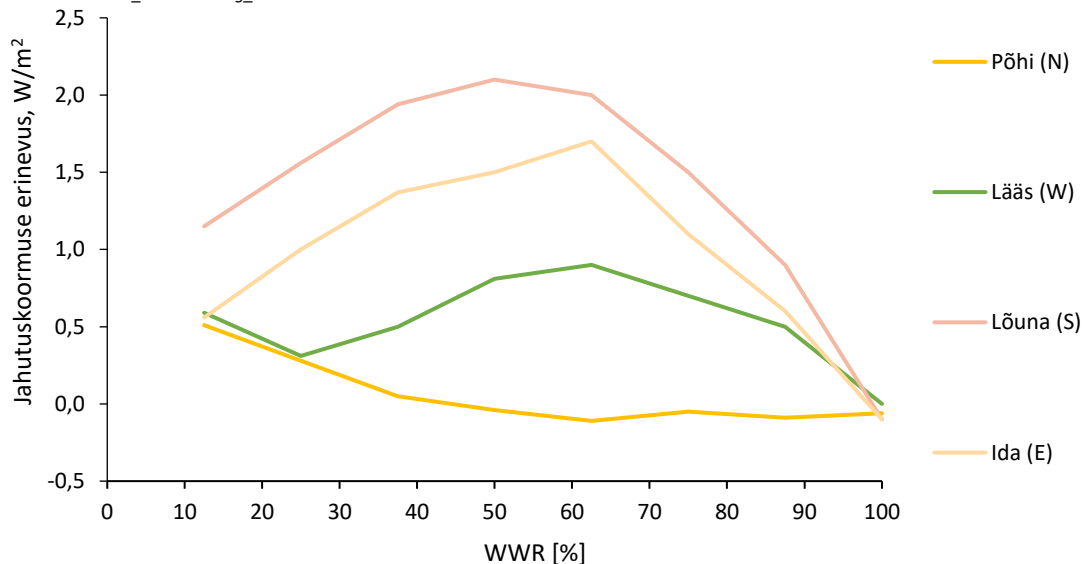
3.2.1.1 Kergkonstruktsiooniga välissein

Simulatsioonis T1-1 kasutati välistarindina IDA-ICE puitkarkasskonstruktsiooni näidisvarianti. Muid parameetreid ei muudetud.

Tabel 30 Simulatsioonis välisseina iseloomustavad parameetrid

Kihid(seest välja):
-kipsplaat 26mm
-Isolatsioon + puitkarkass 195mm ($U=0,052$ $W/(m^2 \cdot K)$)
-kipsplaat 26mm
-puit 25 mm
$U_{vs}=0,235$ $W/(m^2 \cdot K)$

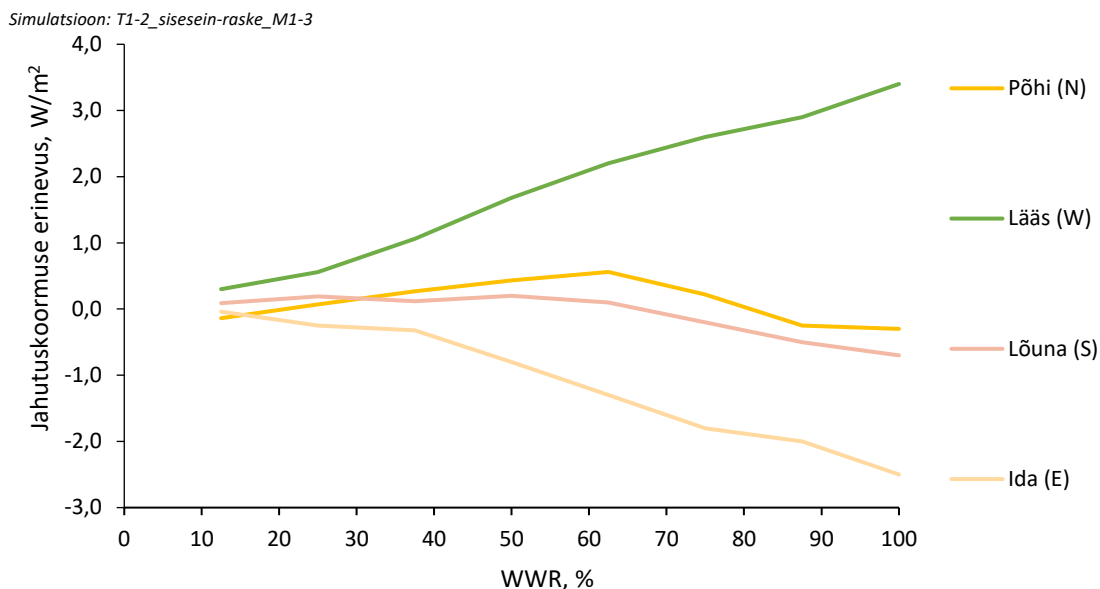
Simulatsioon: T1-1_välissein-kerg_M1-3



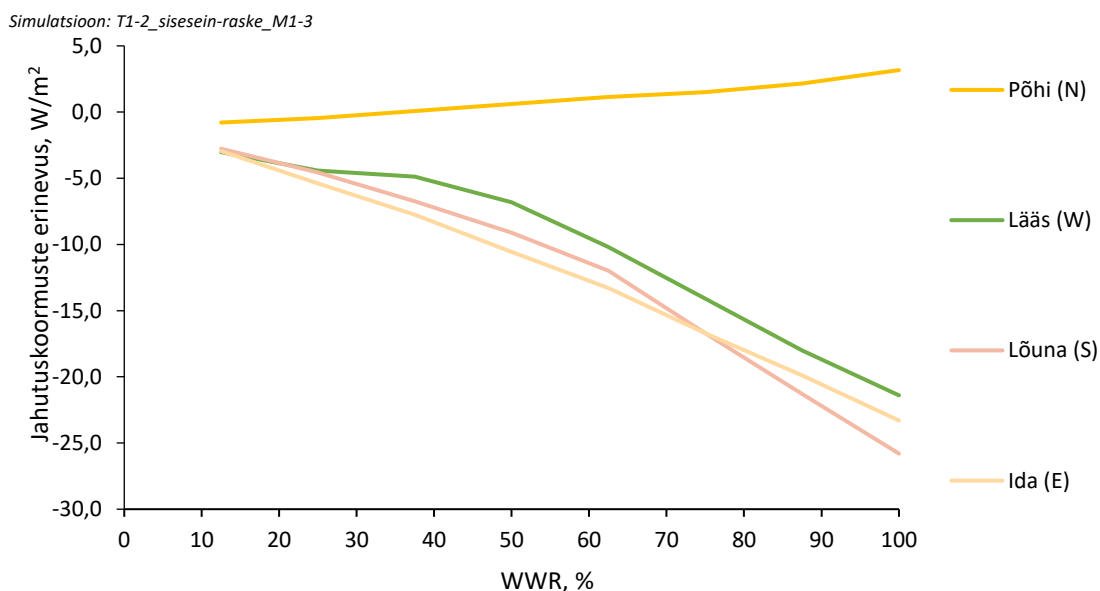
Graafik 37 Jahutuskoormuste tulemuste erinevus kasutades kerge konstruktsiooniga välisseina võrreldes simulatsiooniga M1-3

3.2.1.2 Raske sisesein

Simulatsioonis T1-2 kasutati siseseina tarindina kergbetoonist seinapaksusega 150mm. Muid parameetreid ei muudetud. Kuna simulatsiooni T1-2 tulemused saadi huvitavad, siis viidi ka läbi täiendav simulatsioon T1-3 kasutades betoonist siseseina paksusega 150mm.



Graafik 38 Jahutuskoormuste tulemuste erinevus kasutades 150mm kergbetoonist siseseina võrreldes simulatsiooniga M1-3



Graafik 39 Jahutuskoormuste tulemuste erinevus kasutades 150mm betoonist siseseina võrreldes simulatsiooniga M1-3

3.2.1.3 Analüüs (seinad)

Karkasskonstruktsiooniga välisseina tulemuste erinevus baasruumis kasutatud seinatüübist on väike. Tulemused erinevad kõige rohkem WWR 50...60% vahemikus. Kergbetoonist siseseina mõju on väike võrreldes baasruumis kasutatud seinatüübiga. Kuna saadud tulemus oli üllatav, siis viidi läbi täiendav simulatsioon 150mm betoonist siseseinaga. Betoonist sisesein mõjutab jahutuskoormus suurel määral nii lõunas, idas kui ka läänes. Lõuna suunal vähendavad betoonist siseseinad WWR 100% juures jahutuskoormust üle 25 W/m². Kui hoones peaks leiduma betoonist siseseinasid, siis kindlasti tasuks need mudelis sellisena defineerida, kuna jahutuskoormust vähendav mõju on olemas. Tarindite mõju saaks veel täiendavalt uurida ning lõplikuid järeldusi antud tulemuste põhjal ei saa teha.

3.2.2 Aken

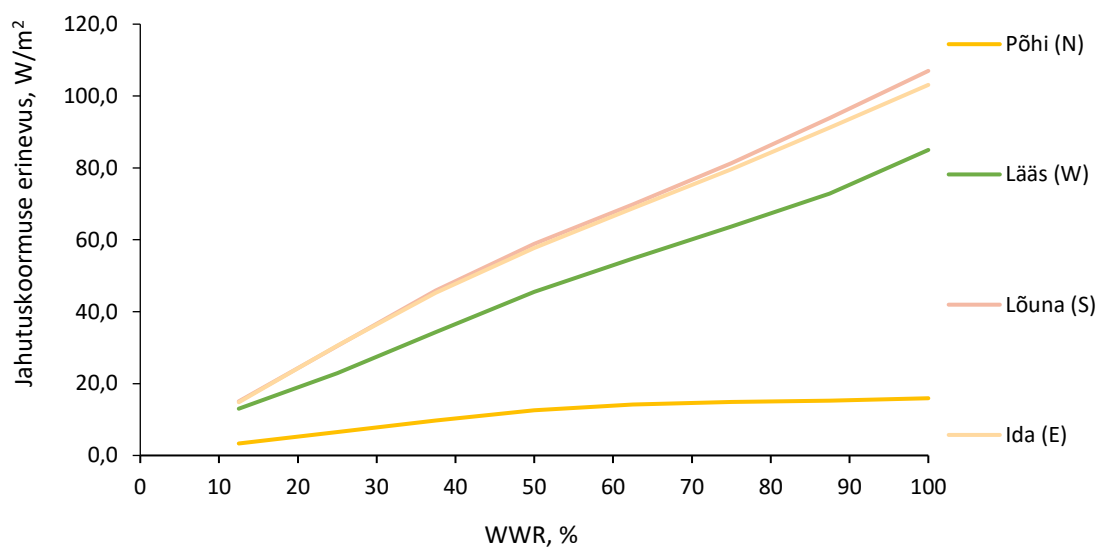
3.2.2.1 Kirgas klaas

Simulatsioonis T2-1 kasutati kirka aknaklaasina IDA-ICE andmebaasist leitavat Pilkington'i 3 kordset kirkast klaasi. Klaasi parameetrid on toodud allpool tabelis. Muid parameetreid ei muudetud.

Tabel 31 Simulatsioonis T2-1 kasutatava klaasi andmed

	Baasmudel	Simulatsioon
-kood	Pilkington Optifloat Green (6gn-15Ar-S(3)6)	Pilkington Optifloat Clear (4-15-4-12-4)
-Soojusläbivus	$U_{klaas}=1,1 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	$U_{klaas}=1,1 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
-Päikesekiirguse koguläbivus	$g=0,40$	$g=0,68$
-Otsekiirguse osakaal	$T=0,34$	$T=0,6$
-Valgusläbivus- tegur	$T_{vis}=0,66$	$T_{vis}=0,74$

Simulatsioon: T2-1_aken-kirgas_M1-3



Graafik 40 Jahutuskoormuste tulemuste erinevus kasutades kirgast klaasi võrreldes simulatsiooniga M1-3

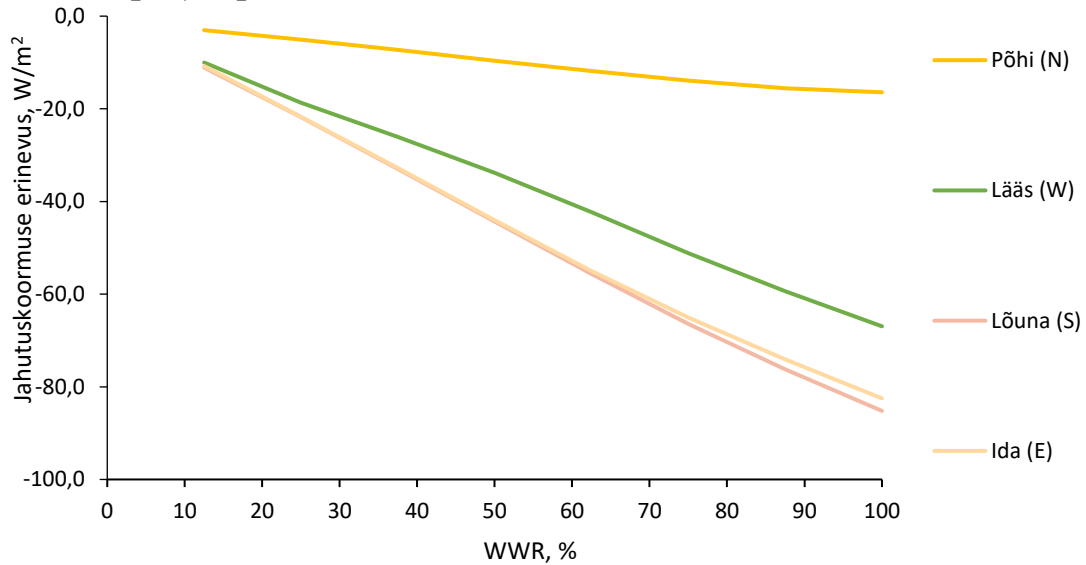
3.2.2.2 Päikesekaitse klaas

Simulatsioonis T2-1 kasutati kirka aknaklaasina IDA-ICE andmebaasist leitavat Pilkingtoni 3 kordset päikesekaitse klaasi. Klaasi parameetrid on toodud allpool tabelis. Muid parameetreid ei muudetud.

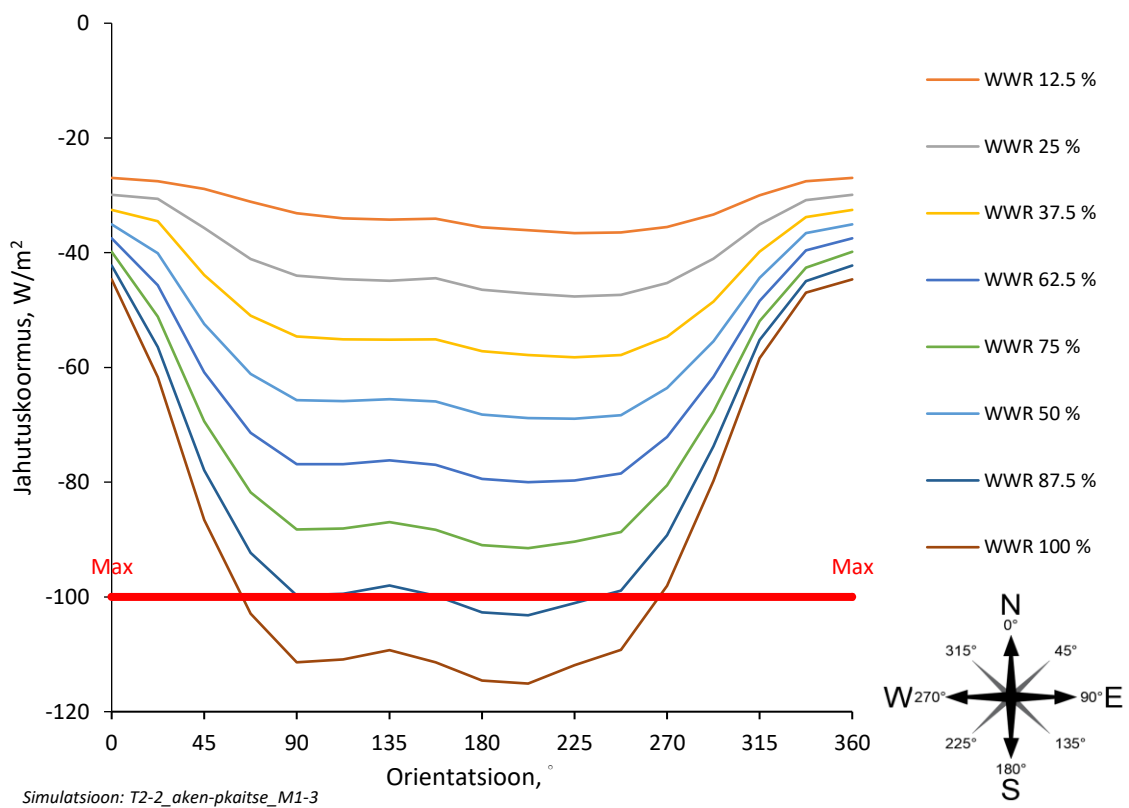
Tabel 32 Simulatsioonis T2-1 kasutatava klaasi andmed

	Baasmudel	Simulatsioon
-kood	Pilkington Optifloat Green (6gn-15Ar-S(3)6)	Pilkington Suncool 40/22 (6C(40)-15Ar-4-15Ar-S(3)4)
-Soojusläbivus	$U_{klaas}=1,1 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	$U_{klaas}=0,6 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
-Päikesekiirguse koguläbivus	$g=0,40$	$g=0,20$
-Otsekiirguse osakaal	$T=0,34$	$T=0,17$
-Valgusläbivustegur	$T_{vis}=0,66$	$T_{vis}=0,36$

Simulatsioon: T2-2_aken-pkaitse_M1-3



Graafik 41 Jahutuskoormuste tulemuste erinevus kasutades kirkast klaasi võrreldes simulatsiooniga M1-3



Graafik 42 Jahutuskoormused kasutades päikesekaitse klaasi

3.2.2.3 Analüüs (aken)

Kirka ja päikesekaitse klaasiga simulatsioonid näitavad, et kasutatava aknaklaasi parameetrid mõjutavad jahutuskoormust väga suurel määral. Jahutuskoormuste

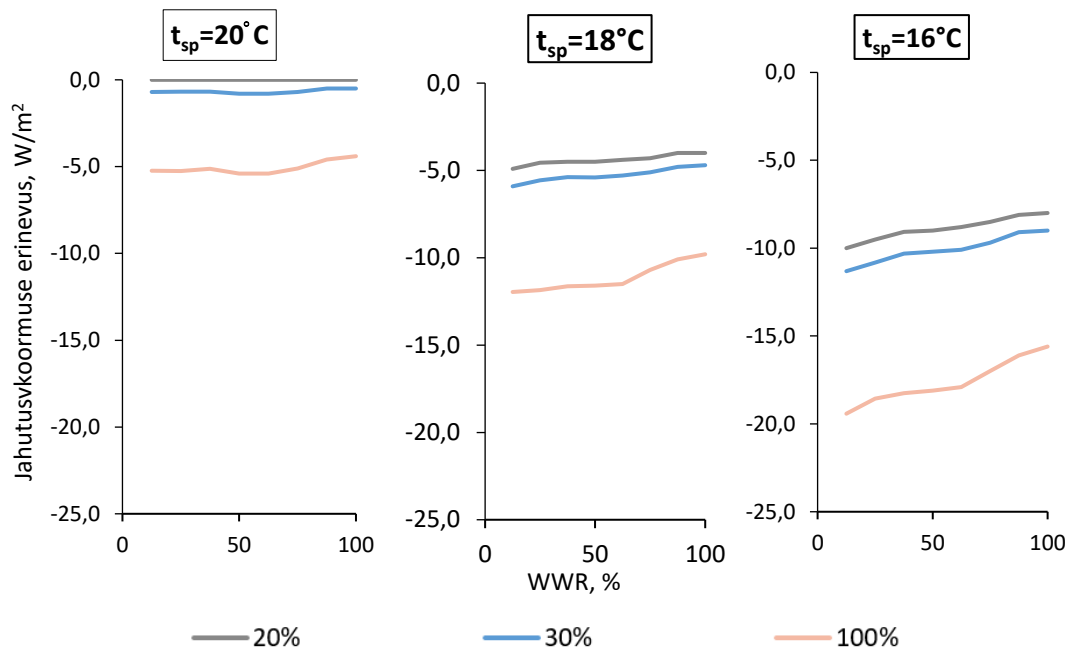
määramise seisukohalt on väga oluline arvestada reaalselt hoonesse projekteeritavate akendega. Selleks, et vältida väga suuri jahutuskoormusi tuleks suunavahemikus 45...315° vältida kirkaid klaase. Päikesekaitseklaasiga läbi viidud simulatsiooni graafikutelt on näha, et isegi päikesekaitseklaasiga pole võimalik rajada WWR=100% hooneid nii, et ei ületataks 100 W/m² jahutuskoormust. Tuleb ka arvestada, et päikesekaitseklaasiga suureneks ka valgustusest tulenev jahutusvajadus. Põhja suunal on valitava akna mõju jahutuskoormusele märkimisväärselt väiksem võrreldes teiste ilmakaartega.

3.3 SEADEARVUD

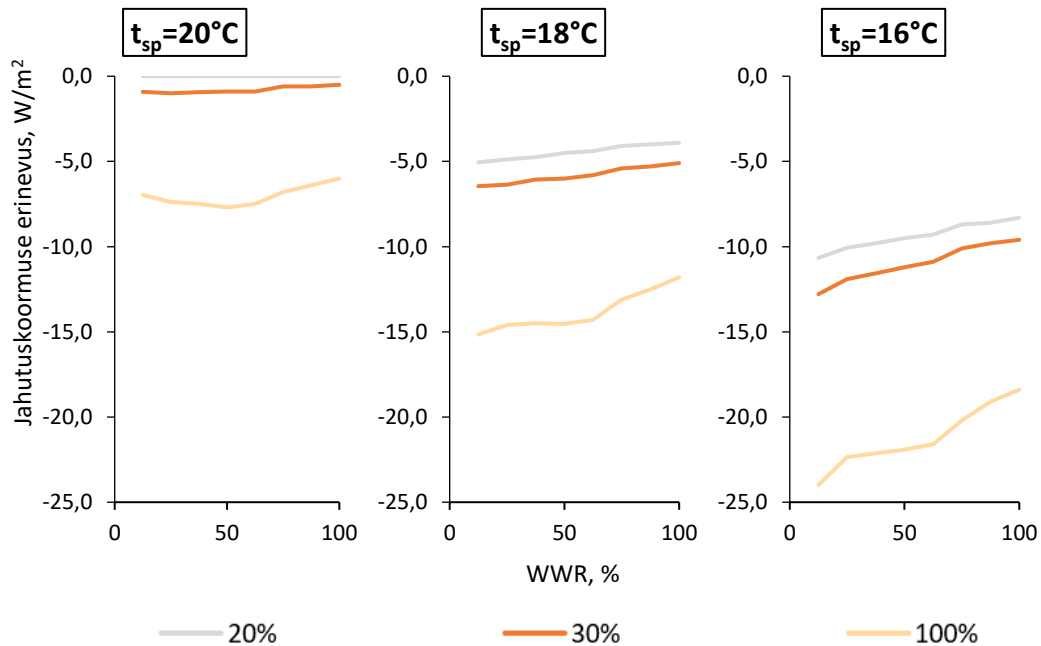
Seade arvude simulatsioonidega uuriti ventilatsiooni öist jahutus. Simulatsioonide tulemuste iseloomustamiseks on graafikud, milles võrreldakse jahutuskoormusi mõõtmete simulatsioonides saadud väärtustega. Võrdlusgraafikutes tähendab positiivne väärtus, et muudetud parameeter suurendab jahutuskoormust ning negatiivne väärtus, et jahutuskoormus langes.

3.3.1 Ventilatsioon öine jahutus

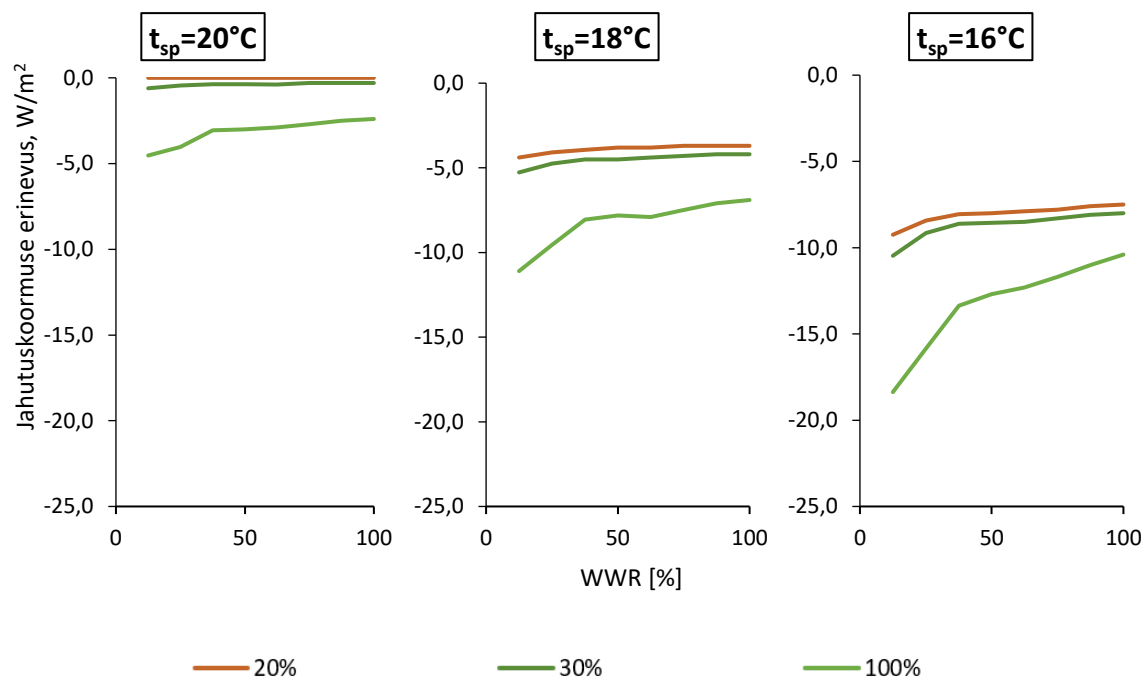
Akna öise jahutuse uurimiseks teostati uuriti 3 olukorda: öine ventilatsioon töötamine päevasest koormusest 20%, 30% ja 100%. Kõik parameetrilised simulatsioonid viidi läbi sissepuhke temperatuuridega 16°C, 18°C ja 20°C ning koostati võrdlevad graafikud. Võrdluseks võeti olukord, kus sissepuhke temperatuur on 20°C ja öise ventilatsiooni õhukoguseks on 20% päevasest. Simulatsioonide põhjana kasutati mudelit M1-3.



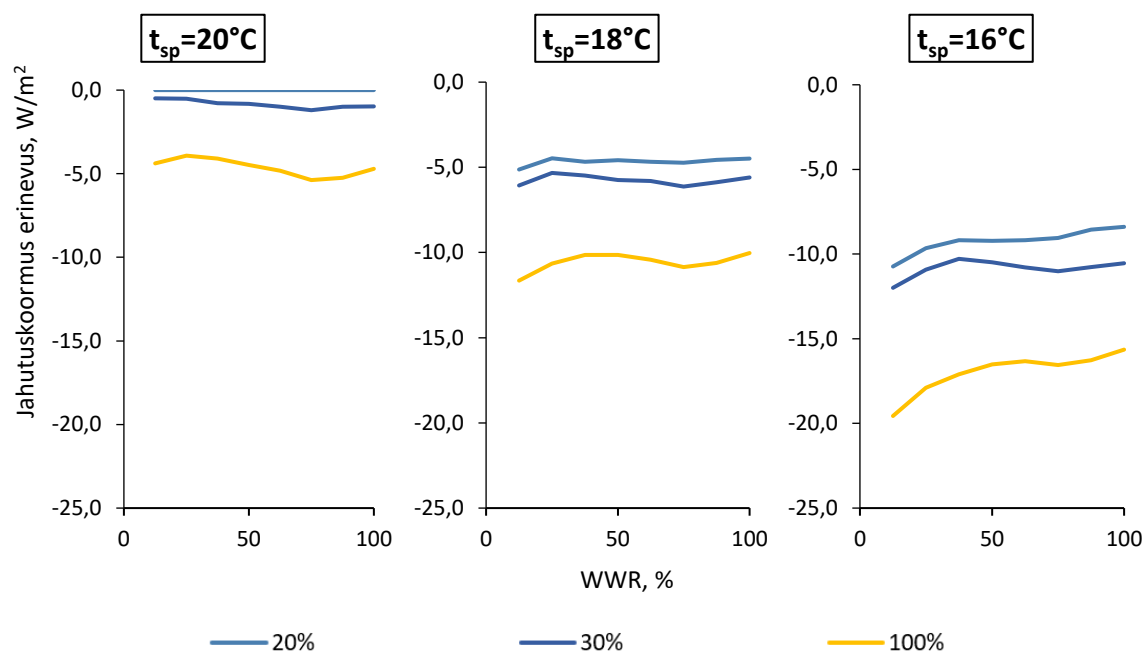
Joonis 7 Jahutuskoormuste erinevus lõuna suunal sõltuvalt WWR-st ning öise ventilatsiooni osakaalust (20%, 30% ja 100%) võrreldes sissepuhke temperatuuriga 20 °C ja öise ventilatsiooni määraga 20%.



Joonis 8 Jahutuskoormuste erinevus ida suunal sõltuvalt WWR-st ning öise ventilatsiooni osakaalust (20%, 30% ja 100%) võrreldes sissepuhke temperatuuriga 20 °C ja öise ventilatsiooni määraga 20%.



Joonis 9 Jahutuskoormuste erinevus ida suunal sõltuvalt WWR-st ning öise ventilatsiooni osakaalust (20%, 30% ja 100%) võrreldes sissepuhke temperatuuriga 20 °C ja öise ventilatsiooni määraga 20%



Joonis 10 Jahutuskoormuste erinevus ida suunal sõltuvalt WWR-st ning öise ventilatsiooni osakaalust (20%, 30% ja 100%) võrreldes sissepuhke temperatuuriga 20 °C ja öise ventilatsiooni määraga 20%

3.3.1.1 Analüüs (ventilatsiooni öine jahutus)

Analüüsil tuleb arvestada, et graafikutel toimub võrdlus simulatsiooniga sissepuhke temperatuuriga 20 °C ning öise ventilatsiooni määraga 20%. Lisaks tuleb arvestada, et 2 °C sissepuhke temperatuuri langust vähendab jahutuskooormust õhutiheduse 1,2 kg/m³ ja 1,5 l/sm² õhuvahetuse juures $\phi_{lang}=1,5*1,2*2=3,6$ W/m².

Kõigis ilmakaartes on öise jahutuse mõju jahutuskooormusele arvestatav. Öise ventilatsiooni kõige suurem mõju on ida suunal ning väikseim lääne suunal. Puhudes öösel tупpa külmemat õhku saavutatakse suurem öise jahutuse efektiivsus (kõikidel graafikutel suureneb amplituud 20% ja 100% vahel sissepuhutavat temperatuuri langetades). Võrreldes 20 °C, 20% olukorda ja 16 °C 100% on jahutuse vähendamise potentsiaal kuni 15 W/m². Sellest tulemusest on maha lahutatud ventilatsiooni sissepuhkeõhu alandamisest tulenev jahutuskooormuse langus 7,2 W/ m². Erinevus öise jahutuse määra 20% ja 30% vahel on väike.

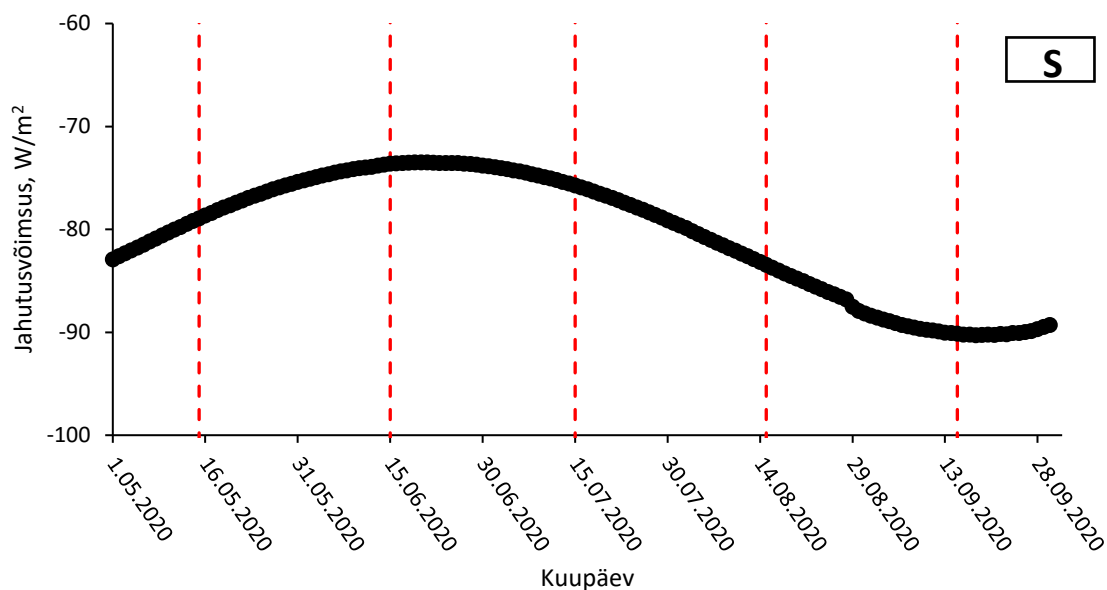
3.4 ARVUTUSPARAMEETRID

3.4.1 Kuupäev 15

IDA ICE arvutab kasutades sünteetilist kliima jahutuskooormuseid arvutuskuude 15. kuupäevade järgi. Simulatsioonidega uuritakse kui palju muutuvad ühe kuu lõikes jahutuskooormused W/m². 15. kuupäeva ja tegeliku jahutuskooormuse mõju uurimiseks teostati simulatsioonid ajavahemikus 1. mai kuni 31. septembrini. Uuritavaks mudeliks võeti tüüpruum.

3.4.1.1 Lõuna

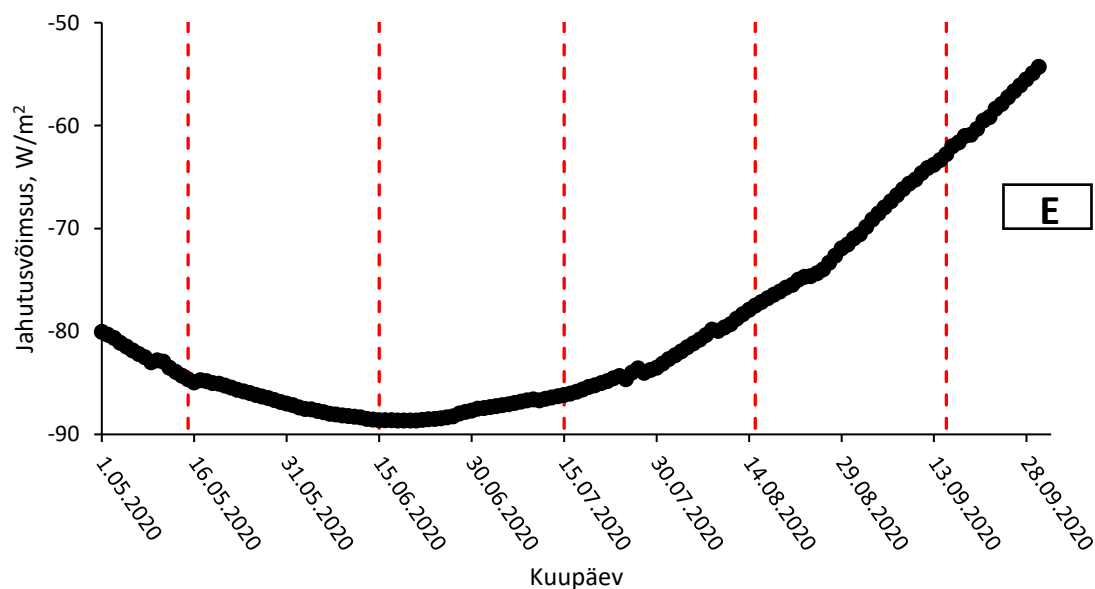
Lõunas suunal on arvutusperioodil väikseim jahutuskooormuste tipp juuni keskpaigas. Juuni keskel on päikese kõrgusnurk suurim ning Tulemused suurenevad juuni kuust eemaldudes. Suurim jahutuskooormus saadakse septembri keskpaigas. Septembri ning juuni keskpaiga tippude erinevus on 16,8 W/m².



Graafik 43 Jahutuskoormuste muutmine arvutuseperioodil lõuna suunal

3.4.1.2 Ida

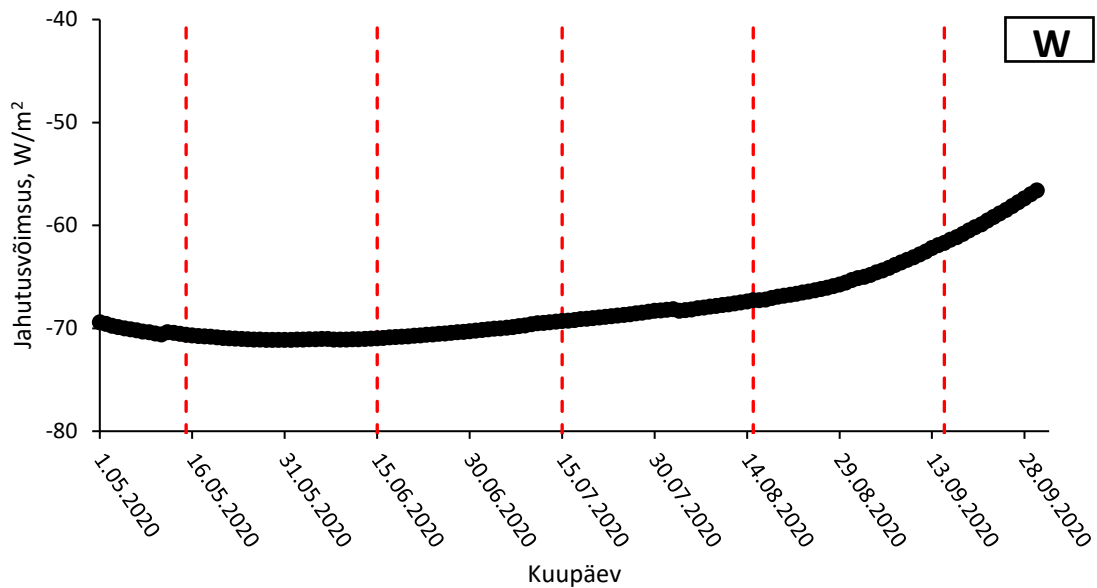
Ida suunal on suurim jahutuskoormus juunis ühtides enam vähem IDA 15. kuupäeva tulemusega. Eemaldudes juunikuust jahutuskoormused vähenevad liikudes mööda kõverat.



Graafik 44 Jahutuskoormuste muutmine arvutuseperioodil ida suunas

3.4.1.3 Lääs

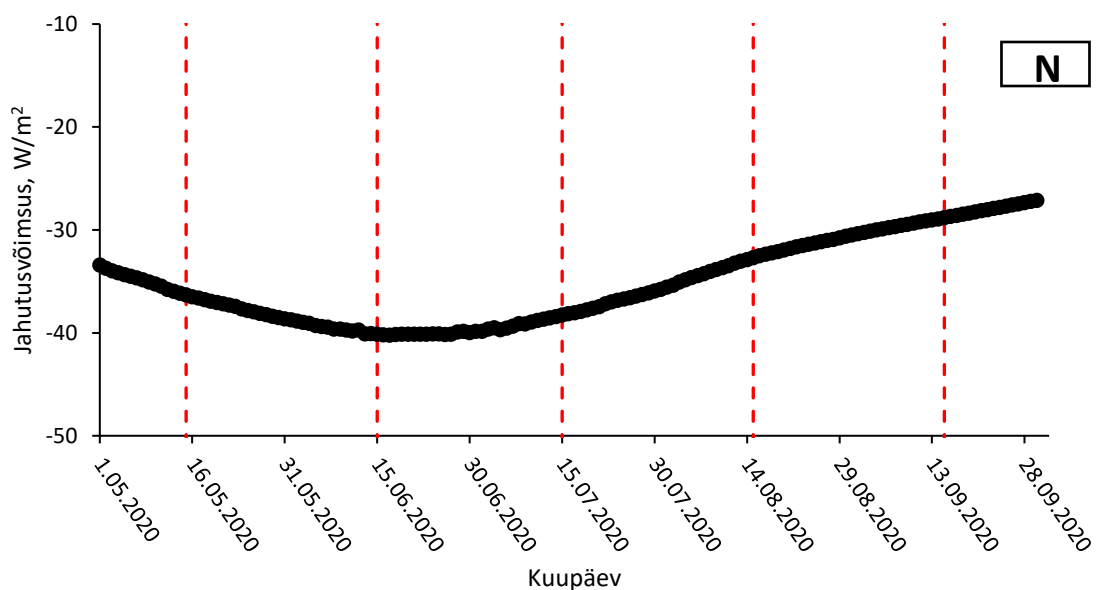
Lääne suunal jääb jahutuskoormuse tipp mai ja juuni vahepeale. Erinevus mai ja juuni 15. kuupäeva jahutuskoormusest on minimaalne. Eemaldudes maist jahutuse tipukoormus langeb mööda kõverat.



Graafik 45 Jahutuskoormuste muutmine arvutuseperioodil lääne suunal

3.4.1.4 Põhi

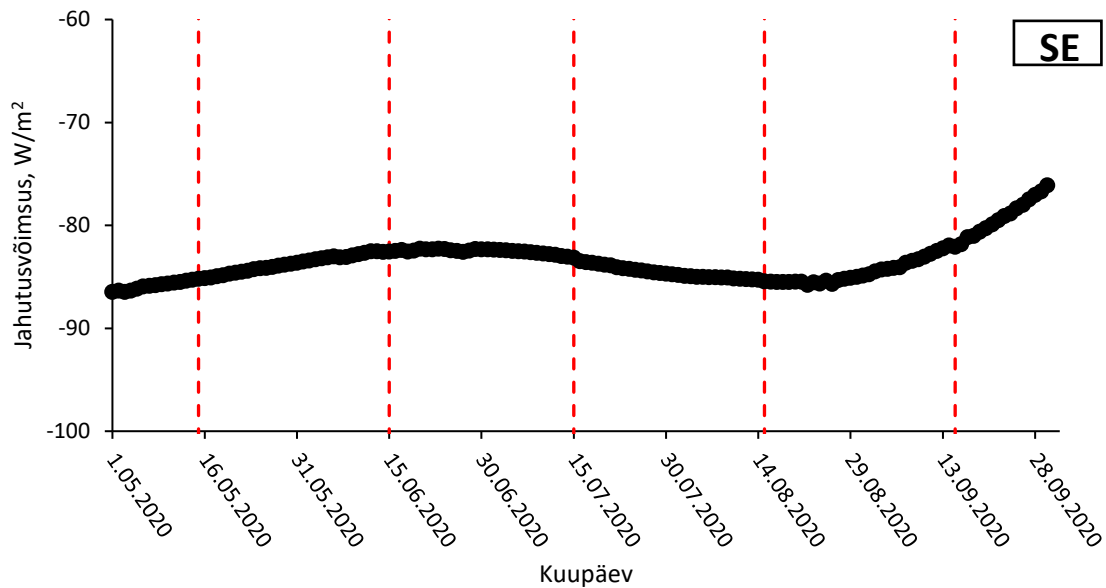
Põhja suunal jääb jahutuse tipukoormus juuni kekspaika. Eemaldudes juunist langeb jahutuse tipukoormus mööda kõverat.



Graafik 46 Jahutuskoormuste muutmine arvutuseperioodil põhja suunal

3.4.1.5 Kagu

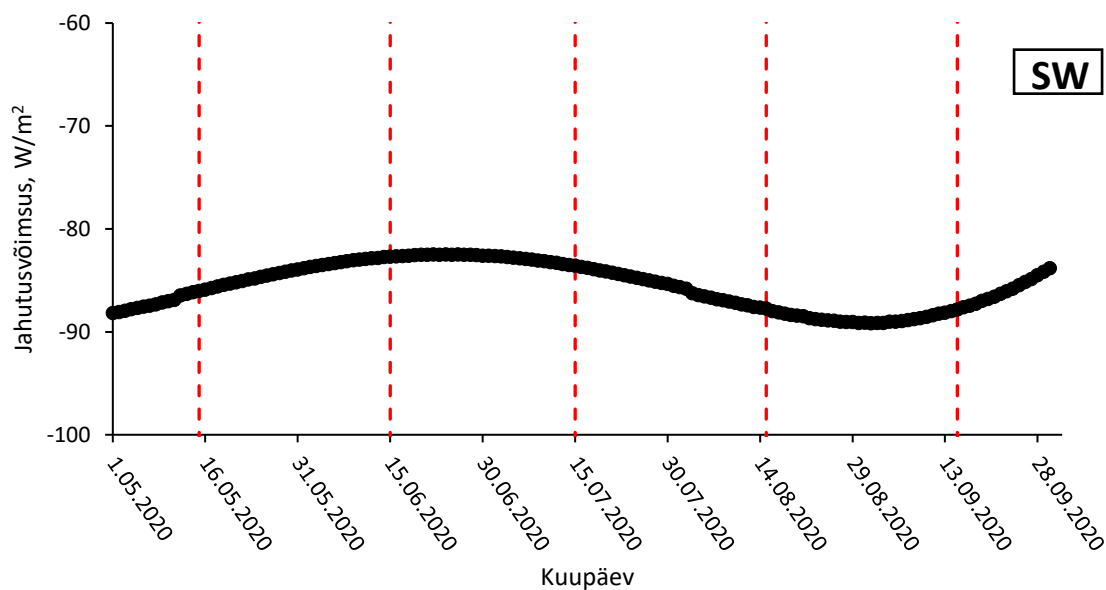
Kagu suunal on jahutuse tipukoormusel mai alguses. Augustis paikneva tipu jahutuskoormus on natuke väiksem.



Graafik 47 Jahutuskoormuste muutmine arvutuseperioodil kagu suunas

3.4.1.6 Edel

Edelas on jahutuse madalaim tipukoormus septembri alguses. Mai alguse tipp jääb septembri tipule alla.



Graafik 48 Jahutuskoormuste muutmine arvutuseperioodil edela suunas

3.4.1.7 Analüüs (kuupäev 15)

IDA-ICE arvutused 15. kuupäevadel võivad tekitada valesid tulemusi. Probleem on jahutuskoormuste alahindamises. Kõigil ruumi orientatsioonidel ei jää jahutuskoormuste tipp 15. kuupäevale. Väga palju sõltub 15. kuupäeva mõju lähteandmete valikust. Eeldusel, et arvutusvahemikuks võetakse mai kuni september,

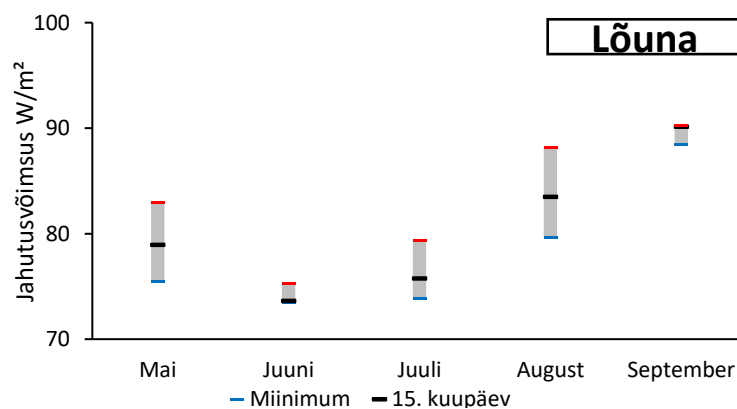
pole mõju väga suur. Kui viia arvutusi läbi vaid juuni kuus, siis võib jahutuskoormusi märkimisväärselt alahinnata.

Ida, lääne ja põhjasuunal jääb jahutuskoormuse tipp juuni kuusse ning väheneb juuni kuust eemaldudes. Ida suunal toimub jahutuskoormuste vähenemine juuni kuust eemaldudes järsku kõverat mööda. Näiteks viies läbi idasuunalisi arvutusi juuli kuus, alahinnataks jahutuskoormust $2,5 \text{ W/m}^2$, augusti kuus $11,2 \text{ W/m}^2$. Põhja ja lääne suunal on jahutuskoormuste vähenemine juuni kuust eemaldudes suhteliselt lauge.

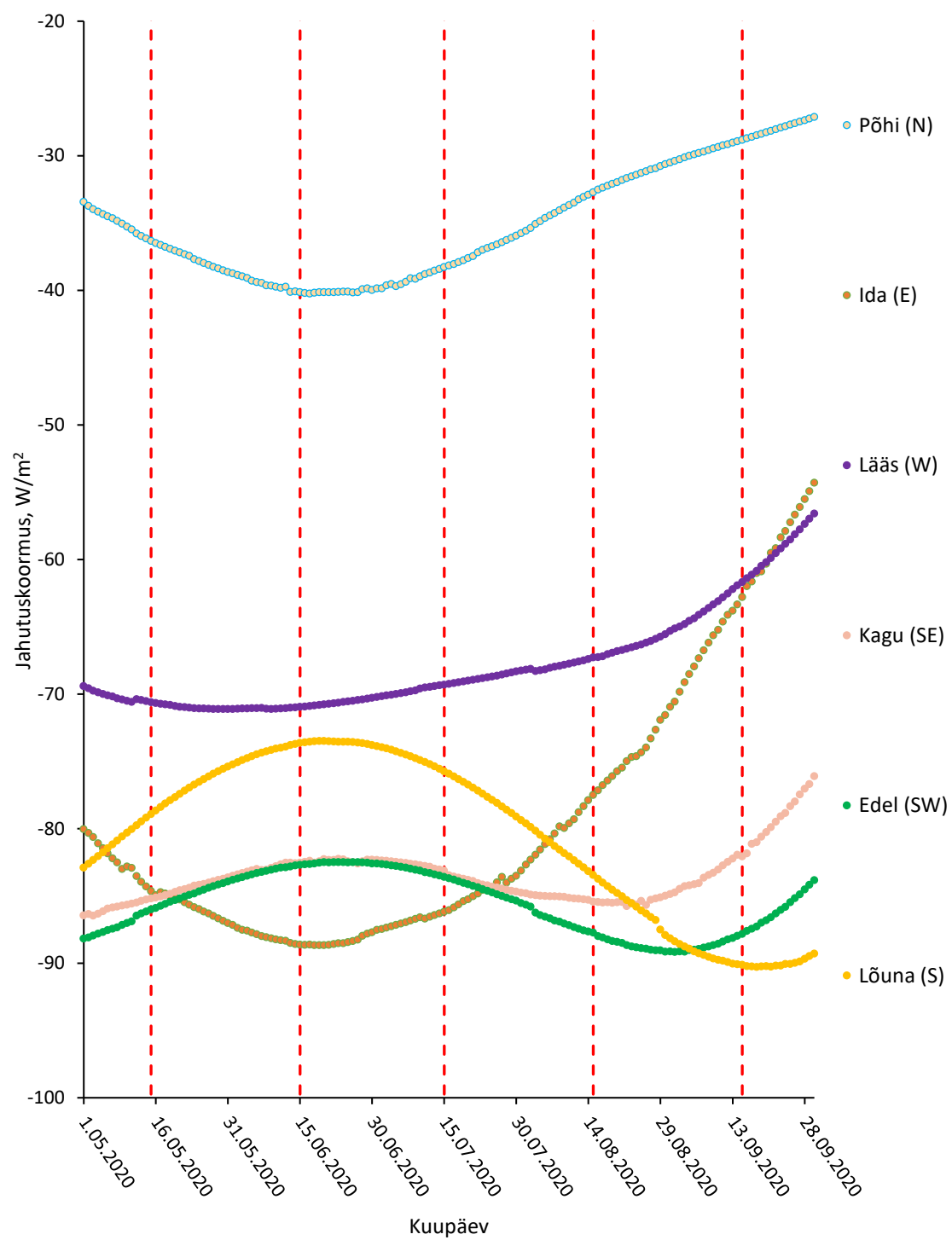
Edela ja kagu jahutuskoormuste tipud jäävad mai algusesse või septembri algusesse/augusti lõppu. Edela suunal on 1. septembrile jääva tipukoormuse erinevus 15. augustist olevast $1,4 \text{ W/m}^2$. Kagu suunal on 1. maile jääva tipukoormuse erinevus 15. augusti olevast $1,3 \text{ W/m}^2$.

Lõuna suunal jääb jahutuskoormuse tipp septembris. Erinevus jahutuskoormuse 18. septembrile jääva tipu ja 15. kuupäeva on $0,2 \text{ W/m}^2$. Arvutades tulemusi lõunas juuni kuu järgi aladimensioneeritaks jahutuskoormus $16,7 \text{ W/m}^2$, juuli korral $14,5 \text{ W/m}^2$ ja augusti korral $6,8 \text{ W/m}^2$. Seega on lõuna suuna jaoks ülimalt oluline arvutusperiood valida õigesti.

Põhiilmakaartes jäävad tipukoormused 15. kuupäevade lähedale. Täpselt 15. kuupäevadele jäämist mõjutab päikese tõeline aeg, mille üheks teguriks on tegelik päikese tõusmise ja loojumise kellaajast. Seega kui uuritav hoone on orienteeritud nii, et fassaadid jäävad põhiilmakaartesse (ruudu või riskülikukujuline maja), siis arvutab IDA-ICE 15. kuupäevadega suhteliselt õigeid tulemusi. Kui hoone fassaadid pole täpselt nii orienteeritud, siis tuleks arvestada teatava varuga või teha jahutuskoormuste simulatsioon kasutades *custom simulation*'i valikut.



Joonis 11 15. kuupäeva jahutusvõimsuse ja tegelike jahutusvõimsuste võrdlus lõuna suunal



Graafik 49 Jahutuskoormuste muutmine arvutuseperioodil

3.5 ANALÜÜS

3.5.1.1 Simulatsioonide koondtabel

Simulatsioonide tulemuste kohta koostati järgnev tabel, kus on lühidalt kirjeldatud uuritud parameetrite mõju jahutuskoormusele.

Tabel 33 Analüüsitud parameetrite koondtabel (1)

Nr	Uuritav parameeter	Simulatsiooni nimetus	Muudetud parameetrid	Järeldus
1	Akna laius 1	M1-1_aken-laius(h=2m)	1. Akna laius vahemikus 0,5...4,0 m.	Jahutuskoormuste kasv toimub WWR kasvades lineaarselt. Suurimad tipukoormused on lõunas, idas ja kagus. Suunavahemikus 90°...225° ületatakse 100 W/m ² jahutuskoormus 40% WWR-ga.
2	Akna laius 2	M1-2_aken-laius(h=3,2m)	1. Akna laius vahemikus 0,5...4,0m 2. Akna kõrgus 3,2m.	Jahutuskoormuste kasv toimub WWR kasvades lineaarselt. Suurimad tipukoormused on lõunas, idas ja kagus. Suunavahemikus 90°...225° ületatakse 100 W/m ² jahutuskoormus 40% WWR-ga.
3	Akna kõrgus	M1-3_aken-kõrgus(bw=3,2m)	1. Akna kõrgus vahemikus 0,...3,2 m. 2. Akna laius 4 m.	Jahutuskoormuste kasv toimub WWR kasvades lineaarselt. Suurimad tipukoormused on lõunas, idas ja kagus. Suunavahemikus 90°...225° ületatakse 100 W/m ² jahutuskoormus 40% WWR-ga.
4	Akna vertikaalne paiknemine	M1-4_aken-asukoht(vert)	1. Akna alumise ääre kõrgus 0...1,6m	Akna vertikaalse paiknemise mõju tubakontori jahutuskoormuste määramise seisukohalt on väike. Väike mõju avaldub suunavahemikus 45...180°. Suurim erinevus on ida suunal 1,4 W/m ² .
5	Akna horisontaalne paiknemine	M1-5_aken-asukoht(hor)	1. Akna paiknemine fassaadil nõ vasakult paremale 2. Akna mõõdud 1,5m x 3,2m.	Akna horisontaalse paiknemise mõju tubakontori jahutuskoormuste määramise seisukohalt on väike. Väike mõju avaldub suunavahemikus 90...225°. Suurim erinevus on kagu suunal 1,3 W/m ² .
6	Akna sügavus välistarindis	M1-6_aken-sügavus(tarind)	1. Akna sügavus tarindis mõõdetuna fassaadi pinnast vahemikus 0...21cm	Akna sügavus välistarindis avaldab jahutuskoormustele arvestatavat mõju. Mõju kasvab lähenedes lõuna suunale. Suurim erinevus on kagu suunal 4,1 W/m ² .
7	Ruumi laius (WWR=37,5%)	M2-1_ruum-laius(WWR=37,5)	1. Ruumi laius vahemikus 3...10m 2. Akna laius nii, et WWR=37,5%	Arvestati konstantse raami osakaaluga. Mõju raami osakaalu muutust arvestamata on väike. Mõju jahutuskoormusele kasvab lähenedes lõuna suunale. Suurim erinevus on edela suunal 2,2 W/m ² .

Tabel 34 Analüüsitud parameetrite koondtabel (2)

Nr	Uuritav parameeter	Simulatsiooni nimetus	Muudetud parameetrid	Järeldus
8	Ruumi laius kasutades liigendatud aknaid (WWR=37,5%)	M2-2_ruum-laius(WWR=37,5)	1. Ruumi laius vahemikus 3...10m 2. Akende kogus nii, et WWR=37,5%	Arvestati konstantse raami osakaaluga. Mõju raami osakaalu muutust arvestamata on väike. Mõju jahutuskoormusele kasvab lähenedes lõuna suunale. Suurim erinevus on edela suunal 3,0 W/m ² . Erinevus M2-2 mudelist on 0,8 W/m ² .
9	Ruumi laius (WWR=75%)	M2-3_ruum-laius(WWR=75)	1. Ruumi laius vahemikus 3...10m 2. Akna laius nii, et WWR=75%	Arvestati konstantse raami osakaaluga. Mõju raami osakaalu muutust arvestamata on suurema WWR juures olemas. Mõju jahutuskoormusele kasvab lähenedes lõuna suunale. Suurim erinevus on edela suunal 7,4 W/m ² .
10	Ruumi laius kasutades liigendatud aknaid (WWR=75%)	M2-4_ruum-laius(WWR=75)	1. Ruumi laius vahemikus 3...10m 2. Akna kogus nii, et WWR=75%	Arvestati konstantse raami osakaaluga. Mõju raami osakaalu muutust arvestamata on arvestatav. Mõju jahutuskoormusele kasvab lähenedes lõuna suunale. Suurim erinevus on edela suunal 7,5 W/m ² . Erinevus M2-3 mudelist on 0,1 W/m ² .
11	Ruumi sügavus	M2-5_ruum-sügavus	1. Ruumi sügavus vahemikus 2,72...7,2 m.	Ruumi sügavuse suurenemisel vähenevad jahutuskoormused mittelineaarselt.
12	Ruumi kõrgus	M2-6_ruum-kõrgus	1. Ruumi laius vahemikus 3...10m 2. Akna kõrgus nii, et WWR=75%	Ruumi kõrguse kasvades konstantse WWR korral toimub jahutuskoormuste lineaarne kasv. Suurim mõju 12,3 W m ² .
13	Varjestus vasakul	M3-1_varjestus-vasak	1. Varjestuse pikkus vahemikus 0...2,1m	Varjestus akna kõrgune. Tasuks mõelda suunavahemikus 22,5...67,5°. Muudes suundades mõju väike. Kirde suunal suurim mõju ehk vähendab 12,3 W/m ² .
14	Varjestus vasakul	M3-2_varjestus-vasak(2xhw)	1. Varjestuse pikkus vahemikus 0...2,1m	Varjestus 2 x akna kõrgune. Tasuks mõelda suunavahemikus 22,5...67,5°. Muudes suundades mõju väike. Kirde suunal suurim mõju ehk vähendab 18,4 W/m ² .
15	Varjestus paremal	M3-3_varjestus-vasak	1. Varjestuse pikkus vahemikus 0...2,1m	Varjestus akna kõrgune. Suurim mõju suunavahemikus 270...315°. Jahutuskoormust alandav mõju on väike. Lääne suunal suurim mõju ehk vähendab 5,3 W/m ² .

Tabel 35 Analüüsitud parameetrite koondtabel (3)

Nr	Uuritav parameeter	Simulatsiooni nimetus	Muudetud parameetrid	Järeldus
16	Varjestus paremal	M3-4_varjestus-vasak(2xhw)	1. Varjestuse pikkus vahemikus 0...2,1m	Varjestus 2 x akna kõrgune. Tasuks mõelda suunavahemikus 270...315°. Muudes suundades on mõju väike. Lääne suunal suurim mõju ehk vähendab 15,3 W/m ² . Märkatavalt efektiivsem võrreldes akna kõrguse varjestusega.
17	Varjestus akna kohal	M3-5_varjestus-vasak	1. Varjestuse pikkus vahemikus 0...2,1m	Varjestus akna laiune. Tasuks mõelda suunavahemikus 45...315°. Muudes suundades on mõju väike. Lõuna suunal suurim mõju ehk vähendab 40,7 W/m ² . Märkatavalt efektiivsem võrreldes külgsvarjestusega
18	Varjestus akna kohal	M3-6_varjestus-vasak(2xhw)	1. Varjestuse pikkus vahemikus 0...2,1m	Varjestus 3x akna laiune. Tasuks mõelda suunavahemikus 45...315°. Muudes suundades on mõju väike. Lõuna suunal suurim mõju ehk vähendab 48,6 W/m ² . Märkatavalt efektiivsem võrreldes külgsvarjestusega
19	Kerge konstruktsiooniga välissein	T1-1_välissein-kerge_M1-3	1. Karkass välissein	Mõju võrreldes baasmudeliga on suurim 50-60% WWR juures. Mõju on väike. Vajaks täiendavat uurimist.
20	Raske konstruktsiooniga sisesein	T1-2_sisesein-raske_M1-3	1. Kergbetoon sisesein 150mm	Suurim mõju on lääne ja ida suunal. Mõju on väike. Vajaks täiendavat uurimist.
21	Raske konstruktsiooniga sisesein	T1-_sisesein-raske_M1-3	1. Betoon sisesein 100mm	Mõju on suur. Kui peaks leiduma betoonist siseseinu, siis peaks kindlasti nendega arvestama.
22	Kirgas aknaklaas	T2-1_aken-kirgas_M1-3	1. Kirgas aknaklaas g=0,68	Aknaklaasi valiku mõju jahutuse tipukoormusele on väga suur. Kirkaid klaase tuleks vältida suunavahemikus 45...315°.
23	Päikesekaitse aknaklaas	T2-1_aken-pkaitse_M1-3	1. Päikesekaitse aknaklaas g=0,20	Aknaklaasi valiku mõju jahutuse tipukoormusele on väga suur. Jahutuskoormuste vähendamise potentsiaal on suur. Isegi päikesekaitse klaasiga ei saa teha ida, lõuna, lääne fasaade WWR=100%.
24	Vent öine jahutus	S1-1, S1-2, S1-3, S2-1, S2-2, S2-3, S3-1, S3-2, S3-3	1. Öise ventilatsiooni osakaal 20%, 30%, 100% 2. Sisepuhke temperatuur 16, 18, 20 °C.	Põhjaks on võetud simulatsioonimudel M1-3. Öise jahutuse mõju olemas kõigis uuritud olukordades. Madalam sissepuhke temperatuur öösel annab suurema efekti. Suurim mõju on ida suunal ning väikseim lääne suunal. Võrreldes 20 °C, 20% ja 16 °C, 100% on jahutuse vähendamise potentsiaal sõltuvalt WWR-st ca 10-20 W/m ²

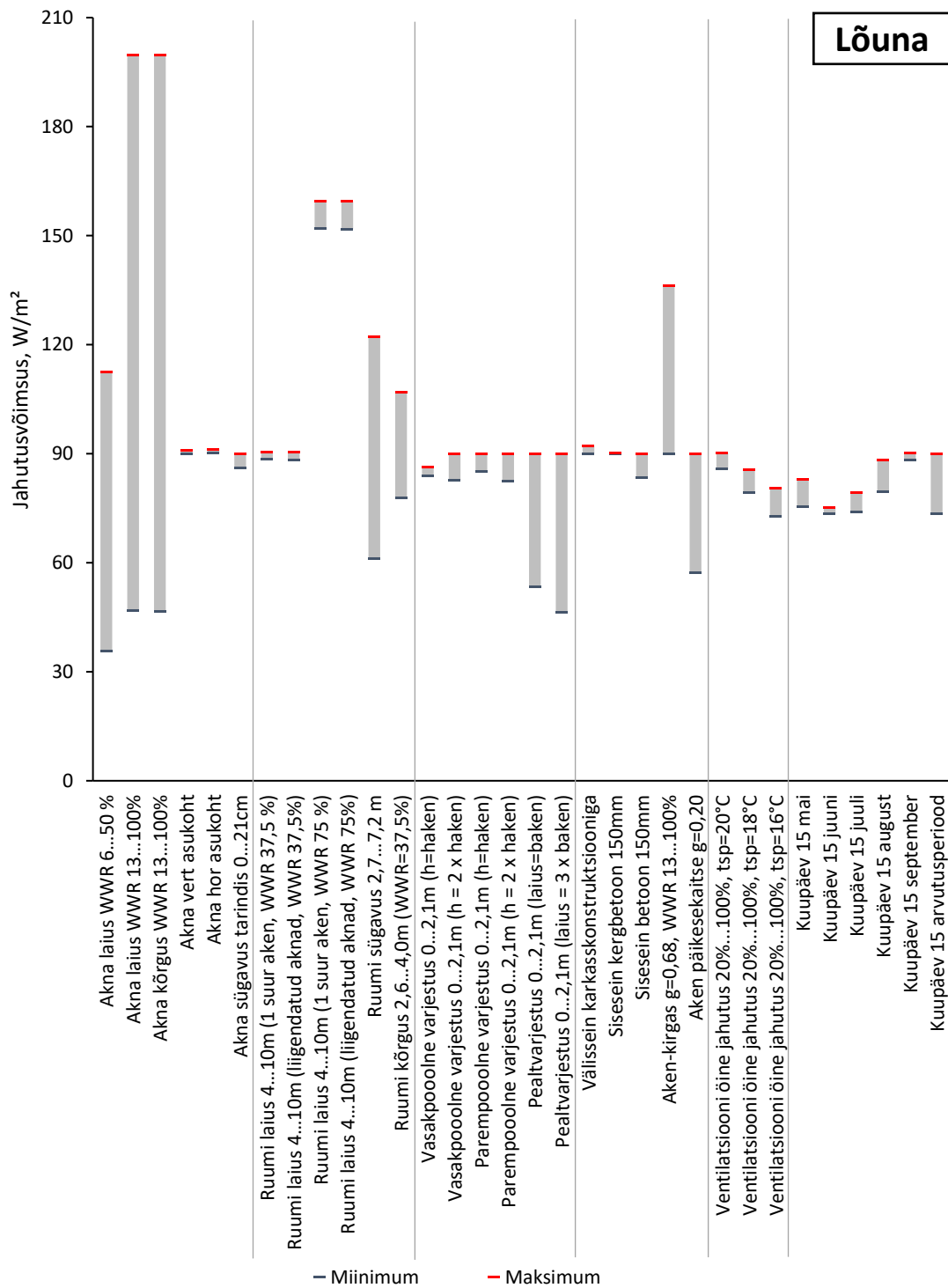
Tabel 36 Analüüsitud parameetrite koondtabel (4)

Nr	Uuritav parameeter	Simulatsiooni nimetus	Muudetud parameetrid	Järeldus
25	Kuupäev 15	A1	1. Arvutused viidud läbi custom simulatsiooniga	Tipukoormuste esinemise aeg ei lange alati kokku IDA-ICE mudeli valitud 15. kuupäeva tipukoormustega. Simulatsioonide ajavahemik tuleks kindlasti võtta vähemalt mai kuni september. Kõige suurem võimalus on eksida lõuna suunaga.

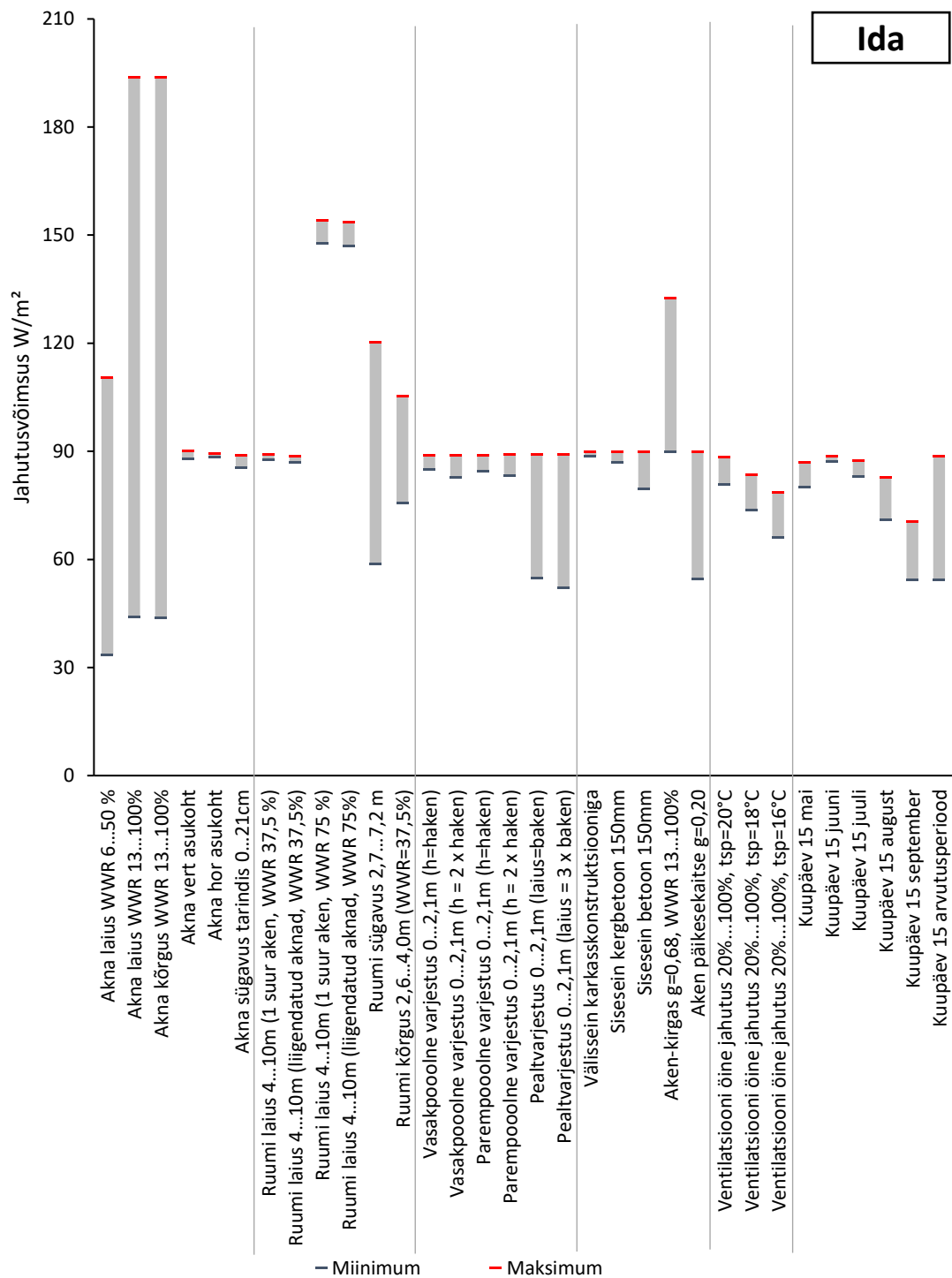
3.5.1.2 Simulatsioonide koondgraafikud

Analüüsitud parameetrite muutumise mõju kohta koostati joonised, kus on ära näidatud kõigi uuritud parameetrite mõju ida, lääne ja lõuna suunal. Joonistel on enamustel simulatsioonidel võrreldud tulemusi tüüpruumiga. Öise jahutuse simulatsioonide võrdlus on toodud vastava uuritud temperatuuri piires. 15. kuupäeva võrdlus on toodud vastava kuu kõikumiste lõikes.

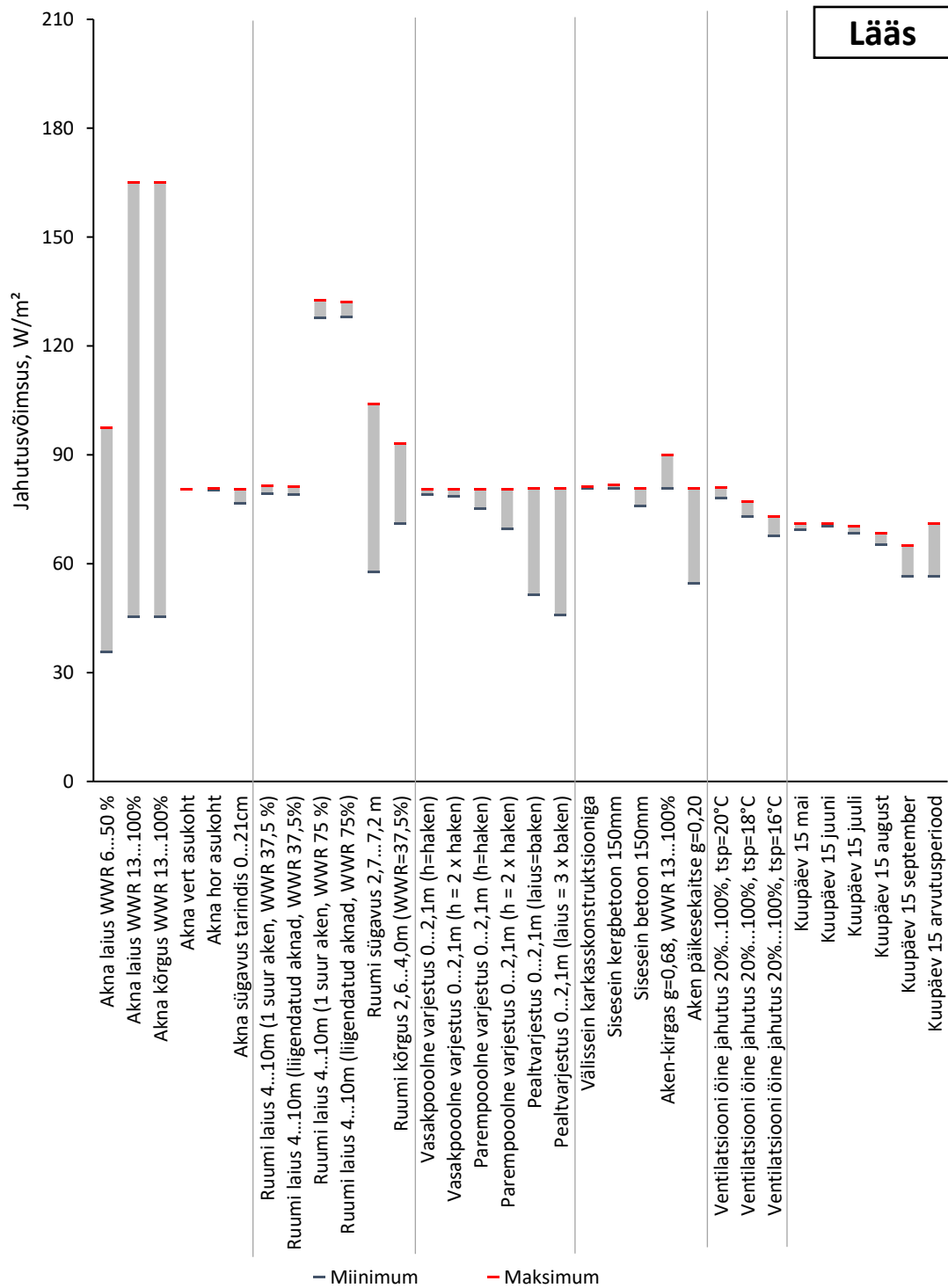
Jahutuskoormuste määravaimaks ruumiparameetriks on aken ning sellega seotud parameetrid, eelkõige päikeseläbivustegur ning akna osakaal välistarindi pindalast. Arvestatav mõju on ruumi sügavusel ja kõrgusel. Ruumi laiuse mõju on väiksem. Akna vertikaalse ja horisontaalse paiknemise mõju on väiksem. Kergbetoonist siseseina ning karkass tüüpi välisseina mõju on väike. Kui hoones leidub betoonist siseseinu, siis nende mõju on arvestatav. Ventilatsiooni öise jahutuse mõju on põhiilmakaartes suurim ida suunal ning väiksem lääne suunal. 15. kuupäeva mõju on olemas. Kõige suurem võimalus eksimiseks on lõuna suunal. Kindlasti tuleks teha arvutusi vähemalt perioodil maist septembrini.



Joonis 12 Parameetrite muutmise mõju jahutuse tipukoormusele lõuna suunal



Joonis 13 Parameetrite muutmise mõju jahutuse tipukoormusele ida suunal



Joonis 14 Parameetrite muutmise mõju jahutuse tipukoormusele lääne suunal

KOKKUVÕTE

Käesoleva uurimistööga uuriti erinevate parameetrite mõju jahutuskoormusele tubakontori-tüüpi ruumis. Ruumi iseloomustavad temperatuuri ja õhuvahetuse seadearvud, kasutusprofiilid ning vabasoojused valiti jahutuskoormuse määramist iseloomustavate projekteerimisjuhiste, standardite, määruste ning juhendaja ja konsultandi kogemuste põhjal. Suures pildis on käesoleva uurimistöö tulemused üle kantavad ka sarnaste parameetritega ruumidele muudes hoonetes. Tuleb märkida, et iga konkreetse hoone jahutuskoormuse arvutused terviklikult on unikaalsed sellele objektile ja siiski arvestada tuleb erinevate temperatuuri ning õhuvahetuse seadearvude, kasutusprofiilide, seadearvud ning vabasoojuste mõjuga.

Uurimistöö analüüsi põhjaks oli 47 erinevat IDA-ICE mudelit. Nendest 41 ruumimudelit sisaldab 128 erineva ruumiolukorra simulatsiooni (ühe parameetri 8 väärtust 16. orientatsioonis). 6 IDA-ICE mudelist koostati konkreetse orientatsiooni kalundrikuu 15. kuupäeva mõju uurimiseks. Põhilise arvutuste läbiviimise tööriistana kasutati IDA-ICE parameetriliste arvutuste funktsiooni *parametric run*. Uurimistöö käsitles ruumi mõõtmete, akna mõõtmete ja paiknemise, varjestuse mõõtmete ja paiknemise, erinevate tarindite, öise jahutuse ning kalendrikuu 15. arvutuskuupäeva mõju ruumi jahutuskoormusele.

Jahutuskoormuste määramisel tubakontoris on määravaimaks teguriks aken ning sellega seotud parameetrid, eelkõige päikeseläbivustegur g ning akna- ja seinapindala suhe WWR. Arvestataval määral on oluline ka akna sügavus tarindis. Akna paiknemise asukoht fassaadis omab tubakontori jahutuskoormuste määramise seisukohalt väikest mõju. Simulatsioonis päikesekaitse klaasiga ($g=0,2$) aknaga ületas jahutuskoormus 100 W/ m^2 piiri vahemikus $67,5...315^\circ$. Seega pole ruumi soojusliku mugavuse seisukohast antud vahemikus võimalik ilma täiendavate varjestuse lahendusteta 100% klaasfassaade teostada. Uurimistöö tulemused näitavad, et M. Thalfedti doktoritöös „Total economy of energy-efficient office building facades in a cold climate“ välja pakutud WWR 25...40% lääne, ida ja lõuna fassaadidele on sobiv jahutuskoormuste dimensioneerimise seisukohast.

Kõige efektiivsemalt vähendab varjestuse lahendustest jahutuskoormusi akna kohal paiknev varjestus. Fassaadi poolt vaadatuna aknast paremal paikneva varjestuse mõju on natuke suurem kui vasakul pool paikneval varjustusel. Aknast vasakul pool paiknevat varjestuse planeerimisele jahutuskoormuse vähendamiseks võib mõelda suundadel $22,5...67,5^\circ$. Aknast paremal pool paikneva varjestuse planeerimisele

jahutuskoormuse vähendamiseks võib mõelda suundadel 270...315°. Akna kohal paikneva varjestuse jahutuskoormust alandav mõju on arvestatav suunavahemikus 45...315°.

Ventilatsiooni öise jahutuse täiendav jahutuskoormust alandav mõju saadi kuni 15 W/m² sõltuvalt ruumide orientatsioonist ning WWR-st. Selleks, et tulemus näitaks tarindite mõju on sellest maha arvestatud ventilatsiooni sissepuhkeõhu alandamisest tulenev jahutuskoormuse langust. Võrdlus viidi läbi olukorraga, kus sissepuhke õhu temperatuur on 20 °C ning öise ventilatsiooni osakaal on 20% päevasest. Öise jahutamise mõju oli olemas kõigis orientatsioonides. Kõige suurem saadi mõju ida suunal ning väikseim lääne suunal. Öise ventilatsiooni teostamisel tuleks võimalusel kasutada madalama temperatuuriga sissepuhke õhku. Öise ventilatsiooniga jahutamist kaaludes tasub kindlasti arvestada suurema energiakuluga ventilatsiooni ventilaatorite töös hoidmisel.

Kalendrikuu 15. kuupäeva simulatsioonides uuriti jahutuskoormuste muutumist tarkvara kasutaja määratud *custom* simulatsiooniga jahutuskoormuste tippe kõigil kuupäevadel maist septembrini. Uuritavateks suundadeks võeti põhi, lõuna, ida, lääs, edel ning kagu. Tulemused näitasid, et IDA-ICE kasutatava jahutussimulatsiooni funktsiooni *cooling load calculation* vaikemäärtusena kasutatav kalendrikuu 15. simulatsioonikuupäeva jahutuskoormus võib erineda tegelikust jahutuskoormuse tippust oluliselt. Põhja ja lääne suunal on jahutuskoormuste tipp juuni kuus ning eemaldumine juunist toimub laugelt. Ida suunal on tipp samuti juunis, kuid eemaldudes langeb jahutuskoormus mööda järsemat kõverat. Edelas ja kagus ei jää tipp kalendrikuu 15. kuupäevale. Erinevus edelas saadi 1,4 W/m² ning kagus 1,3 W/m². Suurim oht eksimiseks on lõuna suunal, kus jahutuskoormuste tipp jääb septembris. Arvutades lõuna suunal jahutuskoormusi ainult juunis aladimensioneeritaks jahutuskoormust 16,7 W/m², juuli korral 14,5 W/m² ja augusti korral 6,8 W/m². Tuleb ka märkida, et simulatsioonid viidi läbi aknaklaasiga, mille $g=0,4$. Kirgaste klaaside korral oleks erinevus seega veelgi suurem. Suurema vea vältimiseks tuleks arvutusperiood võtta maist septembrini. Teatav mõju võib ka olla aprilli kuul, mis käesolevas uurimistöös uuritavateks kuudest välja jäeti. Samas tuleb arvestada, et praegu kasutatud välisõhu arvutuslikud temperatuurid on aprilli kuu jaoks liiga suured. Täiendavalt saaks uurida ka vahepealseid ilmakaarte suundasid ning määrata, kuidas toimub jahutuskoormuste graafiku muutus idast lõunani ning lõunast lääneni.

Kuna enamus läbiviidud simulatsioonidest viidi läbi 16 erinevas orientatsioonis, siis kujunes välja päris hea hinnang jahutuskoormustele sõltuvalt ruumi orientatsioonist.

Jahutuskoormused on kõige suuremad suunavahemikus 67,5...270°. Sellest vahemikust eemaldudes toimub järsk vähenemine kuni põhja suunani. Kõigil arvutusolukordadel saadi orientatsioonile 2 tippu: lõunas ja idas. Kagu suunal saadi jahutuskoormus natuke väiksem võrreldes tippudega lõunas ja idas. Täiendavalt saaks uurida, kuidas muutub graafiku kuju erinevate sisemiste vabasoojuste kasutusprofiilidega.

Uurimistöö tulemused näitavad, et jahutuskoormuste määramine tuleks teostada igal juhul dünaamilise simulatsiooniga. Kõige olulisem on mudelis määrata õigesti akna mõõdud ning realselt ehitusel kasutatava akna parameetrid. Näiteks lõuna suunal ($g=0,4$) WWR muutudes vahemikus 13...100% muutub jahutuskoormus 47...200 W/m². Tüüpiumis lõuna suunal (WWR=37,5%) muudab päikeseläbivustegur $g=0,20...0,68$ jahutuskoormust 57...136 W/m². Arvestatavat mõju avaldavad ka ruumi sügavus ning kõrgus. Kõigi ülejäänud parameetrite mõju on suurusjärgu võrra väiksem ($<10\text{W/m}^2$, enamustel $<5\text{W/m}^2$). Kõigil ülejäänud uuritud parameetritel on olemas teatav mõju, muutes jahutuskoormust uuritud vahemikes vähemalt 1 W/m². Uuritud jahutuse lõppelementide põhivalikusamm jääb vahemikku 50...100W. Tüüpiumi 16 m² põrandapindala juures on 1 W/m² eksimus piisav, et valida 1 valikusammu võrra liiga väike seade. Lisaks tuleb arvestada, reaalses hoonetes toimub täiendavalt ruumide omavaheline soojusvahetus.

Töö autor leiab, et käesoleva uurimistöö täienduseks saaks uurida veel mitmete parameetrite mõju, mis praegusest tööst välja jäid. Täiendavate uurimistöö ruumipõhiselt vajaksid järgnevad parameetrid: erinevad välisõhu arvutuslikud temperatuurid, ümbritsevate ruumide mõju, nurgaruumi simulatsioonid, katuse ja põranda tarindi mõju, seadmete ja valgustuse võimsuse tundlikkus, erinevate kasutusprofiilide mõju, kalendrikuu 15. kuupäeva tundlikkus teistsuguste lähteandmetega. Käesolev magistr töö annab ülevaate parameetritest, mille mõju tuleks omakorda uurida jahutuskoormuste üheaegsuse määramisel ning külmajaamade dimensioneerimisel. Lisaks on võimalus läbiviidud simulatsioonid ühendada energia- ning ehitusmaksumuse arvutustega. Viimaseks näeb uurimistöö koostaja võimalust analoogse suunaanalüüsi meetodikaga viia läbi simulatsioone hoonete jaoks, et optimeerida huvitava arhitektuurilahendusega hooneid orientatsiooni, jahutuskoormuste, energiaarvutus kui ka ehitusmaksumuse poolest.

Kokkuvõttes leiab magistr töö autor, et:

- Ruumide jahutuskoormuste määramisel on IDA ICE parameetiline funktsioon hea abivahend kiirendamiseks simulatsioonide läbiviimise protsessi. Eriti varajases projekteerimise staadiumis;

- Antud töös uuritud tubakontori jahutuskormuste arvutamisel on määrav eelkõige aknaklaasi päikeseläbivustegur g ja akna- ning seinapindala suhe WWR ;
- Kõige efektiivsem on akna kohal asetsev varjestus (kuni 44 W/m^2), vertikaalne varjestus läänes (kuni 11 W/m^2) on võrreldes idaga (kuni 6 W/m^2) suurema mõjuga;
- Öise ventilatsiooni mõju jahutuskormusele on kuni 15 W/m^2 ;
- Jahutuskormuste arvutamine kalendrikuu 15. kuupäevade järgi ei ole korrektne ega iga hoone puhul sobilik. Suurim erinevus minimaalse kalendrikuu 15. kuupäeva ja ruumi tegeliku jahutuskormuse vahel on edela fassaadil kuni $1,4 \text{ W/m}^2$ ja suurim erinevus kahe kalendrikuu 15. kuupäeva vahel ida fassaadil augusti ja septembri kuus (kuni $14,7 \text{ W/m}^2$).

SUMMARY

The aim of this paper is to research how different parameters affect the cooling load of a small office room in Estonian climate and geographic conditions. Open-plan office rooms were not a part of this research. The room's design parameters were chosen based on Estonian design guidelines, regulations and the experience of the supervisor and the consultant. The results of this research can be generalised for use with other rooms with similar parameters. However, it is important to pay attention to the fact that every building has unique temperature and ventilation setpoints, internal gains and room usage.

The analysis of this research is based on 47 different IDA-ICE models. 41 of the models consist of simulating 128 different room states (8 values of one parameter in 16 different orientations). Six simulations were conducted to examine the difference between cooling loads on 15th calendar day and the real cooling load peak. The main tool used in this research was the IDA-ICE function called parametric run. In this research the effect following parameters was analyzed: room measurements, window measurements and location, window shading measurements and location, different wall constructions, night cooling potential and 15th calendar day cooling load comparison with the real peak time.

The most important factor when determining the cooling load of a small office room was found to be the window and parameters relating to it. The most important parameters were solar factor and window-to-wall ratio. The window depth in wall construction also had a noticeable effect. Meanwhile, the horizontal and vertical placement of the window only has a minor effect on the cooling load. In a simulation using low solar factor glass with room facade azimuth being 67,5 to 315 degrees the cooling load exceeded 100 W/m². Therefore, it is not recommended to implement 100% glass facades in those conditions. The research conducted shows that using 25...40% window-to-wall ratio on a building's west, east and south facades is sufficient in terms of cooling load. The previous statement was proposed by M. Thalfedt in his thesis „Total economy of energy-efficient office building facades in a cold climate“.

According to the simulations the most effective shading in terms of reducing cooling load is shading placed above the window. Meanwhile, shading proved to be slightly more effective when placed on the right side of the window than when placed on the left side. In order to reduce peak cooling load the left side shading would be a viable when the facade azimuth is 22,5 to 67,5 degrees. Right side shading would be a viable when the

facade azimuth is 270 to 315 degrees. The shading above window is effective at facade azimuth from 45 to 315 degrees.

Ventilation night cooling provided additional cooling potential up to 15 W/m^2 depending on the room orientation and window to wall ratio. The effect of lower temperature air cooling potential was subtracted from the result in order to show only the effect of the wall constructions mass. The ventilation night cooling had an effect on all facade orientations. The highest effect appeared with the facade facing east and lowest with the facade facing west. Lower air temperatures used for night cooling are more impactful.

15th calendar day simulations investigated how the cooling load peaks changed daily from the start of May until the end of September. The simulation were ran with room facade facing north, west, southwest, south, southeast and east. The results show that the cooling load on a daily basis can vary wildly from the load on the 15th calendar day which is used as the default option when using IDA-ICE cooling load calculation option. When the facade faces north or west, the cooling load peaks in June. When the facade faces east the cooling load peaks also peaks in June. However, it drops off sharply in other months. When the facade is facing southwest or southeast the peak cooling load does not occur on the 15th calendar day. The difference calculated was $1,5 \text{ W/m}^2$ and $1,3 \text{ W/m}^2$ when facing southwest and southeast respectively. The greatest risk of error is when facing south as the cooling load peaks in September. When calculating the cooling load only in June, one would underestimate the cooling load by $16,7 \text{ W/m}^2$, in July $14,5 \text{ W/m}^2$ and $6,8 \text{ W/m}^2$ in August. It has to be noted that the simulations were ran with a glass with a solar factor of $g=0,4$. With a higher solar factor the difference would be even greater. To avoid making an error when using the cooling load simulation function, one should calculate the load from May to September. Further research could investigate the cooling load in April and how intermediate azimuths affect the cooling load.

Most of the simulations used 16 different facade orientations which resulted in a good overview of the effect of orientation on the cooling load. The biggest cooling loads were calculated with a facade azimuth of 67,5 to 270 degrees. The load sharply declined when the facade was rotated north. In all calculations two noticeable peaks developed - when facing south and when facing east. However, when facing southeast, the load was lower than when facing east or south. Further research is needed in how the graph is affected by different internal gains.

The analysis shows that determining cooling loads should definitely be done using a dynamic simulation. The most important factor in these simulations is to correctly determine the window to wall ratio and solar factor of the window. All other factors play a lesser role in the actual outcome. However, other parameters also matter, especially the height and depth of the room. Additionally, one must keep in mind that in real buildings heat is exchanged between different rooms.

The author believes that further research could be conducted to take into account parameters that were not the focus of this paper. For example one could consider the effects of factors such as: different design temperatures of outdoor air, surrounding rooms, the construction of the roof and floor, different internal gains, 15th day simulations with different initial data. Additionally, it is possible to combine the models with energy and construction cost calculations. Lastly, the author sees promise in using the same type of directional analysis to conduct simulations on buildings with interesting architecture.

In summary,

- IDA ICE parametric run is a good tool to make cooling load calculations quicker, especially in the early design phase;
- The most important factors for determining the cooling load of a small office room are the window's solar factor and window to wall ratio;
- The most effective shading solution is shading above the window (up to 44 W/m²), vertical window shading is more effective in the west (up to 11 W/m²) compared to east (up to 6 W/m²);
- The effect of nighttime ventilation cooling is up to 15 W/m²
- Calculation of cooling loads on the 15th calendar day is not appropriate and does not produce accurate results for every building. The biggest difference between 15th calendar day and the actual lowest cooling load was 1,4 W/m², when facing south west. The biggest difference between 15th days of 2 calendar months was 14,7 W/m² on the east facing facade between the months of August and September.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] U. Nations, „Paris agreement“, 2016.
- [2] Euroopa Liidu Teataja, „Komisjoni soovitus (EL) 2019/1019 hoonete ajakohastamise kohta“, 2019.
- [3] Keskkonnaministerium, „Seletuskiri kliimapoliitika põhialustele aastani 2050“, 2016.
- [4] Ettevõtlus- ja infotehnoloogiainister, *Hoone energiatõhususe miinimumnõuded*. 2019.
- [5] Y. Al Horr, M. Arif, A. Kaushik, A. Mazroei, M. Katafygiotou, ja E. Elsarrag, „Occupant productivity and office indoor environment quality: A review of the literature“, *Build. Environ.*, kd 105, nr June, lk 369–389, 2016, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.06.001.
- [6] M. Ülesmäe, „Tallinnas asuva 4-korruselise büroohoone sisekliima ja energiatarbe analüüs“, 2018.
- [7] M. Thalfeldt, „Total economy of energy-efficient office building facades in a cold climate“, Tallinna Tehnikaülikool, 2016.
- [8] H. Voll, „Passiivsete arhitektuuriliste jahutusmeetmete kasutamine ühiskondlike hoonete kavandamisel . Innovatiivne lähenemine energiakokkuhoiule“. .
- [9] F. Goia, „Search for the optimal window-to-wall ratio in office buildings in different European climates and the implications on total energy saving potential“, *Sol. Energy*, kd 132, lk 467–492, 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.03.031.
- [10] F. De Luca, H. Voll, ja M. Thalfeldt, „Comparison of static and dynamic shading systems for office building energy consumption and cooling load assessment“, *Manag. Environ. Qual. An Int. J.*, kd 29, nr 5, lk 978–998, 2018, doi: 10.1108/MEQ-01-2018-0008.
- [11] H. Voll ja E. Abel, *Hoonete Energiatarve ja sisekliima*. 2014.
- [12] Majandus- ja taristuminister, *Hoonete energiatõhususe arvutamise meetodika*. 2019.
- [13] SA KredEx, „www.kredex.ee“. .
- [14] Riigi Kinnisvara AS, „Tehnilised nõuded mittelehoonetele 2020“.
- [15] C. Mao, J.-C. Baltazar, ja J. S. Haberl, „Comparison of ASHRAE peak cooling load calculation methods“, *Sci. Technol. Built Environ.*, kd 25, nr 2, lk 189–208, veebr 2019, doi: 10.1080/23744731.2018.1510240.
- [16] C. Mao, J.-C. Baltazar, ja J. S. Haberl, „Literature review of building peak cooling load methods in the United States“, *Sci. Technol. Built Environ.*, kd 24, nr 3, lk 228–237, märts 2018, doi: 10.1080/23744731.2017.1373700.
- [17] R. Elghamry ja H. Hassan, „Impact of window parameters on the building

envelope on the thermal comfort, energy consumption and cost and environment", *Int. J. Vent.*, kd 19, nr 4, lk 233–259, okt 2020, doi: 10.1080/14733315.2019.1665784.

- [18] T.-A. Kõiv ja A. Rant, *Hoonete küte*. 2013.
- [19] V. Russak ja A. Kallis, „Eesti kiirguskliima teatmik“, 2003.
- [20] Saint Gobain Glass, „https://glassolutions.ee/sites/glassolutions.eu/files/2017-07/tootekataloog_est.pdf“.
- [21] T. Tark, „Jahutus- ja külmatehnika loengumaterjalid“. 2019.
- [22] Eesti Kütte- ja Ventilatsiooniinseneride Ühendus, „EVS 906:2018 Mitteleluhoonete ventilatsioon. Üldnõuded ventilatsiooni- ja ruumiõhu konditsioneerimissüsteemidele. Eesti rahvuslik lisa standardile EVS-EN 16798-3:2017“, 2018.
- [23] R. Murula, A. Tihhonov, J. Kurnitski, ja M. Thalfeldt, „Energiatõhususe juhendmaterjal ja meetodika peaprojekterijatele ja arhitektidele“, 2017.
- [24] Chiller Ltd, „<https://portaali.chiller.fi/en/tervetuloa>“.
- [25] Halton Oy, „Halton Hit Design“.