

TARTU ÜLIKOOL
LOODUS- JA TEHNOLOOGIATEADUSKOND
TEHNOLOOGIAINSTITUUT

TUULE MALL KULL
**PÄIKESEENERGIA PASSIIVSE KASUTAMISE POTENTSAAL
ERINEVA GEOMEETRIA JA KOMPONENTIDEGA HOONETEL
EESTI KLIIMAS**

BAKALAUREUSETÖÖ FÜÜSIKAS (12 EAP)

Juhendajad:

TÖNU MAURING, PhD

ERKO JAKOBSON, PhD

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja:

Juhendaja:

TARTU 2013

Sisukord

1	Sissejuhatus	3
2	Valdkonna ülevaade	8
2.1	Hoone soojusbilanss	8
2.1.1	Soojuskaod	9
2.1.2	Soojusallikad	11
2.2	Päikesekiirgus hoone kontekstis	12
2.2.1	Päikesekiirgus hoonest väljaspool	12
2.2.2	Akende soojusbilanss	14
2.2.3	Hoonesse siseneva ja utiliseeritava päikesekiirguse maksimeerimine	16
2.3	Päikeseenergia passiivse kasutamise kirjeldamine	19
3	Materjal ja metoodika	21
3.1	Katse püstitus	21
3.2	Kasutatud simulatsioonitarkvara	23
3.2.1	Kadude arvestamine	25
3.2.2	Vabasoojuse arvestamine	27
3.3	Kasutatud kliimaandmed	29
4	Tulemused ja arutelu	31
4.1	Eesti kliima hoonete kontekstis	31
4.1.1	Eesti kliima kirjeldus	31
4.1.2	Kütteperioodi valik	31
4.2	Akende soojusbilanss Eesti kliimas	35
4.3	Hoonete passiivse päikeseenergia kasutamise potentsiaal Eesti kliimas	38
4.3.1	SSI tundlikkusanalüüs	41
4.3.2	Hoonete soojusbilansi dünaamika 43 aasta jooksul	42
5	Kokkuvõte	48
6	Tänuõnad	50

7 Summary	51
Lisa A Sisendandmed	59
Lisa B Kliimaandmed	62
Lisa C Simulatsioonitulemused	65

1 Sissejuhatus

Praeguses Euroopas pärineb 36% CO_2 -emissioonidest ja 40% koguenergiatarbest hoonetest, mille keskmine energiatarve on Euroopas $220 \text{ kWh}/m^2$ aastas, neist eluhoonetel $200 \text{ kWh}/m^2$ aastas [1]. Euroopa Parlamendi ja Euroopa Nõukogu hoonete energiatarvuse direktiivi alusel peavad 2020. aasta lõpuks kõik uued hooned olema liginullenergiahooned [2], mistõttu eluasemete energiatarve on kogu Euroopas üha suurema tähelepanu all. Antud direktiiv on üks meetmetest, et liikmesriigid vähendaksid kasvuhoonegaaside heitkoguseid. Nii kasvuhoonegaaside heitkoguse ning energiatarbe vähendamise kui ka taastuvenergiaallikate osakaalu tõstmise eesmärk aastaks 2020 on 20% võrreldes 2005. aastaga [3]. Kui praegune tendents jätkub, on energiatarbe vähendamine ainus valdkond, kus eesmärki ei täideta [4].

Nii on selge, et plaanile elluviimiseks peab antud valdkonna edasine kokkuhoid olema oluliselt suurem kui 20%. Eestis on eramute keskmine primaarenergiavajadus praegu üle $210 \text{ kWh}/m^2$ aastas¹ [5]. Eestis ei tohi 2013. aasta jaanuaris jõustunud energiatarvuse miinimumnõuete alusel uute ja olulisel määral restaureeritavate väikemajade primaarenergia vajadus ületada 160 kWh ruutmeetri kasuliku pinna kohta aastas [6], mis on umbes 20% madalam praegusest keskmisest tasemest. Passiivmajadel on see arv maksimaalselt $120 \text{ kWh}/m^2a$ ja Eestis on kulutõhusaks peetud ka $110 \text{ kWh}/m^2a$ [7]. Seega oleks Eestis võimalik selle sektori energiatarvet vähendada ligi 50 protsenti. Euroopas on keskmiselt hoonete energiatarve Eestile sarnane, mistõttu kehtib see potentsiaal kogu Euroopa jaoks ning järelkult on hoonete energiatarvuse suurendamine üsna suure mõjuga koguenergiatarbele.

Käesolevas töös analüüsitakse võimalusi vähendada ruumide kütteks kuluvat energiat, mis praegusel ajal moodustab Euroopas keskmiselt umbes 70% eluhoonete lõppenergiatarbest. [8]. Hoone energiatarvuse tagamise olulisim meede on transmissioonikadude maksimaalne vähendamine, kuid juba heade piiretega hoones on küttevajaduse kujunemisel eriti oluline, kui palju on seal vabasoojust. Inimestest tulenevat soojushulka eluhoones väga muuta ei ole võimalik ja seadmetelt tulenev soojushulk suurendaks ka lõppenergiatarvet, mistõttu pole selle

¹See väärtus on arvatud kWh-hinnaga 6 senti energiakulude põhjal.

tõstmisest kasu. Akende kaudu sisenevat päikeseenergiat saame aga tasuta ning seetõttu on otstarbekas seda kütteenergiavajaduse arvel maksimeerida. Ilmselt saab mõjutada passiivse päikeseenergia abil saadavat vabasoojuse hulka hoone geomeetria ja komponentide abil. Selleks, et erinevate tüüphoonete päikese kasutamise potentsiaali võrrelda, tuleb seda esiteks ühe hoone kohta hinnata. Siit tulenevat uuritakse, kuidas passiivse päikese kasutamise määra hoones kirjeldada ehk kui palju osaleb päikesekiirguse panustatav vabasoojus hoone kütteenergiavajaduse vähendamisesse? Kuidas see sõltub hoonegeomeetriast ning komponentidest?

Hoone päikese kasutamise potentsiaal sõltub peale asukoha laiuskraadi ka õhureostusest, pilvisusest ja lumikattest. On selge, et aastast aastasse on need tigmused väga varieeruvad, kuid hoonete energiaarvutusi tehakse üldjuhul sellest hoolimata vaid ühe standardiseeritud aasta jaoks. Töös püütakse jõuda arusaamisele, kuidas käitub hoone keskmisest oluliselt väiksema või suurema kiirgushulgaga, samuti väga madala temperatuuriga aastatel. Seetõttu vaadeldakse 43 aasta pikkust perioodi ning uuritakse, milline on olnud erinevate hoonete päikese kasutamise dünaamika Eestis selle aja vältel.

Tabel 1: Töös kasutatud füüsiliste suuruste tähised, ühikud ja selgitused

Tähis	Ühik	Kirjeldus
c	$Wh/(m^3K)$	õhu erisoojusmahtuvus, võetakse vaadeldavas temperatuurivahemikus konstantseks väärtusega $0.33 Wh/(m^3K)$
C	$Wh/(m^2K)$	
λ	W/mK	soojusjuhtivustegur
Psi	W/mK	külmasilla lineaarne soojusjuhtivustegur
Ψ_f	W/mK	akende paigaldusest tekkiv külmasild, standardi vaikeväärtus on $0.04W/(mK)$, arvutatakse standardis EN ISO 10211 toodud meetodika alusel
Ψ_g	W/mK	akna klaasi ja raami vahelise tihendi külmasild, arvutatakse vastavalt standardile EN 10077
\vec{q}	W/m^2	soojusvoo tihedus
U	W/m^2K	piirde soojusläbivus, arvutused teostatakse standardi EN 6946 alusel.
U_f	W/m^2K	akna raami soojusläbivus, mõõtmise ja arvutamine standardi EN 10077 põhjal
U_g	W/m^2K	akna klaaspaketi soojusläbivus, mõõtmise ja arvutamine standardi EN 673 põhjal
U_w	W/m^2K	akna kogusoojusläbivus; arvestatakse raami, klaasi, suurusi Ψ_g ja Ψ_f
K_L	W/K	Kaotegur, arvestab nii soojusjuhtivus- kui ka õhuvahetuskadusid
P_I	W	inimeste ja seadmete panustatava vabasoojuse võimsus
P_H	W	küttekoormus
P_L	W	kadude võimsus
P_G	W	kogu vabasoojuse võimsus
V_{aaf}	m^3/h	keskmine õhuvooluhulk, arvutatakse maksimaalse õhuvooluhulga kaudu
V_V	m^3	ventileeritav ruumala, $A_{TFA} \cdot 2.5 m$
V_{n50}	m^3	hoone siseruumala
R_i	m^2K/W	soojustakistus i-nda materjalikihi jaoks
R_{si}	m^2K/W	piirde sisepinna soojustakistus, ISO 6946 alusel üles 0.1, alla 0.17, horisontaalsuunas 0.13
R_{se}	m^2K/W	piirde välispinna soojustakistus, ISO 6946 põhjal välisõhuga piirnevatel pindadel 0.04, maapinna vastu olevatel pindadel 0

Tähis	Ühik	Kirjeldus
A	m^2	piirde pindala, hoone kirjeldatakse PHPPs välismõõtmete järgi.
A_w	m^2	akna kogupindala
A_f	m^2	akna raami pindala
A_g	m^2	akna klaasosa pindala
A_{TFA}	m^2	kasulik pind (sarnane Eesti määrase köetava pinnaga), üldjuhul arvestatakse inimese kohta $35 m^2$
l_f	m	aknapaigalduse külmasilla pikkus
l_g	m	klaasi ja raami vahelise külmasilla pikkus
l	m	külmasilla pikkus
d	m	materjalikihi paksus
G	kWh/m^2	kogukiirgus vastavale pinnale
R	kWh/m^2	peegeldunud kiirgus horisontaalpinnalt
D	kWh/m^2	hajuskiirgus horisontaalpinnal
S_n	kWh/m^2	otsekiirgus risti kiirtega
S	kWh/m^2	otsekiirgus horisontaalpinnal
Q_t	kWh	transmissiooni soojuskadu läbi piirete, arvutus põhineb standardil DIN EN ISO 6946
Q_{tb}	kWh	transmissiooni soojuskadud läbi külmasildade, arvutusstandard ISO 10077-2
Q_{1D}	kWh	transmissiooni soojuskadu 1D juhul
Q_{2D}	kWh	transmissiooni soojuskadu, mis on leitud 2D arvutusel numbriliselt mõne vastava programmi abil (nt. THERM, Bisco), reglementeeritud standardiga DIN 10211-1
Q_V	kWh	õhuvahetuse tõttu tekkivad soojuskadud (infiltratsioon ja ventilatsioon), kuni 2008 oli standardis EN ISO 13790
Q_L	kWh	hoone kogusoojuskadu
Q_T	kWh	kogu transmissiooni soojuskadud
Q_I	kWh	vabasoojus seadmetelt ja inimestelt

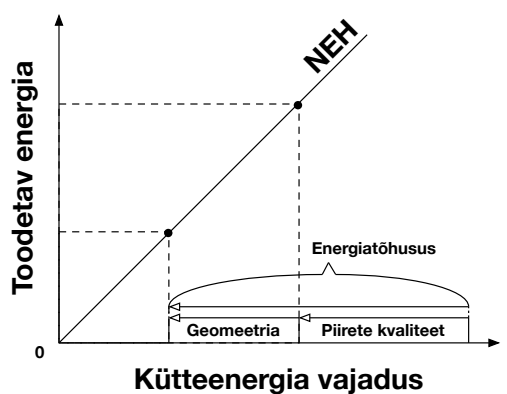
Tähis	Ühik	Kirjeldus
Q_s	kWh	päikesekiirguse panustatud vabasoojus
Q_F	kWh	kogu vabasoojus
Q_G	kWh	kogu kasutatav (utiliseeritav) vabasoojus
Q_H	kWh	kütteenergia netovajadus, leitakse pool-dünaamilise kuupõhise meetodiga standardi EN ISO 13790
G_t	kKh	kraadtundide arv
T	K	temperatuur
T_{in}	K	sisetemperatuur, 20 kraadi, mugavusreglementatsioon standardis ISO 7720
t_{Month}	h	aeg, tunde kuus
τ		ajategur, iseloomustab hoone massiivsust
n_V	$1/h$	energeetiliselt efektiivne õhuvahetuskordsus, tavaliselt võetakse $20 - 30 m^3/h$ inimese kohta, maksimaalne ja keskmine õhuvahetuskordsus arvestatud kordajaga 0.77, vastav standard on DIN 1946 Part 6
$n_{V,res}$	$1/h$	hoonekarbi lekete põhjustatud lisaõhuvahetuskordsus
$n_{V,system}$	$1/h$	keskmine ventilatsiooni õhuvahetuskordsus (vaikeväärtus 0.4 1/h)
n_{50}	$1/h$	õhulekkearv, mõõdetakse 50 Pa rõhuerinevuse korral
Φ_{HR}	%	ventilatsiooniseadme soojustagastuse efektiivsus
g	%	klaaspaketi lühilainelise kiirguse läbilaskvusprotsent, EN 410
η_G	%	utiliseerimistegur vabasoojuse jaoks
e	-	tuultele avatuse koefitsient, 0.07 mõõduka avatuse korral, EN 832
f_T	-	vähendustegur, välisõhu jaoks 1, Kesk-Euroopas maapinnal umbes 0.5, maapinna kohta arvutused standardi DIN EN ISO 13370 põhjal
r	-	vähendustegur, korrutis varjutuskoefitsiendist, mustuse koefitsiendist (0.95), mitteperpendikulaarse kiirguse vähendustegurist (0.85)
		ja klaasi osakaalust kogu akna pindalast
k	-	otsekiirguse vertikaalile teisenduse tegur

2 Valdkonna ülevaade

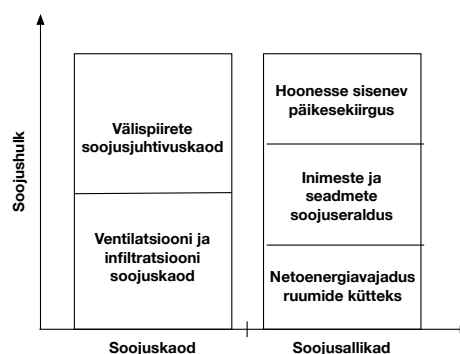
2.1 Hoone soojusbilanss

Tulevikus peavad kõik hooned olema liginullenergiahooned, mille energiakulu on väga väike ning mis toodavad majas või selle lähikümbruses taastuvatest energiaallikatest peaaegu kõik oma tarbitavast ruumide ja vee kütteks vaja minevast energiast [2]. Nullenergiahoones (NEH) toodetakse kogu vajalik energia (nende hoonete kontseptsioon on toodud joonisel 1).

Energia tootmine on kallis ning eramajade puhul vähese pindala tõttu ka üsna piiratud. Väiksema energiavajaduse huvides püütakse seega minimiseerida energiavajadust. Kõige suurema osa sellest moodustavad kütte- ja jahutusenergiavajadus, mis püütakse võimalikult väikseks viia. Neid mõjutavad nii hoone konstruktsioon, sh näiteks piirete isolatsioon ja külmasillad, õhupidavus, aga ka geometria: hoone, akende ja nende klaaspindade mõõtmed ning klaaspindade suund ilmakaarte suhtes. Energiatõhususe määrana kasutatakse ka energiatõhususarvu, kuid see kirjeldab lisaks hoonekarbile veel tehnosüsteeme, kasutatavaid energiaallikaid jms [6]. Hoonekarbi energiatõhusust iseloomustab netoenergiavajadus ruumide kütteks ja jahutuseks. Teist nendest siin töös ei käsitleta.



Joonis 1: Nullenergiahoone põhimõtteskeem



Joonis 2: Hoone soojusbilansi skeem

Hoone netoenergiavajadus kütteks kujuneb sellest väljuva soojushulga ja samal perioodil hoonesse siseneva või sinna siseneva vabasoojuse vahena. Soojusbilanss on hoonesse siseneva ja

sealt väljuvate soojushulkade jaotus süsteemis toimuvate protsesside vahel. Bilansi negatiivse osa ehk soojuskao moodustavad soojuskadu läbi piirete ning ventilatsiooni ja infiltratsiooni soojuskadu. Positiivne osa ehk soojusallikad moodustuvad aga vabasoojusest seadmetest, inimestest ja klaaspindade kaudu sisenevast päikeseenergiast ning netoenergiavajadusest ruumide kütteks. Üldjuhul püütakse hoones hoida konstantset temperatuuri, seega peavad sisenev ja väljuv energiahulk olema võrdsed [9] (sellise olukorra näide on toodud joonisel 2). Seetõttu on selge, et kütteenergiavajadust saab vähendada vaid kas kadude vähendamise või vabasoojuse suurendamisega. Järgnev selgitabki hoone soojusbilansi komponente täpsemalt.

2.1.1 Soojuskaod

Soojuskao saab jagada kaheks põhiliseks osaks: kadu soojusjuhtivuse teel läbi piirete ning õhuvahtusel väliskeskkonnaga. Üldjuhul on kõige suurem hoone soojuskadu läbi välispiirete, kus soojusülekanne toimub enamasti soojusjuhtivuse teel. Fourier' seadusest teame, et konstantse soojusjuhtivusteguri korral on soojusvoo tihedus²

$$\vec{q} = -\lambda \nabla T \text{ [W/m}^2\text{]}$$

Soojusjuhtivustegur λ ei ole tegelikult konstantne, vaid sõltub temperatuurist, kuid praktilistel arvutustel seda üldjuhul ei arvestata. Soojusülekanne arvutamisel läbi pinna lihtsustatakse soojusvoog ühedimensionaalseks. Sel juhul soojusvoog läbi homogeense pinna konstantsete ääritingimuste (temperatuuride) puhul on seega

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \text{ [W]}$$

kusjuures Δx on materjalikihi paksus ehk d ja soojustakistus on

$$R = \frac{\Delta x}{\lambda} \text{ [m}^2\text{K/W]} \quad (1)$$

Soojusläbivus on

$$U = \frac{1}{R} \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

²Kõik siin ja edaspidi selgitamata tähised on toodud tabelis 1.

ehk Fourier' seadust saab esitada ka kui

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = U \cdot A \cdot (-\Delta T) \quad (2)$$

Soojustakistus on aditiivne suurus, soojusläbivus aga mitte, seega n homogeenest materjalikihist koosneva pinna soojusläbivus leitakse valemist

$$U = \frac{1}{R_1 + R_2 + \dots + R_n} \quad (3)$$

Soojusülekanal läbi materjali on selle pinnal lisaks veel õhukiht, mis suurendab soojustakistust. Õhukihi paksus sõltub õhu liikumise kiirusest antud keskkonnas. Hoone välispiirete sise- ja välispinna soojustakistust kirjeldavad vastavalt R_{si} ja R_{se} . Kui piirdes õhkvaheid esineb, toimub soojusülekanne ka konvektsiooni ja soojuskiirguse teel. See toimub näiteks mitmekihiliste klaaspakettide puhul aknaklaaside vahel. Akende soojusülekandest räägin täpsemalt peatükis 2.2.1. Eelpool mainitust järeldub, et soojuskao vähendamiseks tuleb hoone välispiirded konstrueerida võimalikult väikse soojusjuhtivusteguriga materjalide võimalikult paksudest kihtidest.

Transmissioonisojuskadod sõltuvad oluliselt ka piirde pindalast, seetõttu peaks soojuskao vähendamiseks hoonel välispiiret ruumala või põrandapinna kohta olema võimalikult vähe. Seega on vastava ühiku kohta kadu väiksem suurtel ja vähe sopilistel hoonetel. Seda omadust kirjeldatakse hoone kompaktsusega, mis ongi suhe $A/V [m^2/m^3]$ [10]. Sopiliste hoonete soojuskadu on suurem ka seetõttu, et keerulise geomeetrilise ehituse tõttu esineb külmasildasid rohkem. Külmasild on piirkond, kus soojustakistus on väiksem seda ümbritsevast ja seetõttu on soojusvoo tihedus läbi selle ala suurem. Sageli lihtsustatakse külmasillad ühedimensionaalseteks joonkülmasildadeks ja kirjeldatakse suurusega $\Psi [W/mK]$. Joonkülmasillad tekivad näiteks akende paigaldusel, aknaklaasi ja raami kinnituskohas, aga ka juhul kui näiteks vahelae või kütmata keldri kandvad konstruktsioonid läbivad soojustuskihti. Külmasild võib tekkida ka põrandaplaadi ja seina ühenduskohas või kahte seina ühendavas nurgas. Viimaseid nimetatakse geomeetrilisteks külmasildadeks.

Hoone välispiirded on olulised ka väliskeskkonnaga reguleerimata õhuvahetuse minimeerimisel, sest läbi mikropragude toimub infiltratsioon ja seetõttu konvektiivne soojusülekanne.

Talvel on madala välistemperatuuri tõttu kaod sellise õhuvahetuse korral suured ning seega peavad hoone välispiirded olema õhupidavad. Hoone kasutusmugavuse tagamiseks tuleb seal siiski õhku vahetada, mida tehakse ventilatsioonisüsteemi kaudu, kusjuures hoone kõrge temperatuuriga õhu asendamisel madalamal temperatuuril õhuga on soojuskadu

$$Q_V = V_V \cdot c \cdot \Delta T \text{ [kWh]}$$

Ventilatsiooni soojuskadu saab vähendada soojustagastusega ventilatsiooniseadme abil, kus väljuva ja siseneva õhu vahel toimub soojusülekanne ja seega on siseneva õhu temperatuur juba oluliselt kõrgem kui välistemperatuur.

2.1.2 Soojusallikad

Soojusallikad jagunevad vabasoojuseks ja kütteenergia netovajaduseks. Vabasoojus ruumis tuleneb pikalainelisest soojuskiirgusest ruumi erinevatelt pindadelt. Esiteks, hoones viibivad inimesed ning paljud kodumasinad on kõrgema temperatuuriga kui ruumide õhk ning seetõttu eraldavad need soojust. Iga seadme ja inimese kohta arvestatakse teatav soojuseraldusvõimsus P ning kogu sel viisil tekkiv vabasoojus leitakse kui

$$Q_I = \sum_i P_i \cdot t$$

Teiseks, läbi hoone klaaspindade toimub soojusvahetus päiksega soojuskiirguse teel, mis neeldub seintes ja mööblis ja mujal ning levib sealt samuti soojuskiirgusena ruumis. Päikesekiirguse panusest räägin täpsemalt järgnevas peatükis.

2.2 Päikesekiirgus hoone kontekstis

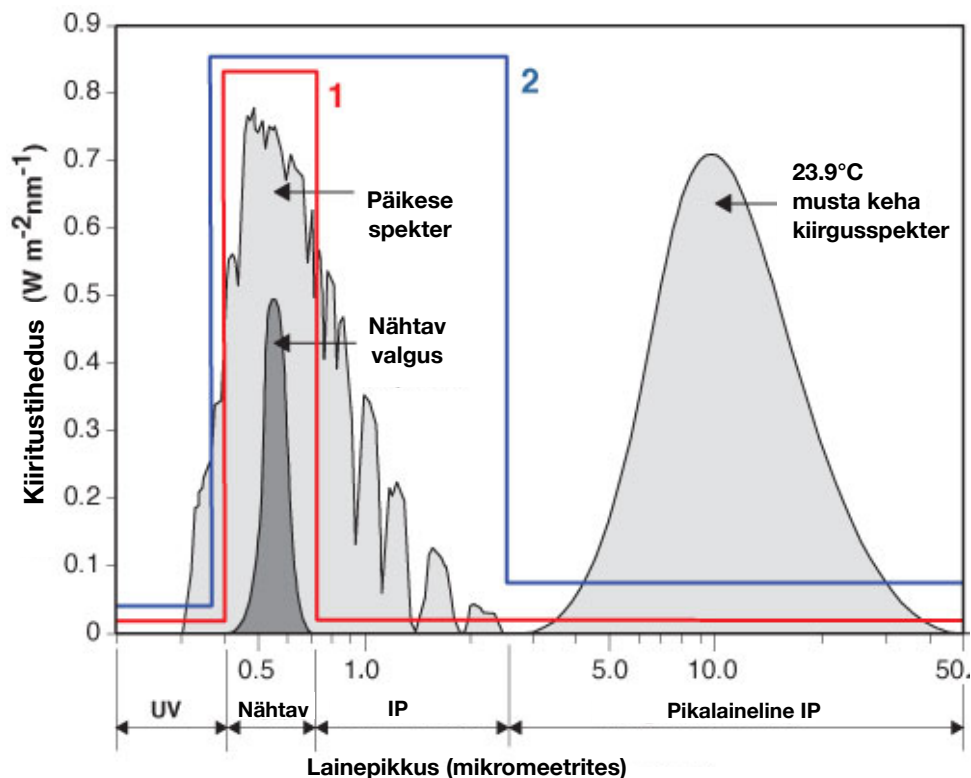
2.2.1 Päikesekiirgus hoonest väljaspool

Päikesekiirgus vastab enam-vähem musta keha kiirgusele temperatuuril 5777 K ehk 5505°C [11]. Vastav musta keha kiirgusspekter, mõõdetud kiirgusspekter atmosfääri välispinnal ning atmosfääri läbinud päikese kiirgusspekter on näha joonisel 3. On leitud, et Maa atmosfääri välispinnale risti langeva kiirguse intensiivsus on umbes 1360 W/m^2 [12]. Osa sellest kiirgusest jõuab atmosfääris hajumata ja neeldumata Maale, seda osa nimetatakse otsekiirguseks. Põhiosa otsekiirgusest jääb lainepikkuste vahemikku 250 kuni 2500 nm [13], seega on see lühilaineline kiirgus. Otsekiirguse hulka vähendavad eriti efektiivselt vee- ja tolmuosakesed atmosfääris (pilved, sudu). Päikesekiirguse Maa atmosfääris Rayleigh hajumise teel hajunud osa ja erinevatelt pindadelt peegeldunud kiirguse atmosfääris taas hajunud osa moodustab kokku hajuskiirguse. Hajuskiirgus on veelgi lühilainelisemas spektriosas kui otsekiirgus. Hajuskiirgus ja otsekiirgus moodustavad kogu horisontaalpinnale langeva kiirguse ehk kogukiirguse. Kaldpindadele langeb veel lisaks maapinnalt peegeldunud kiirgus. Maapinna peegelduvust kirjeldab albeedo, mis on eriti suur lume korral. Thevenard ja Haddad on leidnud, et reaalse albeedo arvestamine lume korral on eriti oluline ja nende toodud näites mõjutas see hoone arvutuslikku soojuskoormust kuupõhiselt üle 23% võrreldes standardaastaga [14].

Enamasti ei lange kiirgus siiski atmosfääri välispinnaga risti, vaid Maa ümara kuju tõttu nurga all, mis sõltub vaatluspunkti laiuskraadist ja päikese koordinaatidest vaatlushetkel. Päikese koordinaate arvestatakse tavaliselt ekvaatorilises koordinaatsüsteemis, mille põhitasand on taevaekvaatori tasand ja koordinaadid on otsetõus ning kääne ehk deklinatsioon. Kohaliku taeva kirjeldamiseks kasutatakse lokaalseid horisondilisi koordinaate, mille põhitasandiks on ideaalne horisonditasand ning koordinaadid kõrgus ja asimuut. Minnes üle ekvaatorilistelt koordinaatidelt kohalikele, kasutatakse vaheetapina tihti tunninurka, mida mõõdetakse mööda taevaekvaatorit sellega risti olevate ning vastavalt taevakeha (päikest) ja kohaliku koordinaadistiku seniiti läbivate tasandite vahel. Seniidis on Päike päikeseaja keskpäeval. Päikeseaega saab vööndiajast arvutada järgneva valemi abil [15]:

$$T\ddot{o}eline\ p\ddot{a}ikeseaeg = Ida\text{-}Euroopa\ talveaeg - (2h - koha\ idapikkus) - ajav\ddot{o}rrand$$

Vaatluskohas asuva pinna kaldenurga ja pinnanormaali sihi järgi saab leida kiirte langemisnurka pinnale. Mida madalamal on päike, seda paksema kihi tihti saastunud atmosfääris peab päikesekiirgus läbima. Kui suviste nurkade puhul on soojusvoo kadu 15%, võib talvel vaid 10-kraadise kõrguse puhul päikesekiirguse kiirgusvoog väheneda atmosfääris isegi üle 30% [16]. Lisaks on selge, et mida suurem on langemisnurk pinnale, seda väiksem on ka intensiivsus.



Joonis 3: Atmosfääri läbinud lühilaineline päikesekiirgus ning keskkonna pikalaineline temperatuurile 23.9°C vastav musta keha kiirgusspekter (pikalaineline soojuskiirgus) spektrivahemike illustreerimiseks [17]. Hajuskiirguse lainepikkuste vahemik ei erine oluliselt siin ära toodud otsekiirguse omast.

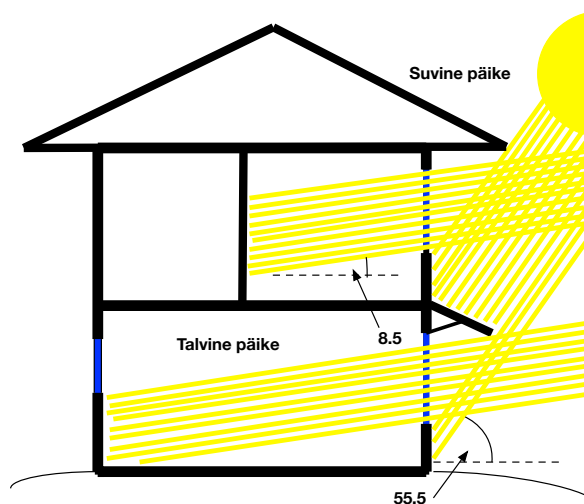
Üldjuhul mõõdetakse otsekiirgust, mis langeb kiirtega ristiasetsevale pinnale ning hajuskiirgust horisontaaltasandile. Lisaks mõõdetakse horisontaalpinnalt tagasipeegelduvat kiirgust. Mõõteandmete teisendamiseks erinevate nurkade all asetsevatele pindadele arvutatakse otsekiirguse puhul geomeetriliselt vootiheduse põhjal.

Hajuskiirguse teisendamisel on mudelid oluliselt keerulisemad, sest hajuskiirgus sõltub pilvede olemasolust ja jaotusest taevas. Viimase põhjal eristatakse isotroopse ja anisotroopse taeva mudeleid. Erinevate mudelite võrdlusi on tehtud väga palju [18], [19], [20], [21], [22], [23] ning lisaks on uuritud seda ka otse lõunasse suunatud vertikaalpinna jaoks eraldi [24].

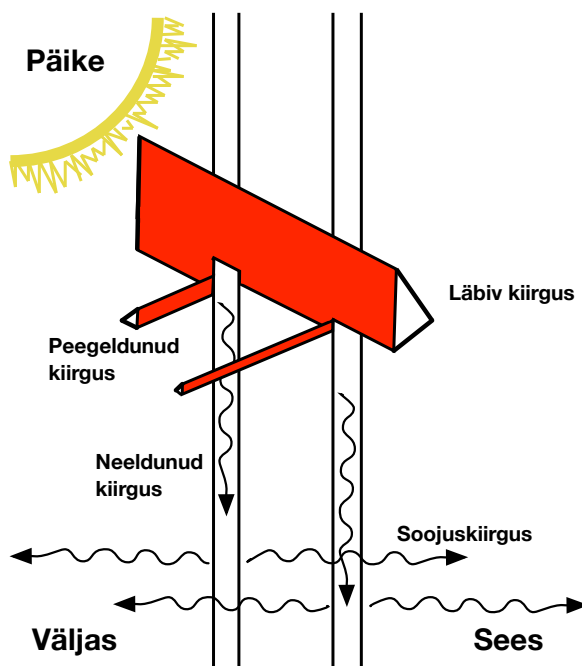
2.2.2 Akende soojusbilanss

Hoonesse jõuab päikesekiirgus läbi klaaspindade, kuhu jõudvast lühilainelisest kiirgusest osa peegeldub tagasi, mida kirjeldab emissiivsus. Teine osa neeldub klaasis, kolmas osa läbib akent ning kandub kiirgusliku soojusülekanne teel ruumi, kus see neeldub (joonis 5). Klaaspindades neeldunud energia soojendab klaasi ning hakkab kiirgama soojuskiirgust ning tekib soojusülekanne madalama temperatuuriga hoone sisepindadele. Samuti toimub soojusülekanne klaasi sisepinnalt konvektsiooni vahendusel. Aknaklaaside emissiivsuse, muude omaduste muutmiseks kasutatakse erinevaid kilesid, näiteks low-E ja peegeldavaid kilesid, soojuslähivuse vähendamiseks kasutatakse klaaside vahetäitena õhu asemel näiteks argooni või krüptooni [17]. Ruumi lühilainelise kiirgusena jõudev soojusvoog neeldub seintes, mööblis ja mujal. Nii salvestuvat energiat kirjeldatakse soojusmahtuvusega, mis sõltub materjali tihedusest.

Lisaks akendele reageerivad ka hoone ülejäänud pinnad päikesekiirgusele seda tagasi peegeldades ja neelates. Näiteks on võimalik hoone välisviimistlusega vähendada nii kütteenergiavajadust kui ka jahutusvajadust, sest pinnaviimistlusest sõltub pinna temperatuur ning see osaleb transmissiooni soojuskadude kujunemisel [25]. Siiski ei ole see efekt väga suur, kuid üha väiksemaks viidavate kadude korral võib tulevikus oluliseks kujuneda.



Joonis 4: Eestis langeb päikesekiirgus keskpäeval lõunaseinale talvel 8.5-kraadise nurga all, suvel 55.5-kraadise nurga all [26]. Sellel põhineb hoone passiivne päikesekiite [27].



Joonis 5: Akendele langev päikesekiirgus osalt peegeldub tagasi, osalt neeldub klaasides ning osalt läbib klaaspaketti. Neeldunud kiirgus kiirgub pikalainelise kiirgusena edasi ruumi [17]. Jooniselt on puudu konvektiivne soojusülekanne nii klaasi sise- kui välispinnalt.

Klaaspakette kirjeldatakse tavaliselt kahe põhilise näitajaga, U_g ja g . U_g on paketi keskosa soojuslähivus, mis iseloomustab akna klaaspaketi soojuskiirguse läbilaskvust temperatuurigradiendi negatiivses suunas ning sõltub põhiliselt paketi soojusjuhtivusteguritest. g on päikesefaktor ehk suhe, mis näitab, kui suur osa lühilainelise (päikese)kiirguse energiast läbib klaasi ja kandub soojusülekande teel ruumi. See arvestab nii lühilainelist klaasi läbivat päikesekiirgust, pikalainelist soojuskiirgust kui ka soojusülekannet õhu vahendusel (konvektsioon) klaasi sisepinnalt [28]. Seda vähendab näiteks klaaspinnal asetsev mustus. Akent kirjeldavad lisaks nendele veel ka raami ja klaasi ühenduse külmasild, raami soojuslähivus ning selle laius, mis mõjutab raami osakaalu kogu aknapindalast. Lisaks sellele suureneb hoone soojuskadu ka akna paigaldusel tekkiva külmasilla tõttu.

Kõigi nende tegurite koosmõjul kujuneb akna soojusbilanss, mida nimetatakse ka akna tootlikkuseks. Akende soojusbilansi negatiivset poolt mõjutavad paigalduse ja tihendi külmasillad, raami ja klaasi U -väärtused ning aknaraami osakaal kogu akna pindalast ehk fragmenteeritus. Soojusbilansi positiivset poolt mõjutab klaasi päikesefaktor. Lisaks on klaasi läbiv energia loomulikult suurem, kui pinnale langeb rohkem kiirgust. Kui Kesk-Euroopas on tootlikud lisaks lõunaakendele ka ida ja lääne aknad, võib põhjamaises kliimas eeldada vaid lõunaakende positiivset soojusbilanssi. Soojemates kliimades on akende soojusbilanss enamasti kütteperioodi keskmisena positiivne, kuid on leitud, et ka Rootsis võib see olla positiivne [29]. Akende kvaliteeti ja käitumist erinevates kliimades on iseloomustatud ka suhtega U_g/g [30].

Lisaks energiatõhususele sõltub akna U väärtusest ka hoones viibimise mugavus. Nimelt suurte soojuslähivuste korral on akna sisepinna temperatuur väga madal ning seetõttu toimub klaasi pinnaga suurem kiirguslik soojusvahetus kui teiste pindadega mis tekitab ebasümmeetrilise tõttu ebamugavust, mida võimendab samal põhjusel tekkiv konvektiivne õhuvool [31].

2.2.3 Hoonesse siseneva ja utiliseeritava päikesekiirguse maksimeerimine

Käesolevas töös uurin passiivset päikesekasutust väga külmas kliimas Eesti näitel. Põhjamaades on väga oluline hoonesse siseneva päikesekiirguse maksimeerimine, kusjuures soojas kliimas on see vastupidi. Akna välispinnale langevat kiirgusvoogu mõjutavad kõikvõimalikud

välised tegurid alates pilvisusest ning õhureostusest, kuni varjutavate objektideni nagu teised hooned ja puud. Lisaks võib osa päikesekiirgusest ära varjata ka hoone enda geomeetria, näiteks sopilisus, aknapõsed ja sirmid. Varjutavate objektide mõju sõltub päikese asukohast taevas vastaval hetkel. Samas kõige olulisemad aspektid on akende kvaliteet, suurus ja suund. Akende soojusläbivus peaks olema võimalikult väike ning päikesefaktor võimalikult suur. Oluliseks peetakse ka raami osakaalu kogu akna pindalast.

Orientatsioon. Akende orientatsioon näitab klaasi normaali suunda ilmakaarte suhtes. Hoone orientatsioon määratakse põhifassaadi normaali suunaga, kusjuures põhifassaad on määratud üldjuhul suurima akende pindalaga. Talvel, kui soovime päikesekiirguse hulka ruumis maksimeerida, on päike Eesti laiuskraadil väga madalal, vaid 8.5 kraadi [26]. Suvel, kui on vaja päikesekiirgust ruumides minimeerida, on päikese kõrgus suur. Päikesekiirguse hulk erinevatel aastaegadel pööripäeva paiku on toodud lisas B. Talvise päikese parimaks ära kasutamiseks on vaja põhiosa akendest paigutada lõunaseina. Päikesekiirte langemisnurgad lõunaseinale suvel ja talvel on näha joonisel 4. Siit on näha, et lõunaakendest talvine päike siseneb olulisel määral ruumi ja suvine päike oluliselt vähem, kusjuures päikesevari akna kohal aitab suvist ülekuumenemist vältida. Alalised sirmid akna kohal peavad olema aga sellised, et varjavad küll suvise päikese, kuid talvise madala päikese lasevad tупpa. Seetõttu on võimalik leida iga kliima ja hoone jaoks optimaalne sirmi laius. Samuti on näha, miks kaldaknad ja horisontaalaknad ei ole kuigi kasulikud talvise päikese püüdmise ja suvise ülekuumenemise vältimisel, lisaks sellele, et neid on ka keeruline varjutada. Töös on analüüsitud ainult vertikaalseid klaaspindu. Suurte klaaspindade suunamine lõunasuunas ning põhjaakende elimineerimine võib ilma varjude implementeerimiseta tekitada hoones väga suurt ülekuumenemisohtu suvel ja suuri küttearveid talvel [32].

Pindala. Enamasti on akna soojusläbivus oluliselt suurem kui muudel piiretel, seega aknad on nagu hõrendus isolatsioonis, kust soojuskadu on suurem kui mujalt. Samas on aknad ainus koht, kust tuleb sisse päikesevalgus ja seetõttu muidugi ka soojus. On selge, et läbi akna hoonesse sisenev soojushulk on proportsionaalne akna klaasiosa pindalaga. Akende suuruse mõju hoone energiatarbele on uurinud näiteks M.-L. Persson ja näidanud, et tavalisi maju mõjutab akende suund ja suurus oluliselt rohkem kui madala energiatarbega majasid [32].

Akende pindala varieerimist küttevajaduse ja küttekoormuse jaoks on palju tehtud [33], [34], [35], [36]. On leitud, et lõunaseina aknapindala ei ole mõtet 100%-ni viia, sest kuigi see võib vähendada küttevajadust, tõstab see kindlasti küttekoormust. Seetõttu peaks pigem otsima optimaalset varianti [37]. Reaalsuses ei olegi see päris võimalik, sest klaasil peab olema kinnituskoht raami näol. Akende pindala varieerimisel reaalse olukorra jaoks on keeruline eraldada akna pindala ja fragmenteerituse mõjusid, sest väiksema akna pindala puhul on raami osakaal kogu akna pinnast alati suurem kui suurematel akendel. Väga suuri aknaid ei ole lisaks eelnevatele põhjustele mõtet teha ka seetõttu, et aken on oluliselt kallim kui sein, eriti suuremate klaaspindade puhul, sest siis peab hoone staatika tõttu tegema klaasid paksemad, mistõttu g väärtus väheneb. Nii tuleb piisava kvaliteedi tagamiseks kasutada erilisi gaase ja kilesid, mis tõstavad veelgi hinda.

Massiivsus. Ruumi jõudnud päikesekiirgus neeldub hoone siseseintes, mööblis ja mujal. Hoone massiivsust kirjeldatakse ajateguriga, mis sõltub kogusoojusmahtuvusest. Kui päikesekiirgust päeval väga palju on, ei pruugi see seintes neelduda ning seetõttu võib tekkida jahutusvajadus. Seetõttu võib juhtuda, et osa potentsiaalset vabasoojust "jääb kasutamata", kuid öösel väga suure sise- ja välistemperatuuride erinevuse korral on ikkagi vaja hoonet kütta. Seda nähtust kirjeldatakse utiliseerimismääraga. Hoone massiivsuse tõstmisega on võimalik suurendada ka utiliseerimismäära, kuid see efekt on oluline vaid väga hästi isoleeritud hoonete puhul [38].

2.3 Päikeseenergia passiivse kasutamise kirjeldamine

Nii kadude vähendamine kui ka hoonesse siseneva päikesekiirguse maksimeerimine on olulised päikeseenergia kasutamiseks hoone energiavajaduse vähendamisel. Hoone disaini hindamiseks on töö algfaasis vaja hinnata selle hoone potentsiaali päikest ära kasutada. Tuleb kindlaks teha, kas hoone soojuskaod on nii väikesed ja sisenev päikesekiirguse soojushulk nii suur, et päikeseenergia osakaal moodustab hoone soojusbilansist olulise osa ja nii kütteenergia netovajadus kui ka kogu energiatarve on seeläbi väiksemad. Seetõttu oleks päikesekasutust mõjutavaid aspekte vaja summaarselt hinnata. Hoonet planeerides tehakse valik erinevate ideede vahel ehk õige otsuse tegemiseks oleks meil vaja erinevaid hooneid vastavas kliimas kuidagi võrrelda.

Eesmärgiks oli kirjeldada hoone potentsiaali passiivset päikeseenergiat kasutada. Selleks tundub esimene loogiline samm uurida, kui suure osa kõikidest kadudest suudab passiivne päikeseenergia vaadeldaval hoonel katta. Seega otsime protsentuaalset suurust, mille puhul 100% oleks kasutatav Q_s koos kütteenergiavajadusega Q_H ning meid huvitab Q_s osakaal selles. Taolist olukorda kirjeldab konstantse utiliseerimismääraga perioodil suhe

$$\frac{\eta \cdot Q_s}{Q_L - \eta \cdot Q_I}$$

Seega peaks suhe olema alati alla ühe. Taoline suhe, SLR (ing.k. "solar-loss ratio") loodi esialgu aktiivsete küttesüsteemide jaoks kuid juba 80ndate alguses kasutati seda passiivse küttesüsteemi, massiivse seina võimekuse kirjeldamisel [39]. Hiljem leiti oluline seos vaadeldava suhte ja päikeseenergia utiliseerimismäära vahel [40]. Siis arvestati aga ainult lõunaaknaid ja ruumi muud vabaenergiat ei arvestatud. 80ndatel tegelesid sarnase suhtega, GLR (ing.k. "gain-load ratio") Barakat ja Sander, kes tõi sisse erinevad ilmakaared ning muu vabasoojuse. Nad arvestasid, et inimeste ja seadmete vabasoojuse utiliseerimismäär on 1. Yohanis kombineeris seni tehtud tööd ning oma tulemuste põhjal leidis, et suurte, mitmetsooniliste hoonete korral annab see suhe vaid ligikaudse hinnangu ning täpsemate tulemuste saamiseks peaks päikese passiivset kasutamist uurima dünaamiliste meetoditega, eraldades erineva orientatsiooniga aknad erinevatesse tsoonidesse [16].

Sarnase kontseptsioonini on jõudnud ka Burmeister ja Keller [41]. Nad nimetavad seda "gain-to-

loss ratio” ning see on lihtsalt Q_s/Q_T ehk nad ei arvesta ventilatsiooni kadusid. Palju kasutatakse ka väga sarnast mõistet “gain-loss ratio”, kuid see on üldjuhul kogu vabasoojust kogukadude kohta.

Üldiselt on päikese kasutamist palju uuritud, kuid seda ei ole tehtud Eesti kliima ja väga madala energiavajadusega hoonete kohta. Eestis on uuritud üldisemalt kiirguskliimat [15], [42] ning Kalamees on loonud Euroopa standardi ja Eesti pikajaliste mõõdetud kliimaandmete põhjal Eesti energiaarvutuste baasaasta [43], [44]. Lisaks on uuritud hoonete praegust olukorda ning soojustusvõimalusi [45], [46]. Hoonete passiivse päikeseenergia kasutust sõltuvalt hoone geometriast pika perioodi jooksul pole varem uuritud. Samas on hoone toimimist 30 aasta jooksul uuritud näiteks Hiinas [47].

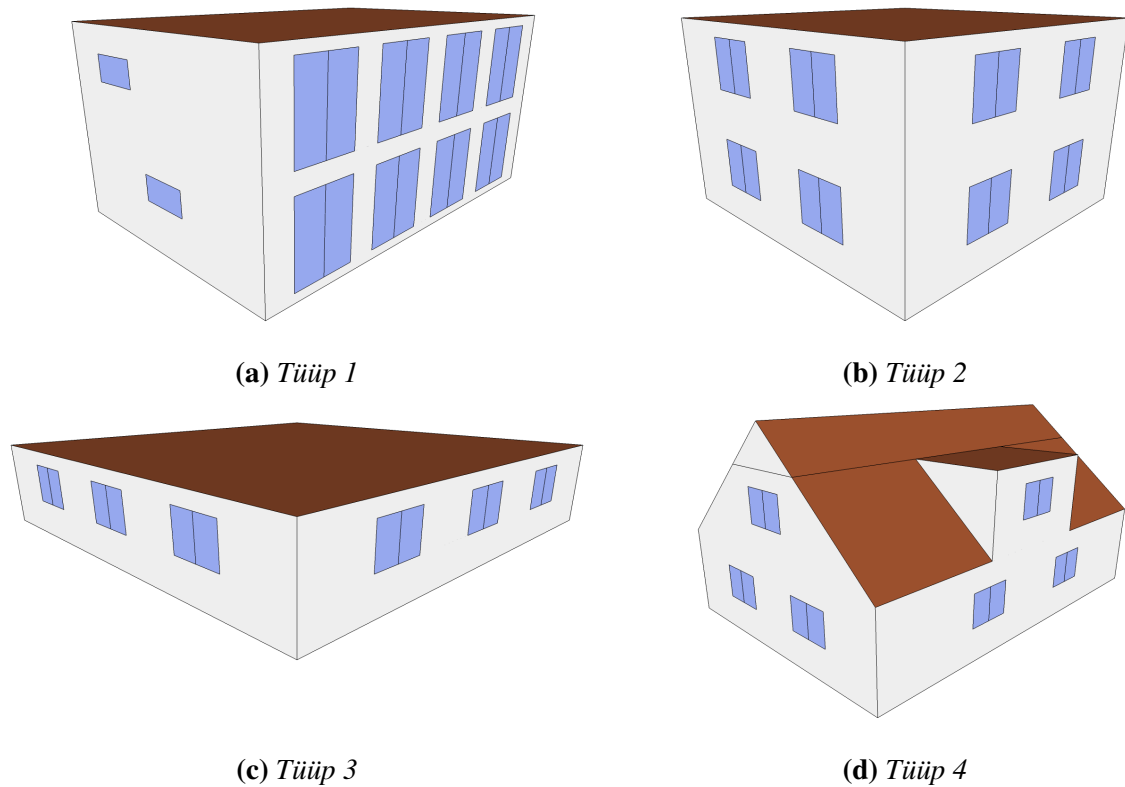
3 Materjal ja metoodika

3.1 Katse püstitus

Püstitatud küsimustele vastamiseks jagasin töö kolme ossa: Eesti kliimaatilise olukorra uurimine hoone kontekstis, akende soojusbilanss kütteperioodil ning hoonete soojusbilanss koos dünaamikaga viimase 43 aasta jooksul.

Töös koostasini nelja ühesuguse ventileeritava ruumalaga ($400 m^3$) kuid erineva disainiga hoonetüübi simulatsioonid. Hoonete isomeetriad on toodud joonisel 6 ning vaated on toodud lisas A. Tüüp 1 on valitud kui uudse, hästi päikesele eksponeeritud arhitektuuriga elamu, tüüp 2 imiteerib tüüpilist Tartu Tähtvere linnaosa maja, tüüp 3 on valitud kui linna-lähedaste asumite uuselamu ning tüüp 4 on Tartu Tammelinna eramaja. Kõigil tüüpidel on erinev kompaktsus ning aknapindala. Tüüpidel 1 ja 2 on kogu aknapindala suur ja peaaegu sama, tüüpidel 3 ja 4 on aknapindala oluliselt väiksem. Tüüpidel 2 kuni 4 on akende paigutus ilmakaarte suhtes sümmeetriline, esimest tüüpi hoonel on aga suured aknad orienteeritud lõunasse ning teiste ilmakaarte suunas on oluliselt vähem klaaspindu. Täpsed akende pindalad ja hoonete sisemõõtmed on lisas A.

Hoonekarbi komponentide mõju illustreerimiseks varieerisin hoone erinevaid energiatõhusust mõjutavaid parameetreid. Moodustasin 3 energiatõhususe taset – I, II ja III. Tasemele I valisin praegu mulle teadaolevalt kõige paremate toodete parameetrid ning tasemele III praegu Eestis kehtivatele miinimumnõuetele vastavad väärtused. Taseme II moodustasin I ja III aritmeetilise keskmisena. Varieeritud parameetrid koos väärtustega erinevatel tasemetel on toodud lisas A.



Joonis 6: Töös kasutatud hoonemudelite isomeetrilised vaated

Eesmärk oli hinnata projekteerimisjärgus hoone päikesekasutust. Seetõttu ei püüdnud ma saavutada väga suurt täpsust vaid pigem tabada tendentse. Hoonete analüüsimiseks kasutasin PHPP metoodikat, mida kirjeldan peatükis 3.2. Varieerisin kliimaandmete sisendeid ja kasutasin lisaks standardaastatele ka mõõdetud Eesti kliima andmeid. Seda selgitan täpsemalt peatükis 3.3. Eesti külma kliima tõttu soovisin uurida just talveolukorda ning jätsin arvestamata suvekuud, sest nende uurimine on täiesti teist tüüpi probleem. Nii analüüsisin kütteperioodi võimalikke määratlusi ja valisin edaspidiseks tööks sobiva perioodi.

Hoonesse siseneb päikese kiirgus läbi klaaspindade, seetõttu on kõige olulisem uurida just nende toimimist Eesti kliimas. Meie kolmel valitud komponentide energiatõhusustasemel vaatlesin hoonest täiesti eraldi vaid akna soojusbilanssi. Püüdsin leida klaasi kvaliteedipiire, mille puhul on veel võimalik, et lõunaakende soojusbilanss on kütteperioodil summarselt positiivne.

Hoonete võrdlemiseks kasutasin nii hoone kütteperioodi soojusbilansi erinevaid soojushulki

kui ka neist kombineeritud indeksit, mis näitab hoonesse siseneva ja seal utiliseeritava päikese-kiirguse osa kütteenergiavajaduse vähendamisel. Kuigi see on väga sarnane GLR-ile, on selle definitsioonis väikesed erinevused ning samuti kasutame seda üsna erineval eesmärgil. Nime-tame meie indeksit hoone passiivseks päikesetundlikkuse indeksiks (ing.k. "*building's passive solar sensitivity index*" ehk lühendina BPSSI või lihtsalt SSI). Valemina avaldub see kui

$$SSI = \frac{\sum_{kku=1}^6 (\eta_{kku} \cdot Q_{s,kku})}{\sum_{kku=1}^6 (Q_{L,kku} - \eta_{kku} \cdot Q_{I,kku})}$$

See indeks võiks kujuneda vahendiks hoone disaini algusjärgus hoone päikesekasutuse hinda-misel ning seeläbi näiteks üheks kriteeriumiks arhitektuurikonkurssidel.

Analüüsin selle indeksi toimimise selgitamiseks tegin indeksi tundlikkusanalüüsi kõigi klaas-pindadega seotud parameetrite jaoks. Töö mahtu arvestades pidin muud võimalikud parameet-rid välja jätma. Tundlikkus on väljundparameetri protsentuaalne muutus sisendparameetri prot-sentuaalse muutuse kohta:

$$Tundlikkus = \frac{\% \Delta V \text{äljund}}{\% \Delta S \text{isend}}$$

Valisin algpunktiks iga hoonetüübi tasemel I ning varieerisin akende pindala (tegelikult laiust), orientatsiooni, päikesefaktorit, klaasi soojusläbivust, raami soojusläbivust ning raami laiust. Korruga vähendasin ühe parameetri kvaliteeti hoides kõik ülejäänud sel ajal hoonevariandi parima energiatõhusustaseme väärtuste juures.

3.2 Kasutatud simulatsioonitarkvara

Hoonete energiasimulatsioonid jagunevad dünaamilisteks ja staatilisteks. Dünaamiliste simu-latsiooni korral esitatakse ääritingimused lühikese ajasammuga, milleks on tavaliselt 15min kuni 1h. Seega tehakse kõik arvutused lühikese sammuga. Dünaamilise arvutuse korral tehakse arvutused enamasti diferentsiaalvõrrandite numbrilise lahendamise teel lühikese ajasammuga. Seetõttu võib dünaamiline hoonesimulatsioon olla väga täpne, kuid nõuab väga palju erinevaid ja vägagi detailseid sisendeid, mis vähendab suure veatõenäosuse tõttu tulemuste usaldatavust. Staatiliste simulatsioonide korral kasutatakse oluliselt lihtsustatud mudeleid ning ääritingimu-sed esitatakse kuu või kütteperioodi keskmiste või summadena.

Käesoleva töö üks eesmärke on uurida hoone käitumist erineva ilmaga aastate korral. Pikaajaliste sobivate erinevate hoonetüüpide soojusbilansi mõõteandmete puudumise tõttu viidi uuring läbi arvutisimulatsioonide abil. Hoonete energiamudelite tegemiseks kasutasin tarkvarapaketti "PassivHaus Projektierungs-Paket"(PHPP) [48]. Tegemist on MS Exceli põhise staatilise simulatsiooniprogrammiga, mis võimaldab läbi viia hoonete energiaarvutusi. PHPP on mõeldud põhiliselt väga madala kütteenergivajadusega hoonete soojusbilansi simuleerimiseks ning see on rahvusvaheliselt tunnustatud tarkvara passiivmajade sertifitseerimisel. Seetõttu ei ole tegemist mitte lihtsalt simulatsiooniprogrammi vaid samas ka simulatsioonimeetodiga [49]. PHPPs arvutatakse soojusbilanssi kuupõhiselt ning see pool-dünaamiline arvutusmeetod põhineb Euroopa standardi EN ISO 13790 [50].

Kuigi PHPP näol on tegemist staatilise hoonesimulatsiooniga, on paljude mõõtmiste abil tõestatud selle kuupõhise meetodi kasutamisel arvutatud tulemuse kokkulangevust nii mõõtmistel saadud tulemuste keskmistega kui ka dünaamiliste hoonesimulatsioonidega [49]. PHPPga samadel alustel põhineva programmi EPW abil arvutatud netoenergiavajadus ruumide kütteks erineb dünaamiliste simulatsioonide abil arvutatud tulemustest umbes 4% [51]. Samas on konkreetse projekti puhul näidatud ka, et staatilise kraadtundide meetodikaga arvutatud kokkuhoid renoveerimisel on mõõtetulemustele olnud oluliselt lähemal kui dünaamilise arvutuse teel leitud [52]. Kraadtundide meetodist räägime täpsemalt peatükis 3.2. Käesoleva töö hüpoteeside kontrollimiseks vajame valdavalt ainult kütteperioodi või kuu keskmisi soojusbilansse, seega piisab meile staatilisest simulatsioonist.

PHPP nõrkuseks on suvise ülekuumenemise ja massiivse konstruktsiooni mõju hindamine [53]. ISO 13790 soovitus järgi peaks täpsemad arvutused ja vea hindamise läbi tegema juhul, kui netoenergiavajadus kütteks on väiksem kui kolmandik soojuskadudest. Nimelt kasutatakse suhet QF/QL vabasoojuse utiliseerimismäära arvutamisel, mida reaalsuses mõjutavad need mõlemad. Viidatud juhul jagatakse kaks väga väikest arvu omavahel ning väikese vea esinemisel sisendandmetes mõjub see kordades rohkem tulemustele. Näiteks kui vaadeldav suhe on 0.75, tipneb 5%-line määramatus soojuskadude arvutusel 20-35%-lise määramatusega kütteenergia vajaduse tulemusel [54].

Praktikas tähendab see, et PHPP väljastatavatel tulemustel esinevad ebatäpsused näiteks väga suurte (üle $20 m^2$, aga meil on see 1. tüüpi hoonetel ligi $35 m^2$, mille juures on erinevus dünaamiliste simulatsioonide tulemusest juba umbes 10% [49]) lõunasse orineteeritud klaaspindade korral, kui sisenev passiivse päikeseenergia hulk läheb väga suureks. Kuigi ühes näites on lõunas aknapinnad pisut suuremad, jääb erinevus dünaamilise simulatsiooniga siiski alla 10% kogu aasta kohta. Lisaks on siin töös toodud katse puhul oluline kütteperiood, mille jooksul on kiirgust vähe ja seega on PHPP täpsus meie jaoks piisav, sest põhiline erinevus tekib suvekuudest.

Kuigi PHPPs soovitatakse kasutada ISO 13 790 kuupõhist meetodit kütteperioodipõhise meetodi asemel, saab ka selle arvutuse põhjal hinnata siiski vaid kütteperioodi kogubilanssi. Tulemuste kuude kaupa eraldi võrdlemisel ei ole mõtet, sest antud meetodil leitud kütteenenergia netovajaduse kuusummad on kütteperioodi alguses pigem kõrgemad ja lõpus madalamad kui dünaamilisel simulatsioonil [50]. See tuleneb ebatäpsusest arvutusest soojusvahetuse kohta maapinnaga.

PHPP metoodika puhul sisestatakse võrreldavate tulemuste saamiseks sisendandmed vastavalt Euroopa standarditele arvutatud ja mõõdetud väärtustena. Kasutatud suuruste tähised koos ühikute, selgituste ja standarditega on toodud tabelis 1. Staatilise simulatsiooni puhul eeldatakse enamasti kütteperioodil konstantset sisetemperatuuri, nii ka PHPPs. Seega peavad bilansi negatiivne ja positiivne pool tasakaalus olema. Järgnevalt vaatame, kuidas soojuskadusid ja soojusallikaid antud metoodika puhul arvutatakse.

3.2.1 Kadude arvestamine

Nagu juba räägitud, koosnevad kaod soojusjuhtivuse kadudest ning õhuvahetuse soojuskadudest. Transmissiooni soojuskaod koosnevad kadudest läbi läbipaistmatute pindade, läbipaistvate pindade ja külmasildade. Ühe pinna soojuskao leidmisel integreeritakse valem (2) ja saadakse

se

$$Q_t = A \cdot U \cdot f_T \cdot G_t$$

kus G_t on temperatuurierinevuse ajaline integraal ehk kraadtundide arv:

$$G_t = \int \Delta T dt \approx \sum_{k_{uu}=1}^{12} (\Delta T_{k_{uu}} \cdot t_{k_{uu}})$$

A on pinna pindala, kusjuures hoone kirjeldatakse PHPPs välismõõtmete järgi ehk kadusid hinnatakse pigem üle. Soojuslähivuse arvutamisel eristatakse läbipaistmatuid pindu ning aknaid. Läbipaistmatute pindade korral leitakse soojuslähivus valemist (3), kusjuures kihtide soojustakistuste hulka arvatakse ka piirdetarindi pindade lähedal asuva õhu soojustakistused R_{si} ja R_{se} . Nende jaoks on standardväärtused toodud tabelis 1. Homogeensete materjalikihtide soojustakistused leitakse valemist (1). Soojusülekanne soojemast keskkonnast külmemasse läbi klaaspindade kirjeldab samuti soojuslähivus U , täpsemalt U_g . Kuid siin arvestab see nii ruumi pikalainelist soojuskiirgust³, konvektsiooni kui ka konduktsiooni. Akende puhul arvutatakse soojuslähivust valemist

$$U = U_w = \frac{1}{A_w} \cdot (U_g \cdot A_g + U_f \cdot A_f + l_g \cdot \Psi_g + l_f \cdot \Psi_f)$$

Kasutatud tähised ja nõuded vastavate suuruste väärtustele on toodud jällegi tabelis 1. Külmasildade soojuskadu leitakse valemist

$$Q_{tb} = l \cdot \Psi \cdot f_T \cdot G_t$$

kusjuures külmasilla lineaarne soojusjuhtivustegur leitakse valemist

$$\Psi = \frac{Q_{2D} - Q_{1D}}{l \cdot \Delta T} \quad (4)$$

Q_{2D} on nubriliselt arvutatud 2D geomeetrilise külmasilla soojuskadu ning

$$Q_{1D} = \sum_i A_i \cdot U_i \cdot \Delta T_i$$

Kui kõigi külmasildade lineaarsed soojusjuhtivustegurid on $\Psi < 0.01 W/(mK)$, nimetatakse konstruktsioone külmasillavabadeks ja need võib arvutustes arvestamata jätta [50]. Valemist

³Temperatuurile $20^\circ C$ vastab musta keha kiirgus spektrivahemikus 4-50 mikromeetrit.

(4) on näha, et külmasilla lineaarne soojusjuhtivustegur saab olla ka negatiivne, kui $Q_{1D} > Q_{2D}$. Selline olukord võib esineda juhul, kui Q_{1D} arvutatakse välismõõtude põhjal, mida antud meetodi puhul just tehaksegi. Kogu transmissiooni soojuskao saab leida valemist (5) summana üle kõigi erinevate pindade ja külmasildade.

$$Q_T = \sum_i Q_{t,i} + \sum_i Q_{tb,i} \quad (5)$$

Ventilatsiooni soojuskao leitakse umbkaudsest valemist

$$Q_V = n_V \cdot V_V \cdot c \cdot G_t$$

kus $n_V = n_{V,system} \cdot (1 - \Phi_{HR}) + n_{V,res}$,

$$n_{V,system} = \frac{V_{aaf} [m^3/h]}{V_V},$$

Piirete õhupidavust iseloomustatakse õhulekkearvuga n_{50} : $n_{V,res} = n_{50} \cdot e \cdot \frac{V_{n50}}{V_V}$.

Üldjuhul ei pea V_{n50} ja V_V võrdsed olema, kuid siin me seda ei arvesta. Kogukaod leitakse valemist

$$Q_L = Q_T + Q_V$$

Seda tehakse nii kütteperioodi kohta kui ka kuude kohta eraldi. Meie kasutame kuupõhist meetodit ja kütteperioodi kohta hinnangu saamiseks summeerime üle kuude, sest sel viisil arvutus peaks olema täpsem ja on eelistatud madala kogubilansiga hoonete puhul [49].

3.2.2 Vabasoojuse arvestamine

Nagu eespool kirjeldatud tekib vabasoojus päikesekiirguse sisenemisel ruumidesse ning inimeste ja seadmete soojuseraldusel. Inimeste ja seadmete poolt eraldatavat vabasoojust kirjeldatakse tavaliselt kas reaalse kasutuse või hoonetüübi standardkasutuse järgi. PHPP meetodi puhul loetakse seda konstantseks $P_{IHG} = 2.1 W/m^2$. Arvestus käib kasuliku pinna (A_{TFA}) kohta, mida meie hoiame kõigi hoonevariantide puhul ühesugusena. See on üsna konservatiivne hinnang, kuid reaalne kasutus varieerub sõltuvalt elanikest väga palju ja hoonete võrreldavuse tagamiseks on valitud keskmine väärtus. Väga energiatõhusate koduseadmete kasutamisel on see oluliselt väiksem. Selle vabasoojuse panustatavat soojushulka arvutatakse valemist

$$Q_I = P_{IHG} \cdot A_{TFA} \cdot t$$

PHPPs kasutatakse siseneva päikesekiirguse tõttu tekkiva vabasoojuse arvutamiseks valemit

$$Q_s = r \cdot g \cdot A_w \cdot G$$

kus G on kogukiirgus vastavale pinnale ning selle arvutamisest räägime täpsemalt peatükis 3.3. g on klaasi päikesefaktor ning r vähendustegur, mis iseloomustab varjude, klaasi mustuse, fragmenteerituse ning klaasi pinnaga mitte risti langeva kiirguse tõttu pinnale langeva kiirguse vähenemist. Selle eriosade standardväärtused on toodud tabelis 1, varjutuse arvutusel arvestame vaid aknapõskede varjudega, mille sügavus on 12 cm ja kaugus klaasi servast võrdne raami laiusel. Kogu vabasoojus leitakse valemist $Q_F = Q_I + Q_s$.

On selge, et küttevajadus ja vabasoojus ei esine alati samal ajal ehk öösel on vaja kütta ja seda ei saa päikesekiirguse arvelt katta. Samas võib juhtuda, et isegi külmal perioodil jääb päeval ajal osa vabasoojust kasutamata. Seda kirjeldatakse utiliseerimismääraga (ing.k. *utilization factor*):

$$\eta_G = \frac{1 - (Q_F/Q_L)^\alpha}{1 - (Q_F/Q_L)^{\alpha+1}}$$

kus $\alpha = 1 + \frac{\tau}{16}$ ning τ on ajategur, mis iseloomustab hoone massiivsust ning leitakse valemist

$$\tau = \frac{A_{TFA} \cdot C}{K_L}$$

C valitakse PHPP ettekirjutuste järgi 60 Wh/m²K kergkonstruktsiooniga ning 204 Wh/m²K massiivse konstruktsiooniga hoonetele. Minu simulatsioonides on eeldatud kergkonstruktsioone. Utiliseeritav vabasoojus on seega

$$Q_G = \eta_G \cdot Q_F$$

ning netoenergiavajadus kütteks kujuneb

$$Q_H = Q_L - Q_G$$

Küttekoormus leitakse sarnaselt:

$$P_L = \left(\sum (A \cdot U \cdot f_T) + \sum (l \cdot \Psi \cdot f_T) + n_V \cdot V_V \cdot c \right) \cdot \Delta T$$

Tõravere kliimaandmestiku põhjal uurisin hoonest eraldi akna klaaspaketi soojusbilanssi kütteperioodi jooksul. Päikesekiirguse soojusbilanssi kirjeldasin valemiga

$$\Delta Q = A_g \cdot (r \cdot g \cdot G \cdot t - U_g \cdot G_t)$$

kusjuures võtsin $A_g = 1m^2$ ning arvutused tegin nii kogu kütteperioodi kui iga kuu jaoks eraldi. Akende soojusbilanssi vaatlesin ilmakaarte kaupa, sest isegi lõunaakende jaoks võib see mõne vähese kiirguse ja külma kuu keskmisena olla negatiivne [55].

Kõik kasutatud PHPP sisendandmed on kirjeldatud lisan A.

3.3 Kasutatud kliimaandmed

PHPPs arvutatakse soojusbilanssi kuupõhise meetodi järgi, mis põhineb Euroopa standardil EN832 (ISO 13790). Lisaks ajas konstantsetele hoone piirete kirjeldusele ja ruumitemperatuurile, mis PHPP meetodi puhul on $20^{\circ}C$, võetakse sisendiks iga kuu kohta keskmine välitemperatuur ning summarne kogukiirgus erinevalt orienteeritud pindadele. Passiivmajade sertifitseerimise puhul kasutatakse rahvusvahelise passiivmajainstituudi (PHI) pakutavat kliimaandmete komplekti, mida siin töös nimetame PHI aastaks. See on moodustatud kasutades tarkvara Meteonorm. Siin töös varieerisin kliimaandmeid kasutades lisaks PHI aastale ka Eesti energiaarvutuste baasaastat ja mõõdetud andmete põhjal arvutatud sisendeid. Eesti energiaarvutuste baasaasta on *“sisekliima- ja energiaarvutuseks koostatud väliskliima andmete kogum, mis põhineb üle-eestilistel kliimaandmetel ajavahemikus 1970–2000 ja on koostatud vastavalt Eesti standardile EVS-EN ISO 15927–4:2005”* ning Eesti ehitusseaduse energiatõhususe miinimumnõuete määrus nõuab energiamärgise arvutuste läbiviimist just selle andmestiku põhjal [56].

Lisaks PHI aastale ja Eesti energiaarvutuste baasaastale kasutasin Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituudi (EMHI) Tõravere meteoroloogiajaamas ajavahemikul 1970-2012 mõõdetud kliimaandmeid [57]. Mõõdeti õhutemperatuuri, otsekiirgust kiirtega risti pinnal ja hajuskiirgust horisontaalpinnal. Selle ajavahemiku jooksul on kasutatud erinevaid mõõtevahendeid. Otse-

kiirguse mõõtmisi hakati 1996. aastal senise aktinomeetri AT-50 asemel mõõtma hoopis pürheliomeetriga NIP ning hajusa kiirguse mõõtmiseks on kasutatud erinevaid püranomeetreid. Temperatuuri mõõtmiseks on kasutatud elavhõbedatermomeetrit ja digitaalset termomeetrit. Siiski võib andmeid lugeda ajas homogeenseks, sest seadmete kalibreerimine on toimunud täpsete etalonide järgi [15].

Kuupõhiste andmete saamiseks mõõdetud temperatuurid keskmistati ja kiirgused summeeriti. Mõõdetud otsekiirguse teisendamiseks horisontaalpinnale ja vertikaalpindadele kasutati Eesti kiirguskliima teatmikus toodud kordajaid. Hajuskiirguse teisendamiseks vertikaalpinna jaoks kasutati isotroopse taeva mudelit, mille alusel vertikaalpinnale langeva hajuskiirguse hulk on kõigis ilmakaartes sama ehk 2 korda väiksem horisontaalpinnale langevast ning vertikaalpinnale langeb pool horisontaalpinnalt peegeldunud kiirgusest, seega [15]:

$$G = k \cdot S + D/2 + R/2$$

Uurisin kliimaandmestikku ning selle varieerumist läbi aastate. Leidsin kõigi nelja orientatsiooni jaoks maksimaalse ja minimaalse kogukiirgusega aastad iga kuu lõikes ning keskmise kogukiirguse vastavale pinnale. Hajuvuse kirjeldamiseks leidsin iga kuu standardhälbe üle aastate. Sama analüüsi teostasid kuu keskmiste temperatuuride jaoks.

Andmeanalüüsi teostasid MS Exceli ja programmi R abil. Lisaks kirjutasid andmete ja andmefailide teisendamiseks sobivale kujule mitmeid Python-i skripte ja Visual Basic-u makrosid. Tulemuste visualiseerimiseks kasutasid R-is tehtud graafikuid ja LaTeXi tabeleid.

4 Tulemused ja arutelu

4.1 Eesti kliima hoonete kontekstis

4.1.1 Eesti kliima kirjeldus

Varem on Tõravere kliimaandmestikku publitseeritud Eesti kiirguskliima teatmikus [15], kuid nüüd on lisandunud veel 12 aastat. Iga kuu jaoks arvutatud keskmised temperatuurid on esitatud joonisel 7. Jõudsin tulemusele, et kõige sagedamini on madalad temperatuurid veebruaris ning teistest oluliselt külmemad kuud on november kuni märts. Veebruaris on temperatuuri hajuvus kõige suurem, kuid ka teistel talvekuudel kuu keskmine temperatuur suurel määral varieerub.

Kiirgusandmete teisendamisel leitud neljale erinevalt orienteeritud vertikaalpinnale langevate kogukiirguste kuusummad on joonisel 8. Graafikutelt on näha, et märtsis on kiirgushulk väga varieeruv. Enamasti põhjendatakse seda eri aastatel erineva albedoga, mis sõltub lumikatte olemasolust ja mõjutab seega peegeldunud kiirguse hulka. Kõige vähem kiirgust esineb novembrist veebruarini.

Erinevate aastaegade olukorra ilmestamiseks Eestis valisin märtsi, juuni, septembri ja detsembri 21. kuupäeva. Leidsin maksimaalse kiirgushulga, mis konkreetsel päeval perioodi 1970-2012 on mõõdetud ning esitasin vastaval päeval horisontaalpinnale langeva kiirgusvoo ajalise muutumise. Peatükis 2.2.1 toodud teooria põhjal leidsin mõõteandmetest vertikaalsetele pindadele langeva kiirguse intensiivsuse päeva jooksul. Tulemused on toodud lisas B, kust on näha, et talvel on kiirgust praktiliselt ainult lõunaküljel ja lühikest aega, kuid maksimaalne kiirgusintensiivsus on isegi suurem kui suvel.

4.1.2 Kütteperioodi valik

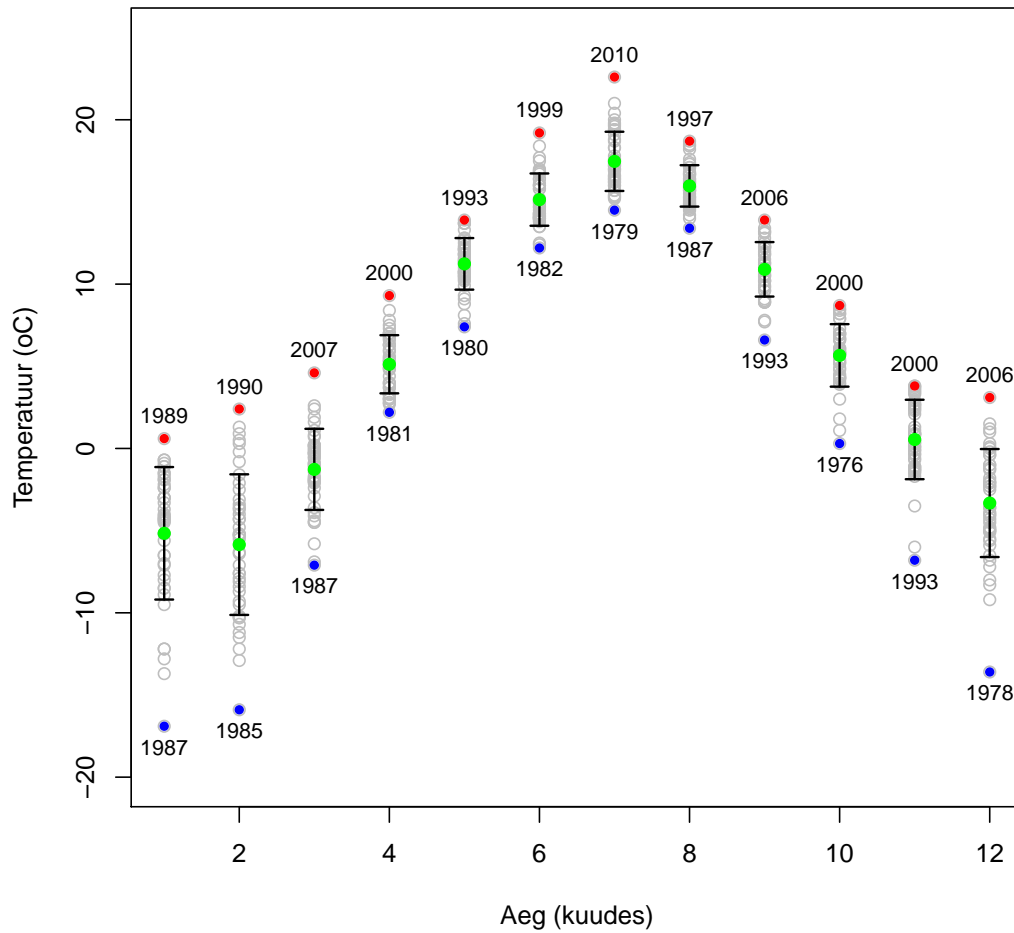
Hoonete võrdlemiseks tuleb määratleda hoonest sõltumatu periood, mille jooksul kõiki hooneid vaadeldakse. Huvitusin talveolukorrast ja otsisin Eesti mõistes universaalset kütteperioodi. Te-

gelik kütteperiood on igal hoonel erineva pikkusega. Üks variant seda ühtlustada on hoonete soojusbilansse vaadeldes valida võrdlusobjektiks kõige pikema kütteperioodiga hoone. Käesolevas töös simuleeritud hoonete kuupõhised soojusbilansid on toodud lisa C. Sellelt jooniselt on näha, et mõnel vaadeldavatest hoonetest esineb küttevajadus ka suvekuudel, variandil 3III esineb küttevajadus kõigil kuudel, isegi juulis. Seevastu variandil 1I on kütteperiood vaid 4 kuud. Nii on ühe hoone kütteperiood teisele jahutusvajaduse hooaeg. Suvel esineb ülekuumenemisoht ja sel ajal ei soovi me päikesekiirguse hulka ruumis maksimeerida. Seetõttu jätame suvekuud vaadeldavast perioodist välja.

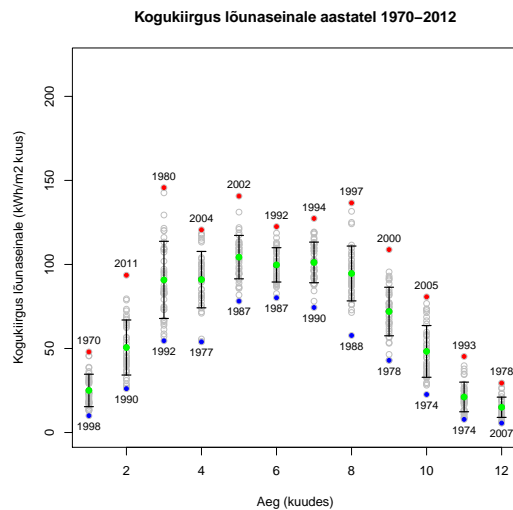
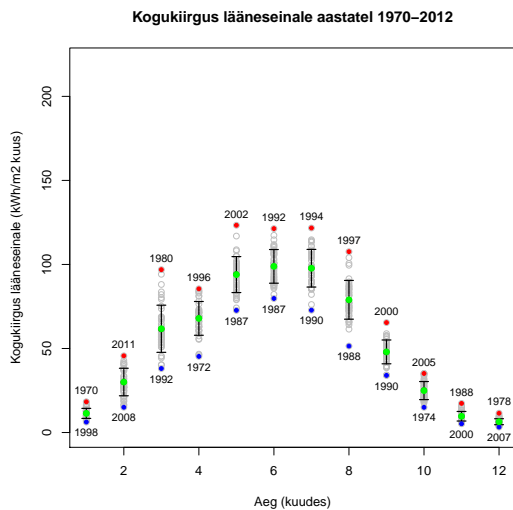
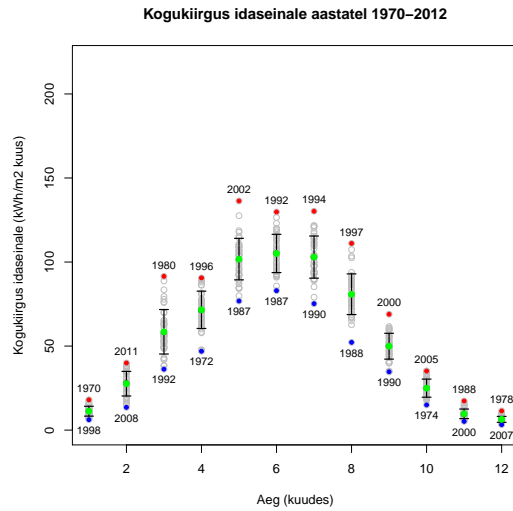
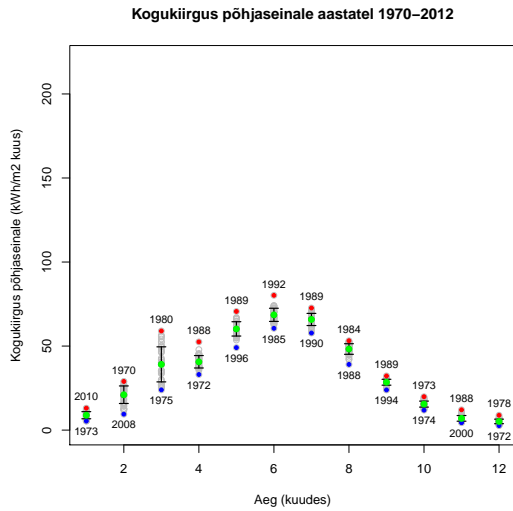
Teine võimalus on valida kütteperiood kliimaandmete põhjal, millest leitakse keskmisest külmemad ja vähema kiirgushulgaga kuud. Eelnevas tõime juba välja, et teistest kuudest selgelt madalama keskmise temperatuuriga on läbi aastate olnud novembrist märtsini ning oluliselt madalama kiirgushulgaga on oktoober kuni veebruar. Seega teistest külmemad ja/või vähesema kiirgusega kuud on oktoober-märts. Valisin selle ajavahemiku kütteperioodiks.

Leidsin kütteperioodi jaoks kraadtundide arvu kõigil aastatel ja võrdlesin saadud tulemusi PHI ja baasaasta kraadtundide arvuga samal perioodil (lisa B). Kuigi mõlemad aastad on mõõtetulemuste keskmisest vaid pisut vähemate kraadtundide arvuga, on kahel kolmandikul mõõdetud aastatest kraadtunde kütteperioodil rohkem kui baasaastal, seega baasaasta põhjal teevad hinnangud pigem alahindavad sel perioodil hoonete soojuskadu. PHI aasta on mediaanile lähemal. Võrdluse PHI ja baasaastaga tegin ka lõunaseinale langeva kiirguse jaoks (lisa ??). On näha, et PHI aasta hindab kiirgust üle, kuid baasaasta veidi alla.

Keskmine temperatuur aastatel 1970–2012

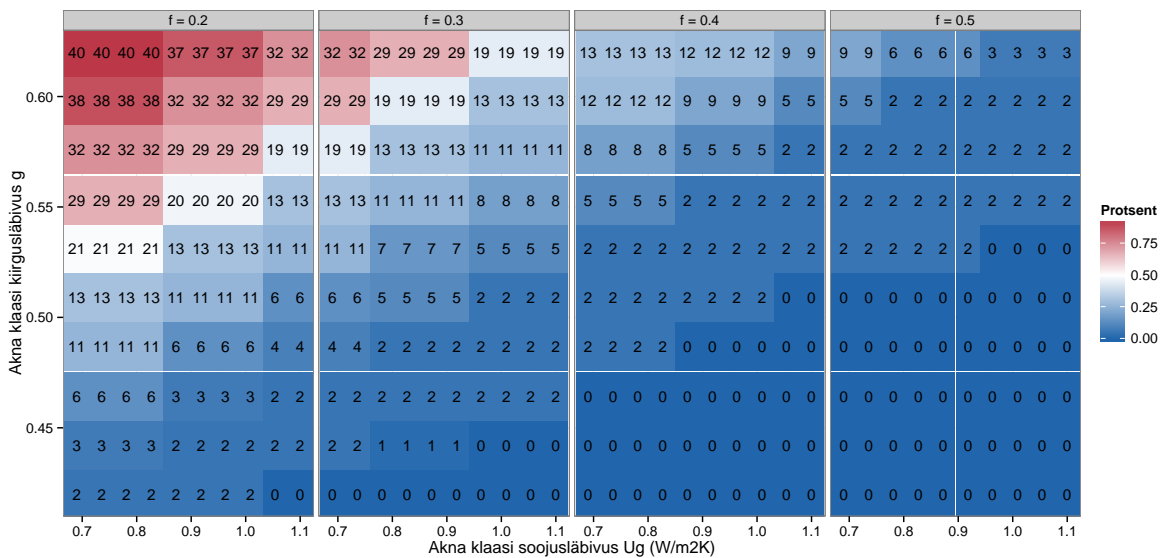


Joonis 7: Tõraveres EMHI 1970-2012 mõõdetud andmete kuukeskised temperatuurid. Iga hall ring tähistab ühte aastat, veeristidega on kujutatud ühe kuu ühe sigma ulatus kuukeskmiste keskmisest üle aastate (roheline täpp). Punane ja sinine täpp tähistavad selle ajaperioodi maksimaalset ja minimaalset kuukeskmist temperatuuri koos neile vastavate aastatega.



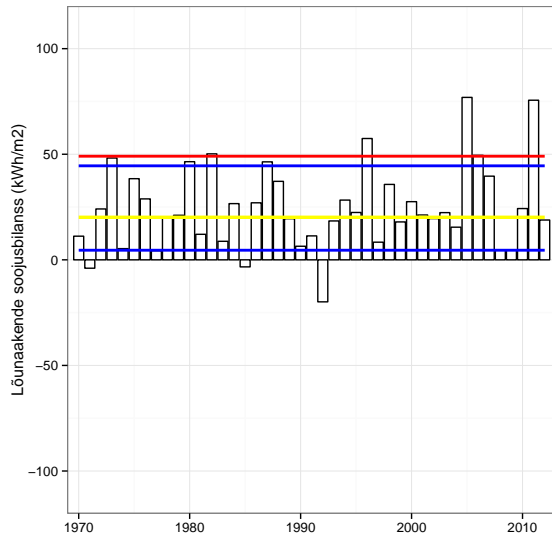
Joonis 8: Tõraveres EMHI mõõdetud kiirgusandmete põhjal arvatud põhja-, ida-, lääne- ja lõunaseinale teisendatud väärtuste kuusummad. Iga hall ring tähistab ühte aastat, vearistidega on kujutatud ühe kuu ühe sigma ulatus kuukeskmiste keskmisest üle aastate (roheline täpp). Punane ja sinine täpp tähistavad selle ajaperioodi maksimaalset ja minimaalset kiirgusenergia kuusummat koos neile vastavate aastatega.

4.2 Akende soojusbilanss Eesti kliimas

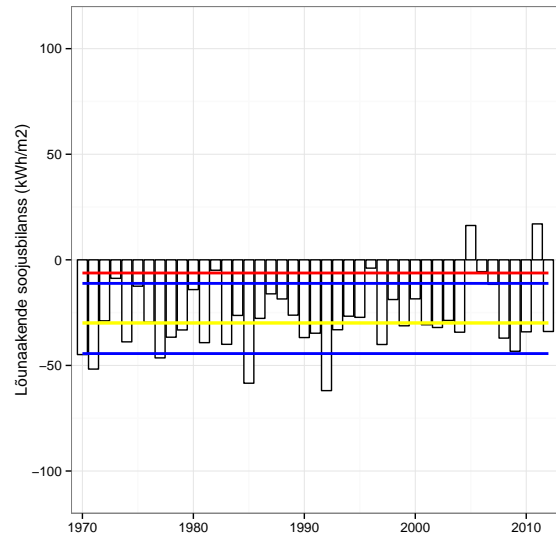


Joonis 9: Akna soojusbilanss I taseme raami ja erinevate U_g ning g väärtuste puhul nelja fragmentatsiooni jaoks. Graafiku peal toodud numbrid näitavad, mitmel aastal oli vastava standardsuurusega akna soojusbilanss positiivne ning värv näitab, mitu protsenti see moodustab 43st aastast.

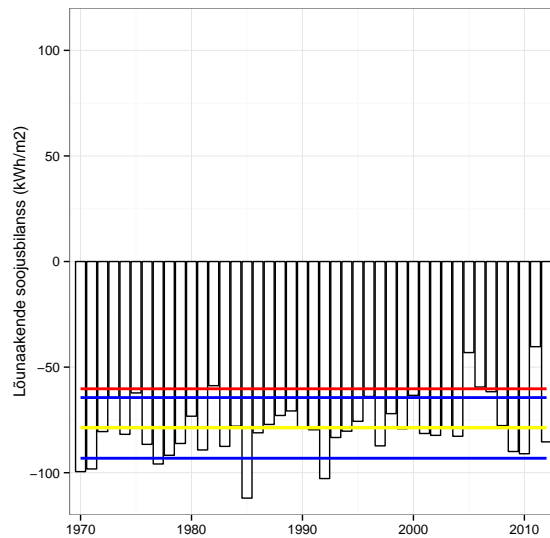
Uurisin akende soojusbilanssi Eesti kliimas sõltuvalt aknaklaaside U_g -väärtusest, g -väärtusest ja fragmentatsioonist f . Püüdsin leida klaasi omadustele alampiire, mille juures enamikel aastast akna soojusbilanss on positiivne. Kasutasin selleks standardmõõtudega akent ($1,23 \text{ m} \times 1,48 \text{ m}$) ning raami U -väärtuse ning akna paigalduse ja tihendi külmasilla soojusläbivused võtsin meetodika osas defineeritud kõige energiatõhusamalt tasemelt I (lisa A). Varieerisin klaasi soojusläbivust vahemikus $0,65 \text{ W/m}^2\text{K}$ kuni $1,15 \text{ W/m}^2\text{K}$, päikesefaktorit vahemikus $0,4$ kuni $0,65$ ja fragmentatsiooni vahemikus $0,2$ kuni $0,5$. Tulemused on joonisel 9. Joonistel on toodud tulemused ainult lõunasse orienteeritud akende jaoks, sest teiste ilmakaarte suunas oli akende soojusbilanss kõigil aastatel negatiivne. Saavutamaks vähemalt pooltel aastatel positiivset soojusbilanssi, peaks $f = 0,2$ korral olema $g > 0,55$ ja $U_g < 0,85 \text{ W/m}^2\text{K}$, samas g -väärtuse parandamisel võib U_g väärtus ka suurem olla. Raami osakaalu suurendamisel $0,3$ -ni väheneb positiivse bilansiga aastate arv oluliselt. Sel juhul peab g -väärtus olema kindlasti üle $0,6$, parem üle $0,62$ ning U_g -väärtus jääma alla $0,95 \text{ W/m}^2\text{K}$, võimalusel alla $0,75 \text{ W/m}^2\text{K}$.



(a) I



(b) II



(c) III

Joonis 10: Akende soojusbilanss kütteperioodil, joonisel (a) on aken, mis vastab komponentide tasemele I, joonisel (b) tase II ja joonisel (c) tase III. Sinisega on tähistatud standardhälbe piirid, kollasega baasaasta ja punasega PHI aasta kohta tehtud arvutus.

Suurema fragmentatsiooniga akendel jääb ka parimate klaasi omaduste puhul positiivse bilanssiga aastate arv alla kolmandiku vaadeldavatest aastatest. On selge, et kasutades parimatest raamidest suurema U -väärtusega raame, on akende positiivset soojusbilanssi veelgi keerulisem

saavutada. Tulemustest järeldub, et kõik kolm vaadeldavat parameetrit on olulise mõjuga akna soojusbilansile ja Eesti külmas kliimas on positiivset bilanssi võimalik saavutada vaid kõige paremate akendega.

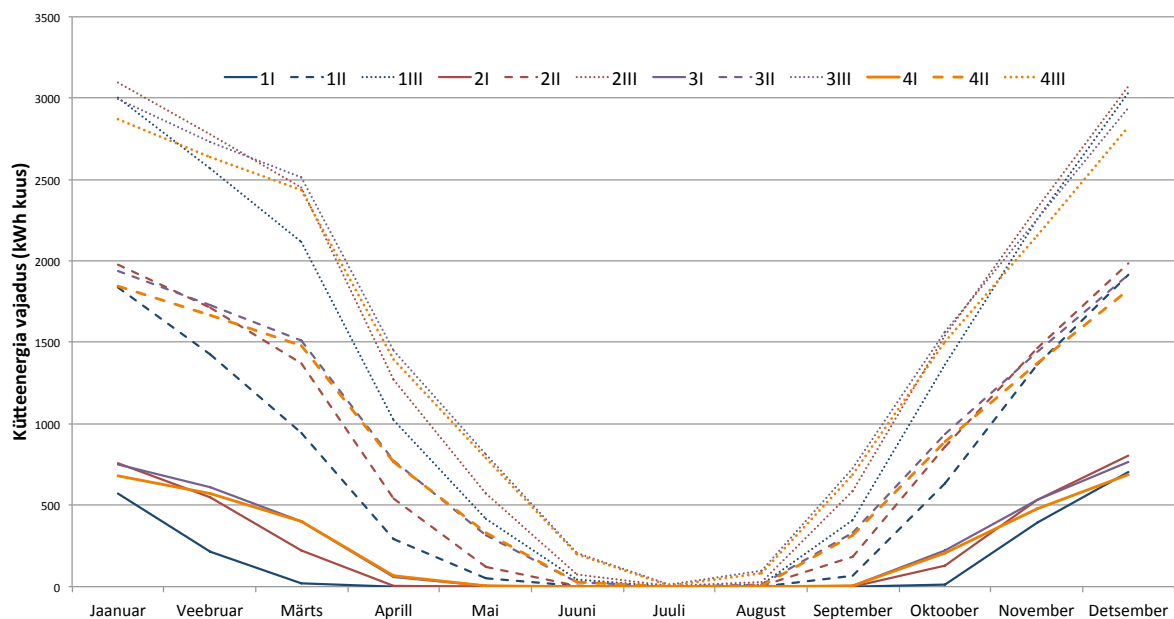
Meie kõigil valitud energiatasemetel I, II ja III jääb fragmentatsioon standardakna mõõtude korral 0,2 ja 0,3 vahele, ümardades võime võtta tasemel I $f = 0,2$ ja teiste tasemete jaoks $f = 0,3$. Taseme I puhul on tegemist parima vaadeldud variandiga ehk enamikel aastatel on soojusbilanss positiivne. Energiatõhusustaseme II puhul on $U_g = 0,9 W/m^2K$ ja $g = 0,52$. Graafikutelt saame kontrollida, et selliste akende soojusbilanss on positiivne umbes 20% aastatest. Tase III on vaadeldud kõige kehvem tase ja selle puhul on akende soojusbilanss kõigil aastatel negatiivne.

Vaatan kolme varianti absoluutarvudes, kolme akna soojusbilansid pikal perioodil on toodud joonisel 10. Kõige parema variandi puhul on bilanss vaid paaril üksikul aastal negatiivne, enamasti siseneb 50 kWh energiat ruutmeetri lõunaakna kohta kütteperioodi jooksul rohkem kui väljub. Antud töös valitud hoonetega sama ruumalaga passiivmaja tarbib kütteperioodil 2600 kWh soojusenergiat, seega 35 m² taolisi aknaid lõunaküljel kataks umbes 2/3 hoone kütteenergiavajadusest. Madalama energiatasemega akende puhul tekitavad aknad kütteenergiavajadust. Kõigil juhtudel hindab PHI aasta olukorda üle, baasaasta on enam-vähem keskmine.

Bülow-Hübe [30] eeskujul vaatasin lisaks U ja g eraldiseisvate mõjule ka suhte U_g/g mõju. See on toodud lisas C. On näha, et vaadeldav suhe kirjeldab üsna hästi soojusbilansi positiivsuse tõenäosust, kuid ei ole need kaks suurust ei ole monotoonselt kasvavad.

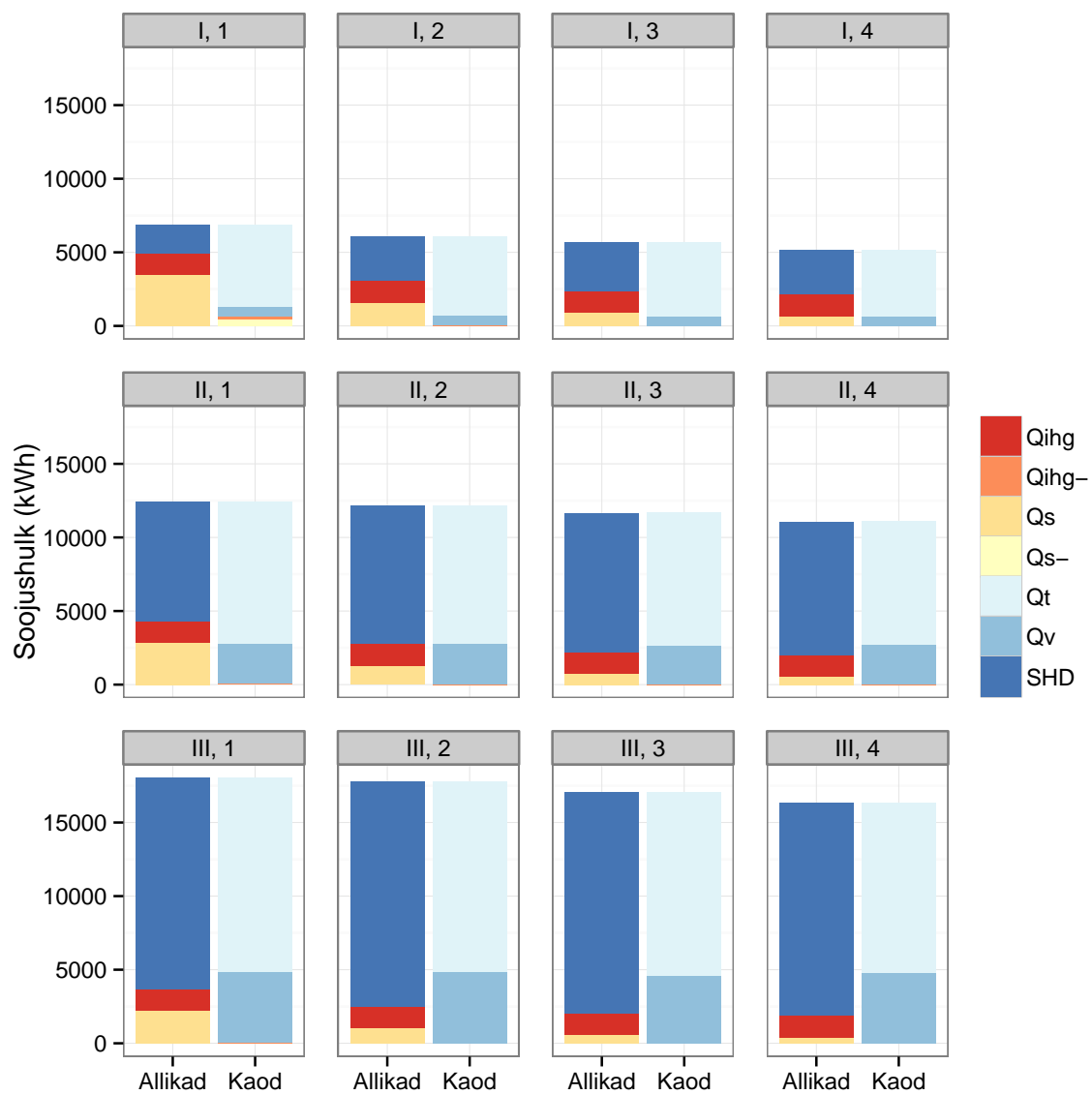
4.3 Hoonete passiivse päikeseenergia kasutamise potentsiaal Eesti kliimas

Selles peatükis analüüsin hoone toimimist Eesti kliimas. Esimese sammuna arvasin PHPP meetodikat rakendades kõigile valitud hoonevariantidele soojusbilansi, mis on esitatud lisas C. Eraldi tõin välja netoenergiavajaduse ruumide kütteks, mis on joonisel 11. Näha on variantide jaotumine kolmele tasemele, mis on meie valitud komponentide energiatõhusustasemed. See osutab, et Eesti külmas kliimas on kõige olulisem valida parimad komponendid ja sellega vähendada soojuskadusid. Kevaditi ja sügiseti on samal komponentitasemel hoonevariantide vahel üsna oluline erinevus, kõige madalama kütteenergiavajadusega hoonete puhul veebruaris isegi üle 50%. Seda hajuvust põhjustavad muud erinevused hoonevariantide vahel ehk põhiliselt hoone geomeetria.



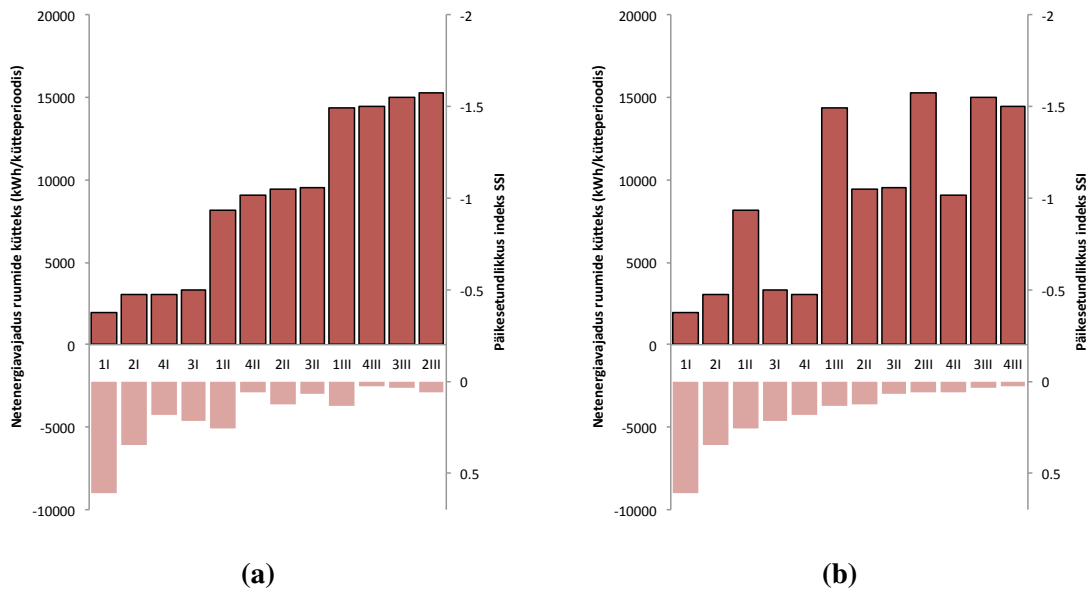
Joonis 11: Kõigi valitud hoonete kuupõhine netoenergiavajadus kütteks arvatatud PHPP meetodil.

Kütteperioodi bilanss kõigi hoonevariantide jaoks on toodud joonisel 12. On huvitav tõdeda, et kuigi kütteenergiavajadus tüübi numbriga väheneb, siis selles suunas kaod suurenevad. See on seotud klaaspindade suurenemisega, sest klaaspindade soojusläbivus on tasemetel I, II ja III puhul vastavalt 8, 5, 5, 4 ja 4, 4 korda suurem kui seintel. Veel on näha, et



Joonis 12: Kõigi valitud hoonevariantide arvutuslik soojusbilanss PHPP meetodil kütteperioodi oktoober-märts kohta.

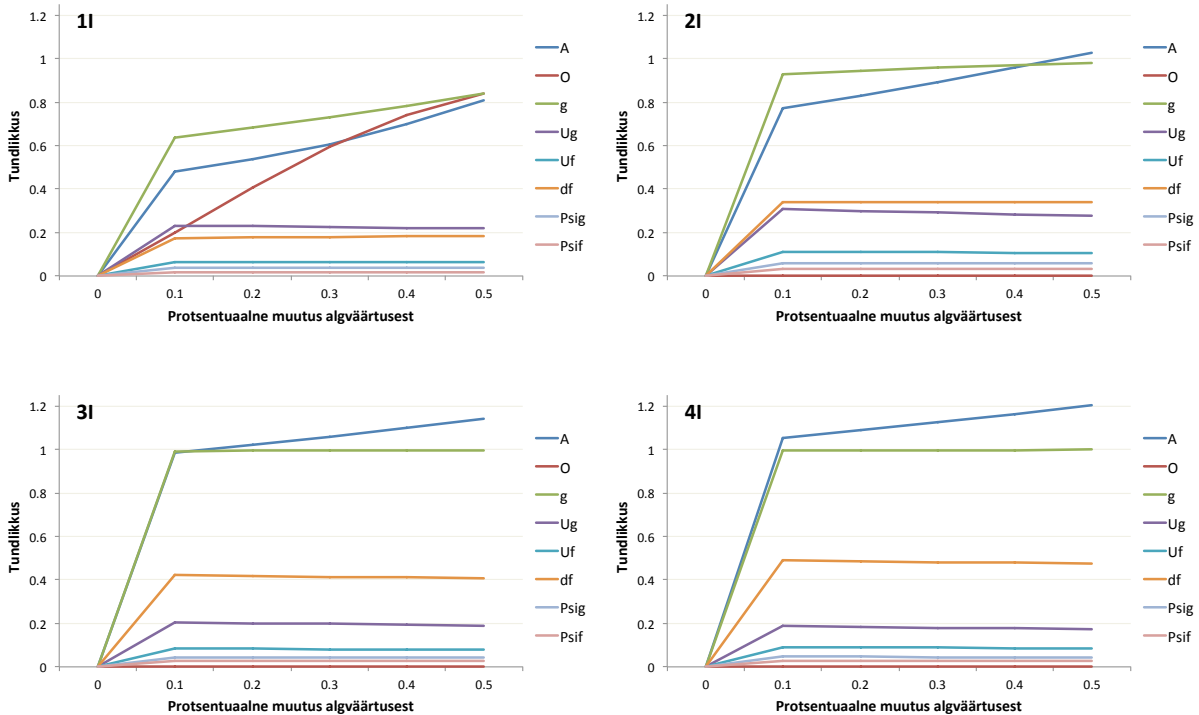
hoone 1I katab päikeseenergiaga ära umbes poole kadudest ning seega kütteenergiavajadus on väike. Samas on Q_h väiksem kui 1/3 kadudest ehk see on meie meetodika tingimuste äärealal ja antud hoone soojusbilansi peaks täpsema meetodika abil kontrollima. Teiste variantide puhul seda probleemi ei ole.



Joonis 13: Hoonevariandid järjestatud kahel viisil (a) kütteenergiavajaduse alusel (tumedamad tulbad, vasakpoolne skaala), (b) päikesetundlikkuse indeksi SSI alusel (heledad tulbad, parempoolne skaala).

Variantide järjestus kütteenergiavajaduse põhjal on toodud joonisel 13a. Kõigi variantide puhul väheneb komponentide energiatõhususe taseme tõstmisel netoenergiavajadus ruumide kütteks umbes 80%, kuid 1. hoonetüübi puhul on muutus kõige suurem (87%).⁴ Klaaspindade suurenemisel suureneb ka päikese panustatav vabasoojuse hulk. Vaatan nende samade hoonete järjestust peatükis 3.1 defineeritud indeksi, SSI alusel (joonis 13b). 1I jääb mõlemal juhul kõige paremaks ning 2I paremuselt teiseks versiooniks, kuid siin ei ole enam selgelt eristatavat tugevamat sõltuvust kas geometriast või komponentidest. Näha on aga see, et esimese hoonetüübi variandid on järjestuses oluliselt ettepoole nihkunud ning kõik neljanda hoonetüübi variandid tahapoole.

⁴1. tüübil 87%, 2. 80%, 3. 78% ja 4. 79%



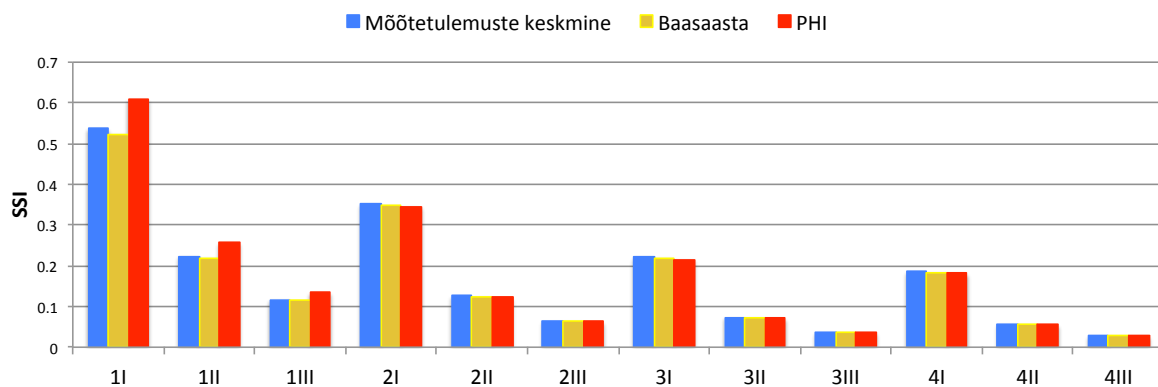
Joonis 14: Tundlikkuse analüüsi tulemused: tulemuse protsentuaalne muutus sisen-
di protsentuaalse muutuse kohta kõigi hoonetüüpide jaoks, kusjuures algenergiata-
se on I.

4.3.1 SSI tundlikkusanalüüs

SSI-le tehtud tundlikkusanalüüsi tulemused on esitatud joonisel 14. Kõige rohkem mõjutavad vaadeldava indeksi väärtust aknapindala vähenemine, peafassaadi lõunasuuna suhtes keeramine ning klaaside g -arv. Orientatsioon mõjutab muidugi ainult esimest tüüpi hoonet, sest teised on ilmakaarte suhtes sümmeetrilised. Aknapindala ja g -arv on see-eest väga olulised ka teiste hoonetüüpide puhul. Järgmise tasemena eralduvad klaasi soojusläbivus ning raami laius. Raami soojusläbivus SSId antud juhul väga palju ei mõjuta, sest selle algväärtus oli väga madal ja protsentuaalne muutus seega väike.

Kliimatiliste tingimuste mõju SSI-le uurides võrdlesin hoonete päikesetundlikkust PHI aas-
ta ja baasaasta kütteperioodidel mõõdetud andmete põhjal arvutatuga: arvutasin SSI aastate

1970-2012 jaoks ning leidsin keskmise. Neil kolmel viisil leitud indeksite võrdlus kõigi hoonetüüpide ja -tasemete jaoks on toodud joonisel 15, kus näeb kõigi hoonete keskmist SSI väärtust. Selgelt on teistest parem 1I, kuid on huvitav märgata, et enam-vähem samaväärsed tunduvad olevat komponentide kvaliteedi vähendamine (üleminek 1II-le) või geomeetriaalalt tähelepanu pööramine (üleminek 3I-le või 4I-le). Erinevused variantide vahel on suured – kui 1I suudab päikeseenergiaga katta üle poole kütteenergiavajadusest, jääb kõige kehvematel see alla kolme protsendi. Esimese hoonetüübi puhul on vaadeldavate kliimavariantide vahel suured erinevused. Seetõttu on üsna ilmne, et tegelike aastate vahel on erinevused veel suuremad, sest siin vaadeldud andmed on keskmistatud või neist on muul viisil äärmused välistatud. Samas ülejäänud variantidel erinevus väga välja ei tule. Seetõttu ongi põnev, kas need ka aastate jooksul kõiguvad ja kui palju.



Joonis 15: SSI kütteperioodi kohta PHI aastal ja baasaastal ning mõõdetud aastate kütteperioodide indeksi keskmine erinevate hoone variantide korral.

4.3.2 Hoonete soojusbilansi dünaamika 43 aasta jooksul

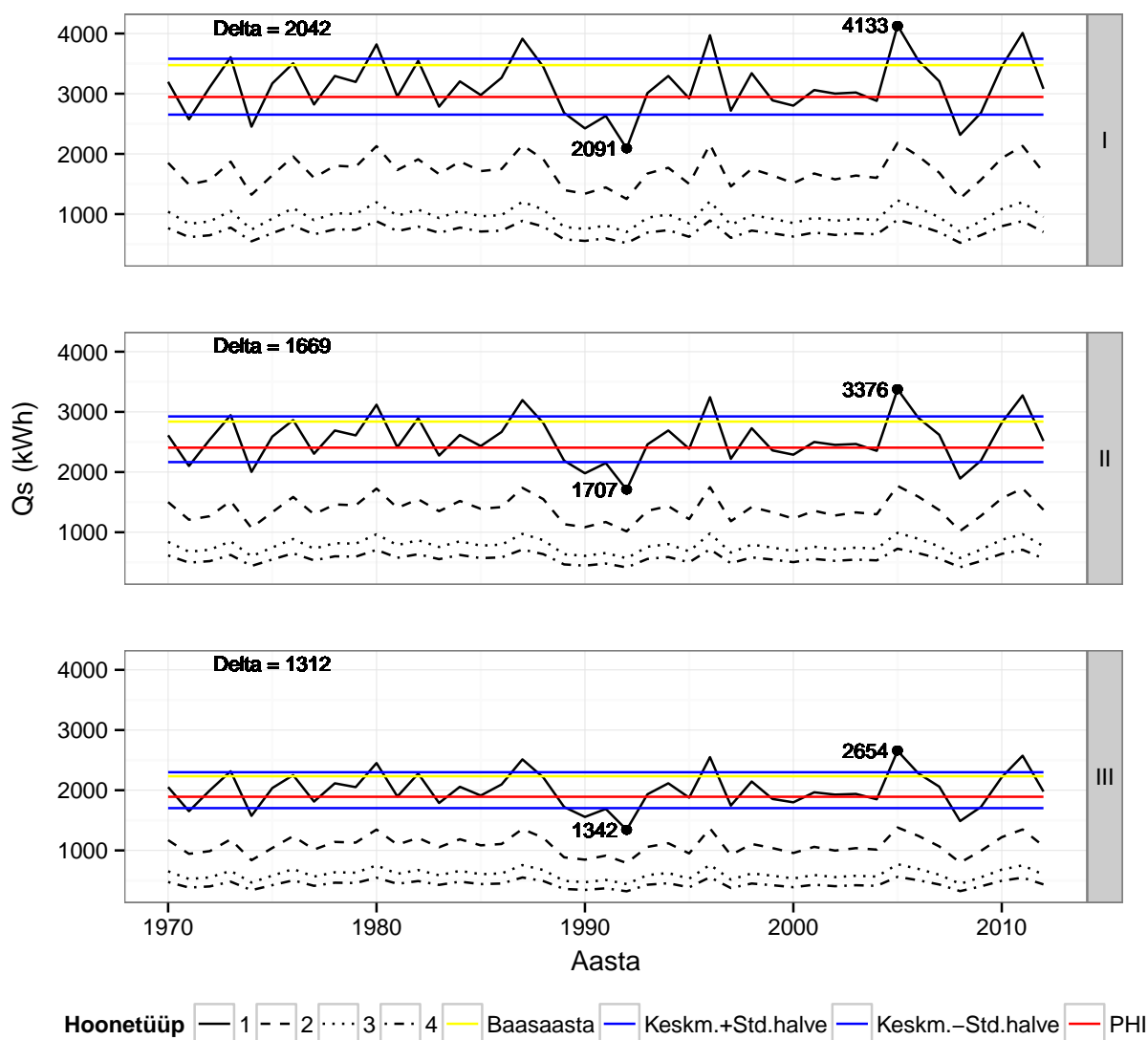
Peatükis analüüsin 43 aasta kliima dünaamikat erinevate hoonetüüpide energiabilansside kaudu. Esialgu vaatlen bilansi komponente eraldiseisvalt. Joonisel 16 on päikesekiirguse panustatava vabasoojuse varieerumine kütteperioodidel läbi aastate. Sama saab jälgida ka Q_L (joonis ??) ja SSI jaoks (joonis ??).

Q_s -i graafikult on näha, et esimest tüüpi hoones on päikese panustatavat vabasoojust läbi aastate kogu aeg oluliselt rohkem, kuid samas kõigub see aastast aastasse oluliselt suuremal määral.

Samuti väheneb nii absoluutväärtus kui ka kõikumise ulatus komponentide energiataset vähendades. Esimest tüüpi hoone puhul oli kõigil energiatasemetel Q_s kõige väiksem aastal 1992 ja kõige suurem aastal 2005. Ekstreemumite vahe on iga energiataseme jaoks graafikul toodud (Delta). Sarnaselt maksimaalsele amplituudile on ka standardhälve kehvemate komponentide korral samal hoonel oluliselt väiksem kui väga heade komponentidega variandil.

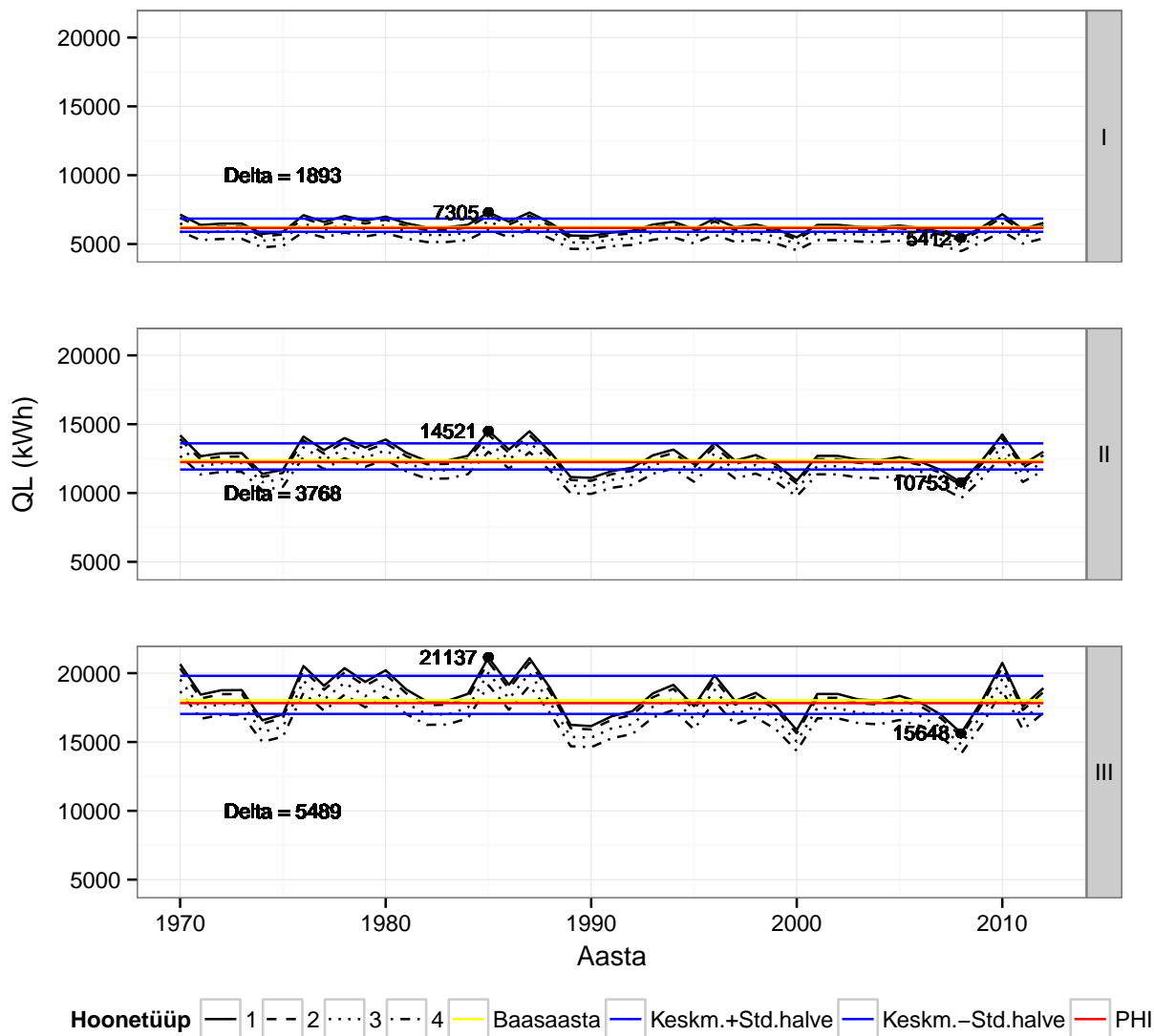
Põhjusel, et Q_L protsentuaalne jaotus ventilatsiooni- ja soojusläbivuskadude vahel on iga hoonetüübi puhul konstantne, ei ole nende kõikumist eraldi ära toodud vaid on vaadeldud summaarselt Q_L kõikumist. Selle asemel on nende protsentuaalne jaotus iga hoonetüübi puhul ära toodud lisas C. Graafikult nähtub, et Q_L kõigub oluliselt rohkem kehvemate komponentidega hoonete puhul. Maksimaalsete kadudega aasta oli 1985, kõige vähem oli kadusid aastal 2008.

SSI valemis on veel ka Q_{ihg} ja η , esimene neist on konstantne. Utiliseerimistegur küll muutub, kuid see on oluliselt seotud massiivsusega ja seda ma põhjalikult siin ei käsitle. Seega on SSI kõikumine põhiliselt seotud Q_s ja Q_L kõikumisega. SSI puhul võib sarnaselt Q_s -ga märgata oluliselt suuremat kõikumist esimest tüüpi hoone puhul, samas kui Q_s absoluutväärtus väga palju erinevate energiatasemete vahel ei muutunud, siis siin on sarnaselt Q_L -ga näha energiataseme vähenemisel ka SSI väärtuse vähenemist. Kui tasemetel I ja II on SSI maksimaalne amplituud aastate jooksul umbes 10%, siis esimesel energiatasemel on see üle 20 protsendi. Veel on huvitav, et muidu keskmise aastana esinenud baasaastal on SSI väärtus suurem isegi ülemisest standardhälbe piirist.

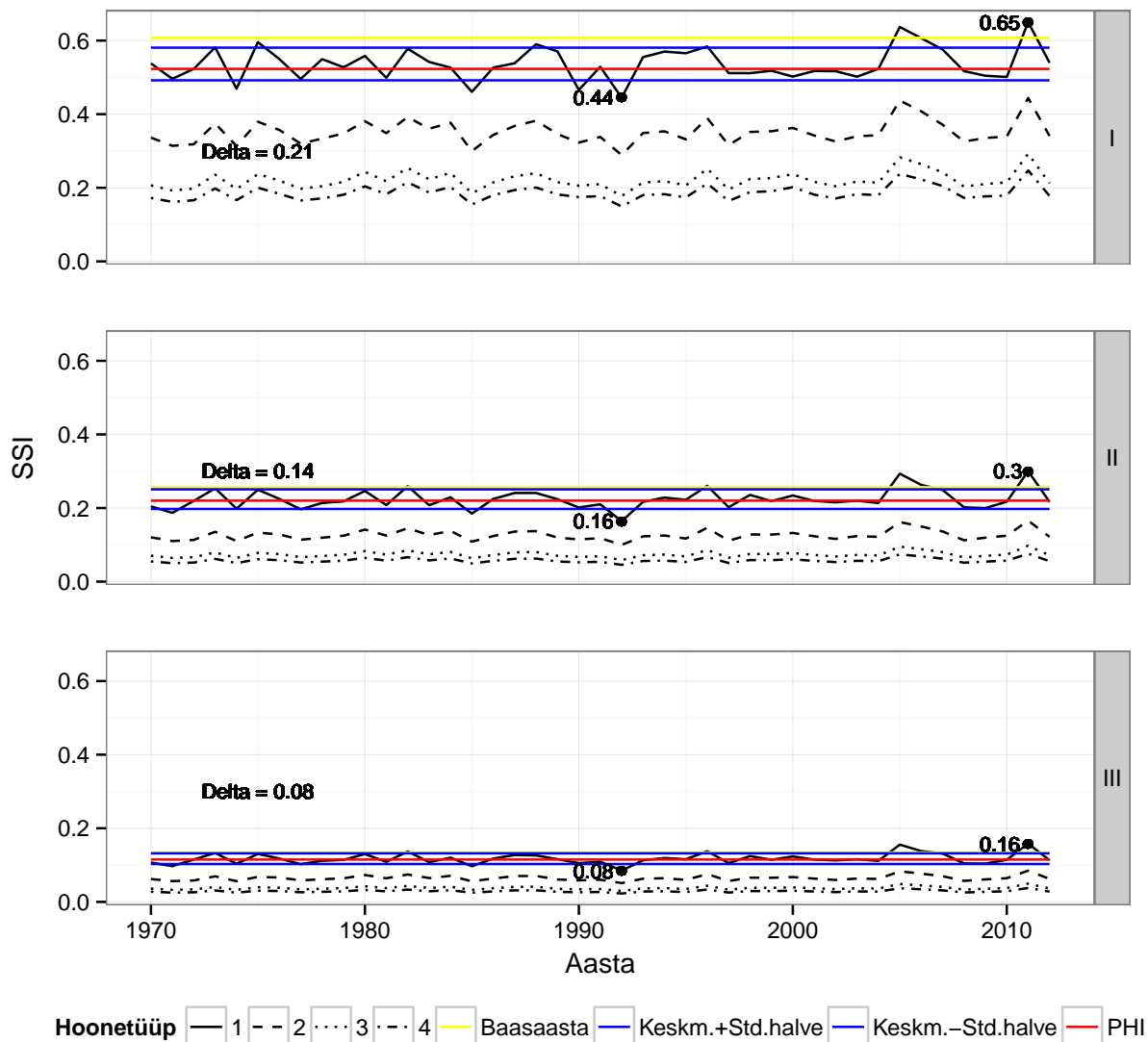


Joonis 16: Päikesekiirguse panustatava vabasoojuse arvutuslik hulk kütteperioodil aastatel 1970-2012. Välja on toodud hoonetüübi 1 jaoks kõigil energiatasemetel tulemused PHI ja Baasaasta kasutamisel ning kõikumise ühe sigma vahemik. Lisaks on märgitud ka aastad, kus Q_s on maksimaalne (2005) ja minimaalne (1992) koos vastavate väärtuste ja nende erinevusega (Delta).

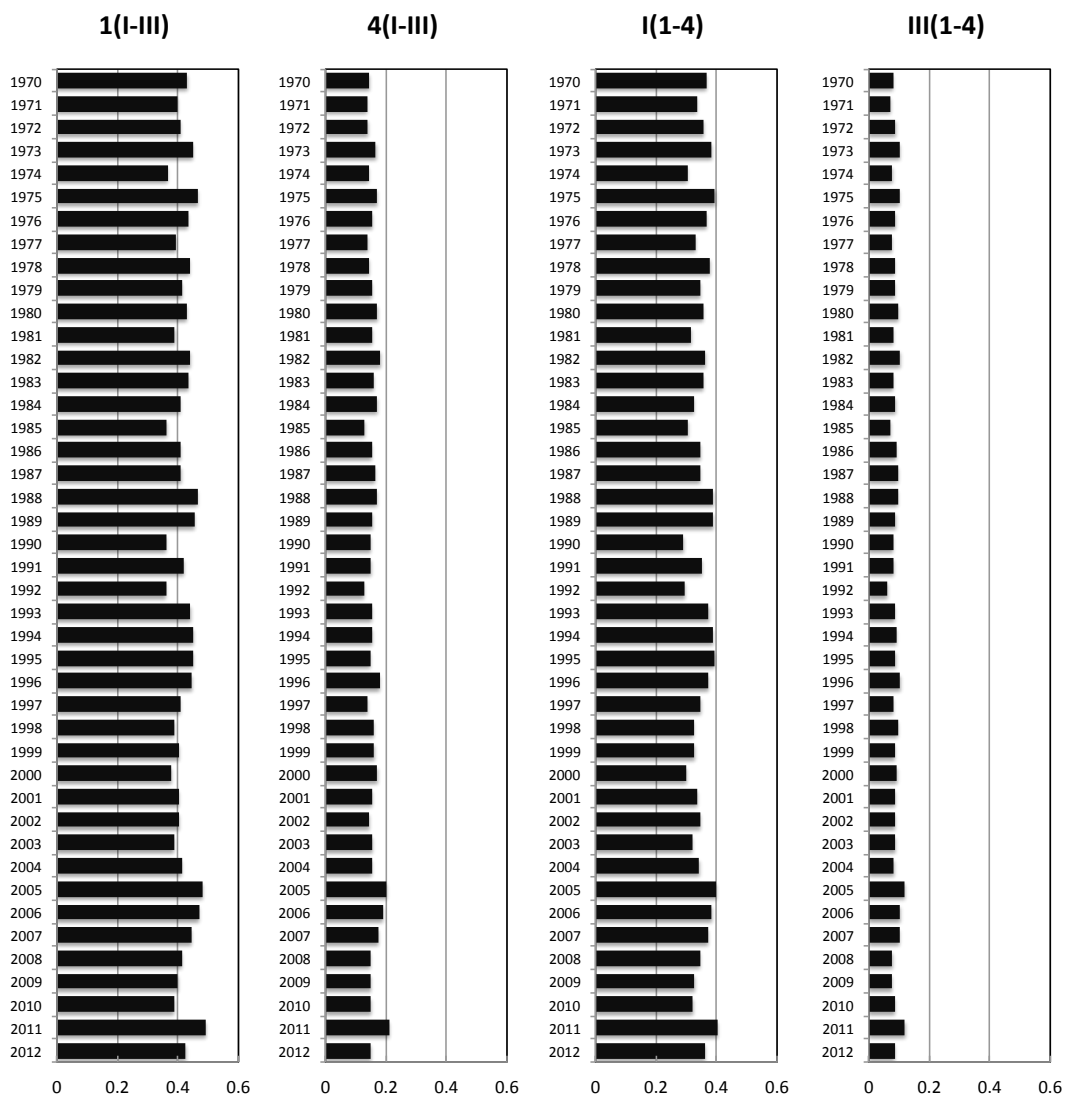
Püüame veelgi ilmestada erinevusi hoone geometria ja komponentide mõjul vaadeldes seni toodud kõikumise asemel absoluutset vahet erinevate variantide vahel. Vaatlen erinevusi kahe äärmise tüübi ja äärmiste tasemete vahel (joonis 19). Siit graafikult on näha, et valinud väga head komponendid või väga hea geometria, mõjutab ka teise osa valik palju hoone päikese-



Joonis 17: Arvutuslikud soojuskaod kütteperioodil aastatel 1970-2012. Välja on toodud hoonetüübi 1 jaoks kõigil energiatasemetel tulemused PHI ja Baasaasta kasutamisel ning kõikumise ühe sigma vahemik. Lisaks on märgitud ka aastad, kus Q_L on maksimaalne (2008) ja minimaalne (1985) koos vastavate väärtuste ja nende erinevusega (Delta).



Joonis 18: SSI kütteperioodil aastatel 1970-2012. Välja on toodud hoonetüübi I jaoks kõigil energiatasemetel tulemused PHI ja Baasaasta kasutamisel ning kõikumise ühe sigma vahemik. Lisaks on märgitud ka aastad, kus SSI on maksimaalne (2011) ja minimaalne (1992) koos vastavate väärtuste ja nende erinevusega (Delta).



Joonis 19: SSI kütteperioodil aastatel 1970-2012.

kasutust. Võimalike valikute vahel on siin toodud näidete puhul umbes 40%. Kui valitakse aga halb geomeetria või vähem kvaliteetsed komponendid, ei mõjuta enam teise valik kuigi palju, erinevus valikute vahel jääb oluliselt alla 20 protsendi. Samas on näha, et komponentide taseme varieerimine mõjutab fikseeritud geomeetriat veidi rohkem kui geomeetria valik fikseeritud energiataset.

5 Kokkuvõte

Euroopas on üha suurema tähelepanu all hoonete energiavajadus ning propageeritakse null-energiahooneid, mis peaksid kogu tarbitava energia ise tootma. Taolise eesmärgi saavutamiseks tuleks hoone energiavajadus viia võimalikult madalale. Kuna energiavajadusest umbes 70% kuulub tavaliselt ruumide kütmiseks, pöörati antud töös põhirõhk just küttevajaduse vähendamise võimalustele. Uuriti hoone geomeetria ja komponentide mõju, et Eesti kliimas päikeseenergiat paremini ära kasutada.

Pikaajaliste kliimaandmete põhjal ei ole Eestis seni uuritud hoonete energiatarvet. Pole ka analüüsitud päikese passiivse kasutuse potentsiaali, kuigi seda on tehtud teistes põhjamaades. Kirjeldati Eesti kliimat hoone kontekstis ning piiritleti kütteperiood, milleks sai 6-kuune ajavahemik oktoobrist märtsini. Kirjanduse põhjal uuriti, kuidas võiks kirjeldada passiivset päikeseenergia kasutust hoones. Leiti GLR, mida veidi modifitseerides pakuti välja uus päikesetundlikkuse indeks

$$SSI = \frac{\sum_{kuu=1}^6 (\eta_{kuu} \cdot Q_{s,kuu})}{\sum_{kuu=1}^6 (Q_{L,kuu} - \eta_{kuu} \cdot Q_{IHG,kuu})}$$

Töös analüüsiti eraldi akende soojusbilansi Eesti kliimas ning leiti, et kütteperioodi positiivse akende soojusbilansi saavutamiseks peaks raami osa klaasist moodustama võimalikult väikese osa, maksimaalselt 30%, isegi nii hea raamide soojusläbivuse korral kui $0,54 \text{ W/m}^2\text{K}$. Klaasi U_g väärtus ei tohiks olla suurem kui $0,95 \text{ W/m}^2\text{K}$ ning g väärtus alla 0,6.

Analüüsiti hoone geomeetria ja komponentide mõju defineeritud indeksile Eesti kliimas nii standardaasta kui ka 43 aasta Eesti kliima dünaamika põhjal. Selleks valiti 4 erinevat hoone tüüpi ning igapähe jaoks neist arvutati soojusbilans kolme erineva komponentide kombinatsiooniga. Oodatult oli komponentide mõju hoonete kütteenegiavajadusele määrava tähtsusega. Hoonete päikesetundlikkuse indeks SSI sõltus olulisel määral ka hoone geomeetriast. Fikseeritud energiatõhusustaseme korral tehtud hoone tüübivalikul oli erinevate variantide SSI-de vahe 40%.

Suurte lõunasse suunatud akendega hoone puhul varieerus päikesekiirguse panustatava vaba-

soojuse hulk aastast aastasse oluliselt rohkem kui ilmakaarte suhtes sümmeetriliste hoonete puhul. Samuti kõikus päikese kasutus väga hea energiatõhususe tasemega hoonetel oluliselt rohkem kui suurema kütteenergiavajadusega hoonetel.

Töös uuriti hoone päikeseenergia passiivset kasutamist kuubilansi meetodil, sest eesmärk oli uurida pikaajalisi tendentse. Edasi võiks uurida tunniandmete põhjal hoone päikesekasutuse dünaamikat näiteks väga külmade ja selgete päevade ja nädalate jaoks Eesti kliimas, et selgitada massiivsuse mõju. Samuti tasuks uurida jahutusvajadust päikest hästi ära kasutavates hoonetes.

6 Tänuõnad

Soovin tänada oma juhendajaid Tõnu Muringut ja Erko Jakobsoni juhtnööride eest, mis mind õigel teel hoidsid ja liialt detailidesse laskuda ei lubanud, kuid samas vajalikul määral ka sinna juhatasid. Minu eriline tänu kuulub laborikaaslasele Jaanus Hallikule, kelle mitmeid ettepanekuid ka töös kasutasin. Arutelud temaga on alati lõbusad, ideederohked ja motiveerivad. Tänan ka kõiki teisi töökaaslasi alati toetava hoiaku ja abivalmiduse eest.

Tänan Targo Kalameest, kelle käest jõudsid minuni baasaasta koostamiseks kasutatud kliimaandmed. Tänan Kalju Eermet jagamast oma kliimaandmestiku koondatud versiooni ning mitmeid häid viiteid. Tänan EMHI töötajat EMHI klienditeeninduse osakonna peaspetsialisti, Valeria Siirandi vastutuleliku ja kiire infovahetuse eest, tänu millele ka Tõraveres mõõdetud kõige uuemad kliimaandmed minuni jõudsid.

Suur aitäh perele ja sõpradele töö üle kontrollimise eest.

7 Summary

Europe has declared to decrease its greenhouse gas emissions and therefore very much attention is paid for buildings' energy efficiency. A new concept of nearly zero energy buildings has been introduced where most of the energy used in a building has to be also produced there. As for limited resources in private housings, the consumption has to be very low. This consists 70% of energy for heating which is the reason this thesis looks for solutions decreasing it. The impact of building's components and geometry on passive solar energy use in Estonian climate is studied.

Building energy use has not been studied in Estonia using long-term climate data. Although passive solar heating potential has been studied in Sweden, it has not been in Estonia.

In this work Estonian climate was described in the context of buildings. Local constant heating period was looked for and a period of 6 months from October to March was selected in respect to the climate data. Literature was reviewed to find a way to describe passive solar energy use in building as whole. Similar to others, however a bit different new index was introduced, a building passive solar sensitivity index (SSI):

$$SSI = \frac{\sum_{month=1}^6 (\eta_{month} \cdot Q_{s,month})}{\sum_{month=1}^6 (Q_{L,month} - \eta_{month} \cdot Q_{IHG,month})}$$

Separately from buildings window solar balance was analysed. The results show that only south-faced window can acquire positive balance in the heating period. Moreover, the windows should have maximum fragmentation of 30% even with a frame as good as $U_f = 0.54 \text{ W/m}^2\text{K}$. The glazing U-value should remain below $0.95 \text{ W/m}^2\text{K}$ and g -value should exceed 0.6.

Both for Estonian standard climate and measured 43 years the impact of building geometry and components on the defined index was analysed. Four types of buildings with different geometry were chosen and three levels of efficiency of components. Energy balance for all combinations was calculated using PHPP2007 method relying on European standard ISO 13 790. The impact of the components was found to be essential. However, SSI depends also on building geometry.

There was 40% difference found for buildings with best components but varying design.

Solar gain was found to change more from year to year in a south-oriented building in comparison with symmetric buildings. The dynamics had greater amplitude also for the best quality components compared to lower level ones.

For this study included the calculations only with monthly method for energy balance calculations, in future also dynamic simulations could be made to assess a shorter period dynamics of a very cold and clear winter day or week. What is more, also summer overheat questions should be solved for the buildings using solar energy very well.

Kasutatud kirjandus

- [1] EU Energy Policy for Buildings after the recast. URL: http://ec.europa.eu/energy/efficiency/doc/buildings/presentation_general_short.pdf (viimati külastatud 05/28/2013).
- [2] Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings. (), URL: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32010L0031:EN:NOT> (viimati külastatud 05/28/2013).
- [3] Package of Implementation measures for the EU's objectives on climate change and renewable energy for 2020. URL: http://ec.europa.eu/clima/policies/package/docs/sec_2008_85_ia_en.pdf (viimati külastatud 05/28/2013).
- [4] A new Directive on Energy Efficiency - Challenges addressed and solutions proposed. URL: http://ec.europa.eu/energy/efficiency/eed/doc/2011_directive/20110622_energy_efficiency_directive_slides_presentation_en.pdf (viimati külastatud 05/28/2013).
- [5] Energiasäästu blogi - Eesti Energia. URL: <https://www.energia.ee/kokkuhoid/blogi/-/blogs/2013/04/09/eramutes-saastetakse-rohkem-energiat-kui-korterites> (viimati külastatud 05/28/2013).
- [6] Energiatõhususe miinimumnõuded. URL: <https://www.riigiteataja.ee/akt/105092012004> (viimati külastatud 05/28/2013).
- [7] J. Kurnitski et al., Cost optimal and nearly zero (nZEB) energy performance calculations for residential buildings with REHVA definition for nZEB national implementation. *Energy and Buildings* 43 (11) (Nov. 2011) 3279–3288, DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.08.033.
- [8] Energy Efficiency Trends in Buildings in the EU. URL: <http://www.odyssee-indicators.org/publications/PDF/Buildings-brochure-2012.pdf> (viimati külastatud 05/28/2013).
- [9] Thermal Balance of Buildings. URL: <https://www.educate-sustainability.eu/portal/content/thermal-balance-buildings> (viimati külastatud 05/28/2013).

- [10] P. Depecker et al., Design of buildings shape and energetic consumption. *Building and Environment* 36 (5) (2001) 627–635, DOI: 10.1016/S0360-1323(00)00044-5.
- [11] Sun: Facts & Figures. URL: <http://solarsystem.nasa.gov/planets/profile.cfm?Display=Facts&Object=Sun> (viimati külastatud 05/28/2013).
- [12] G. Kopp, J. L. Lean, A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance. *Geophysical Research Letters* 38 (1) (2011), DOI: 10.1029/2010GL045777.
- [13] Solar Spectral Irradiance: Air Mass 1.5. URL: <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/> (viimati külastatud 05/28/2013).
- [14] D. Thevenard, K. Haddad, Ground reflectivity in the context of building energy simulation. *Energy and Buildings* 38 (8) (2006) 972–980, DOI: 10.1016/j.enbuild.2005.11.007.
- [15] V. Russak, A. Kallis, Eesti kiirguskliima teatmik (Handbook of Estonian solar radiation climate). (2003), URL: http://scholar.google.com/scholar?q=related:00ptDt64mSEJ:scholar.google.com/&hl=en&num=20&as_sdt=0,5.
- [16] Y. G. Yohanis, B. Norton, Useful solar heat gains in multi-zone non-domestic buildings as a function of orientation and thermal time constant. *Renewable Energy* 27 (1) (2002) 87–95, DOI: 10.1016/S0960-1481(01)00163-X.
- [17] Windows for High-performance Commercial Buildings. URL: <http://www.commercialwindows.org/technologies.php> (viimati külastatud 05/28/2013).
- [18] C. Demain, M. Journée, C. Bertrand, Evaluation of different models to estimate the global solar radiation on inclined surfaces. *Renewable Energy* 50 (2013) 710–721, DOI: 10.1016/j.renene.2012.07.031.
- [19] P. G. Loutzenhiser, G. M. Maxwell, H. Manz, An empirical validation of the daylighting algorithms and associated interactions in building energy simulation programs using various shading devices and windows. *Energy* 32 (10) (2007) 1855–1870, DOI: 10.1016/j.energy.2007.02.005.
- [20] D. A. Chwieduk, Recommendation on modelling of solar energy incident on a building envelope. *Renewable Energy* 34 (3) (2009) 736–741, DOI: 10.1016/j.renene.2008.04.005.

- [21] M. David, P. Lauret, J. Boland, Evaluating tilted plane models for solar radiation using comprehensive testing procedures, at a southern hemisphere location. *Renewable Energy* 51 (2013) 124–131, DOI: 10.1016/j.renene.2012.08.074.
- [22] C. K. Pandey, A. K. Katiyar, A comparative study of solar irradiation models on various inclined surfaces for India. *Applied Energy* 88 (4) (2011) 1455–1459, DOI: 10.1016/j.apenergy.2010.10.028.
- [23] A. M. Muzathik et al., Estimation of global solar irradiation on horizontal and inclined surfaces based on the horizontal measurements. *Energy* 36 (2) (2011) 812–818, DOI: 10.1016/j.energy.2010.12.035.
- [24] E. G. Evseev, A. I. Kudish, The assessment of different models to predict the global solar radiation on a surface tilted to the south. *Solar Energy* 83 (3) (2009) 377–388, DOI: 10.1016/j.solener.2008.08.010.
- [25] F. Ascione et al., Solar gain and building envelope: the surface factor. *Building Research & Information* 38 (2) (2010) 187–205, DOI: 10.1080/09613210903529118.
- [26] Pääkesekiirgus. Aastaegade vaheldumine. URL: http://www.pkpk.ee/pages/files/ehitusfyysika/Konspekt_8.pdf (viimati külastatud 05/28/2013).
- [27] Heating & Cooling, Insulation & Ventilation. URL: http://www.recycleworks.org/greenbuilding/gbg_heating_and_cooling.html (viimati külastatud 05/28/2013).
- [28] EVS-EN 410:1999 Klaas ehitusmaterjalina. (Viimati külastatud 05/28/2013).
- [29] J. Karlsson, Windows: optical performance and energy efficiency. (2001) 49, URL: <http://uu.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:161001>.
- [30] H. Bülow-Hübe, Important design aspects of a very low-energy building. (2011), URL: http://www.northpass.ivl.se/download/18.750e3680136adb9f80580006216/Database+design+aspects_2011-12-16rev.pdf.
- [31] P. R. Lyons, D. Arasteh, C. Huizenga, Window performance for human thermal comfort. *Transactions - American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers* 106 (1) (2000) 594–604, URL: <http://gaia.lbl.gov/btech/papers/44032.pdf>.

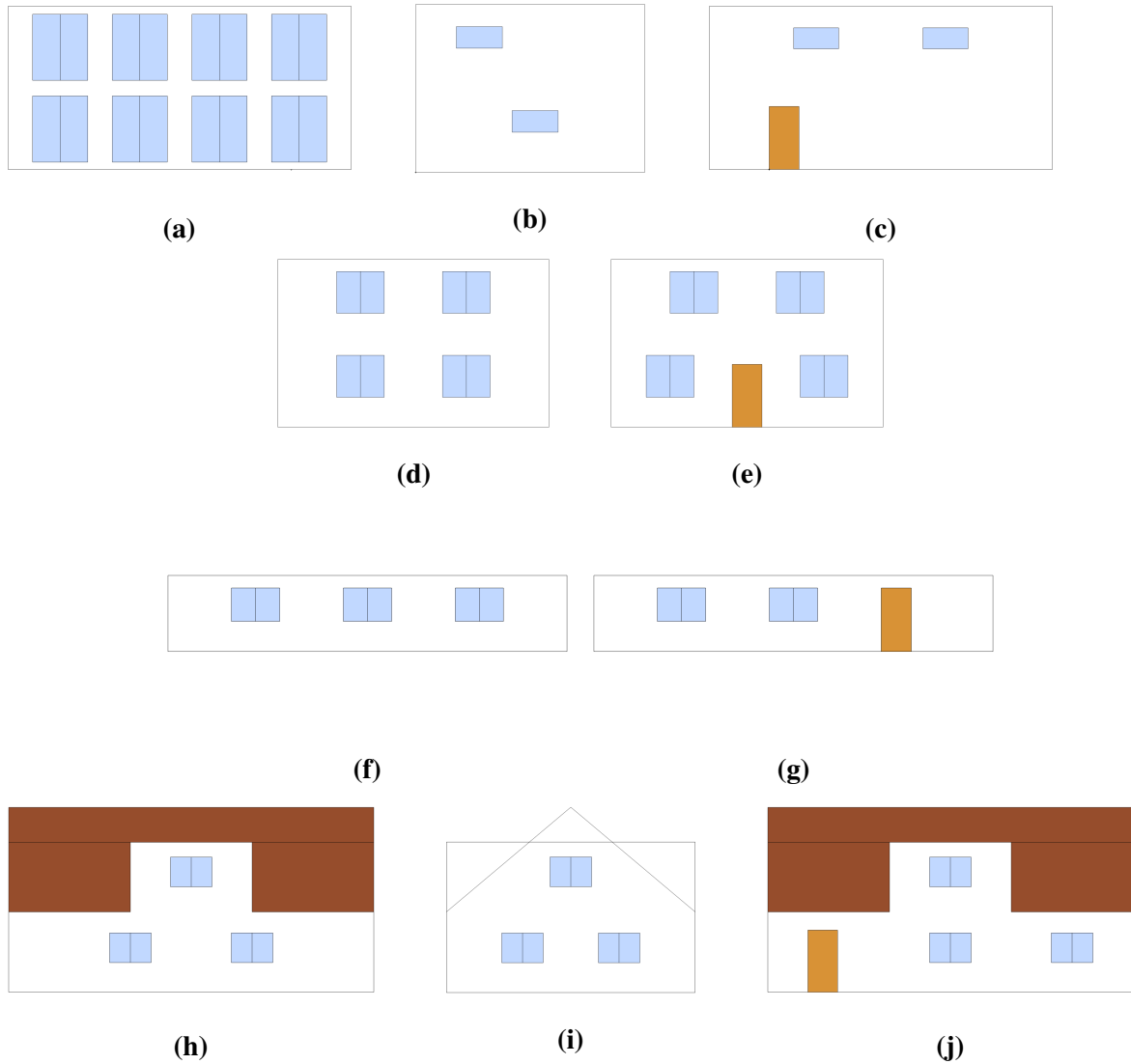
- [32] M.-L. Persson, A. Roos, M. Wall, Influence of window size on the energy balance of low energy houses. *Energy and Buildings* 38 (3) (2006) 181–188, DOI: 10.1016/j.enbuild.2005.05.006.
- [33] A. Capozzoli, H. E. Mechri, V. Corrado, Impacts of architectural design choices on building energy performance. Applications of uncertainty and sensitivity techniques. Eleventh International IBPSA Conference (2009) 1000–1007, URL: http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2009/BS09_1000_1007.pdf.
- [34] H. E. Mechri, A. Capozzoli, V. Corrado, USE of the ANOVA approach for sensitive building energy design. *Applied Energy* 87 (10) (2010) 3073–3083, DOI: 10.1016/j.apenergy.2010.04.001.
- [35] H. Bülow-Hübe, The effect of glazing type and size on annual heating and cooling demand for Swedish offices. In: *Proceedings of Renewable Energy Technologies in Cold Climates*, 1998, URL: http://www.belok.se/docs/dagsljus/3_varme_och_kylbehov.pdf.
- [36] K. Hassouneh, A. Alshboul, A. Al-Salaymeh, Influence of windows on the energy balance of apartment buildings in Amman. In: *Energy Conversion and Management*, Univ Jordan, Fac Engn {&} Technol, Architecture Engn Dept, Amman 11942, Jordan, 2010 1583–1591, DOI: 10.1016/j.enconman.2009.08.037.
- [37] R. M. J. Bokel, The effect of window position and window size on the energy demand for heating, cooling and electric lighting. *Building Simulation 2007* (2007) 117–121, URL: http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2007/p542_final.pdf.
- [38] Insulation vs. thermal mass. URL: [http://passipedia.passiv.de/passipedia_en/planning/thermal_protection/thermal_protection_works/thermal_protection_vs._thermal_storage?s\[\]=time&s\[\]=constant](http://passipedia.passiv.de/passipedia_en/planning/thermal_protection/thermal_protection_works/thermal_protection_vs._thermal_storage?s[]=time&s[]=constant) (viimati külastatud 05/28/2013).
- [39] J. D. Balcomb, R. D. McFarland, Simple empirical method for estimating the performance of a passive solar heated building of the thermal storage wall type. (1978), URL: http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=5012909.

- [40] Y. G. Yohanis, B. Norton, Utilization factor for building solar-heat gain for use in a simplified energy model. *Applied Energy* 63 (4) (1999) 227–239, DOI: 10.1016/S0306-2619(99)00032-X.
- [41] A. Korjenic, T. Bednar, Transformation of Fundamental Parameters for Energy Demand and Indoor Temperature from Room Level to Building Level. *Journal of Building Physics* 33 (4) (2010) 327–355, DOI: 10.1177/1744259109358284.
- [42] K. Eerme, Interannual and intraseasonal variations of the available solar radiation. Solar radiation (toimetaja E. B. Babatunde) (2012) 953–978, URL: http://cdn.intechopen.com/pdfs/33343/InTech-Interannual_and_intraseasonal_variations_of_the_available_solar_radiation.pdf.
- [43] T. Kalamees, J. Kurnitski, Estonian test reference year for energy calculations. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Engineering* 12 (1) (2006) 40–58, URL: http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=wWK2EBgSriEC&oi=fnd&pg=PA40&dq=Estonian+test+reference+year+for+energy+calculations&ots=A84_OP4hCC&sig=pTDa6qfNPGXFXBZ92xYpRpLuLY8
- [44] T. Kalamees et al., Development of weighting factors for climate variables for selecting the energy reference year according to the EN ISO 15927-4 standard. *Energy and Buildings* 47 (Apr. 2012) 53–60, DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.11.031.
- [45] T. Kalamees, J. Vinha, J. Kurnitski, Indoor Humidity Loads and Moisture Production in Lightweight Timber-frame Detached Houses. *Journal of Building Physics* 29 (3) (2006) 29, DOI: 10.1177/1744259106060439.
- [46] T. Kalamees, Indoor Climate Conditions and Ventilation Performance in Estonian Lightweight Detached Houses. *Indoor and Built Environment* 15 (6) (2006) 16, DOI: 10.1177/1420326X06073076.
- [47] L. Yang, J. C. Lam, C. L. Tsang, Energy performance of building envelopes in different climate zones in China. *Applied Energy* 85 (9) (2008) 800–817, DOI: 10.1016/j.apenergy.2007.11.002.
- [48] Passivhaus Institut. URL: http://passiv.de/en/04_php/04_php.htm (viimati külastatud 05/28/2013).
- [49] PHPP Passive House Design Package. URL: http://www.passivhaustagung.de/Passive_House_E/PHPP.html (viimati külastatud 05/28/2013).

- [50] W. Feist et al., Passive House Planning Package Version 7 (2012) Requirements for a quality-approved Passive House. URL: <http://passiv.de/en/> (viimati külastatud 05/28/2013).
- [51] J. der Veken et al., Comparison of steady-state and dynamic building energy simulation programs. (2004), URL: <http://www.ornl.gov/sci/buildings/2012/2004/121.PDF>.
- [52] S. N. Murray, B. Rocher, D. T. J. O'Sullivan, Static Simulation: A sufficient modelling technique for retrofit analysis. *Energy and Buildings* 47 (Apr. 2012) 113–121, DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.11.034.
- [53] Building Energy Software Tools Directory: PHPP. URL: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools/_directory/software.cfm/ID=549/pagename=alpha/_list/_sub (viimati külastatud 05/28/2013).
- [54] EVS-EN ISO 13790:2008 Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling. (), URL: https://wiki.umn.edu/pub/PA5721/_Building/_Policy/WebHome/LEEDENERGYSTAR/_STUDY.pdf (viimati külastatud 05/28/2013).
- [55] G. Haese, Analysis of the influences of solar radiation and facade glazing areas on the thermal performance of multi-family buildings. 2010, URL: <http://www.gartenheim.de/fileadmin/media/PDF/dissertation.pdf>.
- [56] Hoonete energiatõhususe arvutamise meetodika. URL: <https://www.riigiteataja.ee/akt/118102012001> (viimati külastatud 05/28/2013).
- [57] Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituut. URL: <http://www.emhi.ee/> (viimati külastatud 05/28/2013).

Lisa A Sisendandmed

Katses kasutatud hooned



Joonis 20: Igas reas on üks hoonetüüp, esimeses reas tüüp 1 (a-c), teises reas tüüp 2 (d-e), kolmandas reas tüüp 3 (f-g), neljandas reas tüüp 4 (h-j). Vasakpoolne vaade on kõigil lõunafassaad, parempoolne põhjafassaad. 1. ja 4. tüübil on ida- ja läänefassaad lõunafassaadist erinevad ja seetõttu keskmisena välja toodud (b,i). 2. ja 3. tüübil on ida-, lääne- ja lõunafassaad identsed.

Töös kasutatud hoonetüüpide sisendandmed

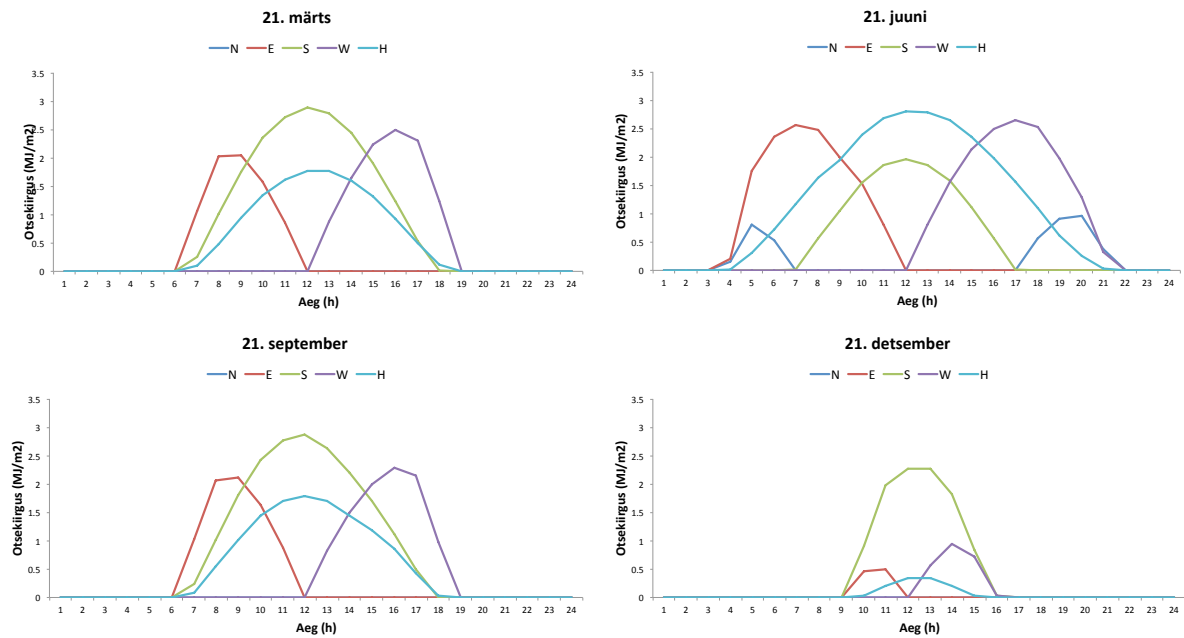
Orientatsioon	arv	laius	kõrgus	pindala		sisemõõtmed
N	2	1.5	0.7	2.1	h	5.44
E	2	1.5	0.7	2.1	a	11.46
W	2	1.5	0.7	2.1	b	7.46
S	16	0.92	2.2	32.38	V (kontroll)	400.6
	Pindala	38.68			S (kontroll)	153.9
N	8	0.8	1.4	8.96	h	5.61
E	8	0.8	1.4	8.96	a	9.1
W	8	0.8	1.4	8.96	b	9.1
S	8	0.8	1.4	8.96	V (kontroll)	400.7
	Pindala	35.84			S (kontroll)	149.1
N	6	0.8	1.1	5.28	h	2.51
E	6	0.8	1.1	5.28	a	13.2
W	6	0.8	1.1	5.28	b	13.2
S	6	0.8	1.1	5.28	V (kontroll)	400.8
	Pindala	21.12			S (kontroll)	156.8
N	6	0.7	1	4.2	h	4.54
E	6	0.7	1	4.2	a	12.3
W	6	0.7	1	4.2	b	8.4
S	6	0.7	1	4.2	V (kontroll)	400.3
	Pindala	16.8			S (kontroll)	186.0

Töös kasutatud energiatasemete sisendandmed

	I	II	III	Ühik
Ψ_{geom}	-0.02	0	0.02	W/mK
U_{uks}	0.8	1.1	1.4	W/m ² K
U_{sein}	0.081	0.166	0.250	W/m ² K
d_{sein}	0.544	0.369	0.194	m
$U_{põrand}$	0.066	0.133	0.200	W/m ² K
$d_{põrand}$	0.672	0.497	0.322	m
U_{katus}	0.07	0.14	0.20	W/m ² K
d_{katus}	0.644	0.444	0.244	m
g	0.62	0.52	0.42	- (%)
U_g	0.69	0.90	1.10	W/m ² K
U_f	0.54	1.02	1.50	W/m ² K
d_f	0.086	0.093	0.100	m
Ψ_g	0.027	0.044	0.060	W/mK
Ψ_f	0.018	0.029	0.040	W/mK
Φ_{HR}	0.93	0.47	0	%
n_{50}	0.4	0.7	1.0	1/h

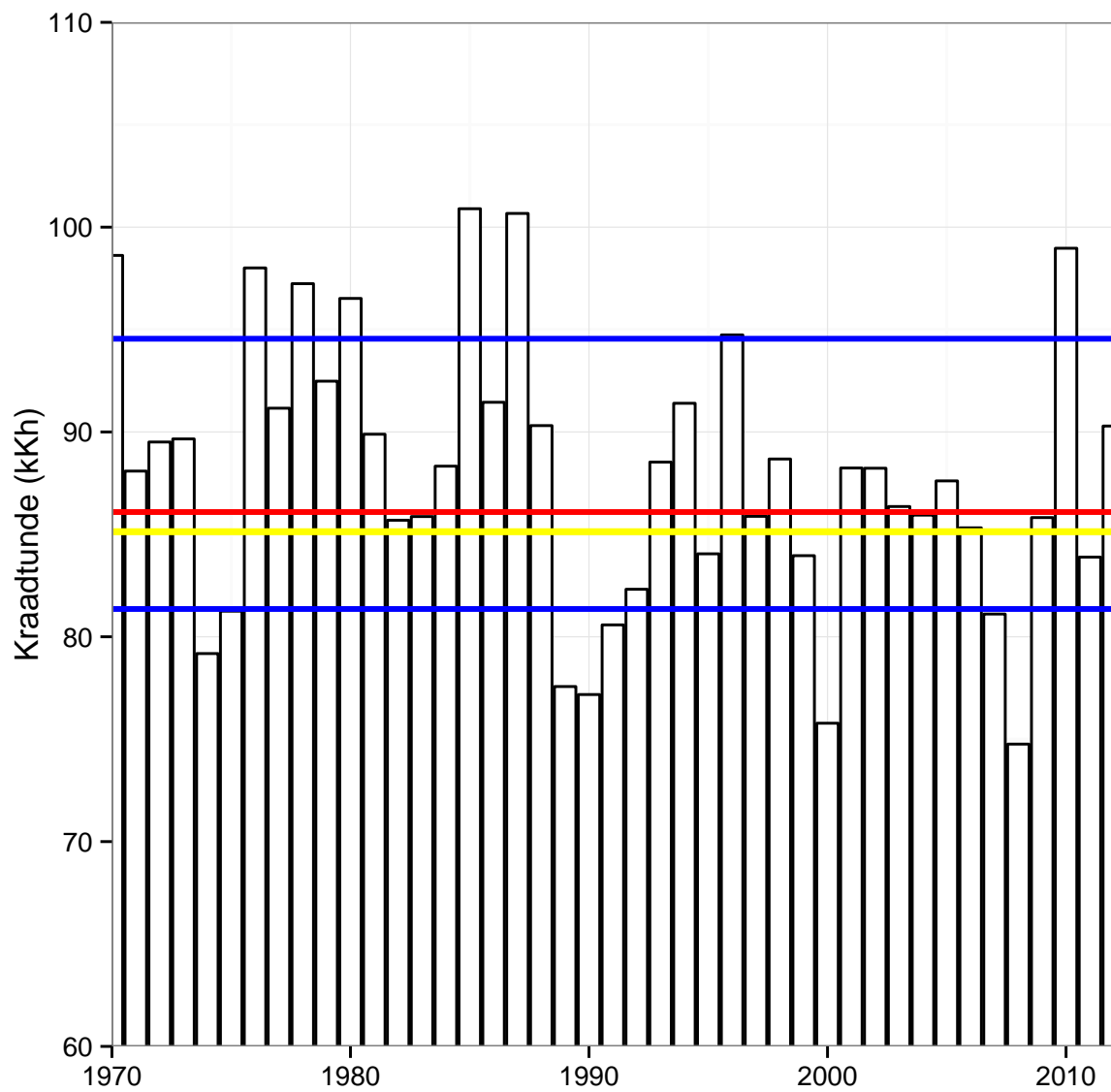
Lisa B Kliimaandmed

Otsekiirgus vertikaalpinandele pööripäevadel



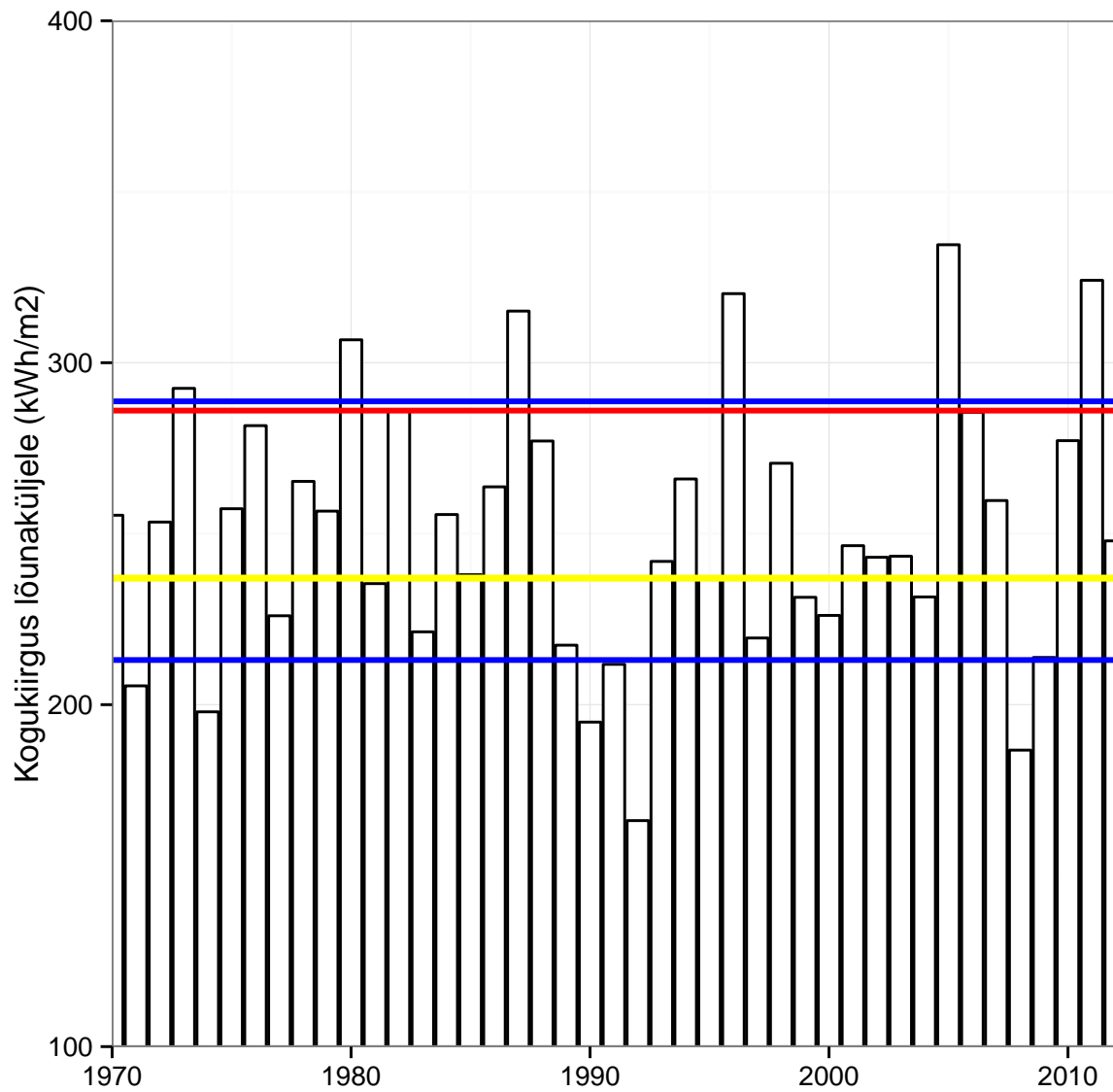
Joonis 21: Tõraveres EMHI mõõdetud andmete põhjal leiti kõigi pööripäevade paiku maksimaalse kiirguse päevasummaga aasta ning esitati vastava päeva kiirgusintensiivsused erinevatele vertikaal- ja horisontaalpindadele.

Kraadtunnid



Joonis 22: Tõraveres EMHI mõõdetud andmete ja standardaastate kraadtundide arv perioodil oktoober-märts.

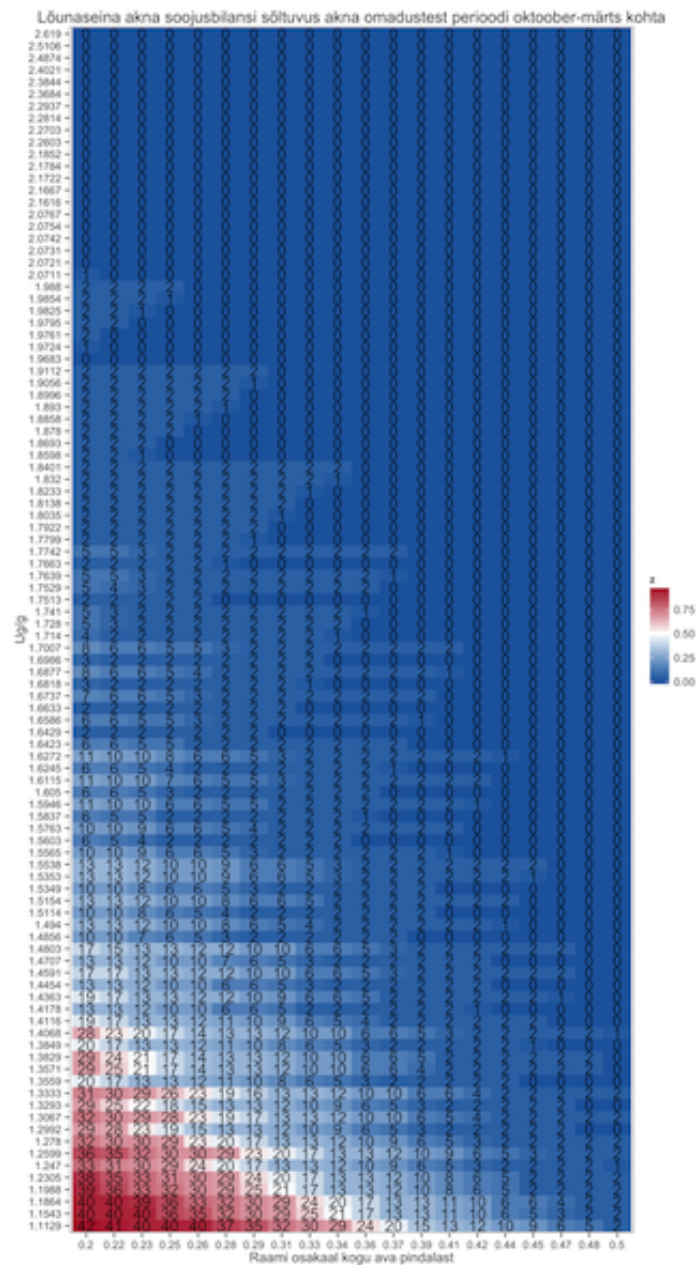
Kogukiirgus lõunaseinal



Joonis 23: Tõraveres EMHI mõõdetud andmete ja standardaastate kogukiirgus lõunaseinale perioodil oktoober-märts.

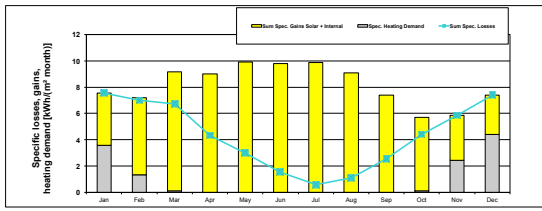
Lisa C Simulatsioonitulemused

Akna soojusbilanss

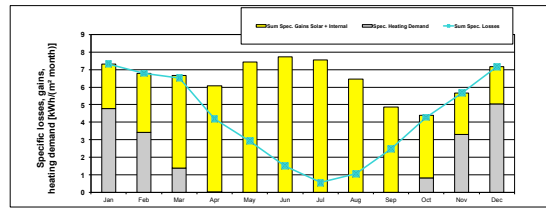


Joonis 24: Lõunaseina akende soojusbilansi positiivsuse tõenäosus sõltuvalt fragmentatsioonist ja suhtest U_g/g . Värvidega on tähistatud see, kui mitmel protsendil aastatest oli vaadeldud 43 aastast aknabilanss kütteperioodi jaoks positiivne, sinine on null ja punane 100% ehk 43 aastat, igal ruudul on märgitud aastate arv.

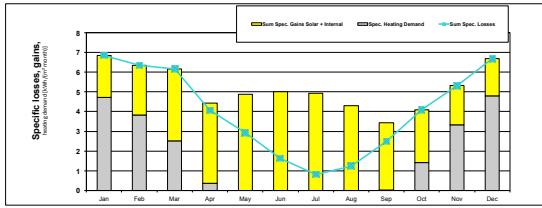
Hoonetüüpide kuupõhised soojusbilansid



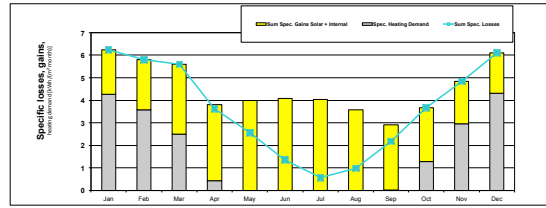
(a) 1I



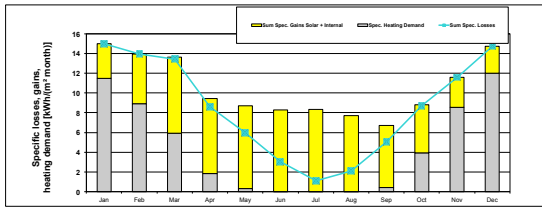
(b) 2I



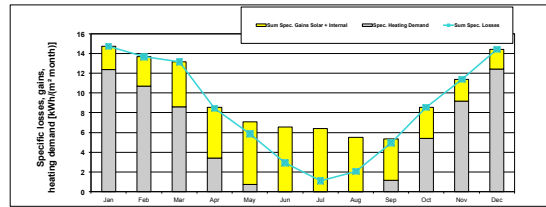
(c) 3I



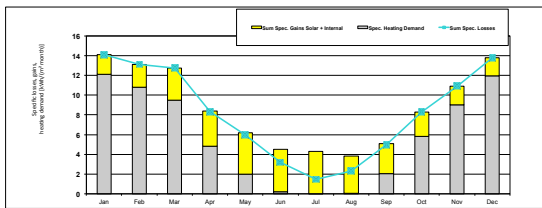
(d) 4I



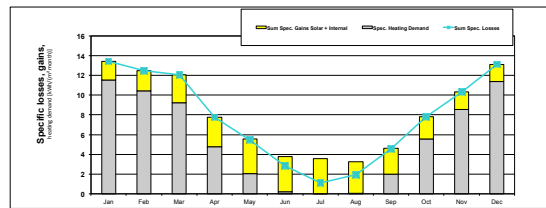
(e) 1II



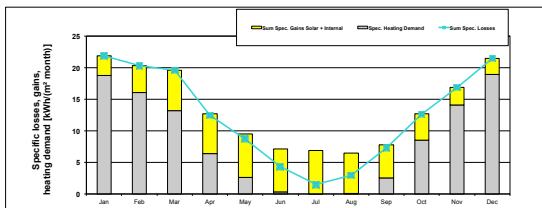
(f) 2II



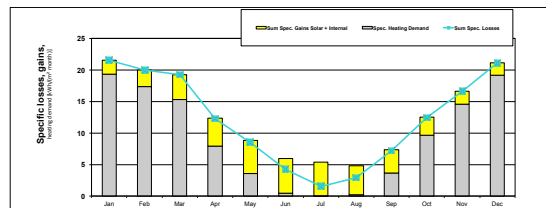
(g) 3II



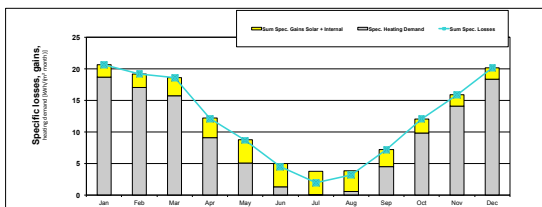
(h) 4II



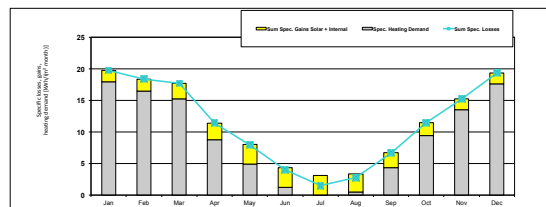
(i) 1III



(j) 2III



(k) 3III



(l) 4III

Kadude jaotus

	Qv	Qt
1I	10,47%	89,53%
1II	22,25%	77,75%
1III	26,91%	73,09%
2I	10,81%	89,19%
2II	22,70%	77,30%
2III	27,34%	72,66%
3I	11,01%	88,99%
3II	22,50%	77,50%
3III	27,00%	73,00%
4I	12,45%	87,55%
4II	24,53%	75,47%
4III	29,32%	70,68%