



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

SISEMISTE VABASOOJUSTE MÕJU BÜROOHOONE ENERGIA-JA KULUTÕHUSUSELE

OFFICE BUILDING INTERNAL HEAT GAIN IMPACT ON THE ENERGY- AND COST-EFFECTIVE SOLUTIONS

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Liina Laas

Üliõpilaskood: 203310EEAM

Juhendaja: Martin Thalfeldt, professor

Kaasjuhendaja: Helena Kuivjõgi, doktorant

Tallinn 2020

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“14” detsember 2020

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“14” detsember 2020

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”.....201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Liina Laas (sünnikuupäev: 18.12.1980)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Sisemiste vabasoojuste mõju büroohoone energia- ja kulutõhususele,

mille juhendaja on Martin Thalfeldt,

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

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

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

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

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

_____ (allkiri)

_____ (kuupäev)

TTÜ Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Liina Laas, 203310EAAM
Õppekava, peeriala: EAAM11, Hoonete energiatõhusus
Juhendaja(d): Professor, Martin Thalfeldt, +372 5209 657
Doktorant, Helena Kuivjõgi

Lõputöö teema:

Sisemiste vabasoojuste mõju büroohoone energia- ja kulutõhususele

Office building internal heat gain impact on the energy- and cost-effective solutions

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Kui palju mõjutavad sisemised vabasoojustused büroohoone arvutuslikku energiatarbimist?
2. Kui palju mõjutavad sisemised vabasoojustused büroohoone kulutõhusaid tehnilisi lahendusi?
3. Kui palju mõjutavad sisemised vabasoojustused büroohoone päikesepaneelide elektritoodangu omatarvet?

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Hoone kohta info kogumine ja mudeli koostamine Ida Iceiga	19.10
2.	Määrusjärgse ETA arvutamine ja olemasoleva ehituslahenduse maksumusinfo hankimine	26.10
3.	Mõõtmistel põhinevate vabasoojuste ja kasutusprofiilide sisestamine mudelisse (mõõtmised ja profiili koostamine ei kuulu antud töö ülesannete hulka) ning ETA arvutamine projektijärgsete lahendustega.	28.10
4.	Muutujate valik ja nende ehitismaksumuse hankimine ning investeerimiskulude analüüs. Välisseina ja katuslae soojustuse paksus (sh võetakse arvesse soojustuse lisamisest tekkinud kasuliku põrandapinna kadu); akende tehnilised näitajad (soojuse ja valguse läbilaskvus, klaaside arv pakettis; staatiline ja dünaamiline päiksevarjestus; ventilatsiooniseadmete SFP ja temp.suhtarv, hoone jahutussüsteemi võimsus, valgustite tüüp ja võimsus ning juhtimine; PV paneelide pindala.	06.11

SISUKORD

TTÜ Ehituse ja arhitektuuri instituut.....	4
EESSÕNA.....	8
Lühendite ja tähiste loetelu	9
SISSEJUHATUS	10
KIRJANDUSE ÜLEVAADE	11
1. ENERGIATÕHUSUS JA KULUOPTIMAALSUS	13
1.1 Hoone tüüpiline kasutus ja sellele vastav soojuseraladus	13
1.2 Paneelide omatarve	14
2 METOODIKA	15
2.1 Objekti kirjeldus.....	15
2.2 Hoone arvutusmodeli koostamine.....	17
2.3 Mõõdetud kasutusprofiil.....	19
2.4 Muutujate valik	20
2.4.1 Hoone välispiirded	21
2.4.2 Valgustus	22
2.4.3 Tehnosüsteemid	23
2.4.4 Lokaalne taastuenergia	24
2.5 Üksikute mudelite moodustamine.....	27
2.6 Kombinatsioonide moodustamine	28
2.7 Kuluoptimaalsuse arvutus	28
3 TULEMUSED	31
3.1 Energiatõhususe arv erinevate profiilidega	31
3.2 Mõõdetud profiiliga vabasoojuste mõju kütte ja jahutuse energiatarbele.....	33
3.3 Üksikute meetmete energiatarve.....	34
3.4 Soojustuse paksuse mõju köetavale pinnale.....	36
3.5 PV paneelide omatarve.....	37
3.6 Energiatõhususe meetmete järjestamine	39
3.7 Kombinatsioonide energiatarve	42
3.8 Energiatõhususe kuluoptimaalne tase ja lisainvesteeringu suurus	45
4 ANALÜÜS	48

4.1 Mõõdetud vabasojustega profiili mõju ETAle	48
4.2 Mõõdetud vabasojuste mõju PV paneelide omatarbele	48
4.3 Mõõdetud vabasojustega profiili mõju kuluoptimaalsusele	48
KOKKUVÕTE	50
SUMMARY	52
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	53
LISAD	55
Lisa 1	56
Lisa 2	63
Lisa 3	65

EESSÕNA

Arvutuslik energiamäärgis arvutatakse hoone tüüpsel kasutusel ning see iseloomustab ja annab ülevaate hoone energiatõhususest.

Kui hoone on kasutusel, siis hoone energiatõhususele lisandub ka hoone tegeliku kasutamise mõju. Ehk kui hoone kasutusel energiaklass halveneb, tuleks esimese asjana suunata tähelepanu sellele kui palju tegelik kasutus erineb teoreetilisest nõ tüüpkasutusest.

Lisaks peab hoone olema kulutõhus. Eestis kehtivad energiatõhususe miinimumnõuded sätestavad, et iga arvutuslikult miinimumnõuetele vastav hoone loetakse kulutõhusaks. Uuringus selgitatakse välja, milline on ühe büroohoone arvutuslik kulutõhus energiatõhusus, mille arvutamisel on kasutatud määrusjärgseid vabasoojuse profiile. Seejärel võrreldakse seda variandiga kus kulutõhusus on arvutatud reaalselt mõõdetud vabasoojuste profiilidega.

Autor tänab oma juhendajaid Martin Thalfeldti ja Helena Kuivjõgit kaasamõtlemise ja igakülgse juhenduse eest.

Autor tänab Pärnu mnt 113 arendajat firmat Mitt & Perlebach OÜ, kelle ehituskunstnik Martin Varvas ja projektijuht Madis Leps olid valmis koostööks ja jagasid magistritöö valmimiseks vajalikke andmeid.

Autor tänab Andrea Ferrantelli mõõdistusandmete eest, et käesolev magistritöö saaks soovitud kujul valmida.

Lühendite ja tähiste loetelu

ETA	Arvutuslik energiatõhususe arv	[kWh/m ² *a]
KEK	Kaalutud enrgiatõhususe arv	[kWh/m ² *a]
A _{kõetav}	Hoone kõetav pind	[m ²]
A _{vp}	Hoone välispiirete pindala	[m ²]
ΣH	Välispiirete summaarne soojuserikadu	[W / K]
Met	Inimese aktiivsustaset iseloomustav näitaja soojusülekande puhul keskkonnale ning sõltub inimese ainevahetusest. Täiskasvanud rahuolekus oleva inimese ainevahetus =1met ja see on 58,2	[W/m ²].
SCOP	Kütteperioodi keskmine kasutegur, mis arvutatakse kütteenergia suhtena elektrikasutusse	
SEER	Jahutusperioodi keskmine kasutegur mis arvutatakse jahutusenergiakasutuse suhtena elektrikasutusse	
SFP	Erivõimsus on süsteemi summaarse võimsuse ja õhuvooluhulga suhtarv.	[(kW/(m ³ /s))]
EN	määrusjärgne inimeste kohaloleku ja valgustuse- ning seadmete elektritarbe profiil	
M	mõõdetud andmetel põhinev inimeste kohaloleku- ning seadmete elektritarbe profiil	
PV	Päiksepaneel (<i>photovoltaic</i>)	
NP	Nõudluspõhine valgustuse juhtimine	
NPd	Nõudluspõhine drimmerdamise võimalusega valgustuse Juhtimine	
VS	Välissein	
KL	Katuslagi	
BMS	Hoone halduse süsteem (building management system)	
NPV	Nüüdispuhasväärtus	[€/m ²]

SISSEJUHATUS

Energiatõhususe arvutamise meetodika [1] määrab ära iga hoonetüübile vastava kasutusprofiili nii nädala kui ööpäeva lõikes. Kasutusprofiil on antud tunniajalise täpsusega. Kasutusprofiil mõjutab hoones tarbitavat energiat mitmel erineval moel: sellest sõltub nii valgustusele kuluv energia, seadmete kasutusele kuluv energia kui ka ventilatsiooni käigus hoidmisele kuluv energia. Samuti sõltuvad sellest hoone sisemised vabasoojused: inimestest tulenev, seadmetest tulenev kui ka valgustusest tulenev.

Euroopa Parlamendi ja Nõukogu direktiivid [2][3][4][5] on sätestanud, et lisaks energiatõhususnõuetele tuleb täita ka kuluoptimaalsuse nõudeid. Hoone energiatõhusust ei tohiks saavutada kuluoptimaalsuse arvelt.

Kõik projekteeritavad hooned peavad vastama energiatõhususe miinimumnõuetele [6][7], mille tõestamiseks tuleb määruses[1] ette antud profiilidega leida arvutuslik energiatõhususe arv.

Arvutuslik energiatarve hoonetes erineb mõõdetud energiatarbest mitmel põhjusel. Üheks põhjuseks on hoone tegeliku kasutusprofiili erinevus määrusjärgsest. Käesoleva magistritöö eesmärgiks on uurida Pärnu mnt 113 ehitatava büroohoone näitel tema arvutusliku energiatõhususe arvu muutumist kasutades reaalselt mõõdetud kasutusprofiile. Teiseks eesmärgiks on vaadelda kulutõhusust energiatõhusate meetmete aspektist mõlema profiili puhul ja teha kindlaks kas kulutõhusate meetmete kombinatsioon sõltub profiilist.

Kolmas eesmärk on uurida päiksepaneelide omatarbe suuruse muutust sõltuvalt kasutatavast profiilist.

KIRJANDUSE ÜLEVADE

Euroopa Liidu direktiivid [2][4][5] kehtestavad nõude, et väljatöötatud energiatõhususe regulatsioonide täitmine peab tagama hoone kuluoptimaalsuse. Uuring „Hoonete arvutuslike energiamärgiste vastavus tegelikule tarbimisele“ [8] toob välja, et tegelik tarbimine erineb arvutuslikust.

Artiklis „A review of internal and external influencing factors on energy efficiency design of buildings“[9] tuuakse välja, et viimase kümnendi jooksul on põhitrendid ehitiste energiatõhususe mõjufaktoritest oluliselt muutunud. Varem panustati optimaalsusele projekteerimises ning hoonete tehnoloogilistele uuendustele, kuid nüüd on lisandunud hoone haldamine vastavalt kasutajate käitumusharjumustele. Näiteks on seal märgitud, et nõudluspõhise valgustuse kasutamisel sõltub valgustuse energiakulu rohkem sellest, milline on hoone täituvus ja millised on kasutajate harjumused, kui välisest valgusmäärast.

Hiina Tianjini Ülikooli teadlased uurisid [10] reeglipärasust kasutajate harjumustes ja büroohoone seadmete energiatarbes ning nende vahelistes suhetes. Leiti, et büroohonete energiatarbe põhimõjutajaks on hoone kasutajad. Energiatarvete prognoositavate mudelite väljatöötamiseks ühendati kaks matemaatilist meetodit, mis üksteist täiendades andsid võimaluse prognoosida üsna täpse energiatarbe. Nende mudelite ja hiljem mõõdetud tegeliku energiatarbe vahe oli alla 5%. Nemed leidsid, et ületunnitöö aeg, oli mõjutatud konkreetse töö spetsiifikast ja ületundide töö arv büroohoneti erines kordades. Näiteks administratiivtööd tegevas bürooos oli tööaeg rohkem fikseeritud ja kontor oli päeva ajal rohkem hõivatud, kui näiteks teaduse või äri tegelev kontor, mille tööajad venisid pikemaks ja töötajate üheaegne kontoris viibimine oli madalam.

Itaalia ja Saksamaa teadlased uurisid [11], kuidas on omavahel seotud hoone välistegurite ja hoone kasutajate mõju. Simulatsioonid näitasid, et massiivsemate ja väiksemate klaaspindadega ja fikseeritud varjestusega hoonete energiakulu oli vähemtundlik kasutajate käitumise muutusele. Eriti tuli see välja külmemas kliimaga maades, nt Rootsi. Põhjamaa riikides oli hoone välislahendus ülitähtis, et vähendada kasutajate mõju energiakulule

TTÜ teadlaste poolt uuritud kuluoptimaalsed lahendused liginullenergiahoonetel [12] näitab, et büroohonete arvutustulemusi mõjutavad kõige rohkem sisendandmed, milleks büroohonete puhul on põhiliselt vabasoojused ja nende profiilid. Seega tegeliku kuluoptimaalsuse leidmiseks ja arvutusliku ja olemasoleva energiamärgise

ühtlustamiseks on oluline, et vabasoojuste suurus ja profiil vastaks võimalikult täpselt tegelikkusele.

Andrei Engelsi magistritöö „Elektritarbimine kahe büroohoone näitel Tallinna Ülemiste Citys“ [13] leidis, et kontorihoone tegelikud kasutusprofiilid ei vasta määrusjärgsetele, mistõttu kontorihoonete kulude arvutus energiatõhususe määrase põhjal sobib vaid võrdluseks, mitte tegelike energiakulude prognoosimiseks. Engelsi töös leiti, et suured erinevused on tööpäevade kestvuse osas ning nädalavahetuse kasutuse osas.

Lisainvesteeringute uuringus [14], mis koostati E.Pikase, M, Thalfeldti, J.Kurnitski ja R.Liase poolt, analüüsiti erinevaid meetmeid ja meetmete kombinatsioone, et jõuda muuhulgas ka liginullhoone kuluoptimaalsuseni. Iga eraldi meede järjestati lisamaksumuse ja energiasäästu järgi. Uuring näitas, et tehes õigeid valikuid investeerimiskulude osas ja energiakulude analüüsis, siis on võimalik teha märkimisväärselt energiatõhusamaid valikuid sama maksumuse eest.

Sama tulemuseni jõudis Jakov Ivanovi magistritöö [15] „Metalli tn 3 büroohoone lisainvesteeringu ja energiatõhususe analüüs“, kus selgus, et nimetatud büroohoone energiatõhususe arvuga $90,7 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a}$, on nii kulutõhus kui ka energiatõhus. Kusjuures energiatõhusam ja kuluoptimaalne lahendus oli madalama ehitusmaksumusega kui algselt kavandatud hoone. Tulemusteni jõudmiseks kasutas ta määrusjärgseid vabasoojuste andmeid ja profiile. Lisaks leiti töös, et büroohoone eksport päiksepaneelidega jääb 14-25% vahele sõltudes süsteemi võimsusest. Pole veel uuritud kuidas mõjutavad tegelikud vabasoojuste profiilid hoone kulutõhusust ning energiatõhususe arvu.

TTÜ teadlaste poolt uuringus PV paneelide tasuvusaja kohta [16] leiti, et PV paneelid büroohtonetes on kulutõhusad, kuid eluhoonetes mitte. Põhiline põhjus selle erinevuse juures seisneb kasutajate profiilis ja võrguühendustasudes. Büroohtoned on käigus päevasel ajal, mis mõjutavad elutsükli kulusid märkimisväärselt.

Pole veel uuritud kuidas mõjutavad hoone kulutõhusust sh PV paneelide omatarbe suurus, tegelikud vabasoojuste kasutusprofiilid. Millist mõju see avaldab kütte ja jahutuse energiale ning ETAlle ja mil määral see erineb määrukses esitatud profiilidega arvatutale?

1. ENERGIATÕHUSUS JA KULUOPTIMAALSUS

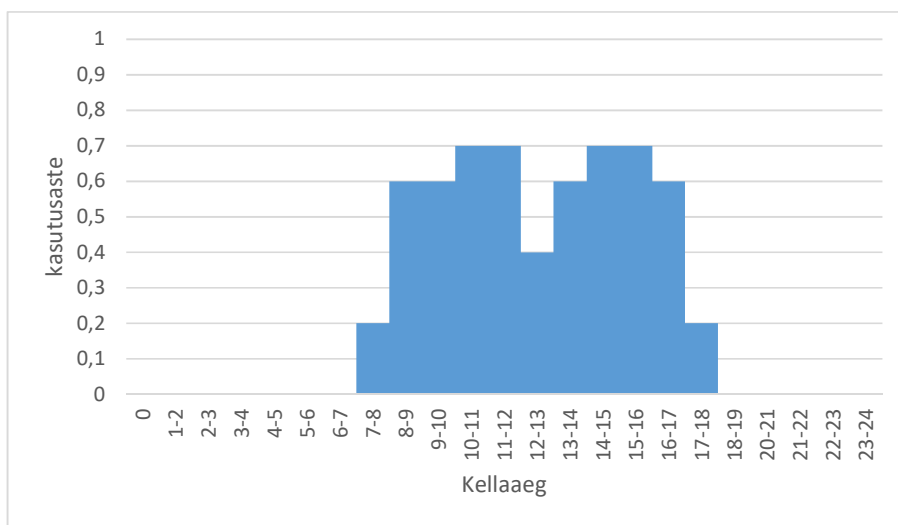
Hoone arvutuslikku energiatõhusust iseloomustab summaarne energiakasutus hoone sisekliima tagamiseks, sooja vee tarbeks ning elektriseadmete ja valgustuse kasutamiseks ning seda väljendatakse energiatõhususe arvuga (ETA). ETA arvutatakse hoone kätava pinna ruutmeetri kohta hoone standardkasutusel. Standardkasutus on kindlaksmääratud hoone kasutuskord ning lisaks on ära määratud ka tehnosüsteeme ning õhupidavust arvesse võtvad parameetrid ning sooja tarbevee erikulu.

1.1 Hoone tüüpiline kasutus ja sellele vastav soojuseraladus

Hoone sisemised vabasoojuse koormused, mis võetakse arvesse ETA arvutamisel on vabasoojused inimestest, valgustusest ja seadmetest. Need koormused on määrukses ette antud ja kujunevad inimeste kohaloleku profiilist, seadmete ja valgustuse kasutamise profiilist ning vastavatest soojusvõimsustest kätava pinna kohta.

Inimestest tulenev soojusvõimsus on määratud inimeste arvu kohta kätava pinna ruutmeetri kohta ning inimeste aktiivsustasemest, mida iseloomustab väärtus *met*. Määrukses arvestatakse ilmse soojusena inimese soojuseraldukses 5 W/m² ning kontorihoonetes arvestatakse ühe inimese kohta on 17 m² kätavat pinda ehk 0,0588 inimest m² kohta.

Määrušnjärgne [1] inimeste kohaoleku ja seadmete ja valgustuse kasutamise profiil tööpäeva lõikes on toodud joonisel 2.1. Nädalavahetusel on kasutusaste 0 ja tarbimist ei ole.



Joonis 2.1 Määrušnjärgne büroohoone kasutusprofiil tööpäeval

Kontorihoone valgustusest tingitud soojuseraldus on 10 W/m^2 mis on antud päevalguslampidele. Uuritavas büroohoones on projekteeritud LED valgustid, mille keskmine soojuseraldus on $6,37 \text{ W/m}^2$. Seadmete kasutamisest tingitud vabasoojuskoormus on 12 W/m^2 .

1.2 Paneelide omatarve

Päiksepaneelidega toodetud elektrienergiaosakaal mis on ette nähtud hoone toimimiseks on kontorihoones maksimaalselt 90% või arvutatakse energiakasutuse simulatsioonarvutusega [1].

2 METOODIKA

Käesolev magistritöö uurib kahe kasutusprofiili võrdlusele nende profiilide mõju arvutuslikule energiatarbele ja kulutõhususele. Üks profiil on määrusjärgne büroohoone kasutusprofiil ja teine on mõõdistusandmete põhjal loodud kasutusprofiil. Võrdlus teostatakse määrusjärgse energiatõhususe arvu arvutamise ja selle põhjal kulutõhusate meetmete leidmisega, et määrata kuluoptimaalne meetmete kogum mõlema profiiliga hoone kasutuse jaoks.

2.1 Objekti kirjeldus

Käesoleva magistritöö uurimisobjektiks on Pärnu mnt 113 projekteeritud ärihoone (joonis 2.2). Hoone ehitajaks Mitt&Perlebach OÜ ning projekteerijaks Arhitektuurbüroo PLUS OÜ. Hoone ehitust alustati septembris 2020 aastal ning on plaanis lõpetada 2022a kevadel.

Ärihoone esimesel korrusel on kaubanduspinnad ja restoran. Teisest kuni neljanda korruseni on parkimistasand aja alates viiendast korrusest algavad büroopinnad. Rohelise mõtteviisi majade arendaja Hepsor paneb sellesse hoonesse kogu oma senise rohebüroode arendamise kogemuse [17]. Tegemine on esimese kõrghoonega Tallinnas, mida jahedal ajal köetakse ja suvisel ajal jahutatakse maaküttega. Temperatuuri reguleerimine hoonetes käib automaatselt läbi maja termoaktiivse konstruktsiooni. Katusel olevad päikesepaneelid aitavad katta üldelektrikulusi.



Joonis 2.2 Pärnu mnt 113 hoone

Hoone fassaadide kujundamisel on tähelepanu pööratud otsese päikesevalguse varjestamisele. Kuigi hoone büroopindade välistarind on suures osas klaasist, siis on kõigil külgedel on kasutatud maksimaalselt tumma seinapinda koos madalamate lintakendega, lõunapoolse külje akende ette on kavandatud päiksevarjestusribid. Hoone lääne-põhja-ida poolsetele fassaadidele on otsese päikese mõju märgatavalt väiksem, mis võimaldab neil külgedel piirduda efektiivse päiksekaitse faktoriga klaasfassaadi kasutusega.

Antud töös on keskendutud hoone büroopindadele – 1.korruse äripinnad ja neli parkimiskorrust on simulatsioonidest ja arvutustest välja jäetud. Büroohoone andmed ja iseloomustus on koostatud vastavalt hoone põhiprojektile ja on toodud Tabelis 2.1 ja 2.2

Tabel 2.1 Büroode osa andmed

Akõetav, m ²	3833
Korruste arv	9
Avp / Akõetav	0,93
$\Sigma H / Akõetav, W / (m^2 \cdot K)$	0,45
Soojavarustuse allikas ruumide ja ventilatsiooniõhu kütteks ja jahutuseks ning tarbeveeks	Energiavaiadega maasoojuspump ja õhkjahuti (drycooler)
Kütte ja jahutuselemendid ruumides	Termoaktiivne laepaneel, vesisüsteemil siugtoru
Ventilatsioonisüsteemid	SV3süsteem bürooruumides ja SV4 süsteem nõupidamisruumides
Ventilatsiooni soojustagastus	Hügroskoopsed soojustagastid

Tabel 2.2 Piirdetarindite kirjeldus

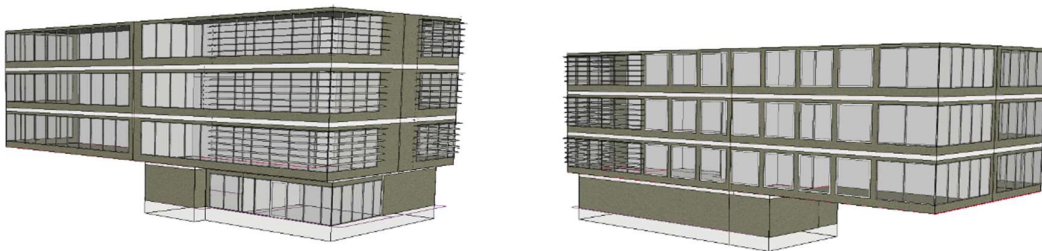
Piirdetarind	Soojusjuhtivus U, W/(m ² ·K)	Pindala A m ²	Soojuserikadu H, W/K	H osakaal %
Välissein	0,17	1104	188	11%
Katuslagi	0,10	511	51	3%
Põrand välisõhu kohal	0,15	267	40	2%
Aknad	0,74	1692	1236	71%
Uksed	1	2,2	2	0%
Külmasillad			106	6%
Infiltratsioon			120	7%
Summa/ Keskmine	0,45	3576	1743	100%

2.2 Hoone arvutusmodeli koostamine

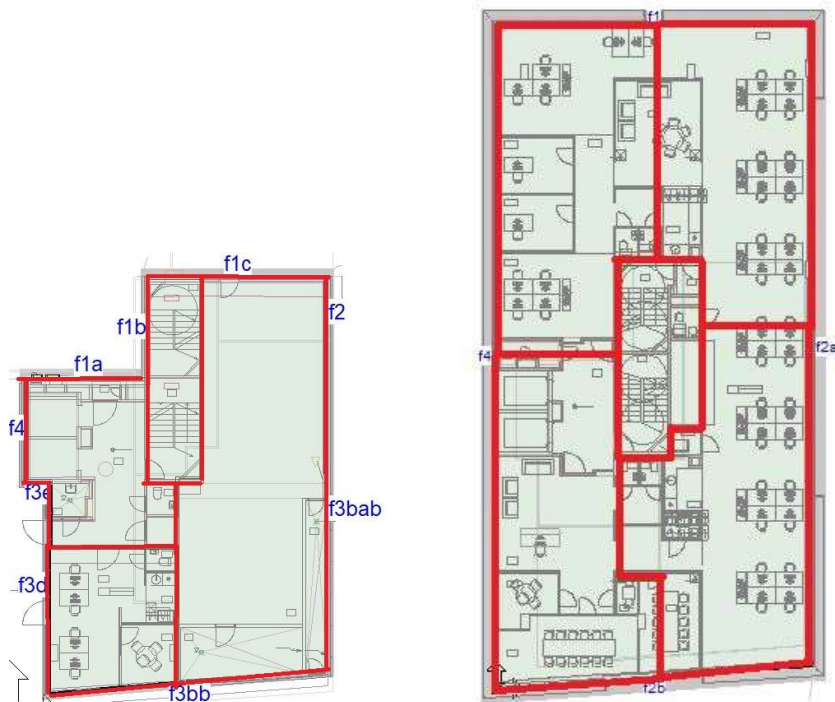
Arvutusmodelid simuleeriti tarkvaraga IDA ICE 4.8 [18] kasutades Eesti baasaasta kliimafaili Estonia_(EST2019) [19], mis on koostatud 31 aasta pikkuse perioodi tüüpiliste kuude kliimaandmete põhjal. Simulatsiooni mudel on näha joonisel 2.3

Käesolevas töös on büroohoone põhikorruste plaan jagatud büroode osas neljaks tsooniks, milles iga tsoon avaneks erinevasse ilmakaarde. Hoone keskel on eraldi tsoonina trepikojad. Erandiks on 5.korrus – mis on plaanilahenduselt ja suuruselt teistest erinev ning koondab endas lisaks büroopinnale ka tehnilisi ruume. Tsoonide jaotus on näha joonisel 2.4. Mudel on konstrueeritud neljakordsena ja tema kolmanda korruse kõiki väärtusi korrutatakse kuuega, kuna need on ühesugused.

Hoone igale tsoonile on määratud peamised parameetrid energiatõhususe nõuetest lähtuvalt [1], [6] ja need on välja toodud tabelis 2.3. Kasutusprofiil on esmalt määratud vastavalt hoone energiatõhususe arvutamise metoodikale, hiljem on kasutatud reaalseste mõõtetulemuste baasil koostatud profiile, mida käsitletakse täpsemalt peatükis 2.3. Tsoonides on ideaalsed küttekahad ja jahutid, milles ei arvestata süsteemikadusid. Samuti ei arvestata modelleerimisel soojus – ja külmaallika kasutegurite ega soojuskadudega. Kõik süsteemikaod võetakse arvesse hilisemas andmetöötuses. Hoone kütte ja jahutuse netoenergia arvutamisel ning PV paneelide omatarbe määramisel, lähtuti esmalt energiatõhususe arvutamise riiklikest nõuetest võetud kasutusprofiilidega ja seejärel tehti samad arvutused läbi mõõdetud kasutusprofiilidega.



Joonis 2.3 Pärnu mnt 113 IDA ICE mudeli läänevaade (vasakul) ja idavaade (paremal).



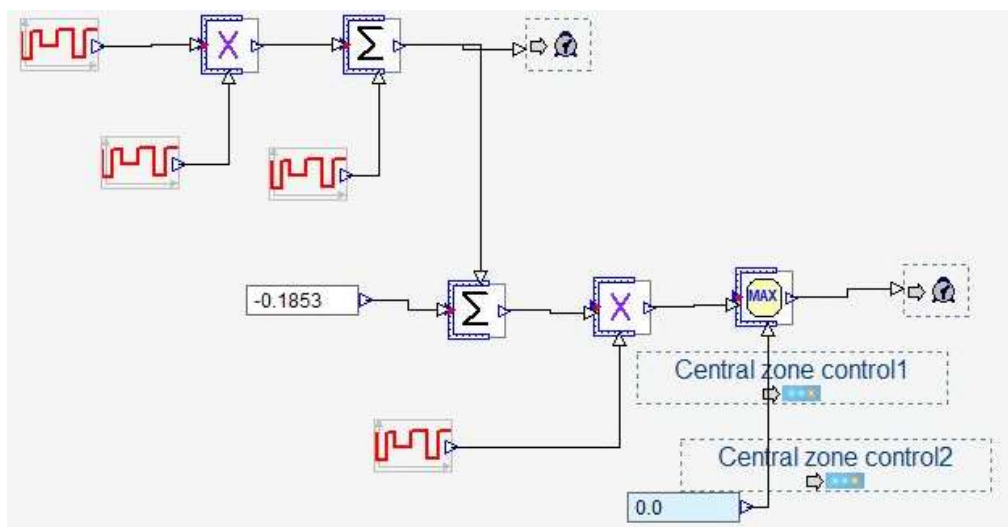
Joonis 2.4 5. korruse ja tüüpkorruse (6-13korrus) plaan tsoonidega, mida kasutati arvutusmudeli koostamiseks

Tabel 2.3 Büroohoone standardkasutus ja sisekliima parameetrid energiatõhususe määru järgi [1]

Inimesed, W/ m ²	5
Seadmed, W/ m ²	12
Valgustus, W/ m ²	6,37
Kasutusaeg tööpäevadel, t	7:00-18:00
Kasutusaeg nädalavahetusel, t	0
Kasutusaste, -	0,55
Kütmise seadeväärtus, °C	21
Jahutamise seadeväärtus, °C	25
Valgustihedus, lx	500
Õhuvahetus, l/(s·m ²)	2
Küttesüsteemi efektiivsus,-	0,99
Maasoojuspumba keskmine soojustegur kütmisel, SCOP	4,4
Maasoojuspumba keskmine soojustegur sooja tarbevee tootmisel COP, -	2,7
Maasoojuspumba kasutegur jahutamisel SEER, -	6,1
Ventilatsiooniseadmete kaalutud keskmine erivõimsus SFP kW/ (m ³ /s)	1,72
Soojustagastuse kaalutud keskmine temperatuuri suhtarv η, %	78
Sooja vee erikulu, l/(m ² ·a)	103

Inimeste kasutusprofiil saadi seadmete ja tunnitarbimise põhjal, millest on maha lahutatud seadmete ja valgustuse tööväline tarbimine, misjärel on saadud graafik korreleeritud määrusjärgse kasutusprofiiliga.

Eelnevate andmete põhjal loodi valemite (1) ja (2) abiga uus kasutusprofiil mis sisestati makro abil IDA ICE programmi ning mida edaspidi nimetatakse „mõõdetud profiiliks“, ning mis annab simulatsioonile määrusjärgse profiiliga võrreldavas võtmes edasi inimeste kohaolekut ning seadmete ja elektritarbimise kasutuse profiile. Tarbitud võimsusi ei muudetud. Joonisel 2.6 on näha mõõdetud profiili loomiseks kasutatud makro.



Joonis 2.6 Mõõdetud kasutusprofiili tegemiseks loodud makro

2.4 Muutujate valik

Et vaadelda erinevate energiatõhususe meetmete mõju muudeti teatud projektijärgseid parameetreid. Enam arvutuslikku energiatõhusust mõjutavad hoone osad ja süsteemid on välja toodud järgnevates alapeatükkides. Valiku kriteeriumiks olid nii määrustes etteantud meetmed kui ka eelnevad samal põhimõttel tehtud tööd ja saadud tulemused [12], [15], [16], [22].

Fassaadipõhised muutujad olid:

- Välisseina ja katuslae soojustuse paksus. Seoses välisseina soojustuse paksuse muutumisega uuriti köetava pinna muutust ja sellest tulenevaid majanduslikke aspekte nagu üüripinna rahalise tootluse muutust võrreldes energiatõhususest saadud majandusliku kasuga

Tehnosüsteemipõhised muutujad olid:

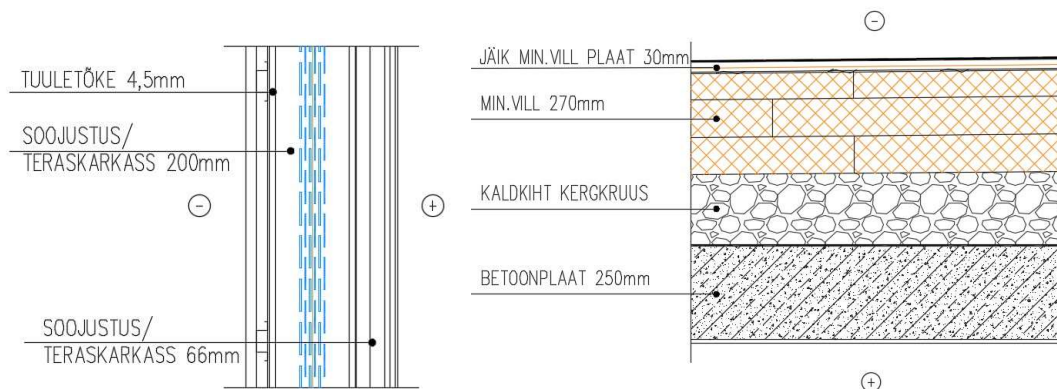
- Ventilatsiooniagregaatide soojusvaheti temperatuurisuhtarv ja energiatarvet iseloomustav näitaja SFP
- Valgustussüsteemi juhtimine
- Päksepaneelide võimsus

Finantsarvutusteks kasutatavad hinnad saadi hoonet ehitavalt firmalt Mitt & Perlebach. Erandiks ventilatsioon, mille hind on pärit projektijärgsete seadmete maaletoojalt ning nõudluspõhine valgustus, mille hinnainfo on pärit Taltechi Haldusosakonnast.

2.4.1 Hoone välispiirded

Hoone soojuskaod määravad põhiliselt piirdetarinditest väljuv soojus. Ehkki suurem osa piirdetarindite soojuskaost läheb läbi klaaspindade, siis välisseinal ja katuslael on samuti oluline osa. Mida suurem on klaaspindade osakaal fassaadis seda väiksem on piirdetarindite soojustuse paksuse mõju. Vaadeldavas hoones on klaaspindade osakaal 61%, mis on suhteliselt suur. Teine oluline aspekt välisseina paksuse puhul on köetava pinna muutumine. Käesolev hoone ei saa suurendada väljapoole, seega paksema soojustuse ja laiema välisseina puhul, muutub ka hoone köetav pind väiksemaks. Vastupidine mõju köetavale pinnale on soojustuse vähendamisel.

Põhiliseks välisseina tüübiks on kergkonstruktsioonis termoprofiiliga 200 mm mineraalvilla ja 66 mm kivivillaga soojustusplaadid (Joonis 2.7). Vaid viienda korruse välisseina tüüp erineb tehnoloogiliste ruumide puhul. Arvutusmudel on kasutatud kõikide välisseinte kaalutud keskmist soojusjuhtivust. Välisseinte isolatsioonimaterjali paksust uuriti 50 mm sammuga.



Joonis 2.7 Tüüpilise välisseina ja katuslae konstruktsioon

Katuslae konstruktsiooniks on monoliitbetoonist plaat koos 270 mm kivivillplaadiga. Katuslae soojustuse paksuse mõju uuriti 30 mm sammuga (Joonis 2.7). Välisseina ja katuslae ühikhinnavahe ruutmeetri kohta sisaldab ka paigalduse maksumust, ning ei sisalda käibemaksu. Piirdetarindite soojuslähivus ja hind on toodud tabelis 2.4.

Tabel 2.4 Soojustuse paksus ja piirdetarindite soojusjuhtivus ja maksumuse vahe välisseina pinna m² kohta võrreldes eelneva variandiga.

Tarind	d _{iso} ,mm	U, W/(m ² ·K)	Hinnavahe eelneva suhtes €/m ²
Välissein	100	0,24	0
	150	0,18	8
	200	0,15	7
	250	0,13	6
	300	0,11	5
Katuslagi	180	0,13	0
	210	0,12	3
	240	0,11	4
	270	0,10	8
	300	0,09	4

2.4.2 Valgustus

Hoone valgustite tüüp ja võimsus on määratud põhiprojektis. Valgustite tüübiks on LED valgustid keskmise võimsusega 6,37 W/m². Kuna antud valgustite energiatõhusus on väga hea, siis valgusti tüüpi muutujaks ei valita. Valgustuse juhtimine on trepikodades liikumisanduri ja valgusanduriga, ülejäänud pindadel käsitsi toimiv. Energiatõhususe ja kulutõhususe omavahelise suhte määramiseks valitakse muutujaks:

- kogu hoone valgustuse nõudluspõhisus
- kogu hoone nõudluspõhisus valgustugevuse sujuva muutmisega ehk drimmerdusega.

Kuna valgustid on kõigis variantides samad, siis valgustite hinnaga ei arvestata. Nõudluspõhisel juhtimisel on arvestatud kohalolekuandurite ja päevavalgusandurite soetamis- ja paigaldamiskulusid ning kaabeldust. Nõudluspõhine juhtimine on käsitsi lülituse süsteemist kallim 8,0 €/ köetava pinna m² kohta ning drimmerdusega nõudluspõhine juhtimine on eelmainitust veel kallim 6,0 €/ köetava pinna m² kohta.

2.4.3 Tehnosüsteemid

Kütte ja jahutuse süsteem

Hoone kütte ja jahutus toimub TABSide süsteemiga, mis on termiliselt aktiveeritud hoone süsteem, kus betoonvahelaed on temperatuuri salvestuseks aktiveeritud massiiv. Tegemist on madalatemperatuurilise kütte ja kõrgetemperatuurilise jahutusega kus puuduvad ruumiseadmed. Reguleerimine toimub iseloomulike ruumides paiknevate lae pinnatemperatuuride andurite ja ruumiõhu temperatuurianturite järgi. Üksiku ruumi tasandil reguleerimist ei toimu.

Ventilatsioonisüsteem

Büroohoones on kaks ventilatsioonisüsteemi (vt Tabel 2.5), millest üks teenindab nõupidamise ruume (SV4) ja teine ülejäänud hoonet (SV3). Ventilatsiooniseadmeteks SV3 ja SV4 on Lindab IMP Kliima KNND hügrokoopse rootoriga seadmed. Projektis on ette nähtud seadme SV3 tootlus 100% tööajal ja 70% töövälisel ajal (arvutusmudelites arvestatakse töövälisel ajal töötamise võimsust määrusjärgselt). SV4 on muutuva õhuhulgaga ja töötab nõudluspõhiselt. Süsteemil on küttekalorifeer ja jahutuskalorifeer sissepuhke õhutemperatuuri muutmiseks normide kohaseks.

Tabel 2.5 Projekteeritud ventilatsioonisüsteeme iseloomustavad näitajad

Iseloomustavad näitajad	SV3	SV4
Seadme suurus	21/12	12/9
Teenindatav köetav pind, m ²	3508	325
Õhuhulk, l/s	6000	2000
Õhuhulk köetava pinna kohta, l/s*m ²	1,7	6,2
SFP, kW/(m ³ /s)	1,8	1,4
Temperatuuri suhtarv, %	78	82,5

Lähtuvalt energiatõhususe määrusest tuleks mudelis arvestada määrusjärgset õhuhulka ning kui on olemas reaalsed seadmed, tuleks kasutada nende reaalsed SFP-d ja temperatuurisuhtarvu. Määrus ei sätesta üheselt kas reaalsete seadmete andmed tuleks võtta projektijärgse õhuhulgaga või määrusjärgse õhuhulgaga. Antud töös on arvestatud projektijärgsete seadmetega ning seadmete tehnilised näitajad on leitud määrusjärgsete õhuhulkadega. Kuna projektis reaalsed õhuhulgad köetava pinna kohta ei võimalda antud seadmeid kasutada määrusjärgsete õhuhulkadega, siis on arvutusmudelil arvestatud, et mõlemad seadmed teenindavad tervet büroopinda, kus üks toodab kolmandik õhuhulgast ja teine ülejäänud.

Muutujateks on valitud ühe suurusjärgu võrra suurem (Vent 3) ja väiksem seade (Vent 1) ning projektijärgne seade (Vent 2). Määrusjärgse õhuhulga ja projektijärgse seadmesuurusega valikud on toodud tabelis 2.6.

Tabel 2.6 Arvutusmudelil kasutatavad seadmed õhuhulgaga 2,0 l/s köetava pinna kohta

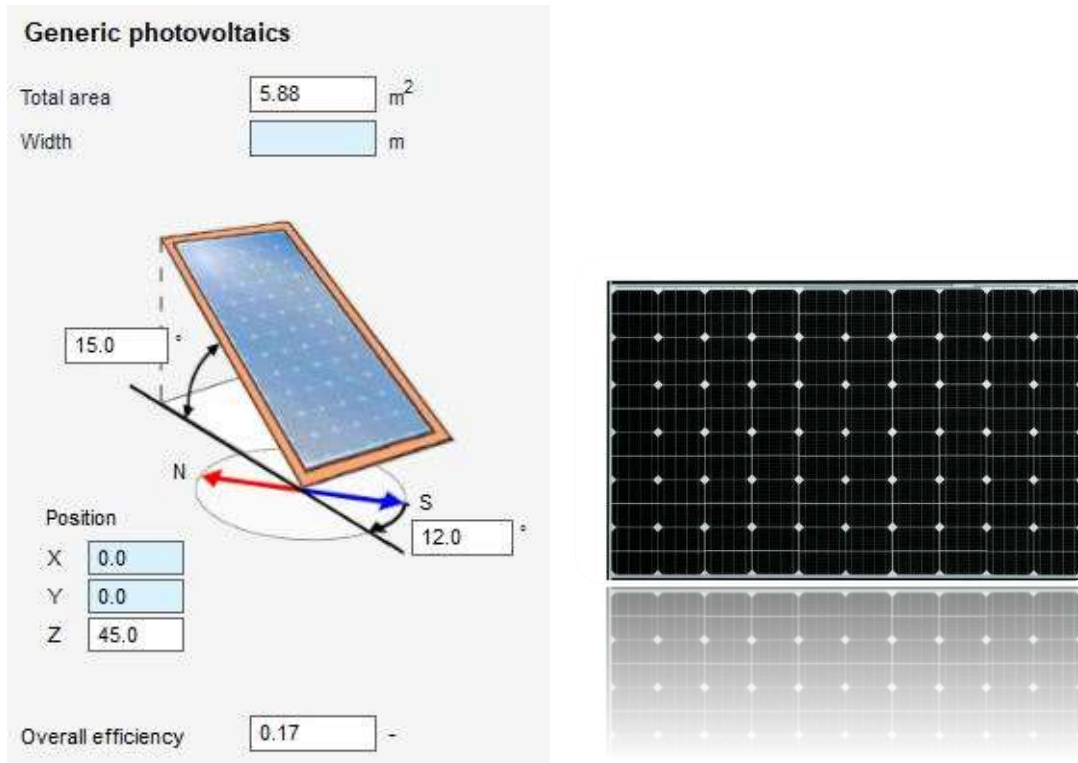
Muutuvus	Süsteem	Seadme nimisuurus sp	Seadme nimisuurus vt	Õhuvooluhulk, l/s	SFP kW/(m ³ /)	Temperatuuri suhtarv η , %	Hinnavahe võrreldes eelnevaga €/tk
Vent 1	SV3	21/9	21/9	5750	2,559	75,7	0
	SV4	12/9	12/6	1917	1,64	82,1	
Vent 2	SV3	21/12	21/9	5750	1,815	76,4	1000
	SV4	12/9	12/9	1917	1,419	82,8	
Vent 3	SV3	21/12	21/12	5750	1,572	77,4	1000
	SV4	12/12	12/9	1917	1,348	82,8	

2.4.4 Lokaalne taastuvenergia

Hoonele on projekteeritud DencoHappel Heamo tüüpi soojuspump, mis võimaldab samaaegselt ruumide kütmist kui ka jahutust, tõstes sellega oluliselt energeetilist efektiivsust. Soojuspump töötab 40 aktiveeritud energiavaiade baasil ning võimaldab samaaegselt nii kütet kui jahutust soojust väliskeskkonda juhtimata. Soojuspumba jahutusvõimsusvõimsus on 235 kW ja küttevõimsus 230 kW. Lisaks on maasoojuspumba toetamas õhkjahuti (drycooler), mille võimsus on 150 kW mis tagab lisakütte võimaluse kuni välisõhutemperatuurini -7°C . Ülaltoodut arvesse võttes on aasta keskmine maasoojuspumba kasutegur küttele SCOP 4,4 ja kasutegur jahutusele SEER 6,1.

Lisaks on hoone elektritarbe katmiseks projekteeritud PV paneelide süsteem võimsusega 5,0 kW. Paneelid asuvad katusel asimuudiga 192° ja horisontaalpinnast 15° nurga all.

Kokku on ette nähtud 18 paneeli kusjuures ühe paneeli pindala on 1,6 m² ja võimsus 280 W. Valitud on Mitsubishi Electric paneelid tüübiga PV_MJE280W (Joonis 2.8)



Joonis 2.8 PV paneeli IDA_ICE mudel (vasakul) ja valitud PV paneel (paremal)

Taastuenergia osas vaadeldakse ilma päiksepaneelideta süsteemi ja muutujateks on valitud järgmised päiksepaneelide võimsused:

- Projektijärgne süsteem, võimusega 1,3 W/kõetava pinna m² kohta ehk koguvõimsusega 5 kW ja maksumusega 5000 €
- Ilma PV paneelideta süsteem
- PV paneelide süsteem võimusega 3,7 W/kõetava pinna m² kohta ehk koguvõimsusega 14 kW. Projekteeritud ja maksimaalse võimaliku vahepealne variant, mille maksumus on 14 000 €
- PV paneelide süsteem võimusega 6,0 W/kõetava pinna m² kohta ehk koguvõimsusega 23 kW. Maksimaalne arv paneele mis katusele mahub, mille maksumus on 24 000 €
- PV paneelide omatarbe analüüsi arvutamiseks vaadeldakse variante kus omatarbesse kuuluvad lisaks seadmete ja valgustuse ja ventilatsiooniseadmete elektritarbele ka:
 - Maasoojuspumba elektritarve kütteks ja jahutuseks.
 - Omatarbe ilma maasoojuspumbata ja ilma jahutuseta

- Omatarve ilma maasoojuspumbata ja kompressoriga jahutus, kus on elektri kompressoriga jahutuse kasuteguriga 3,5. Lisaks jahutuse ja kütte abiseadmete elekter
- Omatarve kui kütteks on maasoojuspump SCOP 4,4 kuid jahutus on eraldi seadmega. Lisaks jahutuse abiseadmete elektrikulu

PV paneelide omatarve on leitud simulatsiooni teel IDA ICE programmiga (joonis 2.8), kus on arvesse võetud seadmete ja valgustuse määrusjärgsed profiilid, maasoojuspumba tarve aasta lõikes ning ventilatsiooniseadmete elektritarve aasta lõikes. Ventilatsiooniseadmete tootlikkuseks kasutusvälisel ajal on arvestatud 7,5% ning SFP on jäetud samaks mis 100% tootlikkusega. Maasoojuspumba elektritarve on saadud neto küttevajaduse läbijagamisel SCOPga ning neto jahutusvajaduse läbijagamisel SEERiga.

2.5 Üksikute mudelite moodustamine

Võttes arvesse eelnevas peatükis väljatoodud muutujaid, moodustati iga muutuja jaoks simulatsioonimudel (Tabel 2.7). Üksikute mudelite arvutustulemuste põhjal luuakse energiatõhusad ja kuluoptimaalsed meetmete kombinatsioonid.

Tabel 2.7 Üksikute meetmete mudelid, kus „Algne“ tähendab projekteeritud varianti.

Mudeli nimetus	Välisseina soojustus mm	Katuslae soojustus	Ventilatsiooni seadme andmed	Valgustuse juhtimine	PV võimsus W/m ²
Algne	200	270	$\eta=78$, SFP=1,72	on/off	1,3
VS100	100	270	$\eta=78$, SFP=1,72	on/off	0
VS150	150	270	$\eta=78$, SFP=1,72	on/off	0
VS200	200	270	$\eta=78$, SFP=1,73	on/off	0
VS250	250	270	$\eta=78$, SFP=1,72	on/off	0
VS300	300	270	$\eta=78$, SFP=1,72	on/off	0
KL180	200	180	$\eta=78$, SFP=1,72	on/off	0
KL210	200	210	$\eta=78$, SFP=1,72	on/off	0
KL240	200	240	$\eta=78$, SFP=1,72	on/off	0
KL270	200	270	$\eta=78$, SFP=1,73	on/off	0
KL300	200	300	$\eta=78$, SFP=1,72	on/off	0
Vent1	200	270	$\eta=77,3$ SFP=2,33	on/off	0
Vent2	200	270	$\eta=78$, SFP=1,72	on/off	0
Vent3	200	270	$\eta=78,8$ SFP=1,52	on/off	0
LED	200	270	$\eta=78$, SFP=1,72	on/off	0
LED_NP	200	270	$\eta=78$, SFP=1,72	Nõudluspõhine	0
LED_NP drim	200	270	$\eta=78$, SFP=1,73	Nõudluspõhine ja drimmerdatud	0
PV_3,7	200	270	$\eta=78$, SFP=1,73	on/off	3,7
PV_6,0	200	270	$\eta=78$, SFP=1,72	on/off	6,0

2.6 Kombinatsioonide moodustamine

Antud töö üheks eesmärgiks oli kulutõhusaimate energiatõhususe meetmete leidmine ja kuluoptimaalsete meetmete kombinatsiooni leidmine.

Baasmudeliks ehk võrdlusudeliks luuakse kombinatsioon kõige väiksemat energiatõhususe arvu näidanud meetmetest. Baasmudeli jääb ka investeringute lisamisel nullnivooks, st hoone meetmete kogumaksumust ei arvutata, vaid ainult lisainvesteeringud baasmudeli suhtes.

Teiseks kombinatsiooniks valiti võrdluse tekitamiseks projekteeritud hoone, mis simuleeriti ning leiti ETA ning lisainvesteeringu maksumus võrreldes baasmudeliga.

Järgmised kombinatsioonid leiti selliselt, et igale muutujale tehti arvutusmodell ETA leidmiseks ning lisainvesteering kõige väiksema ETA suhtes, ehk baasmudeli komponendi suhtes. Seejärel analüüsiti iga meetme energiasäästu ja lisamaksumust eelneva muutuse suhtes ning arvutati välja lisainvesteering 1 kWh säästetud ETA kohta (€/kWh). See meetod võimaldas ratsionaalselt järjestada kõiki meetmeid lisainvesteeringu kasvu järgi ETA suhtes.

Vastavalt lisainvesteeringu kasvule, hakati baasmudelile lisama meetmeid, nii, et esimene kombinatsioon moodustus baasmudelist ja kõige väiksema lisainvesteeringuga 1 kWh ETA vähenemisega meetmega. Seejärel moodustati järgmine kombinatsioon järjekorras teisel kohal oleva meetmemega, säilitades mudelis ka esimest meetmet. Selliselt moodustati 10 kombinatsiooni mõlema profiiliga loodud mudelite kohta, millest simuleerimiseks valiti lisaks baasmudelile ja projektijärgsele mudelile veel neli varianti, mis iseloomustasid enam meetmete iseloomu, nii, et lõpuks said valituks kõik parimad meetmed iga vaadeldud energiatõhususe objekti kohta: valgustuse, PV paneelide, ventilatsiooniseadmete ja soojustuse osas. Väljavalitud mudelitele arvutati kõigepealt aritmeetilisel teel prognoositav ETA ja seejärel neid simuleeriti ja leiti tegelik ETA.

2.7 Kuluoptimaalsuse arvutus

Kuluoptimaalsus on oluline argument energiatõhususe meetmete valikuks ja väljaehitamiseks. Arvutus tehakse 20 aastase perioodi kohta võttes arvesse alginvesteeringut st soetuskulu kui ka iga aastast kulu energiale vastavalt Euroopa Liidu Komisjoni delegeeritud määrusele [4].

Kõigepealt arvatati alginvesteering, mis koosnes energiatõhusate meetmete lisamaksumusest baasmudeli suhtes. Seejärel arvatati simuleeritud mudeli andmetel tarnitud energia kulu ühe aasta kohta. Järgmise sammuna tuli leida diskoneerimistegur, mis võtab arvesse ajavahemiku pikkust, intressimäära, inflatsiooni ja energiahindade tõusu võrreldes inflatsiooniga. Summeerides alginvesteeringu ja diskoneerimisteguriga läbi korrutatud energiakulud leiti nüüdispuhasväärtus (NPV). Seejärel võrreldi valitud kombinatsioonide NPV-d baasmudeli NPV-ga ja kõige minimaalsema väärtuse saanud kombinatsioon ongi kuluoptimaalsuse kriteeriumiks.

Nüüdispuhasväärtus leitakse järgmise valemiga:

$$C_g = (C_1 + C_a * f_{pv}^{(n)}) : A_{kõetav} \quad (3)$$

kus

C_g – kogukulu perioodid jooksul, NPV (€/m²)

C_1 - alginvesteering (€)

C_a - aastane kulu tarnitud energiale (€)

$f_{pv}^{(n)}$ – diskonteerimistegur

$A_{kõetav}$ – hoone köetav pind (m²)

Diskonteerimistegur leitakse valemiga:

$$f_{pv}^{(n)} = (1 - (1 + R_R - e) / 100)^{-n} : R_R - e / 100 \quad (4)$$

Kus

R_R - reaalne intressimäär (%)

e – energiahinna eskalatsioon (%)

n – perioodi pikkus (aastates)

Reaalintressimäär leitakse valemiga:

$$R_R = ((R + R_i) / (1 + R_i / 100)) : R + R_i \quad (5)$$

Kus

R_i – inflatsioonimäär (%)

R – nominaalne intressimäär (%)

Tabel 2.8 Kasutatud majanduslikud parameetrid

Nominaalne intressimäär R , %	2,7 *
Inflatsioonimäär R_i , %	1,7 *
Reaalne intressimäär R_r , %	0,98
energiahinnaeskaloatsioon e , %	0 *
Elektrienergiahind, €/MWh	91,7 **
Periood, aastat	20
Diskondeerimistegur $f_{pv}(20)$	18,08

* andmed võetud allikast [22]

** andmed võetud allikast [23]

3 TULEMUSED

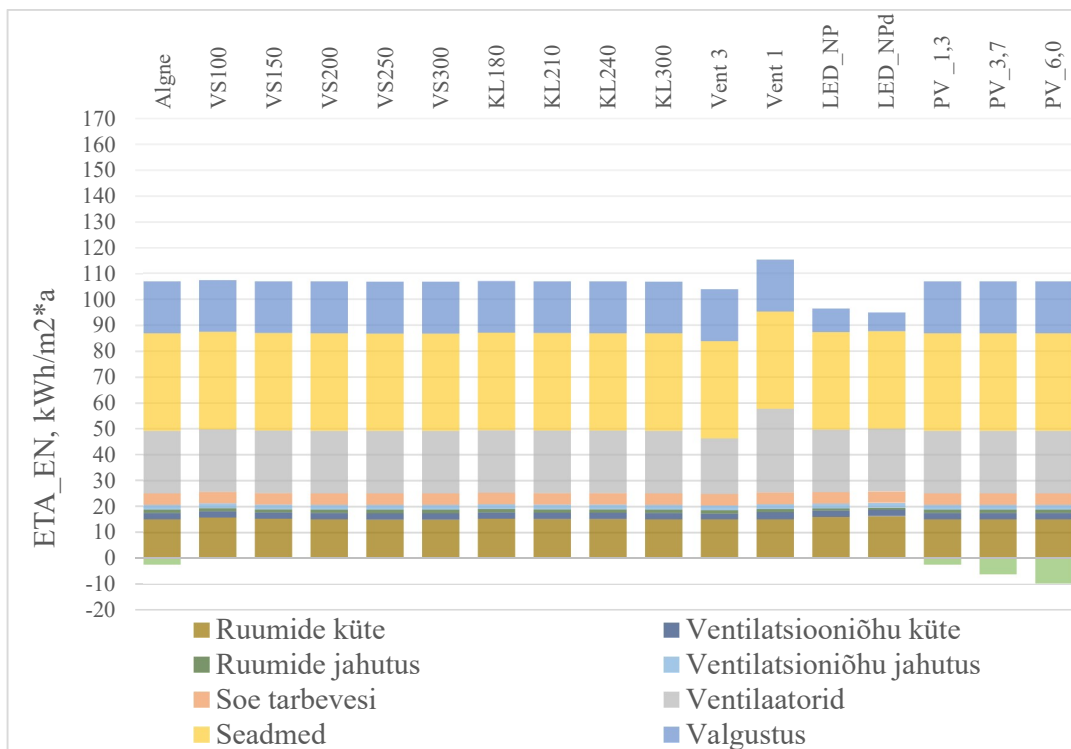
3.1 Energiatõhususe arv erinevate profiilidega

Selleks, et võrrelda mõõdetud profiili määrusjärgse profiiliga teostati kõigi meetmete kohta simulatsioon. Kokku tehti 38 simulatsioonarvutust (19 mõõdetud profiiliga ja 19 määrusjärgse profiiliga) ja leiti iga meetme kohta netoenergiavajadus. Seejärel arvutati välja hoone summaarne energiakasutus ehk brutoenergia, mis võtab arvesse süsteemikaod ja energiamuundumised (soojuspumba SCOP ja SEER ning energia jaotamise kaod). Lõpuks leiti iga mudeli kohta hoone energiatõhususearv (ETA). Kõik arvutustulemid on näha tabelis L1 (Lisa 1).

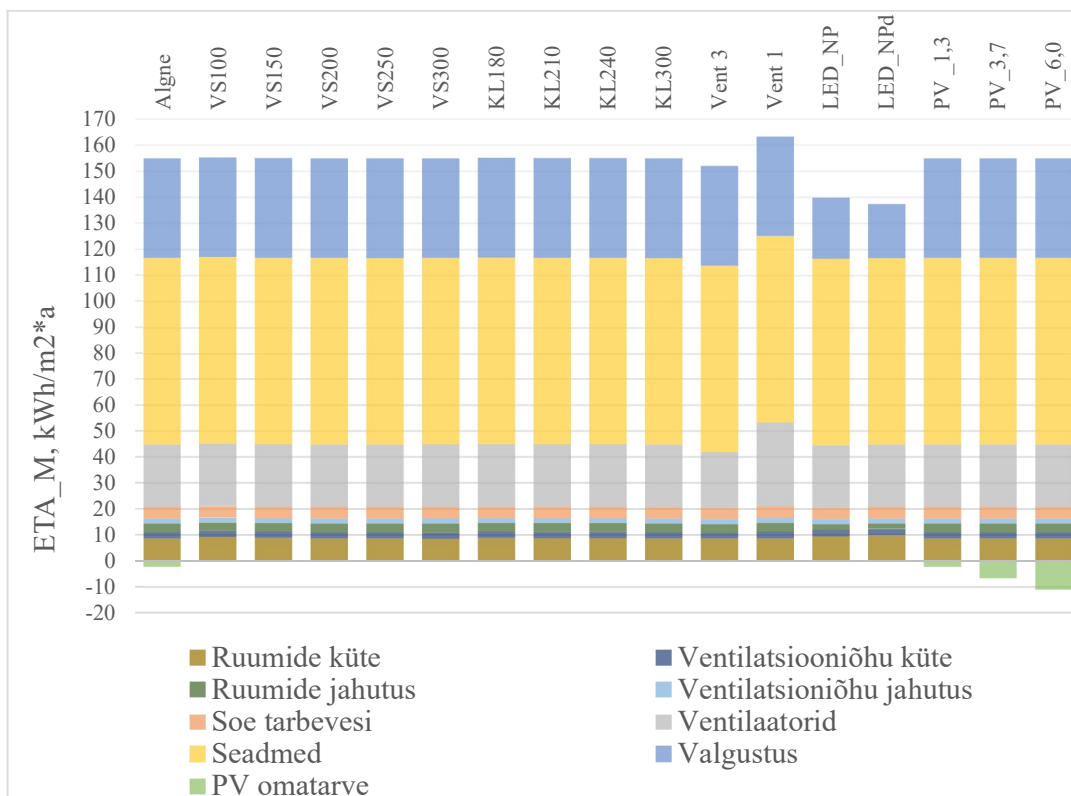
Projektijärgne lahendus määrusjärgsete profiilidega (edaspidi markeriga _EN) andis tulemuseks energiatõhususe arvu 104,3 kWh/(m²*a) ning jääb praegu kehtivatest energiatõhususe nõuetest napilt välja, jäädes madalenergiahoone piiridesse [7]. Hetkel kehtivate nõuete kohaselt peab projekteeritav hoone vastama liginullenergia nõuetele, milleks kontorihoone puhul on ETA väärtus alla 100 kWh/(m²*a) [6], [7].

Mõõdetud profiilidega (edaspidi markeriga _M) projektijärgne lahendus andis ETA tulemuseks 152,4 kWh/(m²*a).

Joonistel 3.1 ja 3.2 saab järeldada, et mõõdetud profiiliga tuleb ETA tunduvalt suurem. Suur osakaal kogu tarnitud energiast on seadmete, ventilaatorite ja valgustuse tarbitaval elektril, mille mõjutamine erinevate meetmetega võib anda energiasäästlikke tulemusi. Pääksepaneelide omatarve on mõõdetud profiiliga mudelite puhul suurem kuid erinevus jääb samasse suurusjärku.



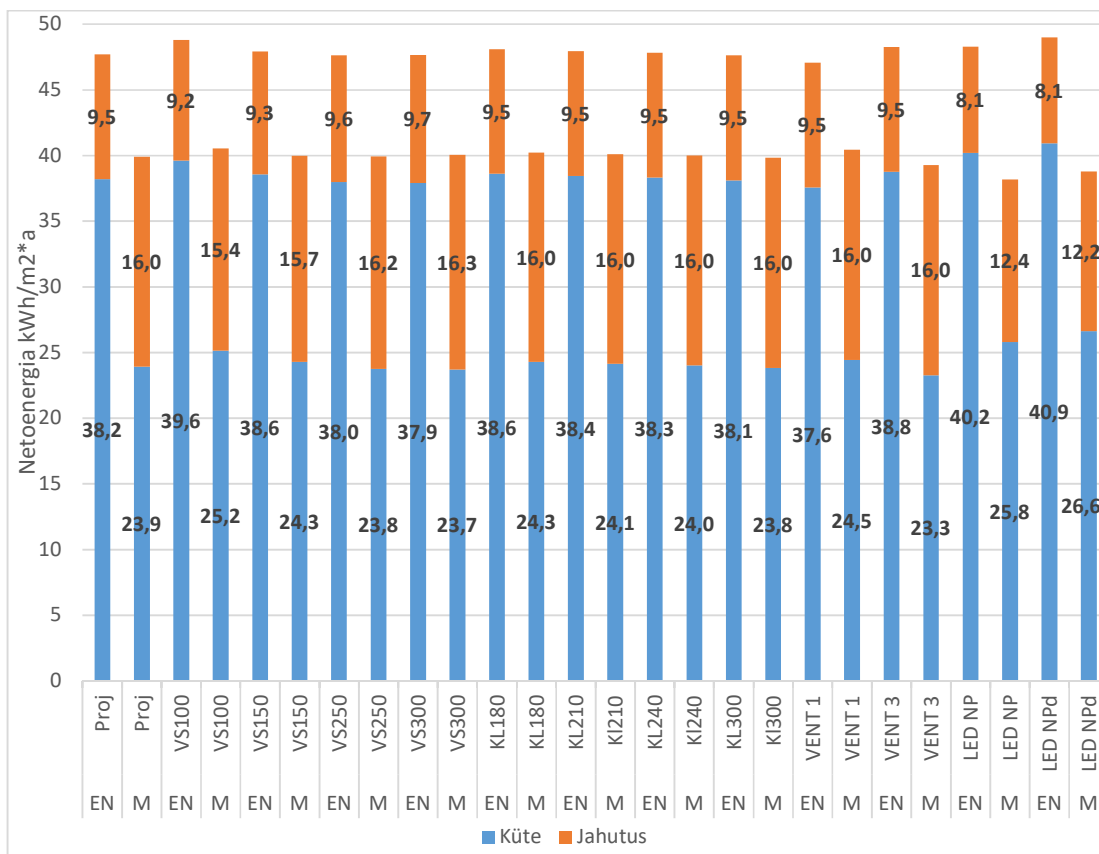
Joonis 3.1 Määruisjärgsete profiilidega arvatatud üksikute meetmete energiatõhususe arv



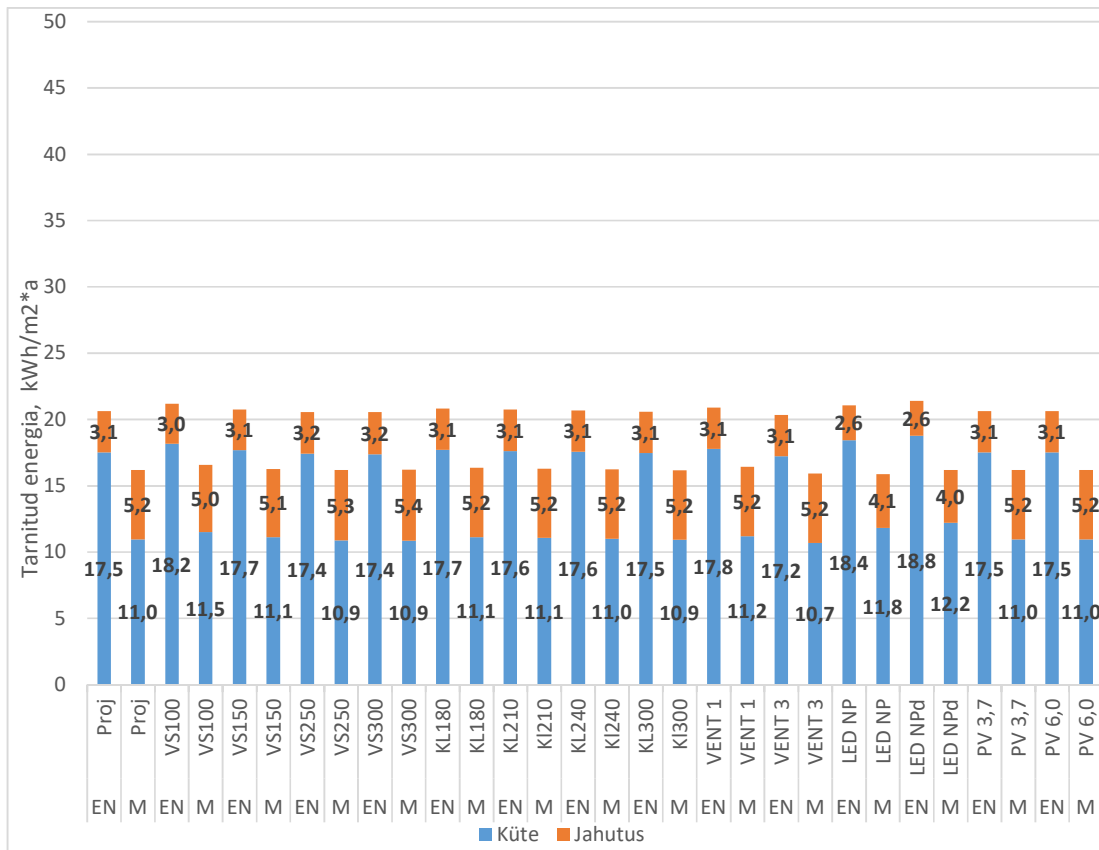
Joonis 3.2 Mõõdetud profiilidega arvatatud üksikute meetmete energiatõhususe arvud

3.2 Mõõdetud profiiliga vabasoojuste mõju kütte ja jahutuse energiatarbele

Kuna mõõdetud profiilis on vabasoojuste mõju oluliselt suurem, siis muutub sellega ka küttele ja jahutusele kuluv energiajaotus (Joonised 3.3 ja 3.4). Sisemised vabasoojused katavad pea 50% küttevajadusest. Ruumide jahutusvajadus küll suureneb kolmekordselt, kuid kuna jahutuse brutoenergia moodustab väga väikese osa energiaarvust, on selle mõju väike.



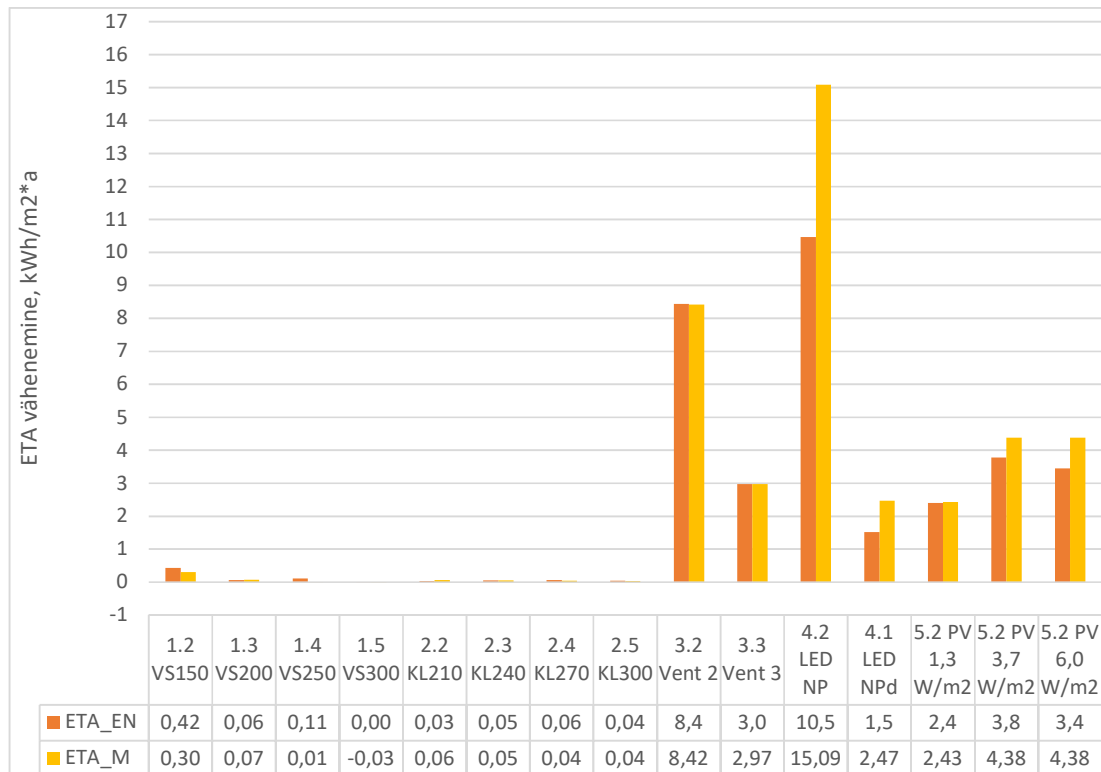
Joonis 3.3 Netoenergiavajaduse võrdlus kütteks ja jahutuseks mõõdetud ja määrusjärgsete profiilidega



Joonis 3.4 Tarnitud energia võrdlus kütteks ja jahutuseks mõõdetud ja määrusjärgsete profiilidega

3.3 Üksikute meetmete energiatarve

Joonis 3.5 illustreerib üksikute meetmete mõju energiatõhususe arvule. Meetmetena on uuritud erinevaid hoone objekte, milleks on väliseina ja katuslae soojustust, ventilatsiooniseadmeid, valgustust ja päiksepaneelide tootlikust ja omatarvet. Joonisele on kantud iga objekti meetmed mis võrreldes eelneva meetmega langetavad arvutuslikku energiatõhusust (ETAt).



Joonis 3.5 Energiatõhususe arvu vähenemine sõltuvalt üksikust meetmest

Välisseina soojustuse muutmisel arvestati ka köetava pinna muutumisega ja sellest on pikemalt kirjutatud peatükis 3.4. Välisseina soojustuse muutmine avaldab energiatarbimise arvule väikest mõju: maksimaalsel juhul oli see 0,6 kWh määrusjärgse profiili puhul ja 0,4 kWh mõõdetud profiili puhul. Sama võib öelda ka katuslae soojustuse kohta, mille muutmisel saavutati mõlema profiiliga ETA muutus maksimaalselt 0,2 väärtuse võrra. (Joonis 3.6)

Kõige rohkem mõjutas ETAt elektritarve, mida iseloomustab ventilaatorite tarbitav elekter, valgustite ja seadmete tarbitav elekter ning päiksepaneelide elektritoodang ja omatarve.

Ventilatsiooniseadme suurenemisele reageerisid mõlema profiiliga arvatud ETAd sarnaselt, kuna ventilatsiooniseadme tarbimist sisemised vabasoojused ei mõjuta. Küll aga jääb suhteline sääst määrusjärgse profiili puhul suuremaks, kuna tema ETA on väiksem, seega suhteline sääst määrusjärgse profiili puhul on 7,5% ja mõõdetud profiili puhul 5%. Samasse suurusjärku jäi ka päiksepaneelide omatarbe arvestamine. Mõõdetud profiiliga arvutuses sai ära kasutada kogu toodetud elektrienergia ja eksport oli 0. Määrusjärgse

profiiliga arvutuses kehtis reegel, et mida suurem on paneelide võimsus seda suurem protsent tootmisest läheb ekspordi, olles 5kW (1,3W/m²) puhul 2% ja 23kW (6,0 W/m²) puhul 14%.

Oluline vahe tuli sisse uuritud valgustussüsteemides. Mõõdetud vabasoojuse profiili puhul alandas nõudluspõhise juhtimise kasutamine energiatõhususe arvu 16 kWh võrra ning määrusjärgse profiili puhul 10 kWh võrra. Drimmerdamise võimaluse lisamisega suurenes energiasääst veelgi. Siiski suhtarvult jäid vähenemised erinevate profiilide lõikes samasse suurusjärku, olles mõlemal juhul ca 10%.

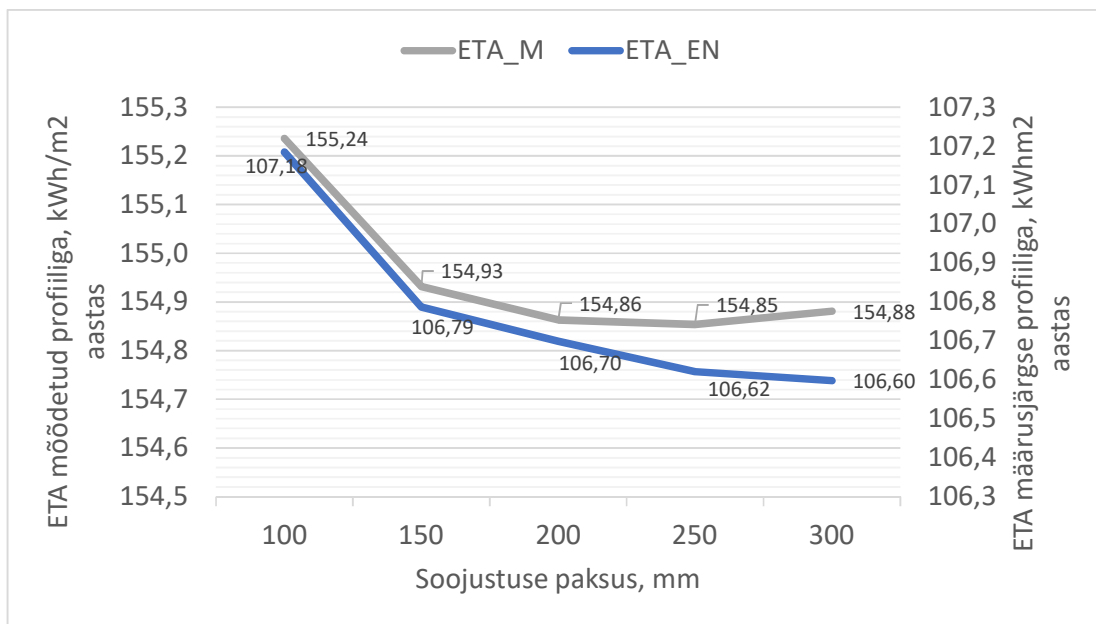
3.4 Soojustuse paksuse mõju köetavale pinnale

On teada, et projekteeritud hoone gabariidid ei saa suureneda põhiprojektis määratud. Antud töös on sellega arvestatud nii, et põhiprojektis määratud soojustuse paksuse muutumisel, muutub ka köetav pind. Projekteeritud soojustuse paksus on 200 mm ning hoone köetav pind seejuures 3833 m². Jättes hoone gabariidid samaks, siis soojustuse muutumisega suurenes ja vähenes köetav pind maksimaalselt kuni 2% ehk 86 m² võrreldes põhiprojekti köetava pinnaga. Köetava pinna 1 m² kinnisvaraline väärtus on 2500 €. Tabelis 3.1 on toodud köetava pinna muutus ja selle kinnisvaraline vääring nii projektipõhise suhtes kui ka baasmudeli suhtes, milleks on minimaalne soojustus 100 mm.

Tabel 3.1 Soojustuse paksuse mõju hoone köetavale pinnale ja kinnisvaralisele väärtusele

Välisseina soojustuse paksus, mm	Köetav pind, m ²	Köetava pinna muutus, m ²	Köetava pinna muutus %	Köetava pinna muutus võrreldes projektijärgsega, %	Kinnisvaralise väärtuse vähenemine võrreldes vähima soojustusega €/m ²	Kinnisvaralise väärtuse muutus võrreldes projektijärgsega, €/m ²
100	3919	0	0	2,2	0	56
150	3876	43	1,1	1,1	28	28
200¹	3833	86	2,2	0	56	0
250	3790	129	3,3	-1,1	84	-28
300	3748	171	4,4	-2,2	112	-56

¹200 mm on hoone põhiprojektijärgne soojustus



Joonis 3.6 ETA väärtused soojustuse muutmisel köetava pinna muutumist arvestades

Välisseina soojustuse muutumisest tingitud energiatõhusust mõjutas üheaegselt nii kütte kui jahutuse osakaalu muutus, kusjuures küttevajadus vähenes ja jahutusvajadus suurenes sõltuvalt soojustuse suurenemisest. Mõõdetud profiili puhul, kus vabasoojused mõjutasid jahutusvajadust rohkem, ületas jahutusvajadusest tingitud ETA suurenemine küttest tingitud ETA vähenemise (vt joonis 3.6), mistõttu maksimaalse soojustuse puhul oli ETA veidi suurem kui aste väiksema soojustuse puhul, olles absoluutarvult olematu mõjuga. Antud töö raames võib öelda, et uuritud välisseina soojustuse muutuse mõju on ETA üldarvust marginaalne.

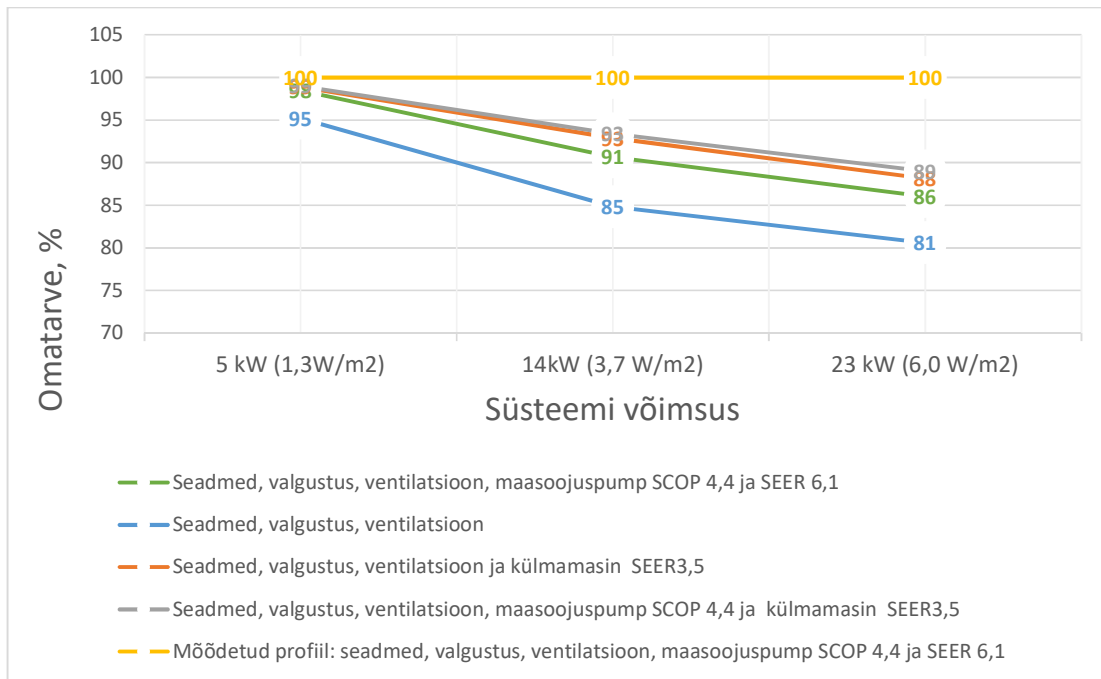
3.5 PV paneelide omatarve

Vaadeldi omatarbe muutust sõltuvalt erinevast sooja- ja külmavarustuse süsteemist. Erinevate võimsustega süsteemi toodang ja omatarve on toodud tabelis. 3.2

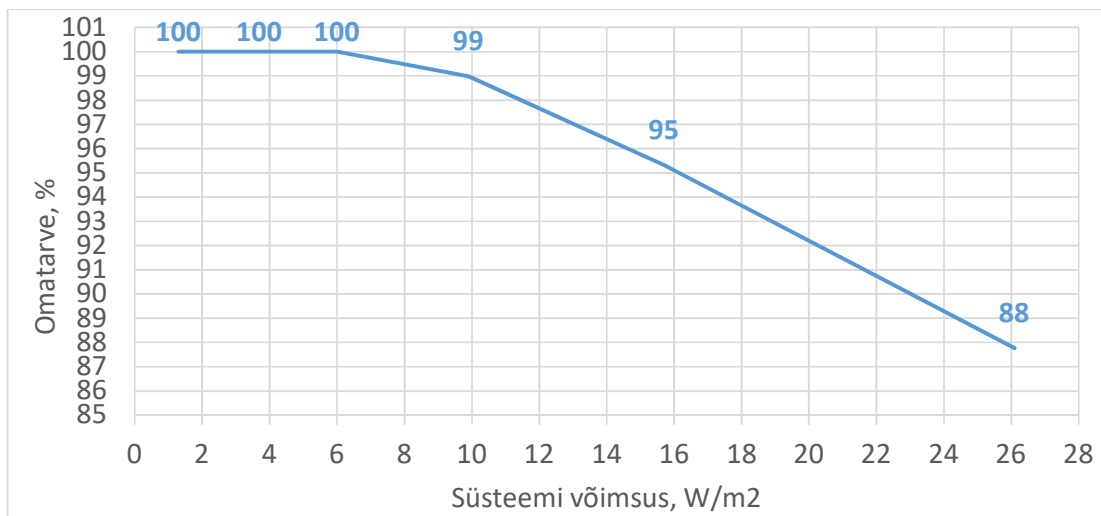
Tabel 3.2 PV paneelide toodang ja omatarve

PV süsteemi võimsus, kW	PV süsteemi võimsus, W/m ²	PV toodang kWh/a	PV toodang kWh/m ² aastas	Omatarve kWh/a	Omatarve_EN kWh/m ² aastas	Eksport_EN kWh/m ² aastas	Eksport_M kWh/aastaks
5	1,3	4658	1,2	4586	1,2	72	0
14	3,7	13044	3,4	11827	3,1	1216	0
23	6,0	21429	5,6	18437	4,8	2992	0

Mõõdetud profiilide puhul oli kõigi sooja ja külmavarustuse variantide ning kõigi PV paneelisüsteemide puhul omatarve 100% (Joonis 3.7). Selleks, et leida punkt mis hetkest algab eksport, arvutati lisaks erinevate võimsustega PV paneelide süsteemide ning selgus, et antud hoone puhul algaks 1% ulatuses eksport 38 kW-se süsteemi puhul (10 W/ kütava pinna m² kohta), ning 100 kW (26 W/m²) süsteemi puhul oleks eksport juba 12% (Joonis 3.8)



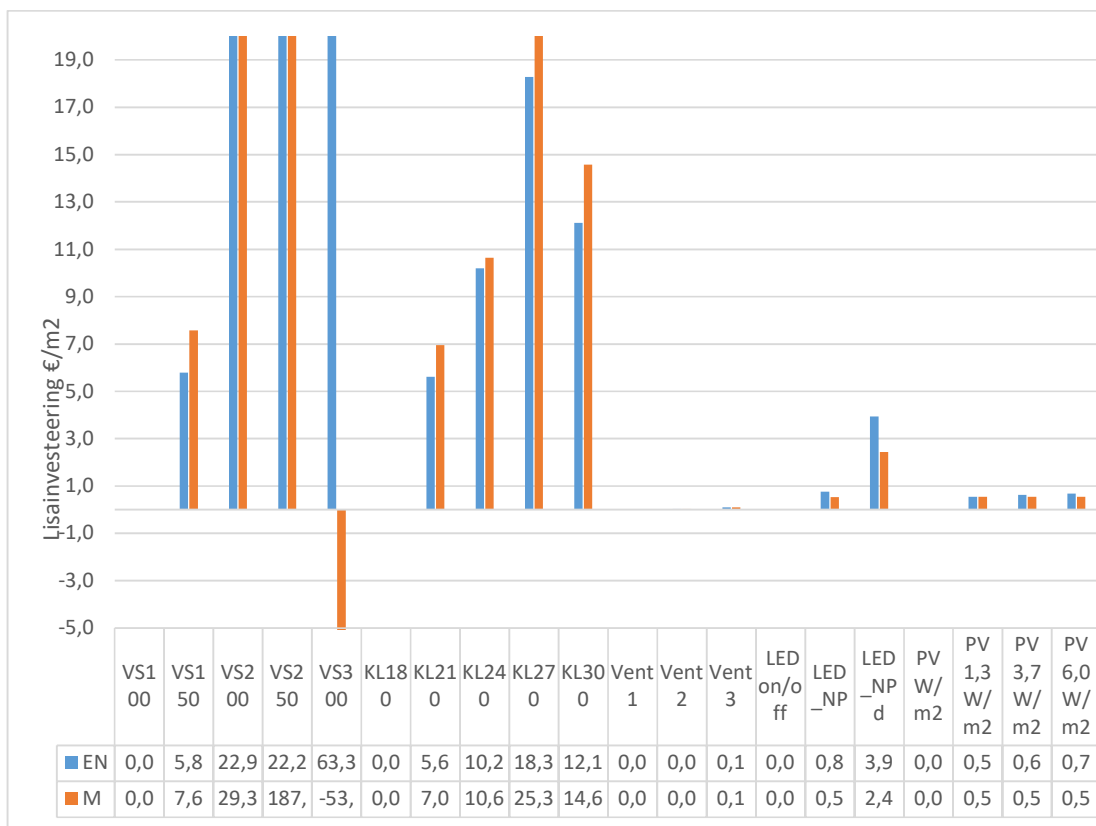
Joonis 3.7 Omatarbe muutus erinevate süsteemide ja võimsuste juures



Joonis 3.8 Mõõdetud profiiliga omatarbe osakaalu muutus sõltuvalt päiksepaneelide võimsusest.

3.6 Energiatõhususe meetmete järjestamine

Võttes arvesse iga üksiku energiatõhususe meetme maksumust, arvatati välja üksikute mudelite investeerimiskulude erinevus. Erinevate meetmete hinnad on kirjeldatud peatükis 2.4 ja peatükis 2.6 kirjeldatud metoodika järgi arvatati välja iga mudeli lisainvesteering säästetud 1 kWh ETA kohta. Arvutuse tulemused on näha joonistel 3.9. Iga meetme detailed tulemused on toodud lisa 2 tabel L2.



Joonis 3.9 Lisainvesteering säästetud ETA kohta eelneva variandi suhtes.

Meetmed mille energiatõhusus oli üliväike või negatiivne ja hinnavahe suhteliselt suur on majanduslikult ebaotstarbekad – nende lisainvesteeringu väärtus oli suur või jäi miinusmärgiga ja nende meetmetega kombinatsioone ei moodustatud. Sellisteks meetmeteks olid välisseina soojustus üle 150 mm ja katuslae soojustused üle 240 mm. Kõik numbrilised väärtused on näha tabelis L2 (lisa 2).

Nulliga võrdsed mudelid on kõige kehvema energiatõhususe arvuga ja neist moodustati esimene kombinatsioon ehk **baasmudel**. Baasmudel on edaspidi võrreldavaks mudeliks energiasäästu potentsiaali ja vajaliku investeeringu arvutustes. Baasmudelis kasutatavad

meetmed on nii mõõdetud kui määrusjärgse profiiliga samad, seega baasmudel on mõlemal juhul sama. Baasmudeli meetmed on järgmised:

1.1 Välisseina soojustuse paksus 100mm

2.1 Katuslae soojustuse paksus 140mm

3.1 Ventilatsiooniagregaatide kombinatsioon Vent 1 (kaalutud keskmine SFP 2,33 ja kaalutud keskmine temperatuuri suhtarv 77,3%)

4.1 LED valgustid käsitsijuhtimisega

5.1 PV paneelide puudumine

Esimeseks ratsionaalseks meetmeks määrusjärgse profiiliga arvutustes on suurema ventilatsiooniseadme valik, mille investeerimiskulud on väga väikesed, eriti võrreldes energiatõhususe arvu suhteliselt suurt vähenemist seetõttu. Järgmiseks ratsionaalseks meetmeks jääb päiksepaneelide paigaldamine. Viimaseks energiatõhususe suurendamise meetmeks on valgustuse nõudluspõhiseks muutmine. Mõõdetud profiiliga arvutamisel oli samuti parimaks meetmeks ventilatsiooniseadme vahetus, kuid nõudluspõhise valgustuse valimine osutus veidi tõhusamaks kui päiksepaneelide soetus. Mõlemas variandis jäid välisseina ja katuslaega soojustamised majanduslikult ebatõhusaks ja energiatõhususe kohalt vähe määravaks. Mõlema profiiliga väljavalitud kombinatsioonid on toodud tabelites 3.3 ja 3.4.

Tabel 3.3 Määrusjärgsete profiilidega arvatud uued kombinatsioonid ja nende aritmeetilised ETAd.

Kombineeritud mudeli number	Kombinatsioonid					Eelneva kombinatsiooni suhtes	Prognoositav tulemus		Märkused
	VS	KL	VENT	LED	PV	Säästetud ETA, kWh/m ²	ETA, kWh/m ²	Lisainvesteering baasmudeli suhtes €/m ²	
	1.3	2.4	3.2	4.1	5.2	11,5	104,3	7,9	projektijärgne lahendus
1K	1.1	2.1	3.1	4.1	5.1	0,0	115,8	0,0	baasmudel
	1.1	2.1	3.2	4.1	5.1	8,4	107,4	0,3	
	1.1	2.1	3.3	4.1	5.1	3,0	104,4	0,5	
	1.1	2.1	3.3	4.1	5.2	2,4	102,0	1,8	
	1.1	2.1	3.3	4.1	5.3	3,8	98,2	4,2	
2K	1.1	2.1	3.3	4.1	5.4	3,4	94,8	6,5	Vent 3, PV,
3K	1.1	2.1	3.3	4.2	5.4	10,5	84,3	14,5	vent 3, PV, NP
4K	1.1	2.1	3.3	4.3	5.4	1,5	82,8	20,5	vent 3, PV, NPd
	1.1	2.2	3.3	4.3	5.4	0,1	82,7	20,9	
5K	1.2	2.2	3.3	4.3	5.4	0,4	82,3	23,2	
	1.2	2.3	3.3	4.3	5.4	0,1	82,3	23,8	vent 3, PV, NPd, KL210, VS150

Tabel 3.4 Mõõdetud profiilidega arvatud uued kombinatsioonid ja nende aritmeetilised ETAd.

Kombineeritud mudeli number	Kombinatsioonid					Eelneva kombinatsiooni suhtes	Prognoositav tulemus		Märkused
	VS	KL	VENT	LED	PV	Säästetud ETA, kWh/m ²	ETA, kWh/m ²	Lisa-investeering baasmudeli suhtes	
	1.3	2.4	3.2	4.1	5.2	11,4	152,4	7,9	projektijärgne lahendus
1K	1.1	2.1	3.1	4.1	5.1	0,0	163,8	0,0	baasmudel
	1.1	2.1	3.2	4.1	5.1	8,4	155,4	0,3	
	1.1	2.1	3.3	4.1	5.1	3,0	152,4	0,5	
2K	1.1	2.1	3.3	4.2	5.1	15,1	137,3	8,5	Vent 3, NP
	1.1	2.1	3.3	4.2	5.2	2,4	134,9	9,8	
	1.1	2.1	3.3	4.2	5.3	4,4	130,5	12,2	
3K	1.1	2.1	3.3	4.2	5.4	4,4	126,1	14,5	Vent3, NP, PV
4K	1.1	2.1	3.3	4.3	5.4	2,5	123,7	20,5	Vent3, NPd, PV
	1.1	2.2	3.3	4.3	5.4	0,1	123,6	20,9	
5K	1.2	2.2	3.3	4.3	5.4	0,4	123,2	23,2	Vent 3, NPd, PV, VS 150, KL210
	1.2	2.3	3.3	4.3	5.4	0,1	123,2	23,8	

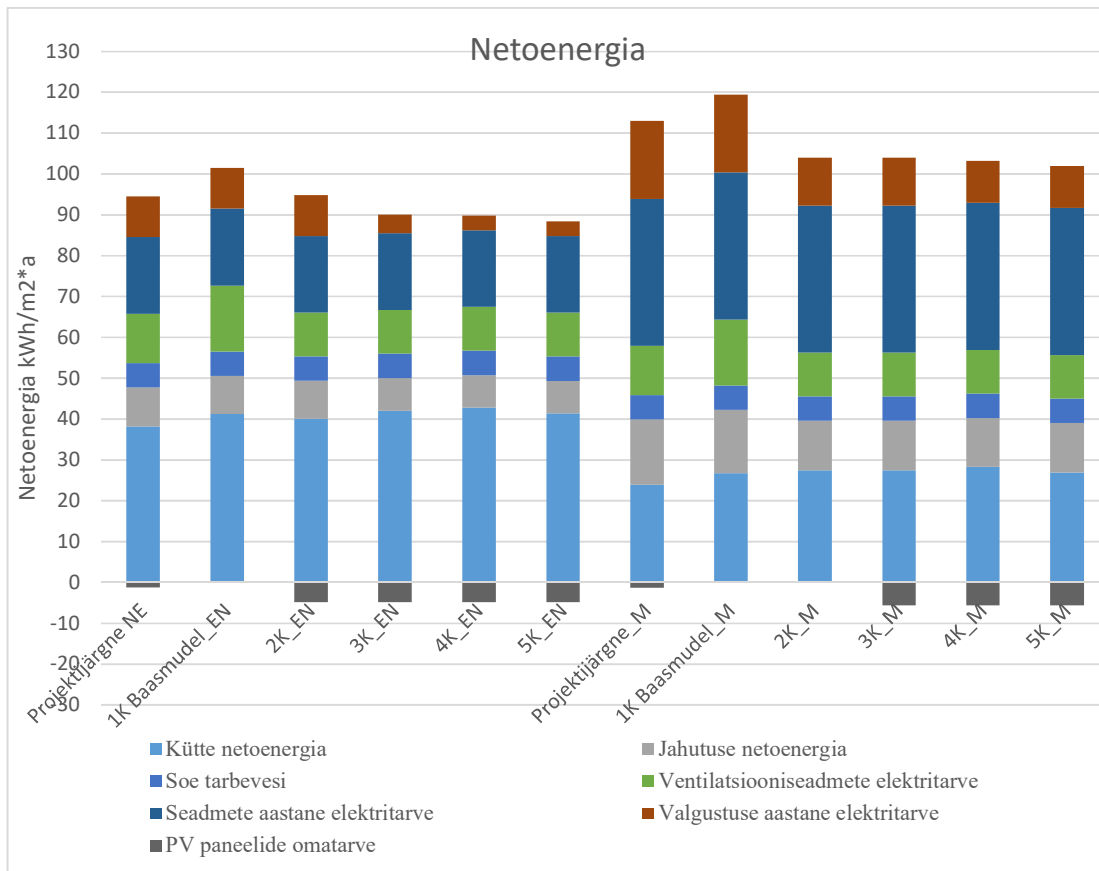
3.7 Kombinatsioonide energiatarve

Mõlema profiili puhul moodustati 10 kombinatsiooni (Tabel 3.3 ja 3.4), millest valiti välja 5, lisaks projektijärgne variant meetmetest. Valitud kombinatsioonid on detailselt näha tabelis 3.5. Kombinatsioonide ETA arvutati välja aritmeetiliselt ja kontrolliti tulemust simulatsiooniga. Aritmeetiline arvutus erines simuleeritud tulemusest 0,5 kWh/m²*a ehk ca 1% määrusjärgse profiili puhul ja 0,5% mõõdetud profiili puhul.

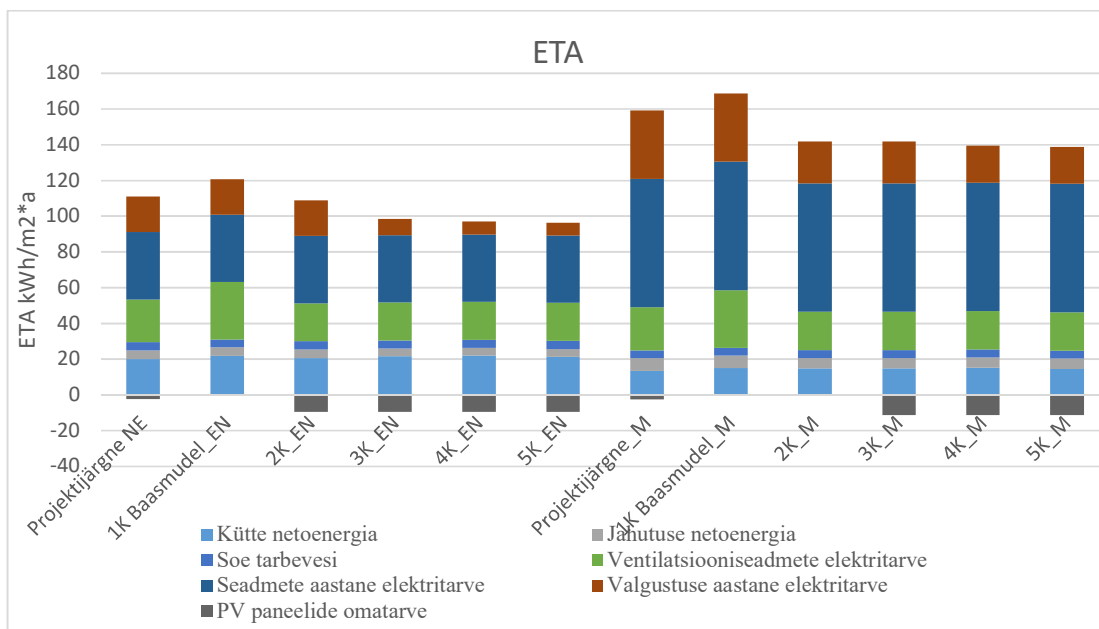
Tabel 3.5 Valitud kombinatsioonide detailed kirjeldused

Väljavalitud kombinatsioonid	Välisseina soojustus mm	Katuslae soojustus	Ventilatsiooni seadme andmed	Valgustuse juhtimine	PV võimsus W/m ²	Prognoositud ETA	Simuleeritud ETA
Projekteeritud hoone_EN	200	270	$\eta=78$, SFP=1,72	on/off	1,3		104,3
1K_Baasmudel_EN	100	180	$\eta=77,3$ SFP=2,33	on/off	0	115,8	116,2
2K_EN	100	180	$\eta=78,8$ SFP=1,52	on/off	6	94,8	95,2
3K_EN	100	180	$\eta=78,8$ SFP=1,52	Nõudluspõhine	6	84,3	84,8
4K_EN	150	180	$\eta=78,8$ SFP=1,52	Nõudluspõhine drimmerdatav	6	82,8	83,2
5k_EN	150	210	$\eta=78,8$ SFP=1,52	Nõudluspõhine drimmerdatav	6	82,3	82,6
Projekteeritud hoone_M	200	270	$\eta=78$, SFP=1,72	on/off	1,3		152,4
1K_Baasmudel_M	100	180	$\eta=77,3$ SFP=2,33	on/off	0	163,8	164,2
2K_M	100	180	$\eta=78,8$ SFP=1,52	Nõudluspõhine	0	137,3	137,8
3K_M	100	180	$\eta=78,8$ SFP=1,52	Nõudluspõhine	6	126,1	126,6
4K_M	100	210	$\eta=78,8$ SFP=1,52	Nõudluspõhine, drimmerdatav	6	123,7	124,1
5K_M	150	210	$\eta=78,8$ SFP=1,52	Nõudluspõhine, drimmerdatav	6	123,2	123,6

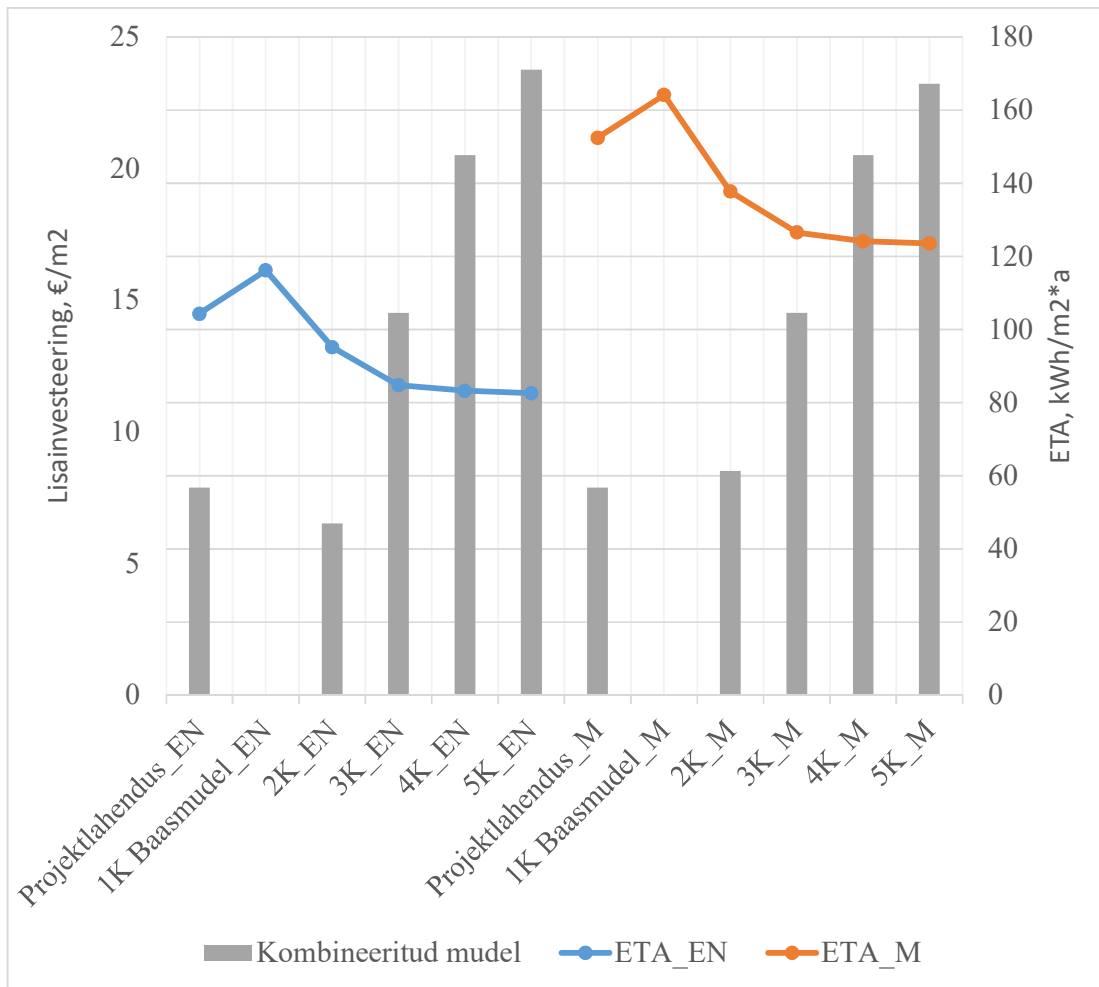
Joonised 3.10 ja 3.11 illustreerivad valitud kombinatsioonide netoenergiavajadust ja energiatõhususe arvu. Detailed arvutustulemused on näha Lisas 3 Tabelis L3.1 ja L3.2



Joonis 3.10 Kombinatsioonide netoenergiavajadus



Joonis 3.11 Kombinatsioonide energiatõhususe arv



Joonis 3.12 uuritud meetmete ratsionaalne järjekord kombineeritud mudelitena ja nende mõju ehitusmaksumusele ning energiatõhususe arvule

Väljavalitud kombinatsioonides sisalduvate meetmete mõju ehitusmaksumusele ja energiatõhususe arvule on näha mõlema profiili puhul joonisel 3.12. Valitud kombinatsioonid on mõlema profiiliga samad, väljaarvatud kombinatsioon nr 2K (2K_EN ja 2K_M), kus määrusjärgse profiiliga osutus ratsionaalsemaks meetmeks, peale ventilatsiooniagregaadi suurendamist, päiksepaneelide kasutamine ja mõõdetud profiiliga nõudluspõhise valgustuse kasutamine.

3.8 Energiatõhususe kuluoptimaalne tase ja lisainvesteeringu suurus

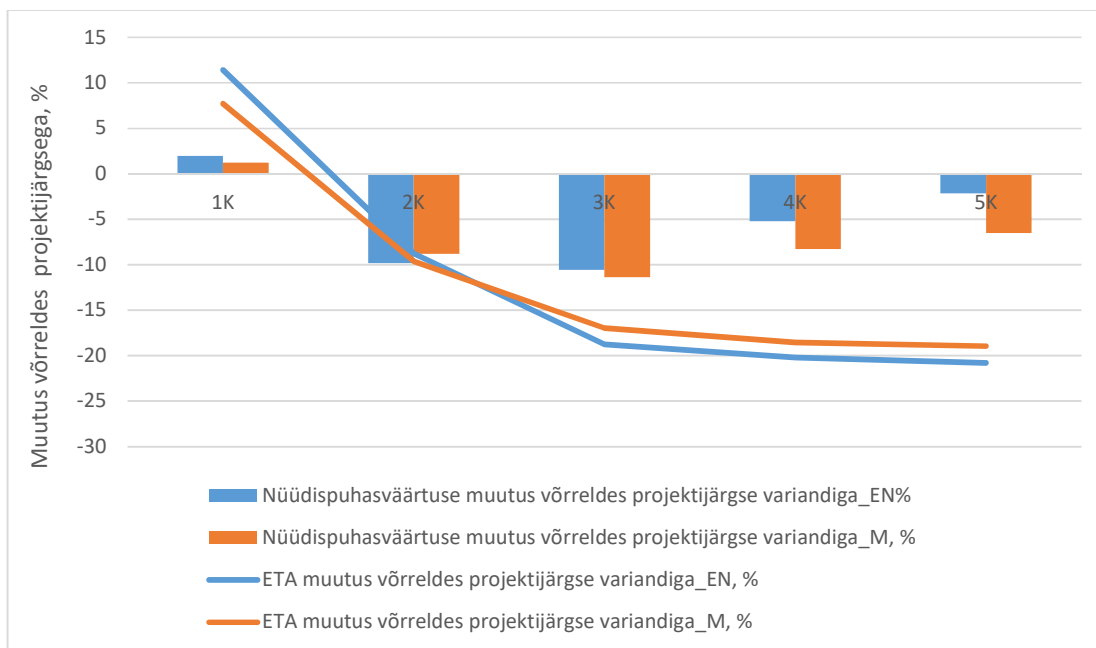
Joonisel 3.13 on toodud finantsarvutuse tulemused valitud kombinatsioonidele, mis näitavad kõrvuti mõlema profiiliga välja joonistunud energiatõhususe arvu ja 20-aastase perioodi nüüdispuhasväärtuse muutust projekteeritud meetmete suhtes.

Graafikust selgub, et mõõdetud profiil käitub sarnaselt määrusjärgse profiiliga. Mõõdetud profiiliga variantide suhteline NPV vähenemine oli samade meetmete paketi puhul alati suurem. Mida kallimaks muutus kombinatsioonide investering, seda suurem vahe oli mõõdetud ja määrusjärgsel profiilil.

Suurem erinevus tuleb sisse kallimate kombinatsioonide puhul, kus mõõdetud profiili nüüdispuhasväärtuse muutus on poole suurem: näiteks kombinatsioon nr 5K on mõõdetud profiiliga 8% väiksema NPV-ga ja määrusjärgse profiiliga ainult 4%. Erandiks on siin kombinatsioon 2K, kuna seal kasutatud meetmed ei ole erinevate profiilide puhul identsed (Vt Tabel 3.10).

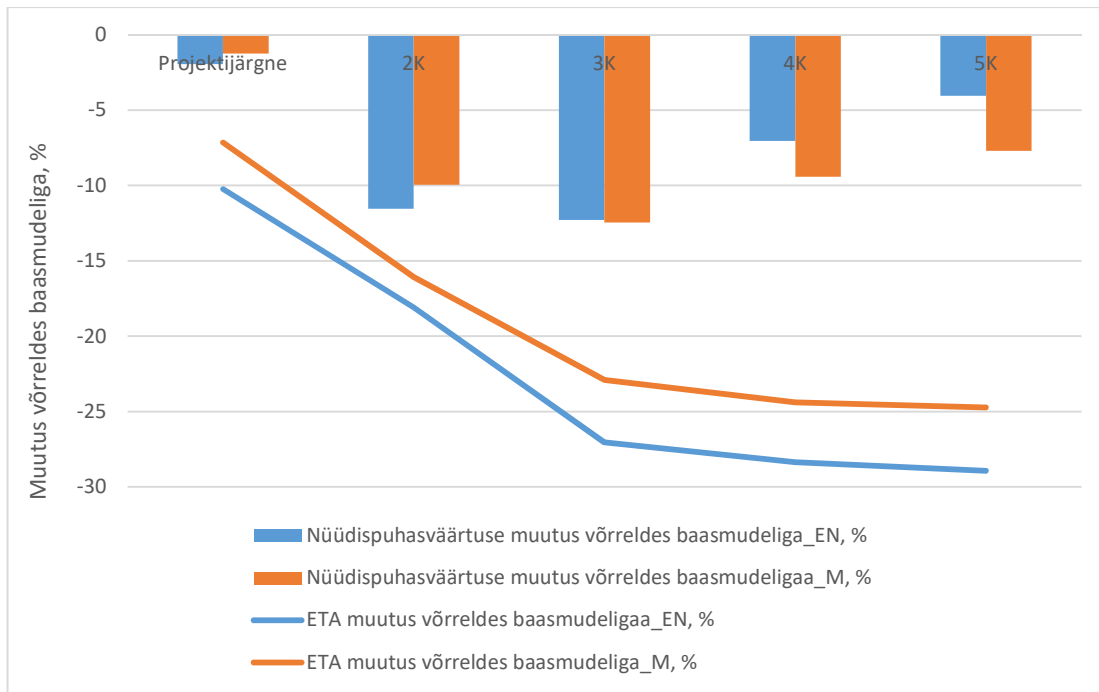
ETA vähenes mõlema profiili puhul sarnaselt ja samas suurusjärgus, olles siiski määrusjärgse profiili puhul veidi parem, st vähenemine oli suurem.

Kõrgeima nüüdispuhasväärtusega kombinatsioon peale baasmudelit, oli kombinatsioon 5K, mis sisaldas endas välisseinte ja katuslagede paksemat soojustust, kuid tulu energiatõhususele oli väike. Kõige väiksema nüüdispuhasväärtuega kombinatsioon mõlema profiili puhul, oli nr 3, mis sisaldas endas investeringut suuremale ventilatsiooniseadmele, maksimaalselt päiksepaneelide võimsusparki ja valgustuse nõudluspõhist juhtimist. Lisades nõudluspõhisele juhtimisele drimmerduse, on energiatõhusus küll parem, kuid tõstab hinda ebaproportsionaalselt palju.



Joonis 3.13 Kombineeritud mudelite ETA ja 20-aasta NPV muutus projektlahenduse suhtes

Baasmudeliga võrreldes on profiilidest tulenevad vahed väiksemad ning NPV vähenemine on odavamate variantide puhul määrusjärgsest veidi suurem (Joonis 3.14).



Joonis 3.14 Kombineeritud mudelite ETA ja 20-aasta NPV muutus baasmudeli suhtes

4 ANALÜÜS

4.1 Mõõdetud vabasoojustega profiili mõju ETAlle

Reaalselt mõõdetud seadmete ja valgustuse elektritarve ning sellest tuletatud inimeste kohaloleku profiilid erinevad oluliselt määrusjärgsetest profiilidest. Mõõdetud profiilide puhul on vabasoojuste mõju ETAlle suurem ja mõjutab oluliselt arvutuslikku energiatarvet.

Määrusjärgse profiiliga simuleerides oli projektijärgsete meetmetega ETA 104 kWh/m²*a, mis viib hoone B klassi ülemisse otsa ning võimaldab lisameetmete kasutusele võtuga lihtsasti saavutada A klassi, ehk hetkel kehtivat nõuet uutele büroohoonetele. Mõõdetud profiiliga oli ETA 152 kWh/m²*a. Lisameetmetega on võimalik langetada ETA-t 124 kWh/m²*a.

Kõige rohkem mõjutab mõõdetud profiili puhul otsese elektritarbe suurenemine valgustuse, ventilaatorite ja seadmete töö jaoks. Kuna vaadeldaval hoonel on väga heade kasuteguritega maasoojuspumpsüsteem nii kütteks kui jahutuseks, siis selle osakaalu muutus suurt mõju ei avaldanud. Kuid teiste kütte ja jahutuse liikidega hoones võib see osa suuremat ETA tõusu tähendada, jäädes siiski marginaalseks võrreldes ülalmainitud kululiikidega. Töös selgus, et netoenergiavajadus ruumide kütteks vähenes mõõdetud profiilide kasutamise puhul ca 2 korda, ning ruumide jahutuseks suurenes 3 korda.

4.2 Mõõdetud vabasoojuste mõju PV paneelide omatarbele

Tulemused näitavad, et mõõdetud profiili puhul on kõikides valitud võimsustega päiksepaneelide süsteemides omatarve 100%. Määrusjärgsete profiilide puhul selgus, et mida suurema võimsusega süsteem, seda väiksem protsent läheb omatarbesse, olles 5kW (1,3W/m²) võimsuse puhul 98% ja 23 kW (6W/m²) võimsuse puhul 86%. Sellised suhtarvud kehtisid projektijärgse sooja ja külmavarustusüsteemile, milleks oli maasoojuspump, kuid sama tendents oli näha ka teiste võrreldud sooja- ja külmavarustus süsteemide puhul.

4.3 Mõõdetud vabasoojustega profiili mõju kuluoptimaalsusele

Kuluoptimaalseks variandiks osutus mõlema profiili puhul samade meetmete süsteem:

- Välisseinte soojustus 100mm. Projektipõhisel hoonel on soojustust 200mm

- Katuslaesoojustus 180mm. Projektipõhisel hoonel on soojustust 270mm
- Ühe astme võrra suuremad ventilatsiooniagregaadid kui projektijärgselt
- Nõudluspõhine valgustuse juhtimine. Projektijärgselt valgustuse juhtimine puudus
- Maksimaalselt katusele mahtuvate PV paneelide süsteem koguvõimsusega 23 kW ehk 6 W köetava pinna m² kohta.. Projektijärgselt oli ette nähtud 5 kW (1,3 W/m²)

Määruspõhise variandi puhul alandas kuluoptimaalne meetmete kogum arvutuslikku energiatõhususe arvu 20 kWh/m²*a võrreldes projektijärgse ETAgaga ning suurendades alginvesteeringut 6,6 €/m². Nüüdispuhasväärtus 20 aastase perioodi peale võrreldes projektijärgsega oli 11 €/m² kohta väiksem.

Mõõdetud profiili puhul alandas kuluoptimaalne meetmete kogum ETA-t 26 kWh/m²*a ning omades samu meetmeid kui määrusjärgne variant, suurendas alginvesteeringut 6,6 €/m² võrra. Nüüdispuhasväärtus 20 aastase perioodi peale võrreldes projektijärgsega oli 14 €/m² kohta väiksem.

Tulemustest selgub, et suhteline ETA vähenemine on määrusjärgsel variandil suurem kuid nüüdispuhasväärtuse vähenemine on väiksem kui mõõdetud profiiliga kombinatsioonil.

Välistarindi soojustamine osutus vähetõhusaks ja kalliks meetmeks mis kuluoptimaalsuse saavutamisele kaasa ei aita.

Finantsarvutusse pole sisse arvestatud välisseinte soojustamise tõttu muutuva köetava pinna kinnisvaralist väärtuse muutust, sh saamata jäänud üüritulu, siis muutub välisseinte arvel köetava pinna vähenemine veelgi ebaratsionaalsemaks ja mittekulutõhusaks meetmeks. Kui kuluoptimaalse tulemuse saavutamiseks tuli lisaks investeerida 6,6 €/m², siis köetava pinna vahe kuluoptimaalse ja projekteeritud variandi vahel on 86 m², kusjuures 1 m² kinnisvaraline väärtus on 2500 €, mis tähendab projekteeritud variandi puhul kinnisvaralise väärtuse kahanemist 56 €/m². Töös ei ole arvestatud välisseinte soojustuse tõttu võimalikku kokkuhoidu tipukoormuse arvutamisel põhineva soojavarustussüsteemi muutust, mis tähendab, et ehkki soojustusel ei ole erilist tähtsust antud hoone aastasel energiakulul, võib see olulist rolli mängida soojavarustusseadmete investeeringul.

KOKKUVÕTE

Käesolevas töös uuriti reaalselt mõõdetud vabasoojuste mõju büroohoone arvutuslikule energiale – ja kulutõhususele. Töö eesmärgiks oli võrrelda reaalselt mõõdetud büroohoone kasutusprofiile määrusjärgsete profiilidega ning leida nende erinevus arvutuslikule energiatõhususe arvule, päiksepaneelide omatarbele ja hoone kuluoptimaalsusele.

Uuritud on 13 korruselist ehitusjärgus rohebüroo hoonet Pärnu mnt 113, Tallinnas, mille köetav pind on 3833m² ning mis peaks valmima 2022a. Lähteandmetena kasutati hoone põhiprojekti.

Andmed, mõõdetud kasutusprofiili loomiseks, saadi 2017a energia mõõtmistulemuste baasil ühe kasutuses oleva Tallinna 11 000 m²-se köetava pinnaga büroopindade hooneautomaatika süsteemist. Analüüsitud tulemused võeti lähteandmetena antud töösse ning nende abil loodi simuleerimisprogrammi IDA ICE makro, mis võimaldas määrusjärgseid ja mõõdetud profiile samades mudelites ja samadel tingimustel kasutada. Andmeid kasutati vaid inimeste kohaloleku ja seadmete ning valgustuse kasutusprofiili loomiseks ja kasutamiseks; määrusjärgsed võimsused eelpoolnimetatud osades jäid samaks. Mõõdetud profiil erineb määrusjärgsest profiilist põhiliselt sellega, et tarbimine ei lähe ka öösel ega nädalavahetusel nulli. Tööpäevade tipud ja kulgumine on aga väga sarnased

Hoone netoenergiavajadus ja päiksepaneelide toodang arvutati programmis IDA ICE 4.8. Dünaamilise väliskliima simulatsioon teostati Eesti baasaasta põhjal.

Analüüsiti erinevaid üksikuid energiatõhususe meetmeid leides iga meetme energiatõhususarvu vähendava väärtuse ning selle meetme lisainvesteeringu kõige vähem tõhusa meetme suhtes. Seejärel oli võimalik meetmed ratsionaalselt järjestada vastavalt nende maksumusele vähendada ETAt 1kWh/m²*a. Järjestatud meetmetega tekitati mõlema profiili puhul energiatõhusate meetmetega kombinatsioone ning nende kombinatsioonide netoenergiatarve simuleeriti IDA ICEs. Samuti arvutati iga kombinatsiooni lisainvesteering baasvariandisuhetes. Nende andmetega oli võimalik igale kombinatsioonile arvutada 20 aastase perioodi peale nüüdispuhasväärtus (€/m²), mille väikseim tulemus ongi kuluoptimaalne meetmete kogum.

Töös selgus, et mõõdetud profiilide puhul on energiatarve märgatavalt suurem ja seda seadmete ja valgustuse elektritarbe tõttu. Ehkki ruumide kütte netoenergia vähenes 50% võrreldes määrusjärgse profiiliga arvutatuga, siis jahutusenergia ruumis suurenes ca 3 korda. Ventilatsioonikalorifeeride küte ja jahutus jäi samasse suurusjärku ja ei muutunud.

Kuna hoones on kasutusel väga energiatõhus sooja ja külmavarustussüsteem, siis nii kütte kui jahutuse muutus omas ETAl väikest mõju võrreldes ventilaatorite, seadmete ja valgustite elektritarbega. Kui projektijärgne lahendus mõõdetud profiiliga jäi napilt liginullhoone piiridest välja kuid on mõne lisameetmega lihtsasti saavutatav, siis määrusjärgse profiili puhul jäi ETA C klassi lõppu ja parima meetmepaketiga oli võimalik jõuda B klassi ehk madalenergiahooneks.

Päiksepaneelide omatarbe uurimisel selgus, et mida suurema võimsusega on päiksepaneelide süsteem seda suurem on ekspordi protsent. Mõõdetud profiili kasutamine mõjus omatarbe protsendile hästi – kõigil vaadeldud juhtudel oli see 100%, kuid määrusjärgse profiili puhul jäi omatarve sõltuvalt süsteemi võimsusest 86-98% juurde. Kuluoptimaalsete meetmete leidmisel käitusid mõlemad profiili arvutused sarnaselt. Väike erinevus oli nõudluspõhise valgustuse kulutõhususes, mis mõõdetud profiilide puhul oli suurem kui määrusjärgsel profiilil, mille jaoks aga oli päiksepaneelide eelistamine kulutõhusam meede. Mõlema profiili puhul kujunes kuluoptimaalseks lahenduseks võrreldes projektijärgsega suurema ventilatsiooniseadme kasutamine, maksimaalse võimsusega päiksepaneelide ning nõudluspõhise valgustussüsteemi kasutamine.

Kui ETAg soovitakse anda aimu tulevastest energiakuludest ning vähendada vahet ETA ja KEKi vahel, tuleks määrusjärgsed profiilid ja piirnõuded büroohonetele ilmselt ümber kohandada. Kohandamiseks tuleks jätkata sarnaste uuringutega, et järeldus oleks laiapõhjalisem ning uurida ka erinevat tüüpi büroohonete vabasoojuste erinevusi. Kuna nii sellest uuringust kui ka paljudest eelnevatest uuringutest selgub, et büroode hoonekarbi energiatõhusus, sh füüsikalised parameetrid omavad järjest vähem mõju tegelikule energiatarbele, siis võiks määruse kohaldamisel mõelda ka ETA arvutamise raskuskeskme nihutamist külmasildadelt ja muudelt ETAt vähe mõjutavatelt (kuid suurt ajaressurssi nõudvad) elementidelt hoone kasutust iseloomustavate, ja lõviosa energiast tarbivate, elementide poole.

SUMMARY

The aim of the work was to compare the moderated office building usage profile with the profile, which are in Estonian regulation and also their differences calculated energy efficiency number, solar panel self-consumption and building cost optimality. A 13-storey office building, under construction, at Pärnu mnt 113 in Tallinn, has been studied, the heated area of it is 3833 m². The main design of the building was used as raw data.

The data, in order to create a measured usage profile, were obtained on the basis of the 2017 energy measurement results of the existing building BMS of 11,000 m² of heated office space in Tallinn.

The measured profile differs from the regulatory profile mainly in that consumption does not go to zero at night and on weekends, but the peaks and course of the working days are very similar.

The net energy demand of the building and the production of solar panels were calculated in the IDA ICE 4.8 program. The simulation of the dynamic outdoor climate was performed on the basis of the Estonian base year.

The study revealed that the energy consumption of the measured profiles is significantly higher due to the electricity consumption of equipment and lighting. Although the net energy of space heating decreased by 50% compared to the calculated profile according to the regulation, the cooling energy in the room increased about 3 times. As the building uses a very energy-efficient heating and cooling system, the change in both heating and cooling had a small effect on the energy calculations compared to the electricity consumption of the fans, equipment and luminaires.

The examination of the self-consumption of solar panels revealed that the higher the capacity of the solar panel system is, the higher the percentage of exports. The use of the measured profile had a good effect on the percentage of own consumption - in all observed cases it was 100%, but in the case of the regulation-profile, the own consumption remained at 86-98% depending on the system capacity.

When finding cost-optimal measures, both profile calculations behaved similarly. For both profiles, the cost-optimal solution was the use of a larger ventilation unit than the project, the use of solar panels with maximum power and a demand-based lighting system.

Similar studies should be continued in order to reach a final conclusion, as well its necessity to study the differences the heat gain impact on different types of office buildings.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Euroopa Parlamendi ja Nõukogu direktiiv 2010/31/EL *hoonete energiatõhususe kohta*, 2010.
- [2] Euroopa Parlamendi ja Nõukogu Direktiiv 2012/27/EL, *milles käsitletakse energiatõhusust*.2012.
- [3] Euroopa Komisjoni delegeeritud määrus (EL), nr 244/2012, *millega täiendatakse direktiivi 2010/31/EL*. 2012.
- [4] Euroopa Parlamendi ja Nõukogu direktiiv (EL) 2018/844, *millega muudetakse direktiivi 2010/31/EL hoonete energiatõhususe kohta ja direktiivi 2012/27/EL energiatõhususe kohta*. 2018.
- [5] Ettevõtetus ja tehnoloogiainistri määrus Nr 63 (11.12.2018), "Hoone energiatõhususe miinimumnõuded," Riigi Teataja, 2020.
- [6] Majandus- ja taristuministri määrus nr 58 (05.06.2015), "Hoone energiatõhususe arvutamise meetodika," Riigi Teataja, 2020.
- [7] Majandus- ja taristuministri määrus nr 36 (06.05.2015), "Nõuded energiamärgise andmisele ja energiamärgisele," Riigi Teataja, 2020.
- [8] J. Kurnitski, T.Kalamees, A.Hambur, K. Kuusk, T.M.Kull, J. Fadejev, M. Kiil, T. Tark , "Hoonete arvutuslike energiamärgiste vastavus tegelikule tarbimisele.," Taltech. 2016.
- [9] S. Chen, G. Zhang, X. Xia, S. Setunge, and L. Shi, "A review of internal and external influencing factors on energy efficiency design of buildings," Energy Build. 2020.
- [10] Z. Wang and Y. Ding, "An occupant-based energy consumption prediction model for office equipment," Energy Build.2015.
- [11] T. Buso, V. Fabi, R. K. Andersen, and S. P. Corgnati, "Occupant behaviour and robustness of building design," Build. Environ. 2015.
- [12] J. Kurnitski, A. Saari, T. Kalamees, M. Vuolle, J. Niemelä, and T. Tark, "Cost optimal and nearly zero energy performance requirements for building in Estonia," Est.J. Eng., no. 3, 2013.
- [13] A. Engels, "Ehituse ja arhitektuuri instituut Elektritarbimise analüüs kahe büroohoone näitel Tallinnas Ülemiste Citys," Magistritöö, Taltech, 2019.
- [14] E. Pikas, M. Thalfeldt, J. Kurnitski, and R. Liias, "Extra cost analyses of two apartment buildings for achieving nearly zero and low energy buildings," Energy, 2015.
- [15] Ivanov Jakov, „Metalli tn 3 büroohoone lisainvesteeringu ja energiatõhususe analüüs," Magistritöö, Taltech. 2016.
- [16] E. Pikas, J. Kurnitski, M. Thalfeldt, and L. Koskela, "Cost-benefit analysis of nZEB energy efficiency strategies with on-site photovoltaic generation,"

Energy, 2017,

- [17] ERR, "Tallinnas kerkib Pärnu maantee viadukti juurde 13 korrusega kõrghoone," 2020. <https://www.err.ee/1133170/tallinnas-kerkib-panu-maantee-viadukti-juurde-13-korrusega-korghoone>.
- [18] IDA-ICE, "IDA Indoor Climate and Energy 4.8 SP2," IDA Indoor Climate and Energy 4.8, 2020.
- [19] J. Kurnitski, T. Kalamees, "Estonian test reference year for energy calculations.," Proceeding Est. Acad. Sci. Eng. 2006, (12), 40-58, 2006.
- [20] Andrea Ferrantelli, Helena Kuivjõgi, Jarek Kurnitski, Martin Thalfeldt "Office Building Tenants' Electricity Use Model for Building Performance Simulations Title," 2021.
- [21] M. Aljas, Hans Kristjan; Ferrantelli, Andrea; Maask, Vahur; Thalfeldt, "Tenant-based measured Electricity Use in 4 large Office Buildings in Tallinn, Estonia," 10th SCANVAC Conf. konverentsile vastu võetud abstrakt. <https://hvac2021.org/>, 2021.
- [22] M. Thalfeldt, „Total economy of energy-efficient office building facades in a cold climate" Doktoritöö, Taltech 2016.
- [23] Eurostat, "Electricity price statistics - Statistics Explained," Eur. Comm., no. November, pp. 1-12, 2020,

LISAD

Lisa 1 - Üksikute energiatõhususe meetmete energiatarbe arvutustulemused

Lisa 2 – Üksikute meetmete lisainvesteering säästetud ETA suhtes, €/kWh

Lisa 3 – Kombinatsioonide energiatarbe arvutustulemuse

Lisa 1

Tabel L.1 Üksikute energiatõhususe meetmete energiatarbe arvutused

Mudel		Energiatarve kWh/(m ² ·a)	KOKKU	Ruumis		Vent. Seadmes		Muu energiakulu				Lokaalne taastuenergia	
				Küte	Jahutus	Küte	Jahutus	Soe tarbevesi	Venti- laatorid	Seadmed	Valgustus	PV omatarve	PV toodang
0 _{EN}	Algne	Neto	93,3	32,8	3,8	5,4	5,7	6,0	12,0	18,8	10,0	-1,2	1,2
		Bruto	52,2	7,5	0,6	1,2	0,9	2,2	12,0	18,8	10,0	-1,2	1,2
		ETA	104,3	15,0	1,3	2,5	1,9	4,4	24,0	37,6	20,0	-2,4	2,4
0 _M	Algne	Neto	111,8	18,6	10,3	5,3	5,7	6,0	12,0	36,0	19,1	-1,2	1,2
		Bruto	76,2	4,3	1,7	1,2	0,9	2,2	12,0	36,0	19,1	-1,2	1,2
		ETA	152,4	8,5	3,4	2,4	1,9	4,4	24,0	72,0	38,2	-2,4	2,4
1.1 _{EN}	VS100	Neto	95,6	34,2	3,5	5,4	5,7	6,0	12,0	18,8	10,0	0,0	0,0
		Bruto	53,6	7,8	0,6	1,2	0,9	2,2	12,0	18,8	10,0	0,0	0,0
		ETA	107,2	15,7	1,1	2,5	1,9	4,4	24,0	37,6	20,0	0,0	0,0
1.1 _M	VS100	Neto	113,7	19,8	9,7	5,4	5,7	6,0	12,0	36,0	19,1	0,0	0,0
		Bruto	77,6	4,5	1,6	1,2	0,9	2,2	12,0	36,0	19,1	0,0	0,0
		ETA	155,2	9,1	3,2	2,4	1,9	4,4	24,0	72,0	38,2	0,0	0,0
1.2 _{EN}	VS150	Neto	94,7	33,1	3,7	5,4	5,7	6,0	12,0	18,8	10,0	0,0	0,0
		Bruto	53,4	7,6	0,6	1,2	0,9	2,2	12,0	18,8	10,0	0,0	0,0
		ETA	106,8	15,2	1,2	2,5	1,9	4,4	24,0	37,6	20,0	0,0	0,0
1.2 _M	VS150	Neto	113,1	18,9	10,0	5,4	5,7	6,0	12,0	36,0	19,1	0,0	0,0
		Bruto	77,5	4,3	1,6	1,2	0,9	2,2	12,0	36,0	19,1	0,0	0,0
		ETA	154,9	8,7	3,3	2,4	1,9	4,4	24,0	72,0	38,2	0,0	0,0

Mudel		Energiatarve kWh/(m ² *a)	KOKKU	Ruumis		Vent. Seadmes		Muu energiakulu				Lokaalne taastuenergia	
				Küte	Jahutus	Küte	Jahutus	Soe tarbevesi	Venti- laatorid	Seadmed	Valgustus	PV omatarve	PV toodang
1.3 _{EN}	VS200	Neto	94,5	32,8	3,8	5,4	5,7	6,0	12,0	18,8	10,0	0,0	0,0
		Bruto	53,3	7,5	0,6	1,2	0,9	2,2	12,0	18,8	10,0	0,0	0,0
		ETA	106,7	15,0	1,3	2,5	1,9	4,4	24,0	37,6	20,0	0,0	0,0
1.3 _M	VS200	Neto	113,0	18,6	10,3	5,3	5,7	6,0	12,0	36,0	19,1	0,0	0,0
		Bruto	77,4	4,3	1,7	1,2	0,9	2,2	12,0	36,0	19,1	0,0	0,0
		ETA	154,9	8,5	3,4	2,4	1,9	4,4	24,0	72,0	38,2	0,0	0,0
1.4 _{EN}	VS250	Neto	94,4	32,6	4,0	5,4	5,7	6,0	12,0	18,8	10,0	0,0	0,0
		Bruto	53,3	7,5	0,7	1,2	0,9	2,2	12,0	18,8	10,0	0,0	0,0
		ETA	106,6	14,9	1,3	2,5	1,9	4,4	24,0	37,6	20,0	0,0	0,0
1.4 _M	VS250	Neto	113,1	18,4	10,5	5,3	5,7	6,0	12,0	36,0	19,1	0,0	0,0
		Bruto	77,4	4,2	1,7	1,2	0,9	2,2	12,0	36,0	19,1	0,0	0,0
		ETA	154,9	8,5	3,4	2,4	1,9	4,4	24,0	72,0	38,2	0,0	0,0
1.5 _{EN}	VS300	Neto	94,4	32,5	4,1	5,4	5,7	6,0	12,0	18,8	10,0	0,0	0,0
		Bruto	53,3	7,5	0,7	1,2	0,9	2,2	12,0	18,8	10,0	0,0	0,0
		ETA	106,6	14,9	1,3	2,5	1,9	4,4	24,0	37,6	20,0	0,0	0,0
1.5 _M	VS300	Neto	113,2	18,4	10,6	5,3	5,7	6,0	12,0	36,0	19,1	0,0	0,0
		Bruto	77,4	4,2	1,7	1,2	0,9	2,2	12,0	36,0	19,1	0,0	0,0
		ETA	154,9	8,4	3,5	2,4	1,9	4,4	24,0	72,0	38,2	0,0	0,0

Mudel	Energiatarve kWh/(m ² *a)	KOKKU	Ruumis		Vent. Seadmes		Muu energiakulu				Lokaalne taastuenergia		
			Küte	Jahutus	Küte	Jahutus	Soe tarbevesi	Venti- laatorid	Seadmed	Valgustus	PV omatarve	PV toodang	
2.1 _{EN}	KL180	Neto	94,9	33,2	3,8	5,4	5,7	6,0	12,0	18,8	10,0	0,0	0,0
		Bruto	53,4	7,6	0,6	1,2	0,9	2,2	12,0	18,8	10,0	0,0	0,0
		ETA	106,8	15,2	1,3	2,5	1,9	4,4	24,0	37,6	20,0	0,0	0,0
2.1 _M	KL180	Neto	113,3	18,9	10,2	5,4	5,7	6,0	12,0	36,0	19,1	0,0	0,0
		Bruto	77,5	4,3	1,7	1,2	0,9	2,2	12,0	36,0	19,1	0,0	0,0
		ETA	155,0	8,7	3,4	2,4	1,9	4,4	24,0	72,0	38,2	0,0	0,0
2.2 _{EN}	KL210	Neto	94,8	33,0	3,8	5,4	5,7	6,0	12,0	18,8	10,0	0,0	0,0
		Bruto	53,4	7,6	0,6	1,2	0,9	2,2	12,0	18,8	10,0	0,0	0,0
		ETA	106,8	15,2	1,3	2,5	1,9	4,4	24,0	37,6	20,0	0,0	0,0
2.2 _M	KL210	Neto	113,2	18,8	10,3	5,4	5,7	6,0	12,0	36,0	19,1	0,0	0,0
		Bruto	77,5	4,3	1,7	1,2	0,9	2,2	12,0	36,0	19,1	0,0	0,0
		ETA	155,0	8,6	3,4	2,4	1,9	4,4	24,0	72,0	38,2	0,0	0,0
2.3 _{EN}	KL240	Neto	94,7	32,9	3,8	5,4	5,7	6,0	12,0	18,8	10,0	0,0	0,0
		Bruto	53,4	7,6	0,6	1,2	0,9	2,2	12,0	18,8	10,0	0,0	0,0
		ETA	106,8	15,1	1,3	2,5	1,9	4,4	24,0	37,6	20,0	0,0	0,0
2.3 _M	KL240	Neto	113,1	18,7	10,3	5,3	5,7	6,0	12,0	36,0	19,1	0,0	0,0
		Bruto	77,5	4,3	1,7	1,2	0,9	2,2	12,0	36,0	19,1	0,0	0,0
		ETA	154,9	8,6	3,4	2,4	1,9	4,4	24,0	72,0	38,2	0,0	0,0

Mudel	Energiatarve kWh/(m ² *a)	KOKKU	Ruumis		Vent. Seadmes		Muu energiakulu				Lokaalne taastuvenergia		
			Küte	Jahutus	Küte	Jahutus	Soe tarbevesi	Venti-laatorid	Seadmed	Valgustus	PV omatarve	PV toodang	
2.4 _{EN}	KL270	Neto	94,5	32,8	3,8	5,4	5,7	6,0	12,0	18,8	10,0	0,0	0,0
		Bruto	53,3	7,5	0,6	1,2	0,9	2,2	12,0	18,8	10,0	0,0	0,0
		ETA	106,7	15,0	1,3	2,5	1,9	4,4	24,0	37,6	20,0	0,0	0,0
2.4 _M	KL270	Neto	113,0	18,6	10,3	5,3	5,7	6,0	12,0	36,0	19,1	0,0	0,0
		Bruto	77,4	4,3	1,7	1,2	0,9	2,2	12,0	36,0	19,1	0,0	0,0
		ETA	154,9	8,5	3,4	2,4	1,9	4,4	24,0	72,0	38,2	0,0	0,0
2.5 _{EN}	KL300	Neto	94,4	32,7	3,8	5,4	5,7	6,0	12,0	18,8	10,0	0,0	0,0
		Bruto	53,3	7,5	0,6	1,2	0,9	2,2	12,0	18,8	10,0	0,0	0,0
		ETA	106,7	15,0	1,3	2,5	1,9	4,4	24,0	37,6	20,0	0,0	0,0
2.5 _M	KL300	Neto	112,9	18,5	10,3	5,3	5,7	6,0	12,0	36,0	19,1	0,0	0,0
		Bruto	77,4	4,2	1,7	1,2	0,9	2,2	12,0	36,0	19,1	0,0	0,0
		ETA	154,8	8,5	3,4	2,4	1,9	4,4	24,0	72,0	38,2	0,0	0,0
3.1 _{EN}	Vent 1	Neto	99,2	32,8	3,8	6,0	5,7	6,0	16,1	18,8	10,0	0,0	0,0
		Bruto	57,6	7,5	0,6	1,4	0,9	2,2	16,1	18,8	10,0	0,0	0,0
		ETA	115,1	15,0	1,3	2,7	1,9	4,4	32,2	37,6	20,0	0,0	0,0
3.1 _M	Vent 1	Neto	117,6	18,6	10,3	5,9	5,7	6,0	16,1	36,0	19,1	0,0	0,0
		Bruto	81,6	4,3	1,7	1,3	0,9	2,2	16,1	36,0	19,1	0,0	0,0
		ETA	163,3	8,5	3,4	2,7	1,9	4,4	32,2	72,0	38,2	0,0	0,0

Mudel		Energiatarve kWh/(m ² *a)	KOKKU	Ruumis		Vent. Seadmes		Muu energiakulu				Lokaalne taastuenergia	
				Küte	Jahutus	Küte	Jahutus	Soe tarbevesi	Venti- laatorid	Seadmed	valgustus	PV omatarve	PV toodang
3.2 _{EN}	Vent 2	Neto	94,5	32,8	3,8	5,4	5,7	6,0	12,0	18,8	10,0	0,0	0,0
		Bruto	53,3	7,5	0,6	1,2	0,9	2,2	12,0	18,8	10,0	0,0	0,0
		ETA	106,7	15,0	1,3	2,5	1,9	4,4	24,0	37,6	20,0	0,0	0,0
3.2 _M	Vent 2	Neto	113,0	18,6	10,3	5,3	5,7	6,0	12,0	36,0	19,1	0,0	0,0
		Bruto	77,4	4,3	1,7	1,2	0,9	2,2	12,0	36,0	19,1	0,0	0,0
		ETA	154,9	8,5	3,4	2,4	1,9	4,4	24,0	72,0	38,2	0,0	0,0
3.3 _{EN}	Vent 3	Neto	92,6	32,8	3,8	4,8	5,7	6,0	10,7	18,8	10,0	0,0	0,0
		Bruto	51,9	7,5	0,6	1,1	0,9	2,2	10,7	18,8	10,0	0,0	0,0
		ETA	103,7	15,1	1,3	2,2	1,9	4,4	21,4	37,6	20,0	0,0	0,0
3.3 _M	Vent 3	Neto	111,0	18,6	10,3	4,7	5,7	6,0	10,7	36,0	19,1	0,0	0,0
		Bruto	75,9	4,3	1,7	1,1	0,9	2,2	10,7	36,0	19,1	0,0	0,0
		ETA	151,9	8,5	3,4	2,1	1,9	4,4	21,4	72,0	38,2	0,0	0,0
4.1 _{EN}	LED_ on/off	Neto	94,5	32,8	3,8	5,4	5,7	6,0	12,0	18,8	10,0	0,0	0,0
		Bruto	53,3	7,5	0,6	1,2	0,9	2,2	12,0	18,8	10,0	0,0	0,0
		ETA	106,7	15,0	1,3	2,5	1,9	4,4	24,0	37,6	20,0	0,0	0,0
4.1 _M	LED_ on/off	Neto	113,0	18,6	10,3	5,3	5,7	6,0	12,0	36,0	19,1	0,0	0,0
		Bruto	77,4	4,3	1,7	1,2	0,9	2,2	12,0	36,0	19,1	0,0	0,0
		ETA	154,9	8,5	3,4	2,4	1,9	4,4	24,0	72,0	38,2	0,0	0,0

Mudel		Energiatarve kWh/(m ² *a)	KOKKU	Ruumis		Vent. Seadmes		Muu energiakulu				Lokaalne taastuenergia	
				Küte	Jahutus	Küte	Jahutus	Soe tarbevesi	Venti- laatorid	Seadmed	valgustus	PV omatarve	PV toodang
4.2 _{EN}	LED_ NP	Neto	89,6	34,7	2,4	5,5	5,7	6,0	12,0	18,8	4,5	0,0	0,0
		Bruto	48,1	8,0	0,4	1,3	0,9	2,2	12,0	18,8	4,5	0,0	0,0
		ETA	96,2	15,9	0,8	2,5	1,9	4,4	24,0	37,6	9,1	0,0	0,0
4.2 _M	LED_ NP	Neto	103,9	20,3	6,7	5,5	5,7	6,0	12,0	36,0	11,7	0,0	0,0
		Bruto	69,9	4,7	1,1	1,2	0,9	2,2	12,0	36,0	11,7	0,0	0,0
		ETA	139,8	9,3	2,2	2,5	1,9	4,4	24,0	72,0	23,4	0,0	0,0
4.3 _{EN}	LED_ NPdrim	Neto	89,4	35,4	2,4	5,5	5,7	6,0	12,0	18,8	3,6	0,0	0,0
		Bruto	47,4	8,1	0,4	1,3	0,9	2,2	12,0	18,8	3,6	0,0	0,0
		ETA	94,7	16,3	0,8	2,5	1,9	4,4	24,0	37,6	7,2	0,0	0,0
4.3 _M	LED_ NP	Neto	103,1	21,2	6,5	5,5	5,7	6,0	12,0	36,0	10,3	0,0	0,0
		Bruto	68,6	4,9	1,1	1,2	0,9	2,2	12,0	36,0	10,3	0,0	0,0
		ETA	137,3	9,7	2,1	2,5	1,9	4,4	24,0	72,0	20,6	0,0	0,0
5.1 _{EN}	PV 0 W/m ²	Neto	94,5	32,8	3,8	5,4	5,7	6,0	12,0	18,8	10,0	0,0	0,0
		Bruto	53,3	7,5	0,6	1,2	0,9	2,2	12,0	18,8	10,0	0,0	0,0
		ETA	106,7	15,0	1,3	2,5	1,9	4,4	24,0	37,6	20,0	0,0	0,0
5.1 _M	PV 0 W/m ²	Neto	113,0	18,6	10,3	5,3	5,7	6,0	12,0	36,0	19,1	0,0	0,0
		Bruto	77,4	4,3	1,7	1,2	0,9	2,2	12,0	36,0	19,1	0,0	0,0
		ETA	154,9	8,5	3,4	2,4	1,9	4,4	24,0	72,0	38,2	0,0	0,0

Mudel		Energiatarve kWh/(m ² *a)	KOKKU	Ruumis		Vent. Seadmes		Muu energiakulu				Lokaalne taastuvenergia	
				Küte	Jahutus	Küte	Jahutus	Soe tarbevesi	Venti- laatorid	Seadmed	valgustus	PV omatarve	PV toodang
5.2 _{EN}	PV	Neto	93,3	32,8	3,8	5,4	5,7	6,0	12,0	18,8	10,0	-1,2	1,2
	1,3	Bruto	52,2	7,5	0,6	1,2	0,9	2,2	12,0	18,8	10,0	-1,2	1,2
	W/m ²	ETA	104,3	15,0	1,3	2,5	1,9	4,4	24,0	37,6	20,0	-2,4	2,4
5.2 _M	PV	Neto	111,8	18,6	10,3	5,3	5,7	6,0	12,0	36,0	19,1	-1,2	1,2
	1,3	Bruto	76,2	4,3	1,7	1,2	0,9	2,2	12,0	36,0	19,1	-1,2	1,2
	W/m ²	ETA	152,4	8,5	3,4	2,4	1,9	4,4	24,0	72,0	38,2	-2,4	2,4
5.3 _{EN}	PV	Neto	91,4	32,8	3,8	5,4	5,7	6,0	12,0	18,8	10,0	-3,1	3,4
	3,7	Bruto	50,3	7,5	0,6	1,2	0,9	2,2	12,0	18,8	10,0	-3,1	3,4
	W/m ²	ETA	100,5	15,0	1,3	2,5	1,9	4,4	24,0	37,6	20,0	-6,2	6,8
5.3 _M	PV	Neto	109,6	18,6	10,3	5,3	5,7	6,0	12,0	36,0	19,1	-3,4	3,4
	3,7	Bruto	74,0	4,3	1,7	1,2	0,9	2,2	12,0	36,0	19,1	-3,4	3,4
	W/m ²	ETA	148,1	8,5	3,4	2,4	1,9	4,4	24,0	72,0	38,2	-6,8	6,8
5.4 _{EN}	PV	Neto	89,7	32,8	3,8	5,4	5,7	6,0	12,0	18,8	10,0	-4,8	5,6
	6,0	Bruto	48,5	7,5	0,6	1,2	0,9	2,2	12,0	18,8	10,0	-4,8	5,6
	W/m ²	ETA	97,1	15,0	1,3	2,5	1,9	4,4	24,0	37,6	20,0	-9,6	11,2
5.4 _M	PV	Neto	107,4	18,6	10,3	5,3	5,7	6,0	12,0	36,0	19,1	-5,6	5,6
	6,0	Bruto	71,8	4,3	1,7	1,2	0,9	2,2	12,0	36,0	19,1	-5,6	5,6
	W/m ²	ETA	143,7	8,5	3,4	2,4	1,9	4,4	24,0	72,0	38,2	-11,2	11,2

Lisa 2

Tabel L2 Üksikute meetmete lisainvesteering säästetud ETA (määrusjärgse profiiliga) suhtes (€/kWh)

Mudeli number	Mudeli nimi	Lisainvesteering ebatõhusa mudeli suhtes €/m ²	ETA sääst ebatõhusa mudeli suhte	Lisa-investeering säästetud ETA kohta ebatõhusa mudeli suhtes €/kWh	Lisa-investeering säästetud ETA kohta eelneva muutuse suhtes €/kWh ₀	Eelnevaks muutuks on mudel
1.1_{EN}	VS100	0	0	0	0	
1.2 _{EN}	VS150	2,30	0,40	5,79	5,79	1.1 _{EN}
1.3 _{EN}	VS200	4,32	0,49	8,89	22,87	1.2 _{EN}
1.4 _{EN}	VS250	6,05	0,56	10,73	22,22	1.3 _{EN}
1.5 _{EN}	VS300	7,49	0,59	12,77	63,35	1.4 _{EN}
2.1_{EN}	KL180	0	0,00	0,00	0,00	
2.2 _{EN}	KL210	0,40	0,07	5,61	5,61	2.1 _{EN}
2.3 _{EN}	KL240	0,93	0,12	7,55	10,20	2.2 _{EN}
2.4 _{EN}	KL270	2,00	0,18	10,99	18,28	2.3 _{EN}
2.5 _{EN}	KL300	2,53	0,23	11,21	12,11	2.4 _{EN}
3.1_{EN}	Vent 1	0	0,00	0,00	0,00	
3.2 _{EN}	Vent 2	0,26	8,43	0,03	0,03	3.1 _{EN}
3.3 _{EN}	Vent 3	0,52	11,40	0,05	0,09	3.2 _{EN}
4.1_{EN}	LED on/off	0	0,00	0,00	0,00	
4.2 _{EN}	LED_NP	8	10,46	0,76	0,76	4.1 _{EN}
4.3 _{EN}	LED_NPdrim	14	11,98	1,17	3,94	4.2 _{EN}
5.1_{EN}	PV 0 W/m²	0	0,00	0,00	0,00	
5.2 _{EN}	PV 1,3 W/m ²	1,30	2,39	0,55	0,55	5.1 _{EN}
5.3 _{EN}	PV 3,7 W/m ³	3,65	6,17	0,59	0,62	5.2 _{EN}
5.4 _{EN}	PV 6,0 W/m ⁴	6,00	9,62	0,62	0,68	5.3 _{EN}

Tabel L3. Üksikute meetmete lisainvesteering säästetud ETA (möödetud profiiliga) suhtes (€/kWh)

Mudeli number	Mudeli nimi	Lisa-investeering ebatõhusa mudeli suhtes €/m ²	ETA sääst ebatõhusa mudeli suhte	Lisa-investeering säästetud ETA kohta ebatõhusa mudeli suhtes €/kWh	Lisa-investeering säästetud ETA kohta eelneva muutuse suhtes €/kWh ₋	Eelnevaks muutuseks on mudel
1.1_M	VS100	0	0,00	0	0	
1.2 _M	VS150	2,30	0,40	5,8	6	1.1 _M
1.3 _M	VS200	4,32	0,49	8,9	23	1.4 _M
1.4 _M	VS250	6,05	0,56	10,7	22	1.3 _M
1.5 _M	VS300	7,49	0,35	21,1	-7	1.5 _M
2.1_M	KL180	0	0,00	0,0	0	
2.2 _M	KL210	0,40	0,06	7,0	7	2.1 _M
2.3 _M	KL240	0,93	0,11	8,7	11	2.2 _M
2.4 _M	KL270	2,00	0,15	13,3	25	2.3 _M
2.5 _M	KL300	2,53	0,19	13,6	15	2.4 _M
3.1_M	Vent 1	0	0,00		0	
3.2 _M	Vent 2	0,26	8,42	0,03	0	3.1 _M
3.3 _M	Vent 3	0,52	11,39	0,05	0	3.2 _M
4.1_M	LED on/off	0	0,00	0	0	
4.2 _M	LED_NP	8	15,09	0,53	1	4.1 _M
4.3 _M	LED_NPdrimm	14	17,56	0,80	2	4.2 _M
5.1_M	PV 0 W/m²	0	0,00	0	0	
5.2 _M	PV 1,3 W/m ²	1,30	2,43	0,54	1	5.1 _M
5.3 _M	PV 3,7 W/m ³	3,65	6,81	0,54	1	5.2 _M
5.4 _M	PV 6,0 W/m ⁴	6,00	11,18	0,54	1	5.3 _M

Lisa 3

Tabel L3.1 Määrusjärgse profiiliga simuleeritud kombinatsioonide energiatarve ja ETA

Mudel		Energiatarve kWh/(m ² *a)	KOKKU	Ruumis		Vent. Seadmes		Muu energiakulu				Lokaalne taastuvenergia	
				Küte	Jahutus	Küte	Jahutus	Soe tarbeve si	Venti- laatorid	Seadm ed	valgust us	PV omatar ve	PV toodang
1K_EN	Baasmudel	Neto	101,5	35,2	6,0	3,7	5,7	6,0	16,1	18,8	10,0	0,0	0,0
		Bruto	58,1	8,1	1,4	0,6	0,9	2,2	16,1	18,8	10,0	0,0	0,0
		ETA	116,2	16,2	2,7	1,2	1,9	4,4	32,2	37,6	20,0	0,0	0,0
2K_EN	Vent 3, PV6	Neto	90,0	35,2	4,8	3,7	5,7	6,0	10,7	18,8	10,0	-4,8	5,6
		Bruto	47,6	8,1	1,1	0,6	0,9	2,2	10,7	18,8	10,0	-4,8	5,6
		ETA	95,2	16,2	2,2	1,2	1,9	4,4	21,4	37,6	20,0	-9,6	11,2
3K_EN	Vent 3, NP; PV6	Neto	85,2	37,2	4,9	2,3	5,7	6,0	10,7	18,8	4,5	-4,8	5,6
		Bruto	42,4	8,5	1,1	0,4	0,9	2,2	10,7	18,8	4,5	-4,8	5,6
		ETA	84,8	17,1	2,2	0,8	1,9	4,4	21,4	37,6	9,1	-9,6	11,2
4K_EN	Vent 3, NPd, PV 6	Neto	85,0	37,9	4,9	2,3	5,7	6,0	10,7	18,8	3,6	-4,8	5,6
		Bruto	41,6	8,7	1,1	0,4	0,9	2,2	10,7	18,8	3,6	-4,8	5,6
		ETA	83,2	17,4	2,2	0,7	1,9	4,4	21,4	37,6	7,2	-9,6	11,2
5K_EN	Vent 3, NPd, PV 6, VS150, KL210	Neto	96,4	22,1	4,8	6,4	5,7	6,0	10,7	36,0	10,3	-5,6	5,6
		Bruto	42,4	8,5	1,1	0,4	0,9	2,2	10,7	18,8	4,5	-4,8	5,6
		ETA	83,6	36,5	4,9	2,4	5,7	6,0	10,7	18,8	3,6	-4,8	11,2

Tabel L3.2 Mõõdetud profiiliga simuleeritud kombinatsioonide energiatarve ja ETA

Mudel		Energia- tarve kWh/(m ² *a)	KOKKU	Ruumis		Vent. Seadmes		Muu energiakulu				Lokaalne taastuenergia	
				Küte	Jahutus	Küte	Jahutus	Soe tarbevesi	Venti- laatorid	Seadmed	valgustus	PV omatarve	PV toodang
1K_M	Baasmudel	Neto	119,4	20,8	5,9	9,9	5,7	6,0	16,1	36,0	19,1	0,0	0,0
		Bruto	82,1	4,8	1,3	1,6	0,9	2,2	16,1	36,0	19,1	0,0	0,0
		ETA	164,2	9,5	2,7	3,2	1,9	4,4	32,2	72,0	38,2	0,0	0,0
2K_M	Vent 3, NP	Neto	104,0	22,7	4,8	6,4	5,7	6,0	10,7	36,0	11,7	0,0	0,0
		Bruto	63,7	0,0	1,1	1,1	0,9	2,2	10,7	36,0	11,7	0,0	0,0
		ETA	137,8	10,4	2,2	2,1	1,9	4,4	21,4	72,0	23,4	0,0	0,0
3K_M	Vent 3, NP; PV 6	Neto	98,4	22,7	4,8	6,4	5,7	6,0	10,7	36,0	11,7	-5,6	5,6
		Bruto	63,3	5,2	1,1	1,1	0,9	2,2	10,7	36,0	11,7	-5,6	5,6
		ETA	126,6	10,4	2,2	2,1	1,9	4,4	21,4	72,0	23,4	-11,2	11,2
4K_M	vent 3, NPd, PV 6	Neto	97,6	23,5	4,9	6,2	5,7	6,0	10,7	36,0	10,3	-5,6	5,6
		Bruto	62,1	5,4	1,1	1,0	0,9	2,2	10,7	36,0	10,3	-5,6	5,6
		ETA	124,1	10,8	2,2	2,0	1,9	4,4	21,4	72,0	20,6	-11,2	11,2
5K_M	Vent 3, NPd, PV 6, VS150, KL210	Neto	96,4	22,1	4,8	6,4	5,7	6,0	10,7	36,0	10,3	-5,6	5,6
		Bruto	61,8	5,1	1,1	1,0	0,9	2,2	10,7	36,0	10,3	-5,6	5,6
		ETA	123,6	10,2	2,2	2,1	1,9	4,4	21,4	72,0	20,6	-11,2	11,2