



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO
INSENERITEADUSKOND
EHITUSE JA ARHITEKTUURI INSTITUUT

AKUDE KASUTAMINE HOONETE ENERGIATÕHUSUSE MIINIMUMNÕUETE SAAVUTAMISEL

USE OF BATTERIES IN ACHIEVING THE MINIMUM ENERGY PERFORMANCE REQUIREMENTS OF BUILDINGS

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Mari-Liis Sits

Üliõpilaskood: 083125EAKI

Juhendaja: Martin Kiil, ekspert

Kaasjuhendaja: Tuule Mall Parts, ekspert

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

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

“22” mai 2024

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“22” mai 2024

Juhendaja:

/ allkiri /

“22” mai 2024

KaasJuhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Mari-Liis Sits

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Akude kasutamine hoonete energiatõhususe miinimumnõuete saavutamisel“,

mille juhendaja on Martin Kiil ja kaasjuhendaja on Tuule Mall Parts

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

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

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

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

22.05.2024 (kuupäev)

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

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: MARI-LIIS SITS, 083125EAKI
Õppekava, peeriala: EAKI02/02, Küte ja ventilatsioon
Juhendaja: Martin Kiil, ekspert
Kaasjuhendaja: PhD Tuule Mall Parts, ekspert

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Akude kasutamine hoonete energiatõhususe miinimumnõuete saavutamisel

(inglise keeles) Using batteries to achieve the minimum energy performance requirements of buildings

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Analüüsida hoones toodetava päikeseenergia salvestamiseks kasutatavate akude potentsiaali energiatõhususe miinimumnõuete täitmisel erinevate tüüphoonete puhul.
2. Selgitada välja akude kasutamise mõju hoone energiatõhususarvule eri hoonetüüpide puhul sõltuvalt muuhulgas hoone suuruselt, projekteeritud tehnosüsteemidest ning hoone seisukorrast.
3. Identifitseerida parameetrid, mille põhjal aku lisamise võimalikku tasuvust hoonetes enne detailsete arvutuste teostamist hinnata.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1	Töö põhieesmärkide sõnastamine	25.02
2	Kirjanduse läbitöötamine, teoreetiliste aluste täiendus	04.03
3	Uurimisküsimuste sõnastuse täpsustus, detailse metoodika kirjelduse koostamine, analüüsitud tüüphoonete valik	08.03
4	Tüüphoonete valik, simulatsiooniparameetrite määramine, energiamudelite koostamine	22.03
5	Esmased simulatsioonid ja tulemuste analüüs	25.03
6	Tüüphoonete simulatsioonide teostamine	01.04
7	Tulemuste analüüs ja analüüsi kirjutamine	08.04
8	Tulemuste vormistamine	15.04

8	Töö vormistamine eelkaitsmiseks ning postri koostamine	21.04
9	Eelkaitsmine	22-26.04
10	Lisasimulatsioonid, analüüsi lõpetamine	01.05
11	Töö sisulise osa lõpetamine	04.05
10	Töö vormistamine ja esitamine juhendajale	14.05
12	Töö lõplik esitamine	22.05
13	Ettekande koostamine ja postri täiendamine	01.06

Töö keel: eesti **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 14. mai 2024a

Üliõpilane: Mari-Liis Sits ".....".....20.....a
/allkiri/

Juhendaja: Martin Kiil ".....".....20.....a
/allkiri/

Kaasjuhendaja: Tuule Mall Parts ".....".....20.....a
/allkiri/

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

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

1.	SISSEJUHATUS	9
2.	TEOREETILISED ALUSED	11
2.1	Seadusandlus	11
2.2	Hoones lokaalselt toodetud taastuenergia omatarbe osakaal	11
2.3	Akud PV-süsteemis	18
2.4	Akude arvestamine omatarbe osakaalu arvutuses	19
2.5	Aku kasutamise majanduslik tasuvus	22
3.	METOODIKA	24
3.1	Metoodika lühikirjeldus	24
3.2	Energiasimulatsiooni tarkvara	25
3.3	Tüüphoonete valik	25
3.4	Lokaalselt toodetud elektrienergia omatarbe osakaalu arvutamine	32
3.5	Aku kasutamise majandusliku tasuvuse arvutus	36
4.	TULEMUSED JA ANALÜÜS	38
4.1	Väikeelamu detailse analüüsi tulemused	38
4.2	Akude kasutamise potentsiaal teistes hoontüüpides	61
4.3	Edasised uurimisküsimused	72
5.	KOKKUVÕTE JA JÄRELDUSED	73
6.	SUMMARY	75
	KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	78

EESSÕNA

Käesolevas magistritöös uuritakse Eestis veel praktikas vähelevinud akude kasutamist hoonete taastuenergia süsteemides. Teema pakkus välja töö juhendaja Martin Kiil. Töös on kasutatud O3 Technology poolt koostatud projektide andmeid aastatest 2021-2024.

Autor tänab lõputöö juhendajaid Martin Kiili ja Tuule Mall Partsi igakülgse toe, aktiivse kaasamõtlemise ja pühendatud aja eest.

Töö koostamisele aitas kaasa ka Sunly AS arendusjuht Siim Paist konsultatsioonidega päikesepaneelide ja akude süsteemide põhimõtete ja hinnastamise vallas. Praktilist abi ja innustust pakkusid Maarja Allmaa, Annika Andresen, Sander Lootus, Kaitlin Pirnuu, Veronika Rõivas ja Kristiina Tinnu Tang. Tänan teid kõiki panustatud aja ja energia eest.

Võtmesõnad: aku, taastuenergia, energiatõhususe miinimumnõuded, energiatõhususarv, magistritöö

Lühendite ja tähiste loetelu

ETA B – hoone energiatõhususarv lokaalseid taastuvenergia allikaid arvestamata, kWh/a.m²

PV-erivõimsus – hoonesse paigaldatud PV-paneelide kogumahtuvuse ja hoone köetava pinna või toatemperatuuriga pinna jagatis, kW / m²

Omatarbe osakaal – päikesepaneelidega toodetud elektrienergiast hoones kohapeal tarbitava energia osakaal, %

PV-paneelid – päikeseenergiast elektrienergiat tootev paneel

Päikesekollektor – päikeseenergiast sooja tarbevett tootev paneel

1. SISSEJUHATUS

Euroopa Komisjoni andmetel tarbib hoonesektor 40% kogu Euroopa Liidus tarbitavast energiast [1]. Seega on kliimamuutuste vastu võitlemises oluline roll hoonetes kasutatava primaarenergia vähendamisel. Sektori energiatarbimise vähendamiseks on vastu võetud EL direktiiv 2010/31 „Hoonete energiatõhusus“ [1].

Direktiivist juhinduvalt on Eestis vastu võetud seadusandlus, mis sätestab hoonetele kehtestatud energiatõhususe miinimumnõuded [2]. Alates 01. jaanuarist 2020 peavad rajatavad hooned vastama liginullenergiahoone nõudmistele. Erandiks on väikeelamud kütava pinnaga <220m² ning hooned, mille puhul lokaalse taastuenergia süsteemi rajamine ei ole majanduslikult põhjendatud või tehniliselt teostatav. Nimetatud juhtudel peab rajatav hoone vastama madalenergiahoone nõudele [2].

Järjest enam levinud on, et ka selliste hoonete arendajad soovivad hoone siiski liginullenergia nõuetele vastavaks saada. Selle põhjusteks on nii turu surve, liginullenergiahoonete kõrgem müügihind, kui ka liginullenergia hoone nõude sissekirjutamine erinevatesse rahastustingimustesse. Näiteks pankade poolsed soodsamad laenustingimused A-klassi energiamärgisega kinnisvara soetamisel või liginullenergia nõuetele vastavuse tingimus Kredexi poolt toetatud kinnisvaraprojektide rahastustingimustes.

Kuivõrd turul on liginullenergia hoonete rajamine tugevalt soositud, on lokaalse taastuenergia rajamine osa pea kõikide uute hoonete ehitamisest. Ehituspraktikas tähendab see enamasti hoonetele PV-paneelide paigaldamist.

Olenevalt hoonetüübist on PV-paneelide energia tootmine ja hoone tarbimisvajadus ajaliselt vähemal või rohkemal määral nihkes. See tingib vajaduse üleliigne toodetud energia võrku müüa. Olukorras, kus võrku müümine ei ole võimalik või on võimalik teenusepakkuja poolt piiratud mahus on hoonesse rajatava päikesepargi suurus piiratud. Kuivõrd päikesepargi võimsus dimensioneeritakse enamjaolt energiatõhususe miinimumnõuete saavutamiseks vajaliku võimsuse põhjal, on säärased piirangud arendajatele ja hoone omanikele kitsaskohaks.

Energiatõhususarvutuse ja PV-paneelide mõistes on oluline näitaja hoone omatarbe osakaal. PV-paneelide poolt toodetud elektrienergiast võetakse hoone energiaarvutuses arvesse vaid hoones ära kasutatav energia ning võrku müüdav energia arvesse ei lähe

[3]. Seega on kõrge omatarbe osakaalu saavutamine hoone energiatõhusarvu alandamise seisukohast soodne.

Üheks võimalikuks meetmeks päikesepeakide omatarbe osakaalu suurendamisel on hoone päikeseenergiasüsteemide akude kaasamine. Hoone tehnoruumi paigaldatavatesse akudesse salvestatakse toodetav üleliigne energia ning see kasutatakse hoonetes järgmistel tarbimisvajadusega tundidel.

Lähitulevikus oodatakse akude PV-süsteemidesse lisamise laialdasemat kasutuselevõttu. Erinevate elektrisõidukite ning -liikurite populaarsus on toonud kaasa akude hindade kiire languse [3][4], tehes need tarbijaile lähitulevikus kättesaadavamaks. Vastavalt Rahvusvahelise Energiaagentuuri 2023 aasta raportile on ametlikud stiimulid akude lisamiseks PV-süsteemidesse ette nähtud näiteks Austrias, Austraalias kui ka USAs California osariigis [4].

Hoone energiatõhususe Eesti arvutusmetoodikas puudub seni eeskiri, kuidas akude kasutamist hoonete energiatõhusarvu arvutamisel arvesse võtta [3]. Ka praktikas on siiani tegu vähelevinud meetmega. Seetõttu puuduvad rusikareeglid, kuidas akude kasutamise mõju hoone energiatõhusarvule sõltub hoone parameetritest nagu näiteks hoone tüüp, selle kōetav pind, muude tehnosüsteemide parameetrid, paigaldatava päikesepeakide võimsus ja potentsiaalse aku maht.

Energiatõhususe arvutamise metoodika 01.03.2025 kehtima hakkav redaktsioon näeb ette, et konkreetse hoone omatarbe osakaal määratakse kas Kliimaministeeriumi avaldatava kalkulaatori abil või arvutatakse see detailse tunnipõhise arvutusega [6]. Käesoleva töö uudsus on hoonetes akude arvestamise ühe võimaliku arvutusmetoodika välja töötamine ja akude tasuvuse esialgseks hindamiseks sobilike parameetrite välja pakkumine.

Antud töö eesmärk on analüüsida akude kasutamise potentsiaali erinevate tüüphoonete energiatõhususe miinimumnõuete täitmisel. Analüüsi tulemusel selgitatakse välja tüüpjuhtumid, mille korral soovitatakse akude lisamist hoone PV-paneelidele kui sobivat energiatõhusust parendavat meetet.

2. TEOREETILISED ALUSED

Peatükis kirjeldatakse määruse nr 58 „Hoone energiatõhususe arvutamise meetodika“ nii hetkel kehtiva (jõustumise kp 08.07.2023) kui ka 01.03.2025 jõustuva redaktsiooni järgseid lähteandmeid ja arvutusmetoodikat, lokaalse toodetud taastuveneriga omatarbe osakaalu ja süsteemi lisatud akude arvestamise arvutuspõhimõtteid.

2.1 Seadusandlus

Peatükis kirjeldatakse hetkel kehtivaid ja lähitulevikus kehtima hakkavaid hoonete energiatõhusust käsitlevaid määruseid.

- MKM määrus nr 63 „Hoone energiatõhususe miinimumnõuded“ (vastu võetud 11.12.2018; redaktsiooni jõustumine 08.07.2023) [2] –
 - edaspidi töös viidatud, kui määrus nr. 63
- MKM määrus nr 63 „Hoone energiatõhususe miinimumnõuded“ (vastu võetud 11.12.2018; redaktsiooni jõustumine 01.03.2025) [7]
- MKM määrus nr 58 „Hoone energiatõhususe arvutamise meetodika“ (vastu võetud 05.06.2015; redaktsiooni jõustumine 08.07.2023) [3]
 - edaspidi töös viidatud, kui määrus nr. 58
- MKM määrus nr 58 „Hoone energiatõhususe arvutamise meetodika“ (vastu võetud 05.06.2015; redaktsiooni jõustumine 01.03.2025) [6]

Määruse nr. 58 01.03.2025 kehtima hakkavas redaktsiooni muudatustest mõjutavad hoonete energiatõhususarvused enim järgmised

- Normaalaasta kliimafaili EST-TRY 1990-2020 kasutuselevõtt
- Hoone kütte- ja jahutuse seadearvete muutus
- Tüüphoonete valgustuse vabasoojuste väärtuste muutus
- Maa-aluste garaažide arvesse võtmise eeskiri
- Sooja tarbevee jaotus- ja ringluskadude arvesse võtmise juhend
- Elektrilise mugavuskütte arvesse võtmise juhend

2.2 Hoones lokaalselt toodetud taastuvenergia omatarbe osakaal

Peatükk kirjeldab hoones lokaalselt toodetud taastuvenergia omatarbe osakaalu arvutamise aluseid.

Hetkel kehtiva määrus nr 58 redaktsioon sätestab, et hoones lokaalselt toodetud taastuvenergia omatarbe osakaalu väärtus määratakse kas hoonepõhise arvutusega või määratakse väärtus määruse nr 58 § 29¹, tabel 19 põhjal [3].

Määruse 01.03.2025 jõustuva redaktsiooniga asendatakse tabel 19 Kliimaministeeriumi poolt välja antava omatarbe osakaalu kalkulaatoriga [6], [8]. Endiselt jääb alles võimalus omatarbe osakaal hoonepõhiselt välja arvutada. Omatarbe osakaalu välja arvutamisel kasutatakse hoone tunnipõhiseid tarbimisandmeid ja PV-paneelide tunnipõhiseid tootmisandmeid normaalaastal.

Käesolevas töös teostatakse omatarbe arvutus aastase tunnipõhise simulatsiooni tulemustega ning akude kasutamise mõju omatarbe osakaalule arvutatakse excelis loodud tööriista abil.

2.2.1 Päikesepaneelide tootlikkuse arvutamine

Hoone PV-paneelide poolt toodetav aastane elektrienergia oleneb paneelide orientatsioonist, kaldenurgast horisondi suhtes ning paigaldatud paneelide kogusest.

PV-paneelide aastane tootlikkus määratakse vastavalt määruse nr 58 § 29 andmetele ja arvutatakse selle lõikes 1 toodud valemiga (1).

(1)

$$E_{pan} = \frac{Q_{päike} \times P_{max} \times k_{kas}}{I_{ref}}$$

- kus E_{pan} päikesepaneeliga toodetud aastane elektrienergia kWh/a;
 $Q_{päike}$ päikesepaneeli pinnale, millele ei teki varje, tulev aastane päikeseenergia kWh/a;
 P_{max} päikesepaneeli maksimaalne võimsus standardtingimustel kW ($I_{ref} = 1$ kW/m², temperatuur 25 °C);
 k_{kas} tegur, mis arvestab päikesepaneeli kasutustingimusi;
 I_{ref} standardkiirus 1 kW/m².

(2)

$$Q_{päike} = 945 \times k_{suund}$$

- kus 945 horisontaalpinnale tulev aastane päikesekiirus kWh/(m²·a);
 k_{suund} suunategur, mis arvestab päikesepaneeli suunatust ilmakaare ja horisondi suhtes

Suunategur k_{suund} määratakse PV-paneelide orientatsiooni ja paigaldamise kaldenurga alusel määruse nr 58 pärit väärtustest, mis on toodud tabelis 1.

Tabel 1 - Kollektori või paneeli suunategur, k_{suund} [3] [6]

Kaldenurk horisondi suhtes, °	Ilmakaar							
	Põhi, 0/360°	Kirre, 45°	Ida, 90°	Kagu, 135°	Lõuna, 180°	Edel, 225°	Lääs, 270°	Loe, 315°
0°	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
5°	0,95	0,97	1,00	1,04	1,05	1,03	1,00	0,96
10°	0,90	0,93	1,00	1,07	1,09	1,06	0,99	0,92
15°	0,85	0,89	1,00	1,09	1,13	1,08	0,98	0,88
20°	0,79	0,86	0,99	1,12	1,16	1,10	0,97	0,84
25°	0,74	0,81	0,98	1,13	1,18	1,12	0,96	0,80
30°	0,68	0,77	0,97	1,15	1,20	1,12	0,95	0,75
35°	0,63	0,74	0,96	1,15	1,21	1,13	0,93	0,71
40°	0,58	0,70	0,95	1,15	1,22	1,13	0,92	0,68
45°	0,54	0,67	0,94	1,15	1,22	1,12	0,90	0,65
50°	0,50	0,65	0,92	1,14	1,21	1,11	0,88	0,62
60°	0,45	0,60	0,88	1,11	1,18	1,07	0,84	0,58
70°	0,42	0,56	0,83	1,05	1,11	1,02	0,79	0,54
80°	0,39	0,52	0,77	0,97	1,03	0,94	0,73	0,50
90°	0,37	0,48	0,70	0,88	0,93	0,85	0,66	0,46

Päikesepaneeli maksimaalne võimsus standardtingimustel P_{max} sõltub paneeli tüübist ja saadakse lähtudes tootja andmetest.

Kasutustingimuste tegur k_{kas} võtab arvesse päikesepaneeli ümbritseva keskkonna iseärasusi (temperatuur, paneeli paigaldus) ja kadusid vahelduvvooluks muundamisel. Täpsemate andmete kasutatakse määruses nr 58 toodud väärtusi, mis on esitatud Tabel 2.

Tabel 2 – Päikesepaneeli kasutustegur, k_{kas} [3], [6]

Paneeli paigaldusviis	k_{kas}
Tuulutuseta	0,70
Mööduka tuulutusega	0,75
Intensiivse tuulutusega	0,80

Valemi (1) tulemusel saadakse PV-paneelide aastane energiatoodang. Arvutamaks PV-paneelide poolt toodetud elektrienergia omatarbe osakaalu on vajalik elektritoodangu tunnipõhiseid andmeid [3].

Selleks võetakse aluseks arvutusprogrammiga IDA ICE teostatud energiasimulatsioon paigaldatavate PV-paneelide parameetritega. Arvesse võetavad parameetrid on

paneelide paigaldamise orientatsioon, paigaldamise kaldenurk ning tuulutusaste. Simulatsiooni tulemusel saadakse paneelide tootlikkuse jagunemine aastas tundide lõikes. Arvutatud aastasele toodangu tulemus korrutatakse igale tunnile määratud koefitsiendiga ning saadakse PV-paneelide toodangu andmed iga tunni kohta aastas.

2.2.2 Hoone aastase tunnipõhise energiatarbe arvutamine

Hoone tunnipõhise energiatarbimise andmete saamiseks teostatakse dünaamiline simulatsioon normaalaasta kliimaga EST-TRY 1990-2020 (väikeelamu detailne analüüs) ja kliimafailiga EST-TRY 1970-1990 erinevate hoonetüüpide valimi korral. Tulemustest eraldatakse hoone süsteemidest elektril baseeruvad tarbijad. Süsteemide aastane tarbimine jaguneb määruses nr 58 toodud väärtustel põhinevateks ja ehitusprojekti lahendustest sõltuvateks.

Määruse nr 58 lähteandmetele tuginedes on konstantsed hoone valgustuse, seadmete ja sooja tarbevee tootmise tarbimisandmed ja abiseadmete elektritarbimine. Hoonete valgustuse ja seadmete energiakulu erinevate määruse redaktsioonide puhul on toodud Tabel 3 ja

Tabel 4. Sooja tarbevee tootmise energiakulu lähteandmed on toodud Tabel 5. Abiseadmete elektrienergia hulk arvutatakse vastavalt määruse nr 58 § 29 toodud andmetele [3], [6]. Vastavad väärtused on toodud Tabel 6.

Tabel 3 – Määruse nr 58 01.03.2025 jõustuv redaktsioon. Hoone tüüpiline kasutus ja sellele vastav suurim vabasoojuse väärtus toatemperatuuriga pinna ühe ruutmeetri kohta. Tabel on esitatud vähendatud mahus esitamaks antud töö kontekstis olulisi eluhoonete andmeid.[6]

Hoone kasutamise otstarve	Kasutusaeg			Kasutusaste	Valgustus ^a , W/m ²	Seade, W/m ²	Inimene ^b , W/m ²	Inimene, m ² /inim
	Kellaaeg	h/24 h	d/7d					
Väikeelamu toatemperatuuriga pinnaga < 120 m ²	00.00-00.00	24	7	0,6	5 ^c	3 ^d	3	28,3
Väikeelamu toatemperatuuriga pinnaga 120-220 m ² ja ridaelamu	00.00-00.00	24	7	0,6	5 ^c	2,4 ^d	2	42,5
Väikeelamu toatemperatuuriga pinnaga > 220 m ²	00.00-00.00	24	7	0,6	5 ^c	2 ^d	1,4	60,7
Korterelamu	00.00-00.00	24	7	0,6	5 ^c	3 ^d	3	28,3

Tabel 4 – Määruse nr 58 08.07.2023 jõustunud redaktsioon. Hoone tüüpiline kasutus ja sellele vastav suurim vabasoojuse väärtus hoone köetava pinna ühe ruutmeetri kohta. Tabel esitatakse vähendatud kujus kajastamiseks antud töö kontekstis olulisi lähteandmeid. [3]

Hoone kasutamise otstarve	Kasutusaeg			Kasutusaste	Valgustus ^a , W/m ²	Seade, W/m ²	Inimene ^b , W/m ²	Inimene, m ² /inim
	Kellaaeg	h/24 h	d/7d					
Väikeelamu köetava pinnaga < 120 m ²	00.00–00.00	24	7	0,6	6 ^c	3 ^d	3	28,3
Väikeelamu köetava pinnaga 120–220 m ² ja ridaelamu	00.00–00.00	24	7	0,6	6 ^c	2,4 ^d	2	42,5
Väikeelamu köetava pinnaga > 220 m ²	00.00–00.00	24	7	0,6	6 ^c	2 ^d	1,4	60,7
Korterelamu	00.00–00.00	24	7	0,6	8 ^c	3 ^d	3	28,3
Kontorihoone	07.00–18.00	11	5	0,55	10	12	5	17,0
Majutushoone	00.00–00.00	24	7	0,4	10	1	4	21,3
Ärihoone	12.00–22.00	10	7	0,4	19	4	14	6,1
Avalik hoone	08.00–22.00	14	7	0,5	14	0	5	17,0
Kaubandus-hoone ja terminal	07.00–21.00	14	7	0,55	19	1	5	17,0
Haridushoone	08.00–16.00	8	5	0,5 ^e	12	8	14	5,4
Ravihoone	07.00–20.00	13	5	0,6	10	4	8	10,6

Tabel 5 – Määrusejärgne sooja tarbevee erikulu ja netoenergiavajadus [3], [6]

Hoone kasutamise otstarve	Sooja vee erikulu, l/(m ² ·a)	Netoenergiavajadus, kWh/(m ² ·a)
Väikeelamu toatemperatuuriga pinnaga < 120 m ²	516	30
Väikeelamu toatemperatuuriga pinnaga 120–220 m ² ja ridaelamu	430	25
Väikeelamu toatemperatuuriga pinnaga > 220 m ²	344	20
Korterelamu	516	30
Kasarmu	602	35
Kontorihoone	103	6
Majutushoone	516	30
Ärihoone	395	23
Avalik hoone	344	20
Kaubandushoone ja terminal	69	4
Haridushoone	172	10
Koolieelse lasteasutuse hoone	258	15
Ravihoone	206	12
Tööstushoone	103	6
Laohoone ja korterelamu soe garaaž	0	0

Tabel 6 – Hoone küttesüsteemi abiseadmete energiatarbe määramine [3], [6]

Hoone tüüp	Kütteviis	Kasutegur h_{jv}	Veeküttesüsteemi ringluspumba elektritarbimine, kWh/(m ² ·a)
Väikeelamu	Radiaator	0,97	1
	Põrandküte, plaat pinnasel või alt tuulutatav põrand	0,85	2
	Põrandküte vahelaes	1,0	2
	Lagiküte katuslaes	0,90	2
	Lagiküte vahelaes	1,0	2
	Ahi, soojust salvestav ahi või kamin	0,8	–
Muu hoone	Radiaator, sh paneel ja jahutustala	0,97	0,5
	Põrandküte, plaat pinnasel või alt tuulutatav põrand	0,85	1
	Põrandküte vahelaes	1,0	1

Projektlahendusel põhineva energiakuluga süsteemid on hoone ruumide ja ventilatsiooniõhu küte, hoone ruumide ja ventilatsiooniõhu jahutus, ventilaatorite elektrienergia. Nende süsteemide arvutuses kasutatakse lähteandmetena nii määrusest tulenevaid kui projekteeritud lahenduste väärtuseid. Hoonetüüpide kütte ja jahutuse seadeväärtused on toodud Ventilatsiooniõhu kütmiseks ja jahutamiseks vajalik energiahulk saadakse simulatsiooni tulemusena. Sissepuhkeõhu väärtuse valikul lähtutakse määruse nr 58 § 18 lõikes 5 sätestatud väärtusest +18 °C [3], [6].

Tabel 7 ja Tabel 8. Ventilatsiooniõhu kütmiseks ja jahutamiseks vajalik energiahulk saadakse simulatsiooni tulemusena. Sissepuhkeõhu väärtuse valikul lähtutakse määruse nr 58 § 18 lõikes 5 sätestatud väärtusest +18 °C [3], [6].

Tabel 7 – Määruse nr 58 01.03.2025 jõustuv redaktsioon . Hoone kütmise ja jahutuse seadeväärtused. Tabel esitatud vähendatud mahus esitamaks antud töö kontekstis olulisi andmeid [6]

Hoone kasutamise otstarve	Kütmise seadeväärtus, °C	Jahutuse seadeväärtus, °C
Väikeelamu toatemperatuuriga pinnaga < 120 m ²	21.5	26
Väikeelamu toatemperatuuriga pinnaga 120–220 m ² ja ridaelamu	21.5	26
Väikeelamu toatemperatuuriga pinnaga > 220 m ²	21.5	26
Korterelamu	21.5	26

Tabel 8 Määruse nr 58 08.07.2023 jõustunud redaktsioon. Hoone kütmise ja jahutuse seadeväärtused. [3]

Hoone kasutamise otstarve	Kütmise seadeväärtus, °C	Jahutuse seadeväärtus, °C
Väikeelamu köetava pinnaga < 120 m ²	21	27
Väikeelamu köetava pinnaga 120–220 m ² ja ridaelamu	21	27
Väikeelamu köetava pinnaga > 220 m ²	21	27
Korterelamu	21	27
Kontorihoone	21	25
Majutushoone	21	25
Ärihoone	21	25
Avalik hoone	21	25
Kaubandushoone ja terminal	18	25
Haridushoone	21	25
Ravihoone	21	25

2.2.3 PV-paneelidega toodetud elektrienergia omatarbe osakaalu arvutus

PV-paneelide poolt toodetud energiast kohapeal tarbitava energia osakaal akuta süsteemis määratakse valemiga (3).

(3)

$$OT_{\%}^{akuta} = \frac{\sum_{n=1}^{n=8760} (PV_n^{tarbitud})}{\sum_{n=1}^{n=8760} (PV_n^{toodang})}$$

kus $OT_{\%}^{akuta}$ päikesepaneeliga toodetud aastasest elektrienergia kohapeal kasutatava energia osakaal, %;

$PV_n^{tarbitud}$ vaatlustunnil päikesepaneelide poolt toodetud elektrienergiast hoones kohapeal kasutatava energia hulk, kWh

$PV_n^{toodang}$ vaatlustunnil päikesepaneelide poolt toodetud elektrienergia kogus kWh;

Päikesepaneelide poolt toodetud elektri hoones kohapeal tarbitud hulk $PV_n^{tarbitud}$ määratakse valemiga (4).

(4)

$$PV_n^{tarbitud} = \begin{cases} H_n^{tarb.kogu}, & H_n^{tarb.kogu} < PV_n^{toodang} \\ PV_n^{toodang}, & H_n^{tarb.kogu} \geq PV_n^{toodang} \end{cases}$$

kus $PV_n^{tarbitud}$ vaatlustunnil PV-paneelide poolt toodetud elektrienergiast hoones kohapeal tarbitud energia hulk, kWh;

$H_n^{tarb.kogu}$ vaatlustunnil hoones tarbitava elektrienergia koguhulk, kWh;

$PV_n^{toodang}$ vaatlustunnil päikesepaneelide poolt toodetud elektrienergia kogus kWh;

Hoone energiatarbimine igal aasta tunnil $H_n^{tarb.kogu}$ saadakse hoone aastase energiasimulatsiooni tulemustest. Vaatlustunnis PV-paneelide toodetav elektrienergia hulk $PV_n^{toodang}$ arvutatakse vastavalt peatükis 2.2.1 kirjeldatud meetodikale.

2.3 Akud PV-süsteemis

Antud peatükis kirjeldatakse akude lisamise mõju hoone omatarbe osakaalule, levinud akutüüpe ning konkreetses süsteemis akude mõju arvutamise aluseid.

2.3.1 Akude mõju hoone omatarbele

Elamutes toodetava taastuvenergia omatarbe osakaal akusid paigaldamata on Saksamaa väikeelamute näitel vahemikus 20-40% [9]. Madal omatarbe osakaal on akude kasutamise seisukohast soodne algtingimus.

Solar Decathloni võistlusmajade energiamonitoorimisandmete analüüs näitab, et akude lisamine tõstab võistlushoonetes toodetud taastuvenergia omatarbe osakaalu 60% võrra ning keskmiselt kahekordistas lokaalselt toodetud energia osakaalu kogu tarbitud elektrienergiast. [9]. Riigid liiguvad oma seadusandluse ja meetmetega omatarbe maksimeerimise toetamise poole [4].

2.3.2 Hoonete PV-süsteemides kasutusel olevad akutüübid

Hoonete PV-süsteemidesse lisatavate akudena on peamiselt kasutusel plii-akud (Pb) ja liitiumioonakud (Li-ioon) [5], [10]. Väikesemahuliste süsteemide puhul peetakse liitiumioontüüpi majanduslikult kõige tasuvamaks [11].

Pliiakude näol on tegu vanema tehnoloogiaga, mille eeliseks teiste akutüüpide ees on peamiselt nende odavam hind ning head taaskasutamise võimalused. Suurimaks negatiivseks omaduseks on laadimistsükli madal arv võrreldes alternatiividega [10].

Liitiumioonakude näol on tegu uuema tehnoloogiaga. Nende eelisteks on kõrge energiatihedus, laadimistsükli kõrge kasutegur, aku kiire vastamisaeg, madal energiakadu ooterežiimil, kiire laadimisvõimsus ja kõrge laadimistsükli arv [10].

Kuigi nende hind püsib pliiakudest kõrgemal, tähendab nende suurem energiaefektiivsus, et aku eluea jooksul on kulu aku ühikuhinna kohta potentsiaalselt madalam [10]. Tabel 9 on toodud plii ja liitiumioonakude peamised parameetrid.

Tabel 9 Erinevatel tehnoloogiatel põhinevate akude peamised tehnilised parameetrid. Allikas: *Battery Storage Systems For Building Applications* [10]

Aku tüüp	Energia-tõhusus, %	Elutsüklite arv	Leke, päev/%	Nominaal-mahtuvusest kasutatav maht, %
Plii-happe	70-90	500-2000	3-15	50
Liitium-ioon	85-100	1000-10000	3-15	80-90

Akude hoonetesse, eriti elamutesse, projekteerimisel ja paigaldamisel tuleb järgida kõiki kehtivad tuleohutuse nõudeid. Käesolevas töös ei ole akude tuleohutusega seotud aspekte ja nendega seotud lisakulusid käsitletud.

2.3.3 Liitium-ioonakude eluiga

Liitiumioonaku eluiga arvestakse laadimistsüklite arvu järgi. Iga laadimistsükliga väheneb aku mahtuvus. Aku loetakse obsoliitseks, kui selle mahtuvus on langenud 60%-ni esialgsest nominaalmahtuvusest. Akude degradeerumise kiirus varieerub aku kasutusest sõltuvalt ning selle vahemikuks loetakse 1000-10000 laadimistsüklit [10]. Käesoleva töö raames arvestatakse liitiumioonaku elueaks 6000 laadimistsüklit.

Hoonete elektrisüsteemides olevate akude kasutusprofiil erineb oluliselt standardsest aku kasutusest, mille põhjal rusikareeglid/normväärtused on välja töötatud. See teeb keeruliseks akus toimivate laadimistsüklite arvu hindamise ja seeläbi ka kasutatavate akude eluea hindamise.

2.4 Akude arvestamine omatarbe osakaalu arvutuses

PV-paneelide poolt toodetud energiast kohapeal tarbitava energia osakaal akuga süsteemis määratakse valemiga (5).

(5)

$$OT_{\%}^{akuga} = \frac{\sum_{n=1}^{n=8760} (PV_n^{tarbitud} + H_n^{akust.tarb})}{\sum_{n=1}^{n=8760} (PV_n^{toodang})}$$

kus	$OT_{\%}^{akuga}$	päikesepaneeliga toodetud aastasest elektrienergia kohapeal kasutatava energia osakaal, %;
	$PV_n^{tarbitud}$	vaadeldaval tunnil päikesepaneelide poolt toodetud elektrienergiast hoones kohapeal kasutatava energia hulk, kWh;
	$H_n^{akust.tarb}$	vaadeldaval tunnil akust maha laetud ja hoone toimimiseks tarbitud energia hulk, kWh;
	$PV_n^{toodang}$	vaadeldaval tunnil päikesepaneelide poolt toodetud elektrienergia kogus, kWh;

Päikesepaneelide poolt toodetud elektri hoones kohapeal tarbitud hulk $PV_n^{tarbitud}$ määratakse valemiga (4). Vaadeldaval tunnil toodetud elektrienergia $PV_n^{toodang}$ arvutatakse peatükis 2.2.1 kirjeldatud meetodikaga.

Vaadeldaval tunnil akust maha laetud ja hoone toimimiseks kasutatav energiahulk $H_n^{akust.tarb}$ määratakse valemiga (6).

(6)

$$H_n^{akust.tarb} = A_n^{mahalaetav} \times \eta^-$$

kus	$H_n^{akust.tarb}$	vaadeldaval tunnil akust maha laetud ja hoone toimiseks tarbitud elektrienergia hulk, kWh;
	$A_n^{mahalaetav}$	vaadeldaval tunnil akust maha laetava energia hulk, kWh;
	η^-	akust energia mahalaadimise kadusid arvestav tegur

Akust maha laetud energia kogus $A_n^{mahalaetav}$ määratakse valemiga (7).

(7)

$$A_n^{mahalaetav} = \begin{cases} A_n^{kumul}, & H_n^{lisa.vajad} \geq A_n^{kumul} \\ A_n^{kumul}, & H_n^{lisa.vajad} < A_n^{kumul} \\ 0, & H_n^{lisa.vajad} = 0 \end{cases}$$

kus	$A_n^{mahalaetav}$	vaadeldaval tunnil akust maha laetava energia hulk, kWh;
	$H_n^{lisa.vajad}$	hoone toimimiseks vajalik tarnitava lisaenergia hulk vaatlustunnil, mis ei ole kaetud lokaalselt toodetud elektrienergiaga, kWh
	A_n^{kumul}	vaatlustunniks akusse kumulatiivselt salvestatud energia maht, ($A_0^{kumul}=0$), kWh ;

Vajalik tarnitava elektrienergia hulk vaatlustunnil, mis ei ole kaetud lokaalselt toodetud elektrienergiaga $H_n^{tarnitav}$ määratakse valemiga (8).

(8)

$$H_n^{lisa.vajad} = \begin{cases} H_n^{tarb.kogu} - PV_n^{toodang}, & H_n^{tarb.kogu} > PV_n^{toodang} \\ 0, & H_n^{tarb.kogu} \leq PV_n^{toodang} \end{cases}$$

kus $H_n^{lisa.vajad}$ osa hoone elektrienergiatarbimisest vaatlustunnil, mis ei ole kaetud vaatlustunnil toodetud lokaalse elektrienergiaga, kWh
 $H_n^{tarb.kogu}$ vaatlustunnil hoones tarbitava elektrienergia koguhulk, kWh;
 $PV_n^{toodang}$ vaadeldaval tunnil päikesepaneelide poolt toodetud elektrienergia kogus, kWh;

Hoone energiatarbimine igal aasta tunnil $H_n^{tarb.kogu}$ saadakse hoone aastase energiasimulatsiooni tulemustest. Vaadeldaval tunnil toodetud elektrienergia $PV_n^{toodang}$ arvutatakse peatükis 2.2.1 kirjeldatud metoodikaga.

Akuse kumulatiivselt salvestatud energia kogus A_n^{kumul} määratakse valemiga (9).

(9)

$$A_n^{kumul} = A_{n-1}^{kumul} + A_n^{salvestatav} - A_n^{mahalaetav}$$

kus A_n^{kumul} vaatlustunniks akuse kumulatiivselt salvestatud energia maht; kWh
 A_{n-1}^{kumul} vaatlustunnile eelneva tunni lõpus akuse kumulatiivselt salvestatud energia maht ($A_0^{kumul}=0$), kWh;
 $A_n^{salvestatav}$ vaadeldaval tunnil akuse salvestatava energia hulk, kWh;
 $A_n^{mahalaetav}$ vaadeldaval tunnil akust maha laetava energia hulk, kWh;

Vaadeldaval tunnil akuse salvestatava energia hulk $A_n^{salvestatav}$ määratakse valemiga (10).

(10)

$$A_n^{salvestatav} = \begin{cases} PV_n^{ulejääk} \times \eta^+, & PV_n^{ulejääk} \leq A_n^{vaba} \\ A_n^{vaba} \times \eta^+, & PV_n^{ulejääk} > A_n^{vaba} \end{cases}$$

kus $A_n^{salvestatav}$ vaadeldaval tunnil akuse salvestatava energia hulk, kWh;
 $PV_n^{ulejääk}$ vaadeldaval tunnil päikesepaneelide poolt toodetud elektrienergia kogus, mida hoones ei tarbita kWh;
 A_n^{vaba} vaadeldaval tunnil akus olev vaba maht energia salvestamiseks, kWh;
 η^+ akuse energia salvestamise kadusid arvestav tegur

PV-paneelide poolt toodetud elektrienergiast hoones mittetarbitud energia hulk $PV_n^{ulejääk}$ määratakse valemiga (11).

(11)

$$PV_n^{ulejääk} = \begin{cases} PV_n^{toodang} - PV_n^{tarbitud}, & PV_n^{tarbitud} < PV_n^{toodang} \\ 0, & PV_n^{toodang} = PV_n^{tarbitud} \\ 0, & PV_n^{toodang} = 0 \end{cases}$$

kus $PV_n^{ulejääk}$ vaadeldaval tunnil akuse salvestamiseks vaba energia hulk, kWh;

	kohapeal tarbitud energia hulk, kWh;
$PV_n^{toodang}$	vaadeldaval tunnil päikesepaneelide poolt toodetud elektrienergia kogus, kWh;
$PV_n^{tarbitud}$	vaadeldaval tunnil päikesepaneelide poolt toodetud elektrienergiast hoones kohapeal kasutatava energia hulk, kWh;

Akus nominaalmahtuvusest energia salvestamiseks vaba maht A_n^{vaba} määratakse valemiga (12).

(12)

$$A_n^{vaba} = \begin{cases} A_{nomin} - A_{n-1}^{kumul}, & A_{n-1}^{kumul} < A_{nomin} \\ A_{nomin}, & A_{n-1}^{kumul} = 0 \\ 0, & A_{n-1}^{kumul} = A_{nomin} \end{cases}$$

kus	A_n^{vaba}	vaadeldaval tunnil akus olev vaba maht, kWh;
	A_{nomin}	aku nominaalmahtuvus, kWh;
	A_{n-1}^{kumul}	vaatlustunnile eelneva tunni lõpus akuse salvestatud energia maht, kWh;

2.5 Aku kasutamise majanduslik tasuvus

Akude lisamise tasuvust eluhoonetesse paigaldatavatele PV-paneelidele on uuritud nii Ühendkuningriikides, Austraalias kui ka mujal [12], [13]. Erinevate uuringute tulemused ei anna ühest vastust akude majandusliku tasuvuse kohta. Uddin ja Gough uurisid aku lisamise tasuvust ühe elamu näitel ühe aasta jooksul ning jõudsid järeldusele, et aku lisamine ei ole elanikule majanduslikult mõttekas [14].

Lisaks akude mõjule energiatõhususarvule on oluline määrata selle meetme majanduslik tasuvus. Käesolevas töös vaadeldakse tasuvust kui liginullenergiahoone nõude täitmiseks vajalikku alginvesteeringu suuruse muutust aku lisamisel hoone taastuvenergia süsteemi.

Nii maailma kui Eesti praktikast on teada, et hoonete arvutuslik energiatõhususarv ning tarbimisandmete järgse energiatõhususarvude vahel on oluline erinevus [15] [16]. Selle põhjused on muuhulgas järgnevad:

- Hoonete kütte- ja jahutuse seadearvete erinevus arvutuslikest väärtustest.
- Arvutuslikus energiamärgises arvesse mittevõetud energiatarbijad – näiteks panduste ja vihmaveerennide elektriküte, miinimumtemperatuuriga alade küte, elektrikeriste ja muude eriseadmete energiatarbimine.
- Hoone tegeliku kasutusgaafiku erinevus arvutuslikust.

Seega on aku tasuvuse arvutamine keerukam, kui vaid soovitud energiatõhusarvu saavutamiseks vajaliku investeeringu arvutus. Käesoleva töö raames vaadeldakse akust tulenevat kasu peamiselt hoones toodetud taastuenergia omatarbimise osakaalu suurendamise võtmes.

Aku lisamisel hoone energiasüsteemi saab seda kasutada ka muudel majanduslikku kokkuhoidu toovatel viisidel. Hoone elektrisüsteemi saab programmeerida nii, et aku laetakse täis elektrienergia madalate börsihindadega tundidel ning kõrgemate börsihindadega tundidel lülitatakse hoone tarbimine võrguenergia asemel akudele. Antud kasutusviisist saadava majandusliku kasu hindamine ei kuulu käesoleva magistritöö mahtu ning sellega edasistes arvutustes ei arvestata.

3. METOODIKA

3.1 Metoodika lühikirjeldus

Metoodika osa tutvustab töös kasutatud tarkvara, päikesepaneelide tunnipõhise tootlikkuse ja akude salvestamise arvutuse aluseid, simulatsioonideks valitud tüüphooneid, tüüphoonete simulatsiooniparameetrite valikut ja selle põhimõtteid.

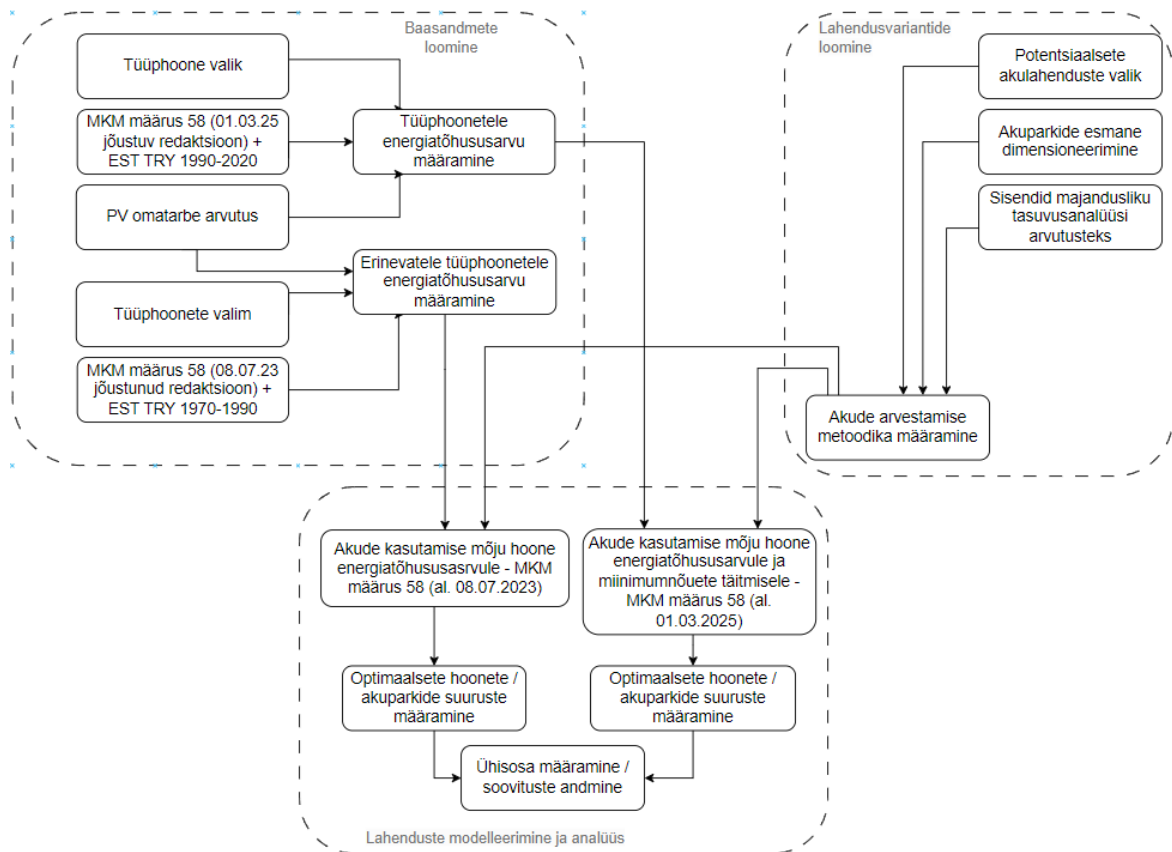
Esmalt teostatakse detailne analüüs valitud tüüphoonele – väikeelamu – kasutades määruse nr 58 01.03.2025 jõustuva redaktsiooni andmeid. Valimi koostatakse defineeritud väikeelamu hoonekarbi ehitusfüüsikaliste parameetrite ja soojusallikate varieerimise teel. Uurimisjuhtumidele arvutatakse liginullenergiahoone nõude täitmiseks vajalik PV-paneelide koguvõimsus, misjärel dimensioneeritakse hoonele optimaalne kombinatsioon PV-paneelidest ning akust.

Võrreldakse lahenduste rajamismaksumusi ning analüüsitakse tasuvate lahenduste ühisosa ja defineeritakse tasuvuspiirid.

Teises osas uuritakse väikeelamu detailse analüüsiga leitavate seoste esinemist teiste hoonetüüpide ning määruse nr 58 hetkel kehtiva redaktsiooni alusel. Valim koostatakse O3 Technology OÜ poolt aastatel 2021 – 2024 teostatud projektidest, erinevate hoonetüüpide esindamise alusel. Valimi objektide arvutused teostati määruse nr 58 hetkel kehtiva redaktsiooni alusel (jõustumise kuupäev 08.07.2023).

Vaadeldakse aku lisamise mõju kolme erineva mahtuvuse korral, mis dimensioneeritakse funktsioonina hoones vajaminevast PV-paneelide koguvõimsusest. Arvutatakse uuritud variantide rajamise maksumus ning vaadeldakse saavutatud säästu omatarbe osakaalu ja PV-erivõimsuse suhtes.

Joonis 1 kujutab töö metoodika põhimõttelist skeemi.



Joonis 1 Uurimistöö metoodika põhimõtteline skeem

3.2 Energiasimulatsiooni tarkvara

Uurimistöö tarbeks vajalikud energiasimulatsioonid on teostatud tarkvaraga IDA Indoor Climate and Energy 4.8 (IDA-ICE).

Hoone energiatõhususe arvutamise metoodika määruse nr 58 01.03.2025 jõustuva redaktsiooni põhjal teostatavate arvutuste energiasimulatsioonid teostatakse kliimafailiga EST TRY 1990-2020.

Hoone energiatõhususe arvutamise metoodika määruse nr 58 08.07.2023 jõustunud redaktsiooni põhjal teostatavate arvutuste energiasimulatsioonid teostatakse kliimafailiga EST TRY 1970-2000.

3.3 Tüüphoonete valik

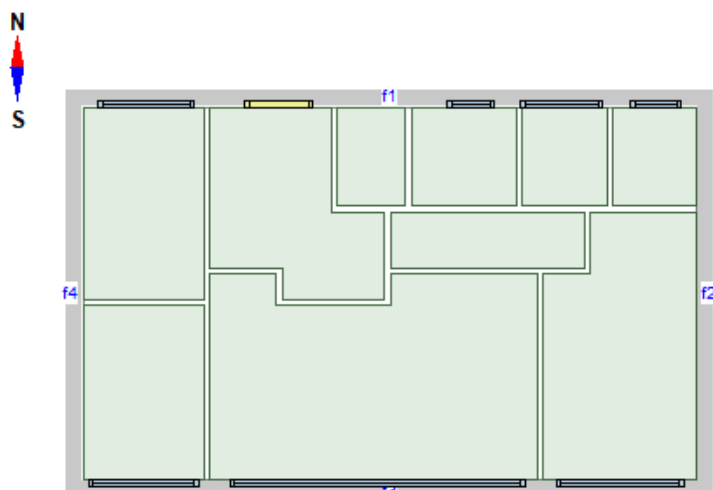
Peatükis kirjeldatakse käesoleva töö raames uuritud hoonete valimit. Punktis 3.3.1 kirjeldatud väikeelamu arvutused teostatakse määruse nr 58 „Hoone energiatõhususe arvutamise metoodika“ 01.03.2025 jõustuva redaktsiooni andmetega.

Punktis 3.3.2 kirjeldatakse laia tüüphoonete valimit, millele arvutatakse aku kasutamise efektiivsus nimetatud määruse nr 58 töö hetkel kehtiva redaktsiooni põhjal (jõustumise kuupäev 08.07.2023).

3.3.1 Väikeelamu detailne analüüs

Hoonetüübiks valiti eluhoone põhjusel, et määruse nr 58 „Hoone energiatõhususe arvutamise meetodika“ 01.03.2025 jõustuva redaktsiooniga kaasnevad muudatused arvutusparameetrites mõjutavad eelduslikud enim eluhoonete energiatõhususarvutuste tulemusi.

Analüüsitavaks tüüphooneks valiti uusehitis – ühekordne väikeelamu köetava pinnaga 100,0 m². Hoone arhitektuur valiti lihtne, et minimeerida arhitektuurse lahenduse mõju tulemustele. Hoonete energiatõhususe meetodika määruse mõistes kuulub hoone kategooriasse „Väikeelamu toatemperatuuriga pinnaga < 120 m². Hoone laius on 13,15 m ning pikkus 8,0 m ja rruumide kõrgus on 3,1 m. Hooneplaan on kujutatud Joonis 2 ja Joonis 3 Hoonekarpide 3D mudelid simulatsiooniprogrammis IDA ICE.

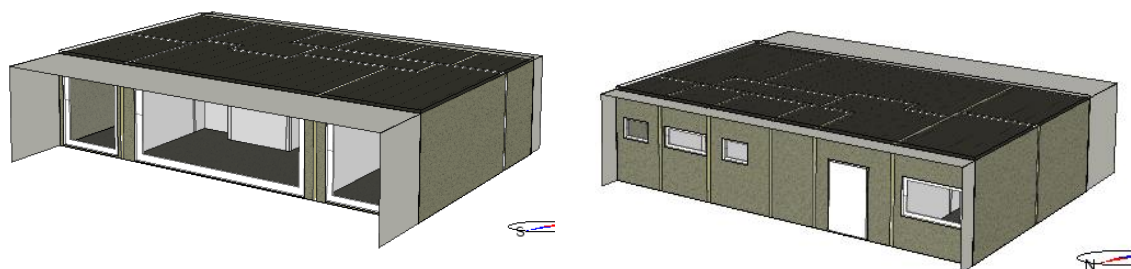


Joonis 2 Tüüphoonete põrandaplaan

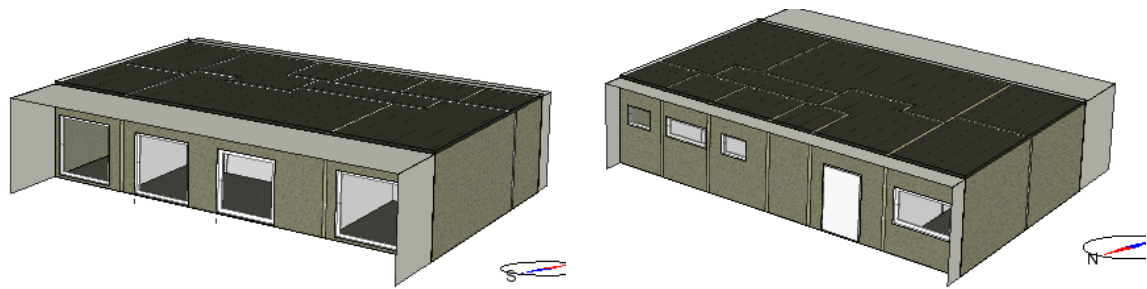
Kolm tüüpstsenaariumit loodi valitud väikeelamu hoone soojustehnilisi näitajaid varieerides. Stsenaariumid esindavad erinevaid praktikas levinud hoonekarpe. Antud töös nimetatakse neid „heaks“, „keskmiseks“ ning „halvaks“ hoonekarbiks. Lisaks soojustehnilistele näitajatele muudeti stsenaariumites hoone akende suuruseid. Hoonekarpide stsenaariumite ehitusfüüsikalised parameetrid on toodud Tabel 10 ja 3D mudelite kuvatõmmised simulatsioonimudelistest Joonis 3.

Tabel 10 Väikeelamu detailses analüüsis kasutatud hoonekarpide soojustehniliste stsenaariumite parameetrid

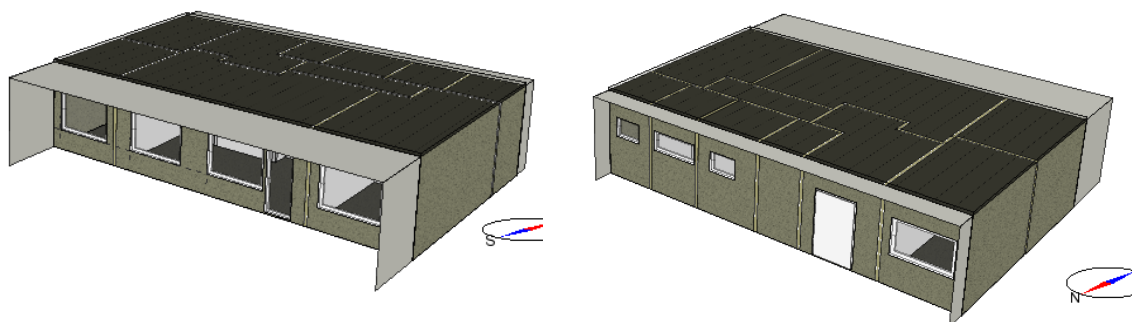
Hoonekarpi parameeter	Hoonekarpi stsenaarium		
	„Halb“ hoonekarp	„Keskmine“ hoonekarp	„Hea“ hoonekarp
TARINDITE U-arvud			
Sisesein	kergsein	kergsein	kergsein
Välissein, W/(m ² ·K)	0,157	0,14	0,12
Katuslagi, W/(m ² ·K)	0,12	0,11	0,10
Põrand pinnasel, W/(m ² ·K)	0,11	0,11	0,11
Aken, W/(m ² ·K)	1,0	0,9	0,8
Välisuks, W/(m ² ·K)	1,2	1,2	1,0
KÜLMASILLAD - allikas	määrusejärgne	arvutuslikud	arvutuslikud
Välissein-välissein, W/(m·K)	0,10	0,048	0,048
Välissein-sisesein, W/(m·K)	0,05	0,05	0,05
Välissein-katuslagi, W/(m·K)	0,10	0,06	0,22
Välissein-põrand pinnasel, W/(m·K)	0,25	0,252	0,25
Akna külmasild, W/(m·K)	0,06	0,06	0,05
Välisukse külmasild, W/(m·K)	0,06	0,06	0,05
INFILTRATSIOON			
Õhulekkearv q ₅₀ , m ³ /(h·m ²)	2,5	1,5	1,0
AKENDE PIND, m ²	38,89	20,99	18,93
Hoone H, W/K	107,18	81,268	70,472
Hoone H/A, W/K.m²	1,07	0,81	0,70



„Halb“ hoonekarp, hoone H/A, W/K.m² 1,07



„Keskmine“ hoonekarp, hoone H/A, W/K.m² 0,81



„Hea“ hoonekarp, hoone H/A, W/K.m² 0,70

Joonis 3 Hoonekarpide 3D mudelid simulatsiooniprogrammis IDA ICE.

Hoone tehnosüsteemide lähteandmed on toodud alljärgnevalt.

Ventilatsioon

- soojustagastuse kasutegur 80 %
- süsteemi SFP 1,5 kW/(m³/s)
- minimaalne heitõhu temperatuur
 - rootorsoojustagastil 0 °C
 - plaatsoojustagastil +5 °C
- sissepuhketemperatuur +18 °C
- järelküttekalorifeer
- sissepuhkeõhk jahutamata

Küttesüsteem

- Põrandküte (veesisüsteem)
- Küttegaafik +40/+35 °C
- Elektriline mugavusküte puudub

Jahutussüsteem

- SPLIT-süsteem
- Jahutusperioodi keskmine jahutustegur 3,5

Vabasoojused vastavalt määruse nr 58 01.03.2025 jõustuvale redaktsioonile.

- Valgustus 5 W/m², 10 %
- Seadmed 3 W/m², 60 %
- Inimesed 3 W/m², 60 %

Sooja tarbevee tootmine

- Sooja tarbevee netoenergiavajadus, 30 kWh/a.m²
- Sooja tarbevee jaotus- ja ringlustorustiku soojuskadu
 - Määrusejärgne 14 kWh/(m².a) ehk 1,598 W/m²
 - Arvutuslik 7,62 kWh/(m².a) ehk 0,87 W/m²
 - Jaotus- ja ringlustorustiku soojuskadudest 70 % arvestatakse ruumidesse jõudvaks vabasoojuseks vabasoojuseks
- Vesiküttesüsteemil põhinevaid käterätikuivateid ei ole
- Sooja tarbevee salvestuse soojuskadu loetakse nulliks

Tehnosüsteemid

- Ventilatsiooni õhuvooluhulk 0,50 l/s.m²
- Põrandküttesüsteemi jaotamise ja väljastamise tegur 0,85

3.3.2 Erinevate hoonetüüpide valim

Hindamaks akude kasutamise potentsiaali erinevates hoonetüüpides koostati O3 Technology OÜ poolt aastatel 2021 – 2024 teostatud projektide energiamärgiste hulgast valim. Kõigi antud valimi objektide arvutused teostatakse määruse nr 58 „Hoone energiatõhususe arvutamise metoodika“ hetkel kehtiva redaktsiooni alusel (jõustumise kuupäev 08.07.2023).

Kokku vaadeldi 24 eri hoonet, mis on tähistatud numbriliselt tunnustega 1 - 24. Objektide valimisel püüti valimis kajastada vähemalt kolm näidet iga valitud hoonetüüpi kohta. Valimi mitmekesistamiseks kajastati igas hoonetüübis vähemalt üks näide tõhusa kaugkütte kohta ning üks maasoojuspumba kohta. Kokku on valimis seega 35 uurimisjuhtu. Valimi lähteandmed on toodud Tabel 11 ja Tabel 12.

Kõikidele hoonetüüpidele ei leitud maasoojuspumbaga objekti näidet. Sel juhul arvutati üks kaugküttel põhinevatest objektidest läbi maasoojuspumbal põhineva lahendusega. Antud juhtumid on eristatavad objekti tunnusel oleva täiendite põhjal. Täiend „-1“ tähistab tõhusal kaugküttel lahendust, „-2“ maasoojuspumbal ja „-3“ õhk-vesi soojuspumbal põhinevat lahendust.

Tabel 11 Erinevate hoonetüüpide valimi mitte-eluhooned – esitatud objektide unikaalne tunnus, köetav pind, soojusallikas ja hoonetüüp, A-klassi saavutamiseks vajalik PV-paneelide koguvõimsus ja energiatõhususarv.

Objekti andmed			Määrusejärgne			
Hoone tunnus	Köetav pind, m ²	Soojusallikas	Hoone tüüp	Taastuenergia omatarbe osakaal, %	Vajalik PV koguvõimsus, kW	ETA A, kWh/a.m ²
1	984.6	kaugküte (mittetõhus)	Avalik hoone	80.0	24.8	128.7
2-1	3401.7	MSP + kaugküte			40.0	134.8
2-2	3401.7	kaugküte			70.0	134.8
3	625.3	ÕVSP			12.0	134.0
4	2577.1	kaugküte	Kontorihoone	90.0	19.9	109.9
5-1	1875.0	kaugküte			41.0	99.8
5-2	1875.0	MSP			26.0	99.0
6	1258.3	maagaas			25.0	93.5
7	2483.0	kaugküte	Haridushoone	60.0	40.2	98.4
8-1	478.3	kaugküte			8.0	100.1
8-2	478.3	MSP			7.0	99.3
9	1170.7	maagaas			17.0	99.4
10-1	1158.9	MSP	Kaubandushoone	90.0	20.0	159.2
10-2	1158.9	kaugküte			63.0	134.9
11	721.7	kaugküte			16.0	159.3
15-1	2547.8	kaugküte	Majutushoone	70.0	32.0	142.7
15-2	2547.8	kaugküte			28.0	144.4
16-1	1014.3	kaugküte			22.0	144.4
16-2	1014.3	MSP			10.0	144.8
17-1	2095.3	MSP			3.0	144.0
17-2	2095.3	kaugküte			20.0	144.3
18	2937.3	kaugküte	Ravihoone	85.0	54.0	134.3
19	3884.6	kaugküte			80.0	100.2
20-1	2550.0	kaugküte			56.0	100.3
20-2	2550.0	MSP			34.0	99.8
21-1	481.8	kaugküte	Ärihoone	60.0	9.0	127.7
21-2	500.0	MSP			10.0	128.6
21-3	500.0	ÕVSP			11.0	129.6

Tabel 12 Uuringu valimi eluhoonete (korter- ja väikeelamud) esitatud objektide unikaalne tunnus, kütav pind, soojusallikas ja hoonetüüp, A-klassi saavutamiseks vajalik PV-paneelide koguvõimsus ja energiatõhususarv.

Objekti andmed			Määrusejärgne			
Hoone tunnus	Kütav pind, m ²	Soojusallikas	Hoone-tüüp	Taastuenergia omatarbe osakaal, %	Vajalik PV koguvõimsus, kW	ETA A, kWh/a.m ²
12-1	1457.6	kaugküte	Korter-elamu	55.0	17.1	108.3
12-2	1457.6	MSP			12.0	105.1
13	10540.1	kaugküte			97.0	108.9
14	2351.7	kaugküte			34.4	111.3
22	219.4	kaugküte	Üksik-elamu	40.0	7.0	119.4
23	489.6	MSP		35.0	10.0	86.5
24	899.9	MSP			23.0	99.7

Objektide PV-paneelide paigaldamise maht on dimensioneeritud liginullenergiahoone nõude saavutamiseks vajaliku mahu järgi.

Valimi hoonetele on teostatud energiatõhususarvutused ja väljastatud energiamärgis aastatel 2021 – 2024. Kõikide hoonete puhul võeti nende tehnosüsteemide lähteandmeteks projektijärgsed lahendused, millele põhinedes on hoonete energiatõhususuarvud on arvatud.

Valimi objektide energiarvutused kontrolliti. Koostati energiaarvutused valitud hoonetele (2, 5, 8, 10, 12, 15, 16, 17, 20, 21) alternatiivse soojusallika valimis esindamiseks ja arvutati energiatõhususarv kehtiva meetoodika põhjal. Valimist valiti lisaarvutuseks objekti valmimiskuupäev alusel, eelistades hilisemalt valminuid.

Akude mõju uurimiseks vaadeldakse kõigi valimi juhtude puhul kolmes eri mahus – 25%, 50%, 75% akusid. Akude maht (kWh) dimensioneeritakse funktsioonina hoonesse paigaldatud PV-paneelide koguvõimsusest (kW) ja tähistatakse töös läbivalt „aku osakaaluna, %“ Näiteks, kui hoonesse paigaldatakse 10 kW PV-paneele, tähistab sellele vastav aku osakaal 25% akut nominaalmahtuvusega 2,5 kWh vastavalt hoonetele paigaldatud PV-paneelide koguvõimsuse põhjal.

Seejärel rakendatakse peatükis 3.4.5 kirjeldatud aku kasutamise mõju arvutamise algoritmi ning arvutatakse lokaalselt toodetud taastuenergia omatarbe osakaal ja vastavad energiatõhususarvud dimensioneeritud akude mahtude puhul.

3.4 Lokaalselt toodetud elektrienergia omatarbe osakaalu arvutamine

Punktis 3.3.1 kirjeldatud väikeelamu tüüpsituatsioonidele teostatakse aastased energiasimulatsioonid vastavalt määruse nr 58 01.03.2025 jõustuva redaktsiooni andmetele. Hoonete tehnosüsteemide andmed on kirjeldatud punktis 3.3.1.

Punktis 3.3.2 kirjeldatud erinevaid tüüphooneid sisaldava valimi aastased energiasimulatsioonid on teostatud vastavalt määruse nr 58 08.07.2023 jõustunud redaktsiooni andmetele. Hoonete tehnosüsteemide andmed on kirjeldatud punktis 3.3.2.

3.4.1 Hoone süsteemide elektrienergiatarbe arvutamine

Hoone energiamudeli aastase simulatsiooni mudeli tulemusena saadakse aastane tunnipõhine andmestik hoone tehnosüsteemide netoenergiavajaduste kohta.

Saadud netoenergiavajaduste andmestik eksporditakse MS Exceli abil programmist IDA ICE. Excelis töödeldakse iga hoone netoenergiavajaduste andmed elektritarbimise andmeteks vastavalt hoones kasutatud tehnosüsteemidele ja nende parameetritele. eksporditakse arvutustööriista ning need on aluseks hoone elektri- ja soojusenergia vajaduse arvutusel. Erinevate süsteemide energivajaduste arvutamise metodika on toodud alljärgnevatel peatükkides.

Summeerides elektril baseeruvate süsteemide energiatarbed igal tunnil saadakse hoone aastane tunnipõhine elektrienergiatarve.

3.4.1.1 Ruumide kütte energiatarbe arvutamine

Ruumide kütte energiatarbe saamiseks jagatakse netoenergia ruumide kütteseadmete jaotamise ja väljastamise kasuteguriga, soojusallika aastase soojusteguri või kasuteguriga ning soojuspumpsüsteemide korral võetakse arvesse soojuspumba osakaalu ning elektriga kaetavat tipukoormuse osa.

Kütteseadme jaotamise ja väljastamise kasuteguri arvestamiseks kasutatakse valemit (13) ning määrus nr 58 andmeid, mis on koondatud Tabel 6 – Hoone küttesüsteemi abiseadmete energiatarbe määramine [3], [6]Tabel 6 [3], [6].

(13)

$$Q_{k\ddot{u}te}^{ruumid} = \frac{Q_{k\ddot{u}te,neto}^{ruumid}}{\eta_{jv}}$$

Kus	$Q_{k\ddot{u}te}^{ruumid}$	ruumide k\ddot{u}tteks vajalik soojusenergia, kWh
	$Q_{k\ddot{u}te,neto}^{ruumid}$	ruumide k\ddot{u}tteks vajalik netoenergia, kWh
	η_{jv}	soojuse jaotamise ja v\ddot{a}ljastamise kasutegur

Soojusallika kasutegur m\ddot{a}aratakse vastavalt m\ddot{a}äruse nr 58 tabelile 8 ning soojuspumps\ddot{u}steemidel aastane soojustegur vastavalt tabelile 10³. [3], [6].

Soojuspumps\ddot{u}steemi puhul m\ddot{a}aratakse selle osakaal ruumides vajaliku soojusenergia tootmisest vastavalt m\ddot{a}äruse § 15 ja § 16 p\ddot{o}hjal. [3], [6].

3.4.1.2 Ventilatsiooni\ddot{o}hu k\ddot{u}tte energiatarbe arvutamine

Ventilatsiooni\ddot{o}hu k\ddot{u}tteks vajaliku energiatarbe saamiseks jagatakse vastav netoenergia soojusallika aastase soojusteguri v\ddot{o}i kasuteguriga ning soojuspumps\ddot{u}steemide korral v\ddot{o}etakse arvesse soojuspumba osakaalu ning elektriga kaetavat tipukoormuse osa vastavalt m\ddot{a}äruse nr 58 § 15 ja § 16 toodu p\ddot{o}hjal [3], [6].

3.4.1.3 Sooja tarbevee energiatarbe arvutamine

Sooja tarbevee tootmiseks vajaliku energiatarbe saamiseks jagatakse vastav netoenergia soojusallika aastase soojusteguri v\ddot{o}i kasuteguriga ning soojuspumps\ddot{u}steemide korral v\ddot{o}etakse arvesse soojuspumba osakaalu ning elektriga kaetavat tipukoormuse osa.

P\ddot{a}ikesekollektori olemasolul v\ddot{o}etakse see arvesse m\ddot{a}äruse nr 58 § 27 toodud andmete p\ddot{o}hjal. S\ddot{u}steemi vajalikust netoenergiast lahutatakse p\ddot{a}ikesekollektori poolt toodetud soojusenergia.

P\ddot{a}ikesekollektoriga toodetud sooja tarbevee soojus arvutatakse m\ddot{a}äruse 58 § 27 l\ddot{o}ikes 2 toodud valemiga (14)

(14)

$$Q_{p\ddot{a}ike} = 945 \times A_{kol} \times k_{soojus} \times k_{suund}$$

kus	945	horisontaalpinnale tulev aastane p\ddot{a}ikesekiirgus kWh/(m ² ·a);
	A_{kol}	kollektori aktiivpindala (m ²), millele ei teki varje

k_{soojus} kollektoriga toodetud soojuse aasta keskmine kogukasutegur (0,4 lamekollektoritel / 0,5 vaakumkollektoritel)

k_{suund} suunategur, mis arvestab päikesepaneeli suunatust ilmakaare ja horisondi suhtes

Suunategur k_{suund} määratakse PV-paneelide orientatsiooni ja paigaldamise kaldenurga alusel määruse nr 58 tabeli 16 toodud väärtustest.

3.4.1.4 Ruumide jahutamise energiatarbe arvutamine

Ruumide jahutamiseks vajaliku energiatarbe saamiseks jagatakse vastav netoenergia jahutusenergia tootmisprotsessi jahutusperioodi jahutusteguriga. Jahutustegurid on esitatud määruse nr 58 §24 tabelis 14 [3], [6]

3.4.1.5 Ventilaatorite, abiseadmete, seadmete ja valgustuse energiatarbe arvutamine

Ventilaatorite energiatarbe arvutatakse hoone ventilatsioonisüsteemi kasutusprofiili, ventilatsiooniseadmete õhuhulkade ja süsteemi SFPsid arvesse võttes.

(15)

$$E_v = P_v \frac{\tau_d \tau_w}{24 \cdot 7} t$$

Kus P_v ventilaatori elektrivõimsus kW

τ_d seadme käidutundide arv (h) ööpäevas arvutuslikul õhuvooluhulgal

τ_w seadme käidupäevade arv (d) nädalas arvutuslikul õhuvooluhulgal

t on arvutusperioodi kestus 8760 tundi (h)

Seadmete ja valgustuse energiatarbe arvutatakse vastavalt Tabel 3 ja

Tabel 4 vabasoojusele ning määruses nr 58 toodud elamu tunnipõhistele kasutusastmetele. Abiseadmete energiatarbe arvutatakse Tabel 6 toodud suurustele.

3.4.2 PV-paneelide poolt toodetav energia

PV-paneelide tunnipõhise tootlikkuse alusandmeteks on Kliimaministeeriumi poolt avaldatud kalkulaatori PV-paneelide tootlikkuse andmed vastavalt PV-paneelide orientatsioonile ning paigalduse kaldenurgale horisondi suhtes [8].

Alusandmeteks võetakse PV-paneelide tootlikkus 1 kW paigaldatud paneelide kohta. Analüüsis korrutatakse see iga tüüpjuhtumi konkreetse paigaldatava PV-koguvõimsusega.

3.4.3 PV-paneelide poolt toodetava energia omatarbe osakaalu arvutus

Hoone PV-paneelide poolt toodetava energia aastase omatarbe osakaalu arvutus teostatakse hoone aastaste tunnipõhiste tarbimis- ning tootmisandmete põhjal.

Hoone energiatarbimise andmed saadakse energiasimulatsioonide tulemustest. Simulatsiooni tulemusel saadakse hoone aastased tunnipõhised energiatarbimised tehnosüsteemide ja energiatarbijate kaupa. Tulemused kujutavad endast süsteemide netoenergia vajadusi ning ei sisalda üldjuhul süsteemide kadusid, jahutuse kasutegureid, ega küttesüsteemides tekkivaid väljastamise ja jaotamisega tekkivaid kadusid. Eelmainitud kaod lisatakse tulemustele manuaalselt.

Igal tunnil arvutatakse lokaalselt toodetud elektrienergiast kohapeal kasutatava ja eksporditava energia hulgad. Tundidel, kui hoone PV-süsteem toodab rohkem energiat, kui süsteem vajab, eksporditakse ülejääk võrku. Hoones lokaalselt toodetud taastuvenergia omatarbe osakaal saadakse aastase summeeritud kohapeal kasutatud energiahulga ja aastase summeeritud lokaalse taastuvenergia tootmise suhtena.

3.4.4 Aku kasutamise arvutuse metoodika

Akude mõju omatarbe osakaalu määramisel arvestatakse detailse tunnipõhise arvutusega. Akude salvestamise tunnipõhiseks arvestamiseks loodi töö raames tööriist programmis MS Excel. Tööriist võtab tunnipõhiselt arvesse hoones päikesepargi poolt toodetavat, hoones tarbitavat, akusse laetavat ja akust mahalaetavat energiahulka. Tööriist võtab arvesse aku nominaalmahtuvust, akusse energia salvestamise ja mahalaadimise kasutegureid.

Aku laadimistsükli efektiivsuseks loetakse 85% [10]. Laadimistsükli kadu jaguneb energia salvestamise ning mahalaadimise vahel suhtena 75% / 25%. Töö kasutatakse järgnevaid energia akusse salvestamise ja mahalaadimise kasutegureid.

Akusse energia salvestamise kasutegur – 0,8875

Akust energia mahalaadimise kasutegur – 0,9625

Tööriista koondatakse hoone tunnipõhised päikesepaneelide tootlikkuse ning energiatarbimise andmed. Lisaks nendele on sisendandmeteks kasutatava aku parameetrid – mahtuvus ning kasutegurid.

Tööriist arvutab tunnipõhiselt välja hoones kohapeal kasutatava PV-paneelide toodangu hulga, akusse salvestava päikeseenergia hulga ning akust mahalaetava energia hulga. Tööriist võtab arvesse akusse energia salvestamise ja sealt mahalaadimise kasutegureid ning piirab akusse salvestatava energia hulga lähteandmetes seadistatud aku mahtuvusega.

Toodetud päikeseenergia, mida ei tarbita kohapeal ega salvestata akusse arvestatakse võrku müüdavaks energiaks. Aasta lõikes summeeritakse PV-toodang, mis hoones kasulikku tarbimisse läheb. Kasulik tarbimine ei hõlma endas võrku müüdavat ega akude kasutamisel kadudeks kuluvat energiat. Aastase summaarse kasuliku tarbimise ja aastase PV-toodangu suhe annab tulemuseks konkreetse hoone PV-paneelide poolt toodetud energia omatarbe osakaalu.

3.5 Aku kasutamise majandusliku tasuvuse arvutus

3.5.1 Aku eluea arvestamine

Käesolevas töös arvutatakse aku elutsükli hind kahel juhul.

Esmalt vaadeldakse olukorda, kus hoonesse paigaldatav aku on kasutusel vaid PV-paneelide poolt toodetud energia ülejäägi salvestamiseks ja hilisemaks tarbimiseks. Selleks valiti nelja käsitletud hoone arvutuste tunnipõhised aastased andmed akusse energia salvestamise ja mahalaadimise kohta. Analüüsitud andmete põhjal toimub aastas akusse energia laadimine 8,6 – 21,7 % tundidest ja sealt energia mahalaadimine 10,4 – 27,7 % tundidest. Konservatiivse lähenemisena lähtutakse kõrgeimast tundide arvust 28 %. Üksikutel tundidel toimuv akusse ja akust maha laetava energia hulk on madal ning ei seda ei käsitleta laadimistsükliks.

Paremate andmete puudumisel eeldatakse, et aastast 28 % päevadest läbib aku ühe laadimistsükli ja aku läbib aastas 101 laadimistsükli. Sel juhul ületab aku teoreetiline eluiga PV-paneelide oodatavat eluiga 25 -30 aastat kahekordselt. [17]

Lisaks vaadeldakse juhtu, kus akut kasutatakse hoones ka soodsa börsihinnaga tundidel elektrienergia salvestamiseks ning selle hilisemaks kasutamiseks. Toodetud päikeseenergia ülejääk ja selle salvestamine toimub peamiselt suvisel perioodil. Talvisel perioodil on päikeseenergia ülejääks väiksem ning aku mahtuvust saab kasutada elektrienergia börsihinna optimeerimiseks. Sellega ühtlustub akude aastaringne kasutamine. Täpsemate andmete puudumisel võetakse lähte-eelduseks, et aku läbib igas päevas ühe laadimistsükli ehk aastane laadimistsükli arv on 365, sel juhul hinnatakse aku elueaks poolt PV-paneelide elueast.

3.5.2 Aku ja PV-paneelide hinnad

Taastuenergiatsüsteemide hindade määramiseks konsulteeriti taastuenergiatootmise ettevõttega Sunly AS (registrikood 14695483). Sellele tuginedes valiti antud töös kasutatavad PV-paneelide ja akude maksumused, mis on toodud Tabel 13

Tabel 13 Aku ja PV-paneelide investeeringute aluseks võetud hinnad.

Süsteem	Hind
Aku, € / kWh	650
Aku paigaldus ja ühendamine, €	110
PV-paneel & inverter, € / kW	908
PV-paneel - paigaldus	<i>*sisaldub paneelide hinnas</i>

Päikesepaneelide paigaldamiseks vajaliku investeering saadakse paigaldatava PV-paneelide koguvõimsuse ja PV-paneeli & inverteri ühikuhinna korrutisena. Akude paigaldamise investeeringu puhul korrutatakse aku nominaalmahtuvus aku ühikuhinnaga ning liidetakse paigalduse ja ühendamise ühekordne kulu.

Käesolevas töös ei ole akude alginvesteeringus ei ole arvestatud aku paiknemise ruumi tuletocketsooniks rajamise kuluga.

4. TULEMUSED JA ANALÜÜS

Tulemuste peatükk jaguneb kaheks. Esimeses osas esitatakse punktis 3.1.1 defineeritud väikeelamu valimi tulemused vastavalt määrusele nr 58 „Hoone energiatõhususe arvutamise meetodika“ 01.03.2025 jõustuvale redaktsioonile.

Tulemusi analüüsitakse vaadeldud hoonekarbi tüüpide ja soojusallikate kaupa. Hinnatakse kummagi parameetri mõju tulemustele. Esitatakse järeldused ja akude esmase tasuvuse hindamise piirid.

Teises osas esitatakse peatükis 3.3.2 esitatud hoonevalimi arvutustulemused. Esitatakse valimi hoonete taastuenergiasisaldusesse akude lisamise mõju saavutatava energiatõhususarvu ning alginvesteeringu säästu perspektiivist.

Võrreldakse kahes osas esitatud tulemusi ning analüüsitakse järelduste ühisosasid.

4.1 Väikeelamu detailse analüüsi tulemused

4.1.1 Valimi esialgsed tulemused

Analüüsitavale väikeelamutele teostati simulatsioonid ja arvutused 01.03.2025 jõustuva „Hoone energiatõhususe arvutamise meetodika“ määruse andmete põhjal. Kolmele defineeritud hoonekarbile teostati nelja tüüpjuhu simulatsioonid. Tüüpjuhud on kombinatsioonid järgnevatest parameetritest: ventilatsiooniseadme soojustagasti tüüp (rootor ja plaat) ning STV jaotus- ja ringlustorustiku soojuskadude arvutuslik ja määrusejärgne väärtus. Hoonekarpide stsenaariumite tehnosüsteemide netoenergiavajadused on toodud Tabel 14.

Igale hoonekarbile valiti täpsemaks analüüsiks kaks tüüpjuhtu. „Halva“ hoonekarbi tehnosüsteemide netoenergiavajaduse kõrgete erivõimused tõttu vaadeldi vaid arvutuslike ringluskadudega variante.

„Keskmise“ ja „Hea“ hoonekarbi stsenaariumitest valiti mõlema valimist madalat ja kõrget energiatarvet esindavad juhud. Madala energiatarbe parameetriteks on ringluskadude arvutuslik väärtus ja ventilatsiooniseadme soojustagasti tüübini rootorsoojustagasti. Kõrge energiatarbe parameetriteks on ringluskadude määrusejärgne väärtus ja ventilatsiooniseadme plaatsoojustagasti.

Tabel 14 Hoonekarpide süsteemide netoenergiavajadused

	Halb hoonekarp		Keskmine hoonekarp		Hea hoonekarp	
Hoone H, W/K	107,18		81,29		70,47	
Hoone H/A, W/K.m ²	1,07		0,81		0,70	
Süsteemide netoenergiavajadused						
Sooja tarbevee jaotus- ja ringlustorustiku soojuskadude allikas	Arvutuslik		Arvutuslik	Määrus, tabel 10 ⁵	Arvutuslik	Määrus, tabel 10 ⁵
Ruumide küte, kWh/a.m ²	86.06		61.70	58.56	51.01	47.96
Ruumide jahutus, kWh/a.m ²	10.34		5.41	6.13	3.90	4.58
Soe tarbevesi, kWh/a.m ²	37.63		37.63	44.01	37.63	44.01
Soojustagasti tüüp	Rotor	Plaat	Rotor	Plaat	Rotor	Plaat
Ventilatsiooniõhu küte, kWh/a.m ²	4.99	8.86	4.98	8.82	4.97	8.78

Valitud juhtudele arvutati energiatõhususarvud erinevate soojusallikate korral. Vastavalt energiatõhususe miinimumnõuetele peab hoone energiatõhususarv vastama madalenergiahoone nõuetele lokaalset taastuenergiasisüsteemi arvestamata [2]. Vastav energiatõhususarv on edaspidi tähistatud „ETA B“. Kui hoone ETA B ei täitnud madalenergiahoone nõuet, lisati hoonele päikesekollektoreid vajaliku aktiivpinnaga, kuni aktiivpind < 8,0 m².

Järgnevalt on toodud Tabel 15,

Tabel 16 ja Tabel 17 sisaldavad uuritud juhtumite lähteandmeid ja saavutatud ETA B väärtuseid. ETA B on tabelis värvitud roheliseks, kui madalenergiahoone nõue on täidetud ning punaseks, kui nõue ei ole täidetud.

„Halva“ hoonekarbi uuritud 21-st variandist täidab ETA B madalenergiahoone nõuet kaheksal juhul. Nendest kuuel korral on miinimumnõue tagamiseks vajalik päikesekollektorite kasutamine.

„Keskmise“ hoonekarbi vaadeldud 21-st juhust täidab ETA B madalenergiahoone nõuet 12-l juhul. Nendest üheksal korral on vajalik päikesekollektori kasutamine. Õhk-vesi soojuspumba korral on päikesekollektori kasutamine kõikidel juhtudel vajalik. Maasoojuspumbaga juhtumite puhul on päikesekollektori kasutamine vajalik kui ventilatsiooni kütteks kasutatakse elektrikalorifeeri. Kaugküte korral on madalenergiahoone nõue päikesekollektoriteta tagatav vaid ventilatsioonisüsteemis rootorsoojustagasti ja vesikalorifeeri kasutamise korral.

„Hea“ hoonekarbi puhul vaadeldud 19-st uuritud juhust täidab ETA B madalenergiahoone nõuet 12-l juhul. Nendest seitsmel juhul on vajalik päikesekollektori kasutamine. Õhk-vesisoojuspumba korral on päikesekollektorite kasutamine vajalik kõikidel juhtudel. Maasoojuspumba ja elektriga hoonetes vaid juhul, kui ventilatsiooni sissepuhkeõhku soojendatakse elektrikalorifeeriga. Kaugküte korral tagatakse nõue päikesekollektoriteta kõikidel juhtudel, välja arvatud ventilatsiooniseadmes plaatsoojustagasti ja elektrikalorifeeri kombinatsiooni kasutades.

Tabel 15 Halb hoonekarp – esialgsed energiatõhususarvud, edasiseks uurimiseks valitakse juhtumid, mille puhul hoone ilma taastuenergiaallikate lisamiseta täidab madalenergiahoone nõudeid (ETA B tulbas märgitud roheliselt).

Halb hoonekarp	Soojusallikas	Ventilatsiooni soojustagasti tüüp	Ventilatsiooni kütte soojusallikas	Päikesekollektori aktiivpine, m²	Tarbevee tsirkulatsiooni- ja ringlusskaod	ETA B, kWh/a.m²
Hoone H = 107.18 W/K						
A-1-M-1	MSP	Rooror	MSP	0.0	arvutuslik	157.6
A-1-M-3	MSP	Rooror	elekter	0.0	arvutuslik	204.1
A-1-M-4	MSP	Rooror	elekter	4.0	arvutuslik	158.8
A-1-Õ-1	ÕVSP	Rooror	ÕVSP	0.0	arvutuslik	198.0
A-1-Õ-2	ÕVSP	Rooror	ÕVSP	6.5	arvutuslik	158.2
A-1-Õ-3	ÕVSP	Rooror	elekter	0.0	arvutuslik	238.5
A-1-Õ-4	ÕVSP	Rooror	elekter	7.0	arvutuslik	163.3
A-1-K-1	Kaugküte	Rooror	Kaugküte	0.0	arvutuslik	180.8
A-1-K-2	Kaugküte	Rooror	Kaugküte	5.0	arvutuslik	160.3
A-1-K-3	Kaugküte	Rooror	Elekter	0.0	arvutuslik	187.2

A-1-K-4	Kaugküte	Rooror	Elekter	8.0	arvutuslik	160.0
A-2-M-1	MSP	Plaat	MSP	0.0	arvutuslik	159.7
A-2-M-2	MSP	Plaat	elekter	0.0	arvutuslik	211.9
A-2-M-3	MSP	Plaat	elekter	4.6	arvutuslik	159.7
A-2-Õ-1	ÕVSP	Plaat	ÕVSP	0.0	arvutuslik	201.2
A-2-Õ-2	ÕVSP	Plaat	elekter	0.0	arvutuslik	246.3
A-2-Õ-3	ÕVSP	Plaat	elekter	10.0	arvutuslik	160.5
A-2-K-1	Kaugküte	Plaat	Kaugküte	0.0	arvutuslik	183.6
A-2-K-2	Kaugküte	Plaat	Kaugküte	6.0	arvutuslik	159.0
A-2-K-3	Kaugküte	Plaat	Elekter	0.0	arvutuslik	194.9
A-2-K-4	Kaugküte	Plaat	Elekter	7.0	arvutuslik	167.7

Tabel 16 Keskmine hoonekarp – esialgsed energiatõhususarvud, edasiseks uurimiseks valitakse juhtumid, mille puhul hoone ilma taastuenergiaallikate lisamiseta täidab madalenergiahoone nõudeid (ETA B tulbas märgitud roheliselt).

Keskmine hoonekarp Hoone H = 81.268 W/K	Soojusallikas	Ventilatsiooni soojustagasti tüüp	Ventilatsiooni kütte soojusallikas	Päikesekollektori aktiivine, m ²	Tarbevee tsirkulatsiooni- ja ringluskao	ETA B, kWh/a.m ²
B-1-M-1	MSP	Rootor	MSP	0.0	arvutuslik	145.0
B-1-M-3	MSP	Rootor	elekter	0.0	arvutuslik	188.3
B-1-M-4	MSP	Rootor	elekter	2.5	arvutuslik	159.9
B-1-Õ-1	ÕVSP	Rootor	ÕVSP	0.0	arvutuslik	172.4
B-1-Õ-2	ÕVSP	Rootor	ÕVSP	2.0	arvutuslik	160.2
B-1-Õ-3	ÕVSP	Rootor	elekter	0.0	arvutuslik	212.9
B-1-Õ-4	ÕVSP	Rootor	elekter	4.7	arvutuslik	159.6
B-1-K-1	Kaugküte	Rootor	Kaugküte	0.0	arvutuslik	157.2
B-1-K-3	Kaugküte	Rootor	Elekter	0.0	arvutuslik	163.6
B-1-K-4	Kaugküte	Rootor	Elekter	1.5	arvutuslik	159.5
B-2-M-1	MSP	Plaat	MSP	0.0	määrus	150.8
B-2-M-3	MSP	Plaat	elekter	0.0	määrus	207.4
B-2-M-4	MSP	Plaat	elekter	4.5	määrus	156.4
B-2-Õ-1	ÕVSP	Plaat	ÕVSP	0.0	määrus	179.9
B-2-Õ-2	ÕVSP	Plaat	ÕVSP	3.5	määrus	158.5
B-2-Õ-3	ÕVSP	Plaat	elekter	0.0	määrus	230.8
B-2-Õ-4	ÕVSP	Plaat	elekter	6.5	määrus	157.1
B-2-K-1	Kaugküte	Plaat	Kaugküte	0.0	määrus	162.4
B-2-K-2	Kaugküte	Plaat	Kaugküte	1.5	määrus	157.6
B-2-K-3	Kaugküte	Plaat	elekter	0.0	määrus	173.6
B-2-K-4	Kaugküte	Plaat	elekter	4.2	määrus	159.9

Tabel 17 Hea hoonekarp – esialgsed energiatõhususarvud, edasiseks uurimiseks valitakse juhtumid, mille puhul hoone ilma taastuenergiaallikate lisamiseta täidab madalenergiahoone nõudeid (ETA B tulbas märgitud roheliselt).

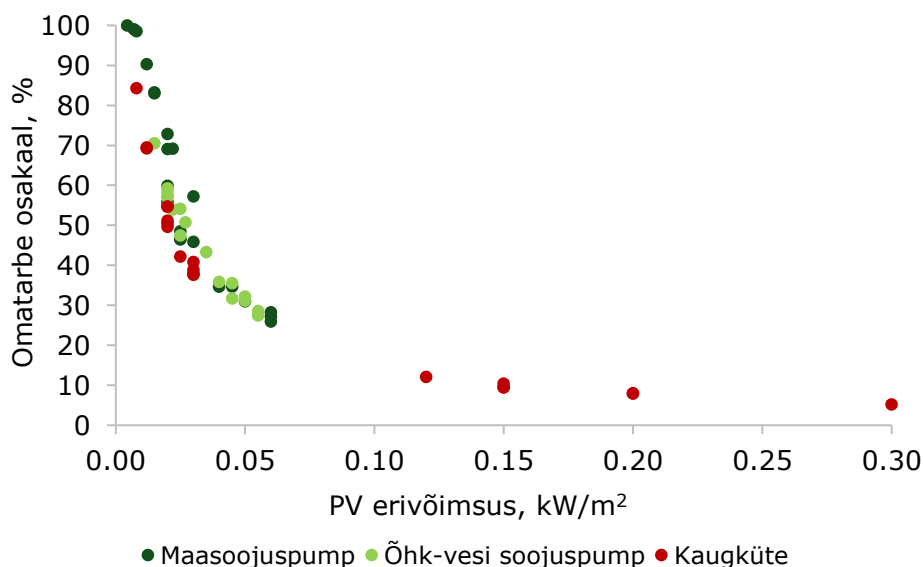
Hea hoonekarp Hoone H = 70.472 W/K	Soojusallikas	Ventilatsiooni soojustagasti tüüp	Ventilatsiooni kütte soojusallikas	Päikesekollektori aktiivine, m ²	Tarbevee tsirkulatsiooni- ja ringluskao	ETA B, kWh/a.m ²
C-1-M-1	MSP	Rootor	MSP	0.0	arvutuslik	141.5
C-1-M-3	MSP	Rootor	elekter	0.0	arvutuslik	181.7
C-1-M-4	MSP	Rootor	elekter	2.0	arvutuslik	159.0
C-1-Õ-1	ÕVSP	Rootor	ÕVSP	0.0	arvutuslik	161.6
C-1-Õ-2	ÕVSP	Rootor	ÕVSP	1.0	arvutuslik	155.4
C-1-Õ-3	ÕVSP	Rootor	elekter	0.0	arvutuslik	202.1
C-1-Õ-4	ÕVSP	Rootor	elekter	4.0	arvutuslik	156.7
C-1-K-1	Kaugküte	Rootor	Kaugküte	0.0	arvutuslik	144.6

C-1-K-3	Kaugküte	Roor	Elekter	0.0	arvutuslik	150.9
C-2-M-1	MSP	Plaat	MSP	0.0	määrus	145.9
C-2-M-3	MSP	Plaat	Elekter	0.0	määrus	199.1
C-2-M-4	MSP	Plaat	Elekter	3.5	määrus	159.4
C-2-Õ-1	ÕVSP	Plaat	ÕVSP	0.0	määrus	167.4
C-2-Õ-2	ÕVSP	Plaat	ÕVSP	1.5	määrus	158.2
C-2-Õ-3	ÕVSP	Plaat	elekter	0.0	määrus	218.2
C-2-Õ-4	ÕVSP	Plaat	elekter	5.3	määrus	158.1
C-2-K-1	Kaugküte	Plaat	Kaugküte	0.0	määrus	150.7
C-2-K-3	Kaugküte	Plaat	Elekter	0.0	määrus	161.9
C-2-K-4	Kaugküte	Plaat	Elekter	1.0	määrus	157.8

4.1.2 Hoonekarpide tulemuste võrdlused

Analüüsimeks hoonesse paigaldatud PV-paneelide koguvõimsuse ja lokaalselt toodetud taastuvenergia omatarbimise osakaalu vahelist seost koostati Joonis 4. PV-paneelide koguvõimsuse (kW) väärtus on jagatud hoone toatemperatuuriga pinna väärtusega (m²) ja saadud suurust tähistatakse edasipidi PV erivõimsus (kW/m²).

Andmed on värvikoodiga soojusallika põhjal eraldatud – tumerohelisega on tähistatud maasoojuspumbaga juhud, helerohelisega õhk-vesi soojuspumbaga juhud ning punasega kaugküttega uurimisjuhud.



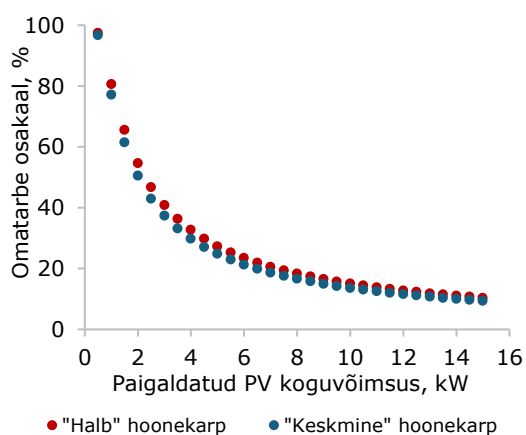
Joonis 4 Arvutusliku omatarbe osakaalu (%) ja paigaldatud PV-paneelide erivõimsuse (PV koguvõimsus hoone köetava pinna suhtes, kW/m²) vaheline seos erinevate soojusallikate korral.

Paigaldatud PV-paneelide erivõimsus jääb enamikel juhtudel vahemikku 0,004 – 0,060. Nendele vastavate omatarbe osakaalud on vahemiku 28-100%. Juhud, kus PV erivõimsus ületab 0,1 kW/m² kohta iseloomustavad olukordi, kus arvuslik omatarbe

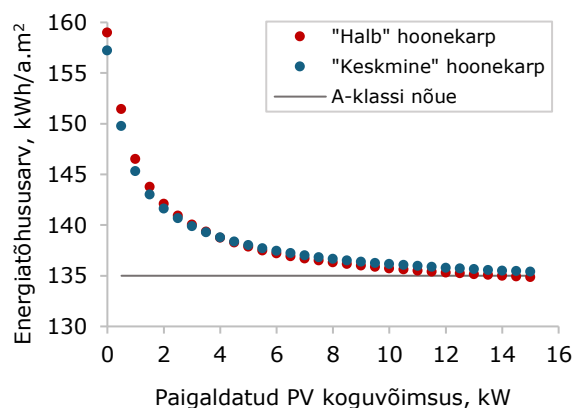
osakaal on madal (<12%) ning PV-paneelide lisades see langeb. Antud juhtumite puhul jääb hoone elektrienergia tarbimine vahemikku 37,0 – 46,0 kWh/a.m², olukorra teke on kirjeldatud Joonis 5 ja Joonis 6.

Hoonele PV-paneelide võimsuse lisamisel langeb hoones toodetud lokaalse taastuvenergia omatarbe osakaal. See on tingitud elektrienergia toodangu tõusust ja hoone elektrienergia tarbimise konstantseks jäämisest. Madala elektrienergia eritarbega ja omatarbe osakaaluga väikeelamu näitehoonete puhul tekib olukord, kus iga järgneva ühiku PV-võimsuse lisamise efekt hoone energiatõhususarvule madalam eelnevast.

Trendi kirjeldamiseks vaadeldi lähemalt kaht näitehoonet Joonis 4, mille mõlema PV erivõimsus on 0,15 kW/m². Tulemused on kujutatud Joonis 5 ja Joonis 6.



Joonis 5 Paigaldatud PV koguvõimsuse (kW) ja omatarbe osakaalu (%) suhe kahe kaugküttel näitehoone põhjal, mille PV erivõimsus (PV koguvõimsus hoone kätava pinna kohta) on 0,015 kW/m².



Joonis 6 Paigaldatud PV-koguvõimsuse (kW) ja energiatõhususarvu (kWh/a.m²) suhe kahe kaugküttel näitehoone põhjal, mille PV erivõimsus (PV koguvõimsus hoone kätava pinna kohta) on 0,015 kW/m².

Joonis 6 iseloomustab nimetatud olukorra mõju hoone energiatõhususarvule - PV-paneelide lisamisel väheneb lisatava ühiku võimsusest saadav mõju energiatõhususarvule. Näiteks „Halva“ hoonekarpi puhul kahaneb esimese 5 kW PV-paneelide lisamisega energiatõhususarv 19,2 ühikut ning järgmise 5 kW lisamisega vaid 1,9 ühikut. Liginullenergiahoone nõude täitmiseks peab paigaldama 15 kW päikesepaneele (erivõimsuseks 1,5 kW/m²).

Eelduslikult on selliste juhtumite puhul akude lisamisest kõige suurem kasu nii energiatõhususarvu kui PV-paneelide hulga vähendamisel kui ka majanduslikul tasuvusel.

Järgnevates punktides vaadeldakse analüüsitud hoonete tulemusi peamise soojusallika kaupa ning hoonekarbi stsenaariumite lõikes.

4.1.3 Maasoojuspump

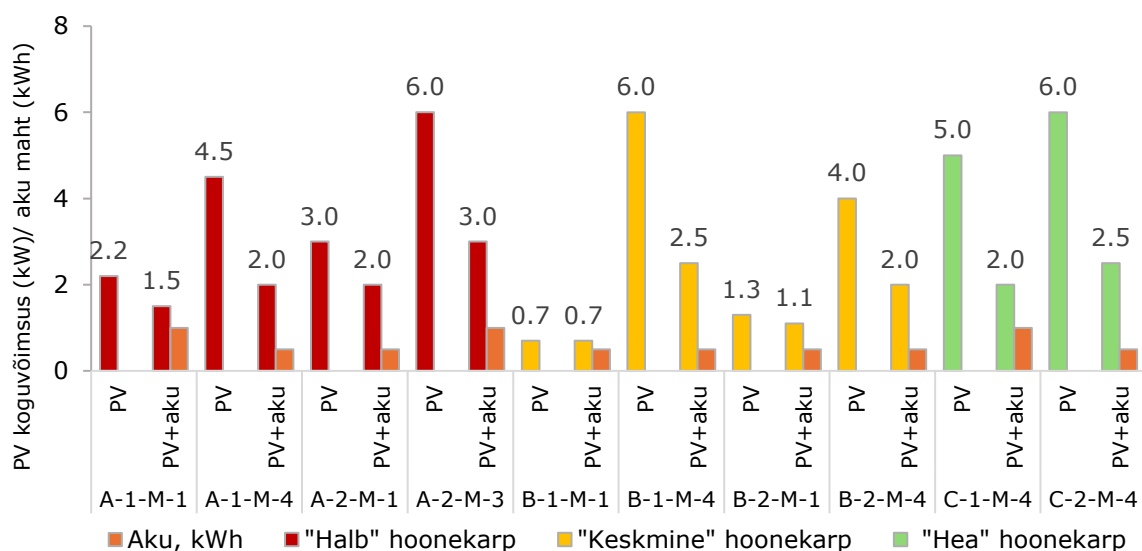
Maasoojuspumbal põhinevaid hooneid arvutati läbi 6 versiooni – iga hoonekarbi tüübi kohta kaks erinevat tehnosüsteemide kombinatsiooni. Juhtude lähteandmed on toodud peatükis 4.1.1 ning esmased tulemused on koondatud Tabel 18.

Tabel 18 Maasoojuspumpadel põhinevad analüüsitud juhud

Uurimisjuhtumi tähis	A-1-M	A-2-M	B-1-M	B-2-M	C-1-M	C-2-M
Hoonekarbi tüüp	„Halb“		„Keskmine“		„Hea“	
Hoone H/A, W/K.m ²	1,07		0,81		0,70	
STV jaotus- ja ringlustorustiku soojuskaod	Arvutulik		Arvutuslik	Määrus, tabel 10 ⁵	Arvutuslik	Määrus, tabel 10 ⁵
Ventilatsiooniseadme soojustagasti tüüp	Rooror	Plaat	Rooror	Plaat	Rooror	Plaat
Vesikalorifeer	A-1-M-1	A-2-M-1	B-1-M-1	B-2-M-1	C-1-M-1	C-2-M-1
Päikesekollektor, m ²	-	-	-	-	-	-
Elektrienergia tarve, kWh/a.m ²	78.79	79.83	72.49	75.42	70.73	72.92
PV-paneelide koguvõimsus, kW	2.2	3	0.7	1.5	0.44	0.8
Omatarbe osakaal, %	69%	57%	99%	83%	100%	99%
ETA, kWh/a.m ²	134.08	133.13	134.27	131.6	134.67	133.67
Elektrikalorifeer	A-1-M-3	A-3-M-3	B-1-M-3	B-3-M-3	C-1-M-3	C-3-M-3
Päikesekollektor, m ²	4.0	4.6	2.5	4.5	2.0	3.5
Elektrienergia tarve, kWh/a.m ²	79.38	79.84	79.95	78.19	79.48	79.68
PV-paneelide koguvõimsus, kW	4.5	6	2.5	4	5	2.5
Omatarbe osakaal, %	35%	28%	65%	35%	31%	63%
ETA, kWh/a.m ²	134.69	133.53	134.92	134.97	135.03	134.84

Kõikide uuritud juhtude puhul on hoone energiatõhususe miinimumnõude tagamine võimalik nii vesi- kui elektrilise küttekalorifeeri korral. Vesikalorifeeri puhul ei ole päikesekollektorite kasutamine ühelgi juhul vajalik. Elektrikalorifeeriga juhtudest on päikesekollektorite kasutamine energiatõhususe miinimumnõude tagamiseks vajalik kõikidel juhtudel.

Süsteemi akude lisamisega saavutatav vajamineva installeeritava PV-paneelide koguvõimsuse vähenemine on kujutatud Joonis 7. Iga uuritud juhtum on esitatud kahe tulbaga. Vasakpoolses tulbas „PV“ on näidatud hoone liginullenergia nõude täitmiseks vajalik PV-paneelide koguvõimsus (kW). Parempoolsed tulbad „PV + aku“ näitavad liginullenergia hoone taseme saavutamiseks vajalikku PV koguvõimsust (kW) ning installeeritava aku mahtuvust (kWh).

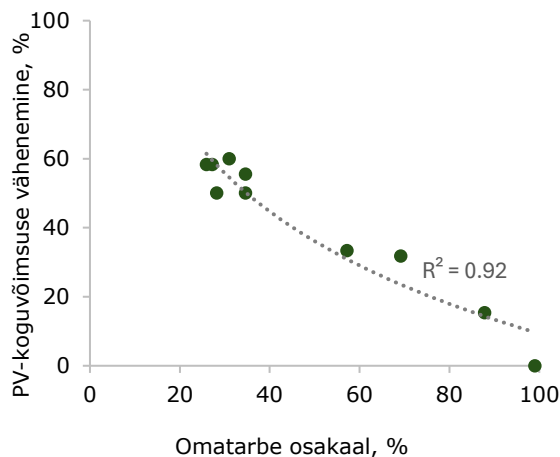


Joonis 7 Liginullenergia hoone nõude tagamiseks vajamineva PV koguvõimsused (kW) akudeta olukorras ja aku lisamisel maasoojuspumpadega hoonete puhul.

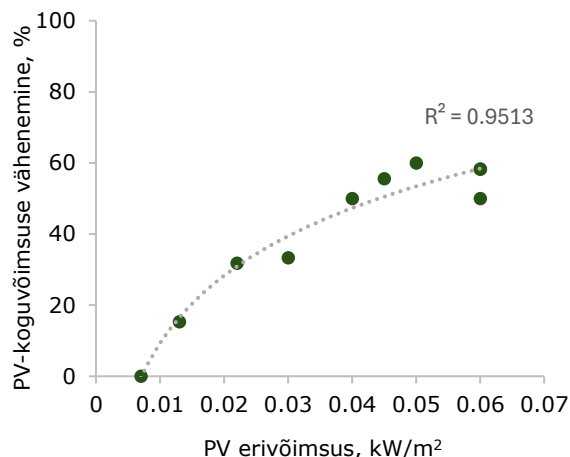
Maasoojuspumpadega hoonete puhul on liginullenergia hoone nõude täitmiseks vajalik esialgne PV-paneelide koguvõimsus vahemikus 0,7-6,0 kW. Kõrge esialgne vajalik PV-paneelide koguvõimsus ennustab taastuvenergia süsteemi aku lisamise kõrget säästupotentsiaali.

Kõikidel juhtumitel, kus esialgne PV-paneelide maht on >4.0 kW väheneb see aku lisamisega ligi poole võrra. Seatakse hüpotees, et PV-erivõimsuse >0,04 kW/m² puhul on akude kasutamine majanduslikult kasulik liginullenergiahoone nõude saavutamisel. Aku lisamise mõju PV-paneelide koguvõimsuse vähendamisele ei sõltu oluliselt hoonekarbi tüübist.

Hoone B-1-M-1 puhul on liginullenergiahoone nõude tagamiseks vajalik PV-paneelide maht akudeta olukorras 0,7 kW. Aku lisamisega ei ole võimalik vajalikku PV-paneelide võimsust vähendada, kuna väiksem kogus paneele ei tooda piisavalt energiat, et liginullenergiahoone nõuet saavutada.



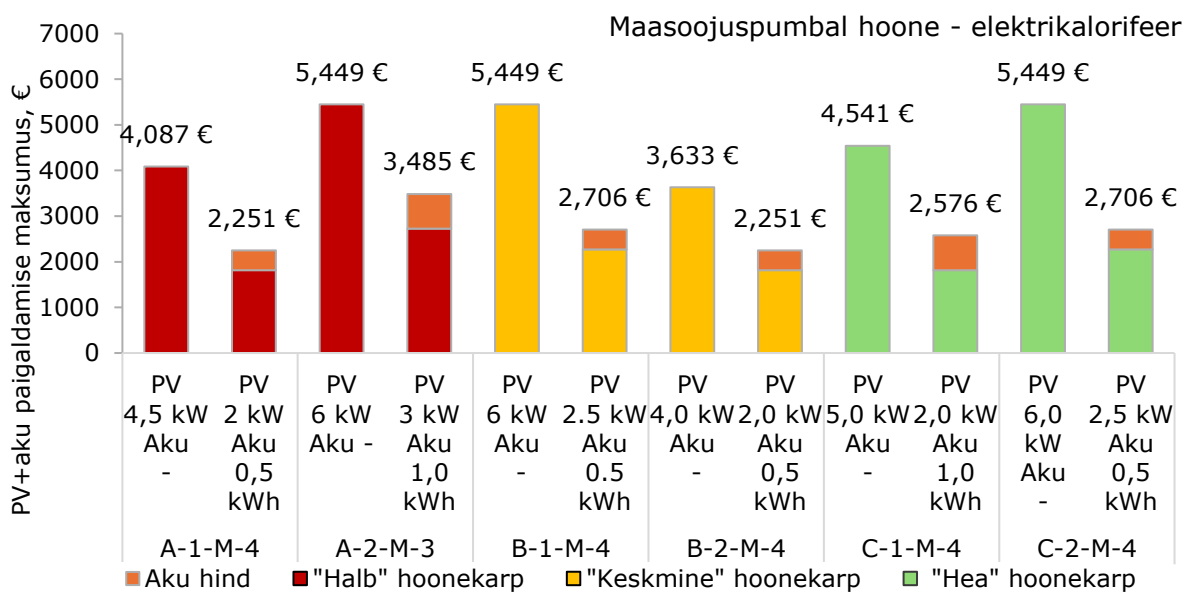
Joonis 8 Paigaldatava PV-võimsuse vähenemise (%) seos arvutusliku omatarbe osakaaluga (%) maasoojuspumpadega näitehoonetes.



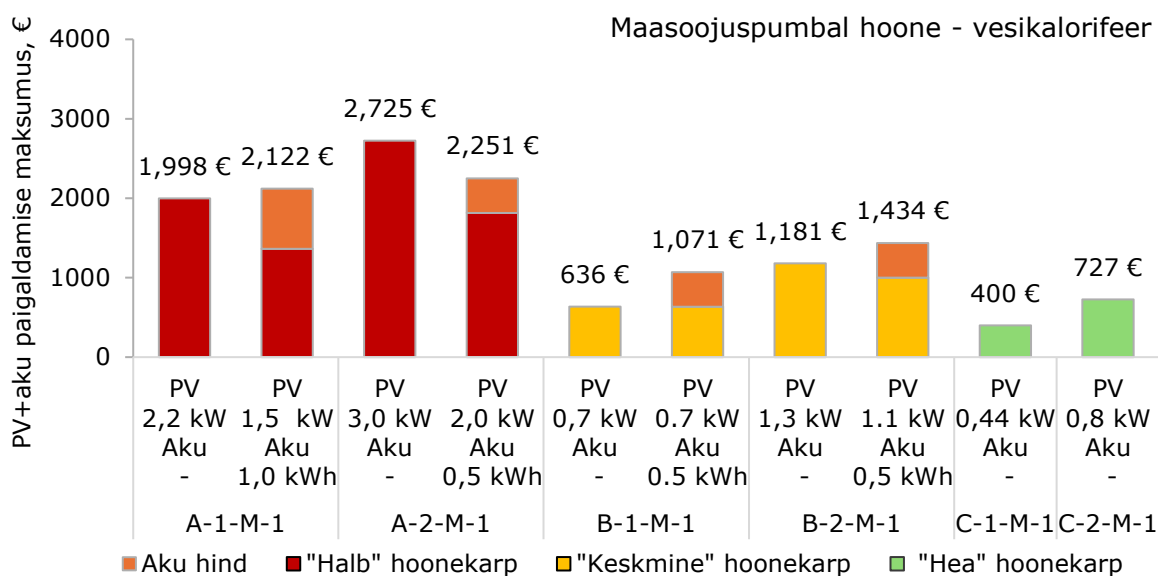
Joonis 9 Paigaldatava PV koguvõimsuse vähenemise (%) seos erivõimsuse (PV koguvõimsus hoone kätava pinna suhtes, kW/m²) maasoojuspumpadega näitehoonetes.

Joonis 8 ja Joonis 9 iseloomustavad vajaliku PV koguvõimsuse (kW) vähenemise seost esialgse omatarbe osakaalu (Joonis 8) ning PV erivõimsusega (Joonis 9). Mõlemal juhul on demonstreeritud tugev seos.

Majanduslik tasuvuse hindamiseks arutati uuritud stsenaariumitele hinnad kahel juhul. Esmalt kulu liginullenergia nõude täitmisele PV-paneelidega ning teiseks PV-paneelide ja aku kombinatsiooni kasutamisel. Tulemused eraldati ventilatsiooniseadme elektrikalorifeeri tüübi järgi, mis on analüüsitud hoonetes on suurim elektrienergia tarbimise muutuja. Tulemused on koondatud Joonis 10 ja Joonis 11.



Joonis 10 Liginullenergia hoone nõudeks vajalik investeering (€) ainult PV-paneele kasutades ning PV-paneelid + aku lahenduse korral maasoojuspumpade ja elektrikalorifeeridega juhtudel.

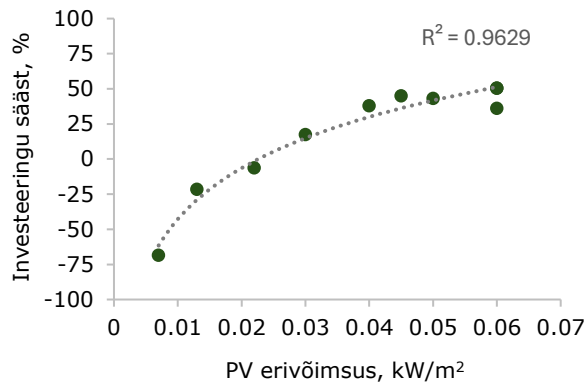


Joonis 11 Liginullenergia hoone nõudeks vajalik investeering (€) ainult PV-paneele kasutades ning PV-paneelid + aku lahenduse korral maasoojuspumpade ja vesikalorifeeridega juhtumitel.

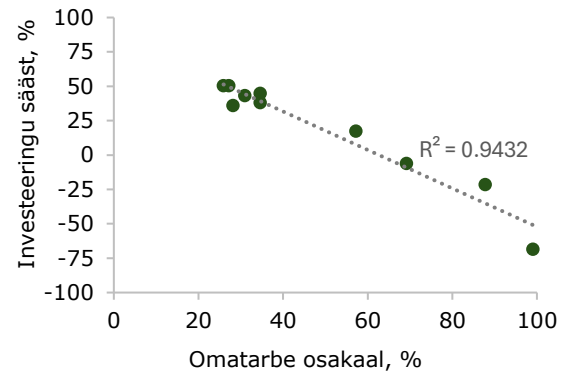
Kõikidel uuritud elektrikalorifeeridega juhtudel on aku paigaldamine liginullenergiahoone nõude saavutamisel tõhus viis vajaliku investeeringu vähendamisel. Paigaldatud PV erivõimsus vahemikku 0,04 – 0,06 kW/m².

Vesikalorifeeridega hoonete puhul demonstseerivad juhtumid A-1-M-1, B-1-M-1 ja B-2-M-1 olukorda, kus esialgne vajaminev PV-paneelide koguvõimsuse paigaldamise investeering on küllalt madal ning selle vähenemine ei suuda kompenseerida aku installerimisest tulenevat lisakulu. Nimetatud näidete PV-erivõimsus on vahemikus 0,007 – 0,022 kW/m². „Hea” hoonekarbi näidete puhul on vajaminev PV-paneelide koguvõimsus sedavõrd madal, et aku rakendamist ei katsetata. Ainsana on aku kasutamine majanduslikult tõhus hoone A-2-M-1 korral, mille PV-erivõimsus on 0,03 kW/m².

Liginullenergiahoone nõude täitmiseks vajaliku investeeringu muutumise seoseid PV-erivõimsuse ja omatarbe osakaaluga kujutavad Joonis 12 ja Joonis 13.



Joonis 12 PV erivõimsuse (PV koguvõimsus hoone köetava pinna suhtes, kW/m²) ja liginullenergia nõude saavutamiseks vajaliku taastuvenergia süsteemi investeeringu muutuse seos (%) maasoojuspumpadega näitehoonetes.



Joonis 13 Hoones toodetud taastuvenergia arvutusliku omatarbe osakaalu (%) ja liginullenergia nõude saavutamiseks vajaliku taastuvenergia süsteemi investeeringu muutuse seos (%) maasoojuspumpadega näitehoonetes.

Joonis 12 ja Joonis 13 iseloomustavad liginullenergiahoone nõude täitmiseks taastuvenergiasüsteemi investeeringu muutuse (%) seost PV erivõimsuse (Joonis 12) ja esialgse omatarbe osakaaluga (Joonis 13). Mõlemal juhul on demonstreeritud tugev seos.

Hüpotees, et taastuvenergiasüsteemis akude kasutamise majanduslik tasuvus on hinnatav esialgse PV-erivõimsuse ja taastuvenergia omatarbe osakaalu järgi peab maasoojuspumpadel väikeelamu puhul paika. Akude lisamine taastuvenergiasüsteemi on majanduslikult kasulik PV-paneelide erivõimsusest > 0,023 kW/m² ja omatarbe osakaalu < 60 % korral.

4.1.4 Õhk-vesi soojuspump

Õhk-vesi soojuspumbal põhinevaid hooneid arvutati läbi 6 versiooni – iga hoonekarbi tüübi kohta kaks erinevat tehnosüsteemide kombinatsiooni. Juhtude lähteandmed on toodud peatükis 4.1.1 ning esmased tulemused on koondatud Tabel 19.

Tabel 19 Õhk-vesi soojuspumpadel põhinevad analüüsitud juhud

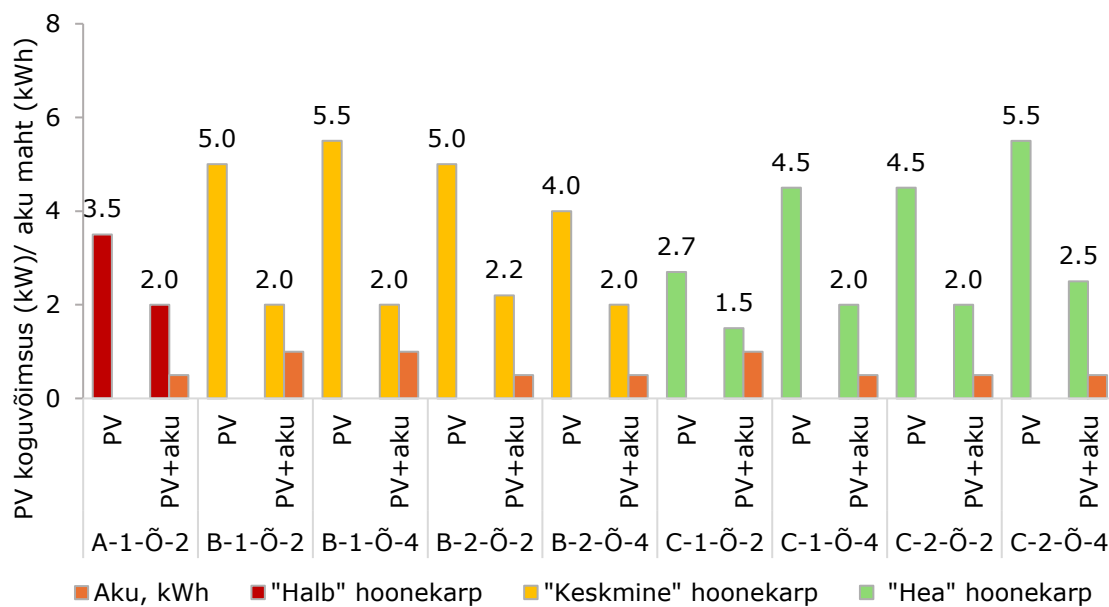
Uurimisjuhtumi tähis	A-1-Õ	A-2-Õ	B-1-Õ	B-2-Õ	C-1-Õ	C-2-Õ
Hoonekarbi tüüp	„Halb“		„Keskmine“		„Hea“	
Hoone H/A, W/K.m ²	1,07		0,81		0,70	
STV jaotus- ja ringlustorustiku soojuskaod	Arvutulik		Arvutuslik	Määrus, tabel 10 ⁵	Arvutuslik	Määrus, tabel 10 ⁵
Ventilatsiooniseadme soojustagasti tüüp	Rooror	Plaat	Rooror	Plaat	Rooror	Plaat
Vesikalorifeer	A-1-Õ-1	A-2-Õ-1	B-1-Õ-1	B-2-Õ-1	C-1-Õ-1	C-2-Õ-1
Päikesekollektor, m ²	6.5		2.0	3.5	1.0	1.5
Elektrienergia tarve, kWh/a.m ²	79.11		80.09	79.24	77.72	79.08
PV-paneelide koguvõimsus, kW	3.5		5	5	2.7	4.5
Omatarbe osakaal, %	43%		32%	31%	51%	36%
ETA, kWh/a.m ²	134.80		135.33	134.45	134.25	133.44
Elektrikalorifeer	A-1-Õ-3	A-3-Õ-3	B-1-Õ-3	B-3-Õ-3	C-1-Õ-3	C-3-Õ-3
Päikesekollektor, m ²			4.7	6.5	4.0	5.3
Elektrienergia tarve, kWh/a.m ²			79.82	78.56	78.34	79.06
PV-paneelide koguvõimsus, kW			5.5	4	4.5	5.5
Omatarbe osakaal, %			29%	36%	32%	27%
ETA, kWh/a.m ²			135.32	134.96	134.65	134.79

„Halva“ hoonekarbi puhul on ETA B madalenergiahoone nõude täitmine võimalik vaid rootorsoojustagasti ning ventilatsiooni vesiküttekalorifeeriga. Juhud, kus madalenergiahoone täitmine ei olnud valitud parameetritega võimalik, ei ole edasises analüüsi kaasatud ning on Tabel 19 värvitud halliks.

„Keskmise“ ja „Hea“ hoonekarbi puhul on ETA B tagamine võimalik nii rootor- kui plaatsoojustagasti kui vesi- ja elektrikalorifeeride puhul. Kõikidel juhtudel on vajalik päikesekollektorite kasutamine, et energiatõhususe miinimumnõudeid tagada.

Kõikide uuritud juhtude puhul on hoone energiatõhususe miinimumnõude tagamine võimalik nii vesi- kui elektrilise küttekalorifeeri korral. Vesikalorifeeri puhul ei ole päikesekollektorite kasutamine ühelgi juhul vajalik. Elektrikalorifeeriga juhtudest on päikesekollektorite kasutamine energiatõhususe miinimumnõude tagamiseks vajalik kõikidel juhtudel.

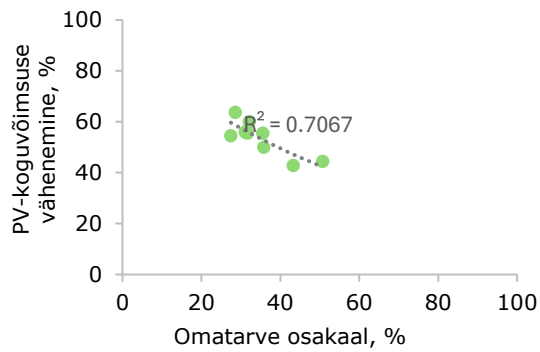
Süsteemi akude lisamisega saavutatav vajamineva installeeritava PV-paneelide koguvõimsuse vähenemine on kujutatud Joonis 14. Vasakpoolses tulbas „PV“ on näidatud hoone liginullenergia nõude täitmiseks vajalik PV-paneelide koguvõimsus (kW). Parempoolsed tulbad „PV + aku“ näitavad liginullenergia hoone taseme saavutamiseks vajalikku PV koguvõimsust (kW) ning installeeritava aku mahtuvust (kWh).



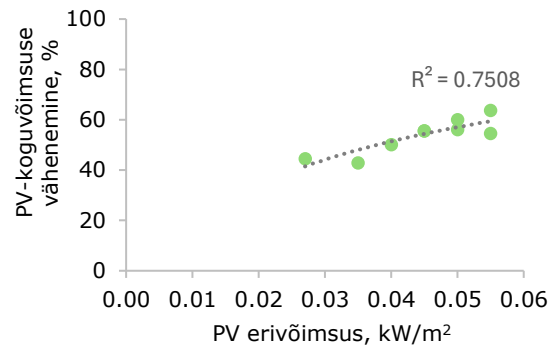
Joonis 14 Liginullenergia hoone nõude tagamiseks vajamineva PV koguvõimsused (kW) akudeta olukorras ja aku lisamisel õhk-vesi soojuspumpadega hoonete puhul.

Õhk-vesi soojuspumpadega hoonete puhul on liginullenergia hoone nõude täitmiseks vajalik esialgne PV-paneelide koguvõimsus vahemikus 2,7-5,5 kW. Kõrge esialgne vajalik PV-paneelide koguvõimsus ennustab taastuenergia süsteemi aku lisamise kõrget säästupotentsiaali. Kõikidel juhtumitel, kus esialgne PV-paneelide maht on >4.0 kW väheneb see aku lisamisega vähemalt poole võrra.

Paneelide mahu vähendamine on „Keskmise“ ja „Hea“ hoonekarbi näidete vahel sarnane. „Keskmise“ hoonekarbi näidete keskmine PV-võimsuse vähenemine 57,4 % ning „Hea“ hoonekarbi puhul 52,5 %. „Halva“ hoonekarbi ühe näite puhul on PV-võimsuse vähenemine 42,9 %.



Joonis 15 Paigaldatava PV-võimsuse (%) vähenemise seos esialgse omatarbe osakaaluga (%) õhk-vesi soojuspumpadega näitehoonetes.



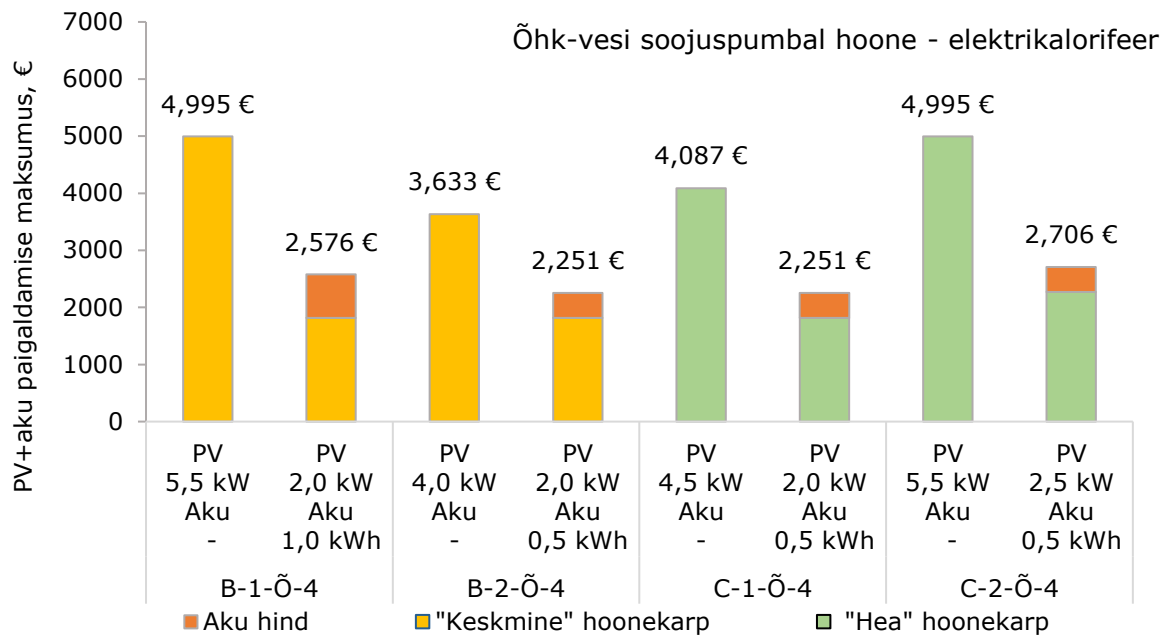
Joonis 16 Paigaldatava PV-võimsuse (%) vähenemise seos erivõimsuse (PV koguvõimsus hoone kätava pinna suhtes, kW/m²) õhk-vesi soojuspumpadega näitehoonetes.

Joonis 15 ja Joonis 16 iseloomustavad vajaliku PV koguvõimsuse (kW) vähenemise seost esialgse omatarbe osakaalu (Joonis 15) ning PV erivõimsusega (Joonis 16). Kuigi mõlemal juhul on seos demonstreeritud, on õhk-vesi soojuspumpadega näidete puhul seos nõrgem, kui maasoojuspumpadega hoonetes. Omatarbe osakaalu ja PV erivõimsust võrreldes on PV erivõimsus paremaks indikaatoriks potentsiaalse PV-võimsuse vähenemise hindamisel.

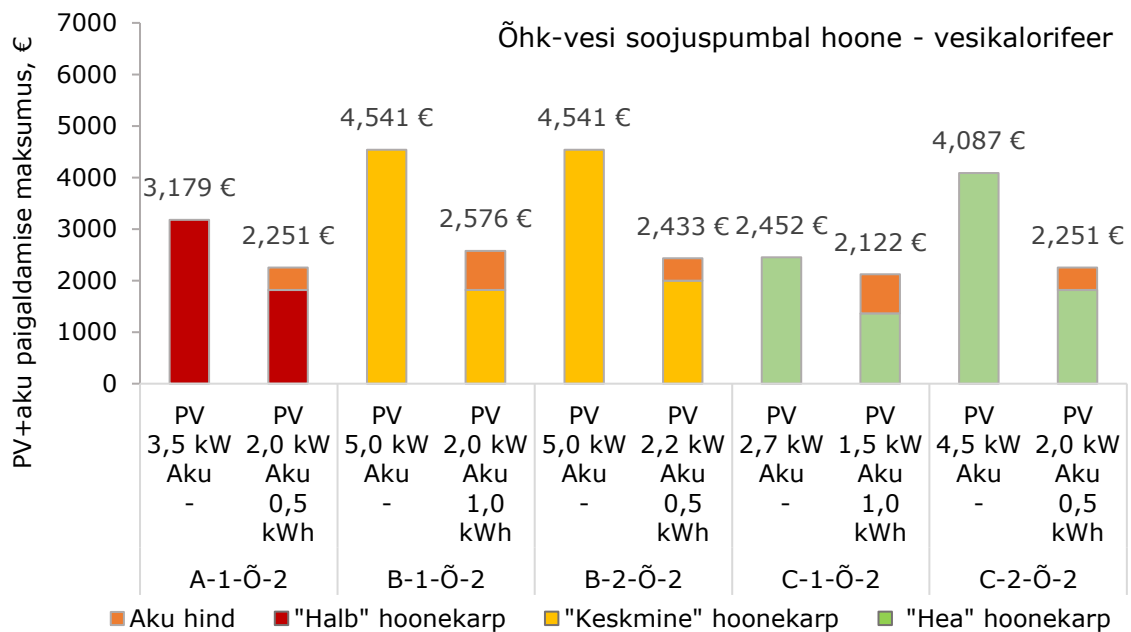
Õhk-vesi soojuspumpadega väikeelamute analüüsitud juhtudel puuduvad näited PV-erivõimsusega < 0,027 kW/m² või omatarbe osakaaluga > 50,8 %. Eeldatakse, et õhk-vesi soojuspumpadega uuritud hoonete tulemused alluvad peatükk 4.1.3 esitatud hüpoteesile ning kõigi uuritud õhk-vesi soojuspumpadega juhtumite korral on aku lisamine majanduslikult tõhus meede liginullenergiahoone nõude saavutamisel.

Majandusliku tasuvuse hindamiseks arvatati uuritud stsenaariumitele hinnad kahel juhul. Esmalt kulu liginullenergia nõude täitmisele PV-paneelidega ning teiseks PV-paneelide ja aku kombinatsiooni kasutamisel. Tulemused eraldati ventilatsiooniseadme elektrikalorifeeri tüübi järgi, mis on analüüsitud hoonetes on suurim elektrienergia tarbimise muutuja. Tulemused on koondatud Joonis 17 ja Joonis 18.

„Halva“ hoonekarbiga juhtudest vaid ühel oli võimalik ETA B-ga madalenergiahoone nõude täitmine, ülejäänud selle hoonetüübi näited on vaatlusest edaspidi välja jäetud.



Joonis 17 Liginullenergia hoone nõude täitmiseks vajalik investeering (€) ainult PV-paneelide kasutades ning PV-paneelid + aku lahenduse korral õhk-vesi soojuspumpade ja elektrikalorifeeridega juhtumitel.



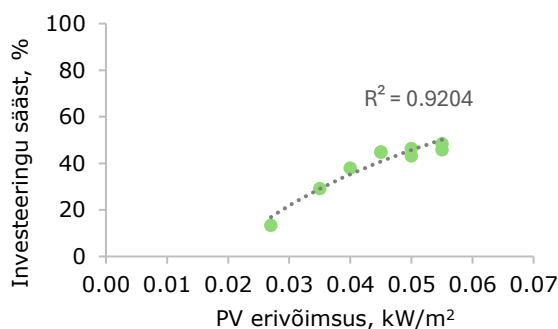
Joonis 18 Liginullenergia hoone nõude täitmiseks vajalik investeering (€) ainult PV-paneelide kasutades ning PV-paneelid + aku lahenduse korral õhk-vesi soojuspumpade ja vesikalorifeeridega juhtumitel.

Kõikidel uuritud elektrikalorifeeridega juhtudel on aku paigaldamine liginullenergiahoone nõude saavutamisel tõhus viis vajaliku investeeringu vähendamisel. Paigaldatud PV erivõimsus jääb vahemikku 0,04 – 0,055 kW/m².

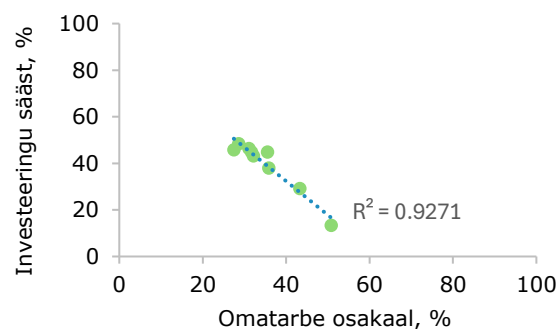
Õhk-vesi soojuspumpade puhul annab akude kasutamine majandusliku säästu kõikidel uuritud juhtudel. Mõnevõrra ebainstinktiivselt saavutavad suurema säästu

vesikalorifeeridega hooned, mille puhul paigaldatud PV-erivõimsus on vahemikus 0,027 – 0,05 kW/m².

Liginullenergiahoone nõude täitmiseks vajaliku investeeringu muutumise seoseid PV-erivõimsuse ja omatarbe osakaaluga kujutavad Joonis 19 ja Joonis 20.



Joonis 19 PV erivõimsuse (PV koguvõimsus hoone köetava pinna suhtes, kW/m²) ja liginullenergia nõude saavutamiseks vajaliku taastuvenergia süsteemi investeeringu muutuse seos (%) õhk-vesi soojuspumpadega näitehoonetes.



Joonis 20 Hoones toodetud taastuvenergia arvutusliku omatarbe osakaalu (%) ja liginullenergia nõude saavutamiseks vajaliku taastuvenergia süsteemi investeeringu muutuse seos (%) õhk-vesi soojuspumpadega näitehoonetes.

Joonis 19 ja Joonis 20 iseloomustavad liginullenergiahoone nõude täitmiseks taastuvenergiastüsteemi investeeringu muutuse (%) seost PV erivõimsusega (Joonis 19) ja esialgse omatarbe osakaalu (Joonis 20). Mõlemal juhul on demonstreeritud tugev seos.

Õhk-vesi soojuspumpadega uuritud juhtumite puhul on akude kasutamine liginullenergiahoone nõude täitmisel majanduslikult tasuv kõikidel uuritud juhtudel. Kõikide näitehoonete PV erivõimsus (kW/m²) ning kõikide uuritud PV erivõimsuste ning omatarbe osakaalude puhul.

Kõikide analüüsitud juhtude PV erivõimsus on < 0,027 kW/m² ja omatarbe osakaal > 50,8 %. Tulemused kattuvad peatükk 4.1.3 esitatud maasoojuspumbaga hoonete tulemustega. Valimi trendi põhjal on arvutuslik kasumlikkuse piir PV erivõimsuse > 0,019 kW/m² ja omatarbe osakaalu < 60 % puhul. Tulemused alluvad maasoojuspumbaga hoonete tulemuste trendidele.

4.1.5 Soojusallikas – kaugküte

Kaugküttel põhinevaid hooneid arvutati läbi 6 versiooni – iga hoonekarbi tüübi kohta kaks erinevat tehnosüsteemide kombinatsiooni. Juhtude lähteandmed on toodud peatükis 4.1.1 ning esmased tulemused on Tabel 20.

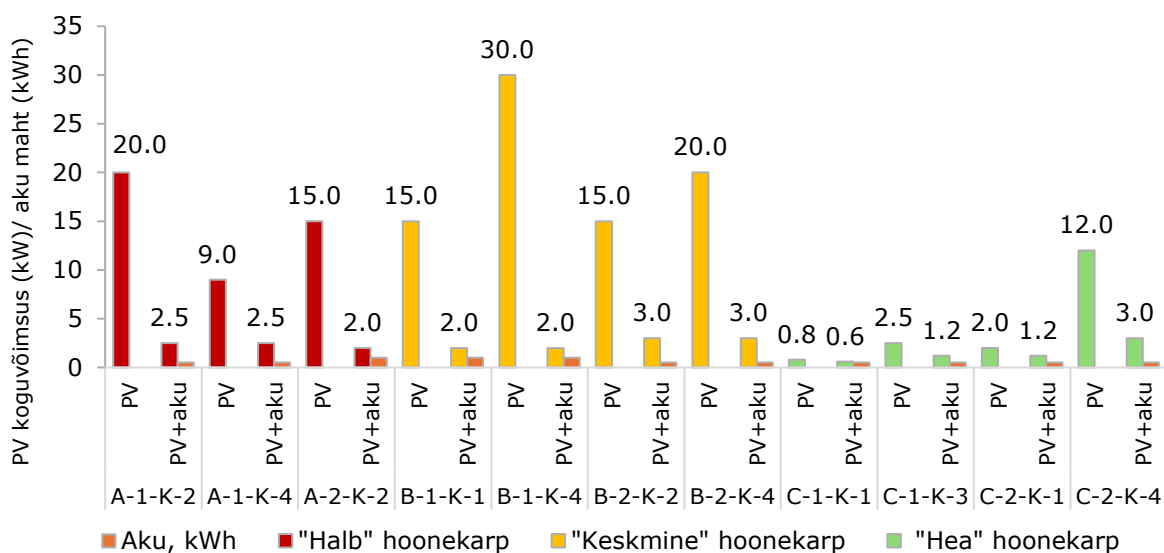
Tabel 20 Kaugküttel põhinevad analüüsitud juhud

Uurimisjuhtumi tähis	A-1-K	A-2-K	B-1-K	B-2-K	C-1-K	C-2-K
Hoonekarbi tüüp	„Halb“		„Keskmine“		„Hea“	
Hoone H/A, W/K.m ²	1,07		0,81		0,70	
STV jaotus- ja ringlustorustiku soojuskaod	Arvutulik		Arvutuslik	Määrus, tabel 10 ⁵	Arvutuslik	Määrus, tabel 10 ⁵
Ventilatsiooniseadme soojustagasti tüüp	Rooror	Plaat	Rooror	Plaat	Rooror	Plaat
Vesikalorifeer	A-1-K-1	A-2-K-1	B-1-K-1	B-2-K-1	C-1-K-1	C-2-K-1
Päikesekollektor, m ²	5.0	6.0	-	1.5	-	-
Elektrienergia tarve, kWh/a.m ²	38.43	38.43	37.02	37.23	36.59	35.91
PV-paneelide koguvõimsus, kW	20	15	15	15	0.8	2
Omatarbe osakaal, %	8%	10%	9%	10%	84%	50%
ETA, kWh/a.m ²	135.67	134.87	135.39	135.32	134.15	135.37
Elektrikalorifeer	A-1-K-3	A-3-K-3	B-1-K-3	B-3-K-3	C-1-K-3	C-3-K-3
Päikesekollektor, m ²	8.0		1.0	4.2	-	1.0
Elektrienergia tarve, kWh/a.m ²	43.42		42.00	46.04	41.55	44.69
PV-paneelide koguvõimsus, kW	12		30	20	2.5	1.2
Omatarbe osakaal, %	13%		5%	8%	42%	12%
ETA, kWh/a.m ²	129.89		135.25	135.40	134.61	135.43

„Keskmine“ ja „Hea“ hoonekarbi puhul on hoone ETA B tulemusega madalenergiahoone nõude täitmine võimalik nii vesi- kui elektrilise küttekalorifeeri korral. „Halva“ hoonekarbi puhul ei ole nõude tagamine võimalik elektrikalorifeeri ning plaatsoojustagasti puhul – näide A-3-K-3. Antud näide on edasisest analüüsist välja jäetud ning Tabel 20 värvitud halliks.

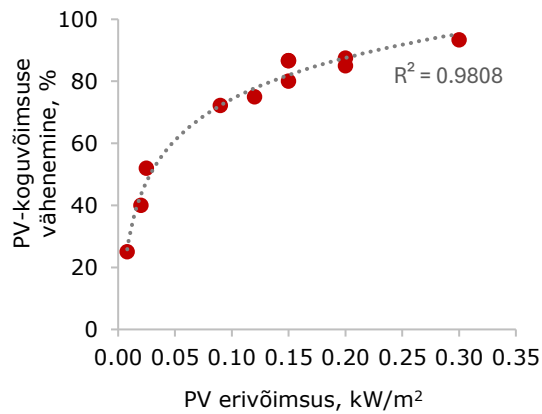
Päikesekollektorite kasutamine on vajalik kõikide „Halva“ hoonekarbiga juhtudel. „Keskmine“ hoonekarbi korral on päikesekollektoreid kasutamata madalenergiahoone nõue täidetud vaid vesikalorifeeri ja rootorsoojustagasti puhul. „Hea“ hoonekarbi korral on päikesekollektorite kasutamine vajalik vaid elektrikalorifeeri ja plaatsoojustagasti korral.

Süsteemi akude lisamisega saavutatav vajamineva installeeritava PV-paneelide koguvõimsuse vähenemine on kujutatud Joonis 21. Vasakpoolses tulbas „PV“ on näidatud hoone liginullenergia nõude täitmiseks vajalik PV-paneelide koguvõimsus (kW). Parempoolsed tulbad „PV + aku“ näitavad liginullenergia hoone taseme saavutamiseks vajalikku PV koguvõimsust (kW) ning installeeritava aku mahtuvust (kWh).

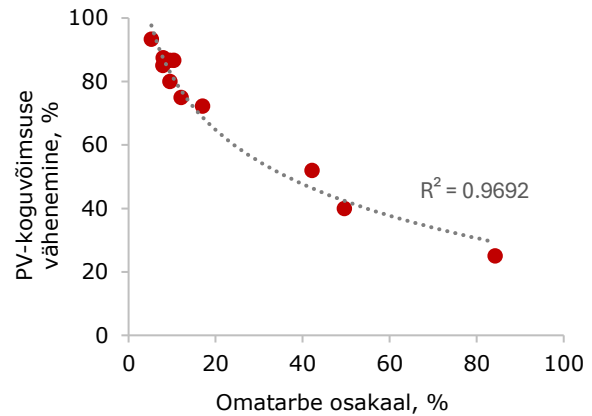


Joonis 21 Liginullenergia hoone nõude tagamiseks vajamineva PV koguvõimsused (kW) akudeta olukorras ja aku lisamisel kaugküttel hoonete puhul

Kaugküttel olevate hoonete puhul on „Halva“ ja „Keskmise“ hoonekarbi tulemused oluliselt erinevad „Hea“ hoonekarbi omadest. „Halva“ ja „Keskmise“ hoonekarbi kõrgete tulemuste põhjused on toodud peatükis 4.1.2 ning Joonis 5 ja Joonis 6.



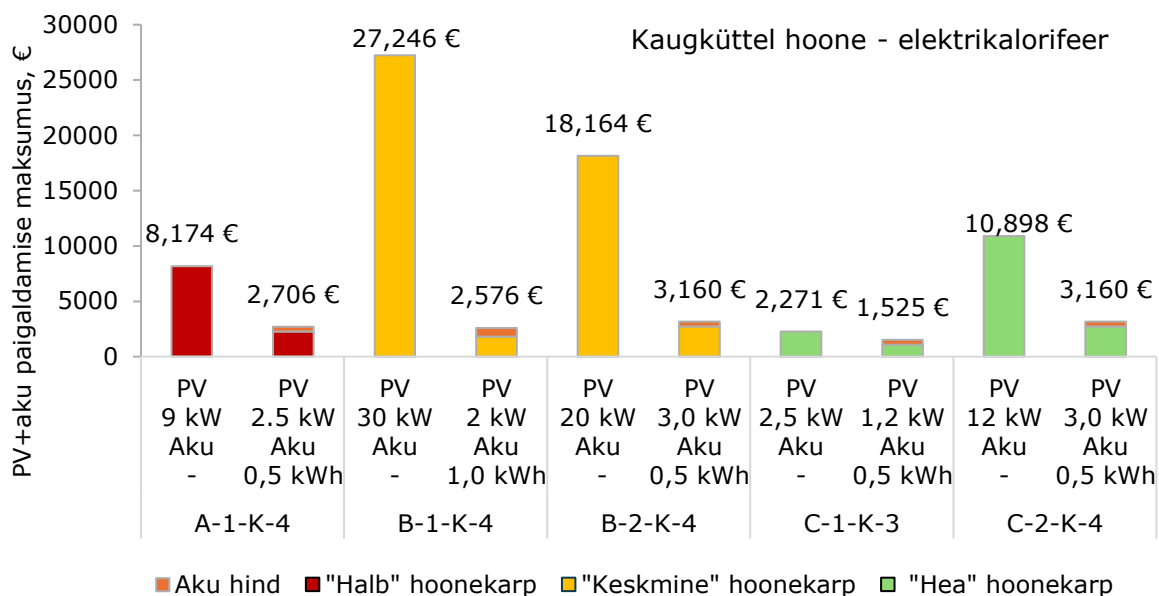
Joonis 22 Paigaldatava PV-võimsuse (%) vähenemise seos erivõimsuse (PV koguvõimsus hoone köetava pinna suhtes, kW/m²) kaugküttele näitehoonetes.



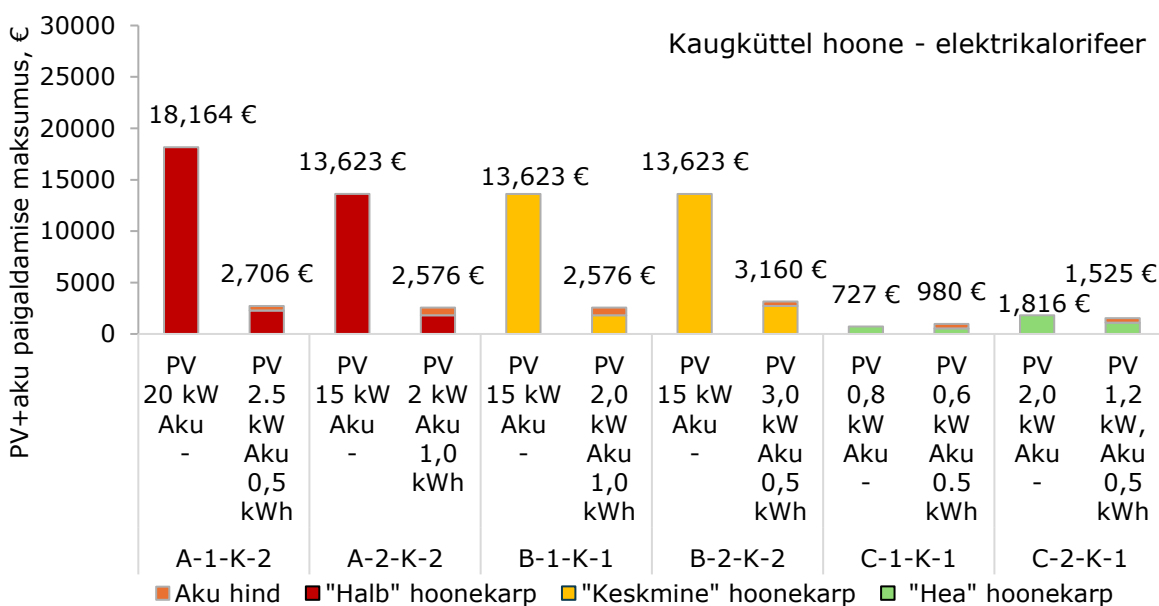
Joonis 23 Paigaldatava PV-võimsuse (%) vähenemise seos erivõimsuse (PV koguvõimsus hoone köetava pinna suhtes, kW/m²) kaugküttele näitehoonetes.

Joonis 22 ja Joonis 23 iseloomustavad vajaliku PV koguvõimsuse (kW) vähenemise seost esialgse omatarbe osakaalu (Joonis 22) ja PV erivõimsusega (Joonis 23). Võrreldes teiste kütteallikatega, joonistuvad kaugküttega objektid puhul välja kõige selgemad seosed. Ka kaugküttele korral on PV erivõimsus paremaks indikaatoriks potentsiaalsel PV-võimsuse vähenemise hindamisel.

Majandusliku tasuvus hindamiseks arutati uuritud stsenaariumitele hinnad kahel juhul. Esmalt kulu liginullenergia nõude täitmisele PV-paneelidega ning teiseks PV-paneelide ja aku kombinatsiooni kasutamisel. Tulemused eraldati ventilatsiooniseadme elektrikalorifeeri tüübi järgi, mis on analüüsitud hoonetes on suurim elektrienergia tarbimise muutuja. Tulemused on koondatud Joonis 24 ja Joonis 25.



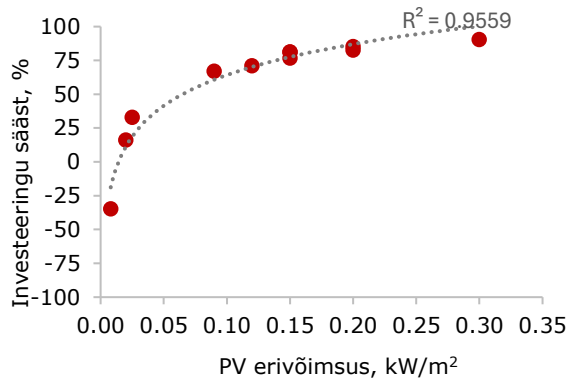
Joonis 24 Liginullenergia hoone nõude täitmiseks vajalik investeering (€) ainult PV-paneelid kasutades ning PV-paneelid + aku lahenduse korral kaugkütte ja elektrikalorifeeridega juhtumitel.



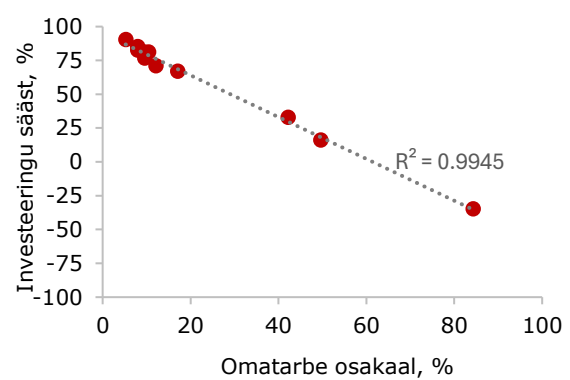
Joonis 25 Liginullenergia hoone nõude täitmiseks vajalik investeering (€) ainult PV-paneelid kasutades ning PV-paneelid + aku lahenduse korral kaugkütte ja vesikalorifeeridega juhtumitel.

Kaugküttega hoonete puhul joonistub välja olukord, kus arvutuslikult madala omatarbe osakaal tõstab vajamineva PV-mahu ebaharilikult kõrgeks. Sellistes olukordades annab aku kasutamine ekstreemselt positiivse säästu.

Liginullenergiahoone nõude täitmiseks vajaliku investeeringu muutumise seoseid PV-erivõimsuse ja omatarbe osakaaluga kujutavad Joonis 26 ja Joonis 27.



Joonis 26 PV erivõimsuse (PV koguvõimsus hoone kätava pinna suhtes, kW/m²) ja liginullenergia nõude saavutamiseks vajaliku taastuvenergia süsteemi investeeringu muutuse seos (%) kaugkütel näitehoonetes.



Joonis 27 Hoones toodetud taastuvenergia arvutusliku omatarbe osakaalu (%) ja liginullenergia nõude saavutamiseks vajaliku taastuvenergia süsteemi investeeringu muutuse seos (%) kaugkütel näitehoonetes.

Joonis 26 ja Joonis 27 iseloomustavad liginullenergiahoone nõude täitmiseks taastuvenergiasüsteemi investeeringu muutuse (%) seost PV erivõimsusega (Joonis 26) ja esialgse omatarbe osakaaluga (Joonis 27). Mõlemal juhul on demonstreeritud tugev seos.

Kaugküttega uuritud juhtumite puhul on akude kasutamine liginullenergiahoone nõude täitmisel majanduslikult mõttekas alates PV erivõimsusest 0,020 kW/m². Aku kasutamine on majanduslikult kasulik juhtudel, kui omatarbe osakaal on < 60 %.

4.1.6 Väikeelamute arvutustulemuste kokkuvõte ja järeldus

Analüüsi tüüpset väikeelamut toatemperatuuri pinnaga 100 m² kolme erineva hoonekarbi tüübi ja kolme soojusallika korral. Hoonekarbi tüübid on tähistatud kui „Halb“ hoonekarp (H/A = 1,07 W/K.m²), „Keskmise“ hoonekarp (H/A = 0,81 W/K.m²) ja „Hea hoonekarp“ (H/A = 0,70 W/K.m²). Soojusallikatena vaadeldi maasoojuspumpa, õhk-vesi soojuspumpa ning tõhusat kaugkütet.

Arvutused ja simulatsioonid teostati 01.03.2025 jõustuva määruse nr 58 „Hoone energiatõhususe arvutamise metoodika“ andmete põhjal. Uuritud „Halva“, „Keskmise“ ja „Hea“ hoonekarpide suurimad erinevused esinesid hoonekarbi madalenergiahoone nõude saavutamisel.

Halva hoonekarbi korral tagati energiatõhususe miinimumnõuded vaid kaugkütte ja maasoojuspumbaga juhtumite korral. Enamikel juhtudel oli vajalik päikesekollektorite kasutamine.

Keskmise ja Hea hoonekarbi puhul on hoonekarbi madalenergiahoone nõue õhk-vesi soojuspumbaga juhtudel täidetud vaid päikesekollektoreid kasutades. Maasoojuspumba ja kaugküttega juhtude puhul on oleneb päikesekollektorite kasutamise vajadus muude süsteemide andmetest (ventilatsiooni soojustagastuse ja järelküttekalorifeeri tüüp).

Aku kasutamise tasuvus erinevate soojusallikate korral

Valimi juhtudele arutati liginullenergiahoone nõude täitmiseks vajalik PV-paneelide koguvõimsus (kW) ning detailse tunnipõhise arvutusega sellele vastav taastuenergia omatarbe osakaal. Järgmisena lisati hoonele taastuenergiasisüsteemi aku, arvatati selle taastuenergia omatarbe osakaal ning dimensioneeriti optimaalne kombinatsioon PV-paneelide koguvõimsusest (kW) ja aku mahtuvusest (kWh) liginullenergiahoone nõude täitmiseks.

Arvatati mõlema lahenduse investeeringu hind ja akude lisamisega saavutatav sääst alginvesteeringust (%). Kõikide soojusallikate puhul vaadeldi investeeringu säästu seost PV-erivõimsuse (kW/m²) ja omatarbe osakaalu (%) vahel.

Kõikide soojusallikate puhul on PV-erivõimsuse ja saavutatav investeeringu sääst tugevas logaritmilises seoses. Seose R² väärtused on vastavalt soojusallikale maasoojuspumba R²=0,9629, õhk-vesi soojuspumbal R²=0,9204, kaugkütteil R²=0,9559.

PV-erivõimsuse tasuvuspiir erineb soojusallikate lõikes. Maasoojuspumba puhul on akude lisamine taastuenergiasisüsteemi on majanduslikult kasulik PV-paneelide erivõimsusest > 0,023 kW/m², õhk-vesi soojuspumba puhul > 0,019 kW/m² ning keskküttega hoonete puhul > 0,020 kW/m². Suurima ja väikseima tulemuse vahe on 17,4 %. Varieeruvuse tõttu suurusele kindlat tasuvuspiiri ei defineerita ning järeldatakse, et PV-erivõimsuse vahemik aku kasumlikkuse määramiseks väikeelamute puhul on 0,019 - 0,023 kW/m².

Sarnaselt on kõikide soojusallikate puhul tugevas lineaarses seoses omatarbe osakaalu ja saavutatav investeeringu sääst. Seose R² väärtused on vastavalt soojusallikale maasoojuspumba R²=0,9432, õhk-vesi soojuspumbal R²=0,9271 ja kaugkütteil R²=0,9945.

Kõigi kolme analüüsitud soojusallika puhul on aku lisamine taastuenergiasisüsteemi majanduslikult tasuv, kui hoones toodetud taastuenergia omatarbe osakaal on < 60 %.

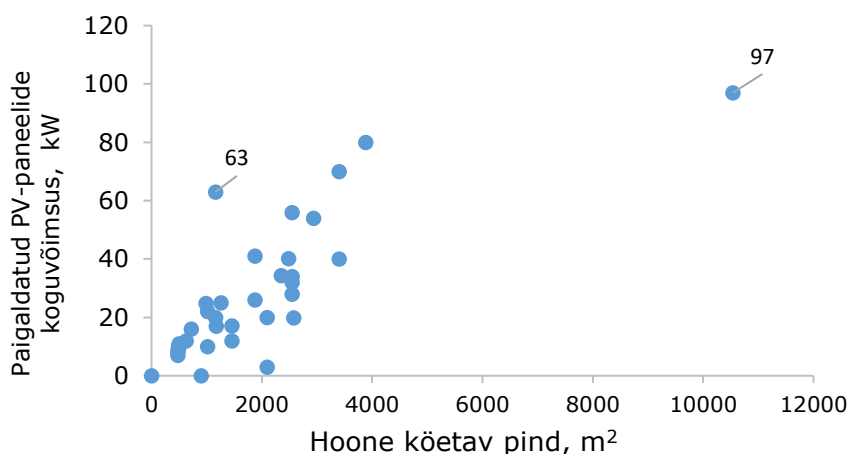
4.2 Akude kasutamise potentsiaal teistes hoontüüpides

Hindamaks akude kasutamise potentsiaali valitud hoonetüüpides arvatati detailise tunnipõhise arvutusega hoones PV-paneelide poolt toodetud energia omatarbe osakaalule ja selle mõju hoone energiatõhususarvule.

4.2.1 Valimi üldandmed

Analüüsis uuriti 24 eri hoonet eri hoonetüüpides. Kõikidele objektidele määrati unikaalne tähis. Objektide tähistuses tähistab esimene number unikaalset hoonet ning täiend -1/-2/-3 tähistab olukorda, kus sama hoone on arvatud läbi erinevate soojusallikatega. Seeläbi saadi 24 hoone andmete põhjal kokku 35 uurimisjuhtu.

Arvutustes lähtuti määruse nr 58 kehtiva redaktsiooni andmetest.

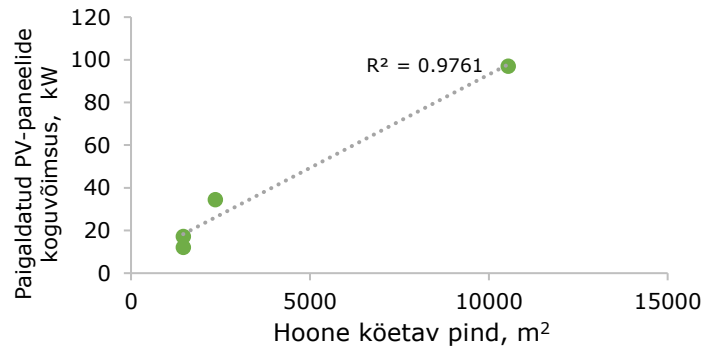


Joonis 28 Liginullenergia hoone tingimuste täitmiseks vajaliku PV-paneelide koguvõimsuse (kW) ja hoone kätava pinna (m²) seos uuritud juhtumite 1-24 puhul.

Vastavalt Joonis 28 joonistub olenemata hoonetüübist välja üldine trend vajaliku PV-paneelide koguvõimsuse ja hoone kätava pinna vahel. Kõrvalekalduvad juhud on objektid 10-2 (PV koguvõimsus 63 kW) ja 13 (PV koguvõimsus 97 kW).

Objekti 10-2 puhul on tegu rekonstrueeritava hoonega, mille puhul hoone ETA B väärtus ületab madalenergiahoone piirmäära. Võrreldes teiste valimi hoonetega on hoone liginullenergiahoone nõude täitmiseks vajalik PV-paneelide hulk oluliselt kõrgem.

Objekti 13 kuulub korterelamute hulka ning selle tulemus jälgib ülejäänud uuritud korterelamute tulemuste trendi nagu näidatud Joonis 29.



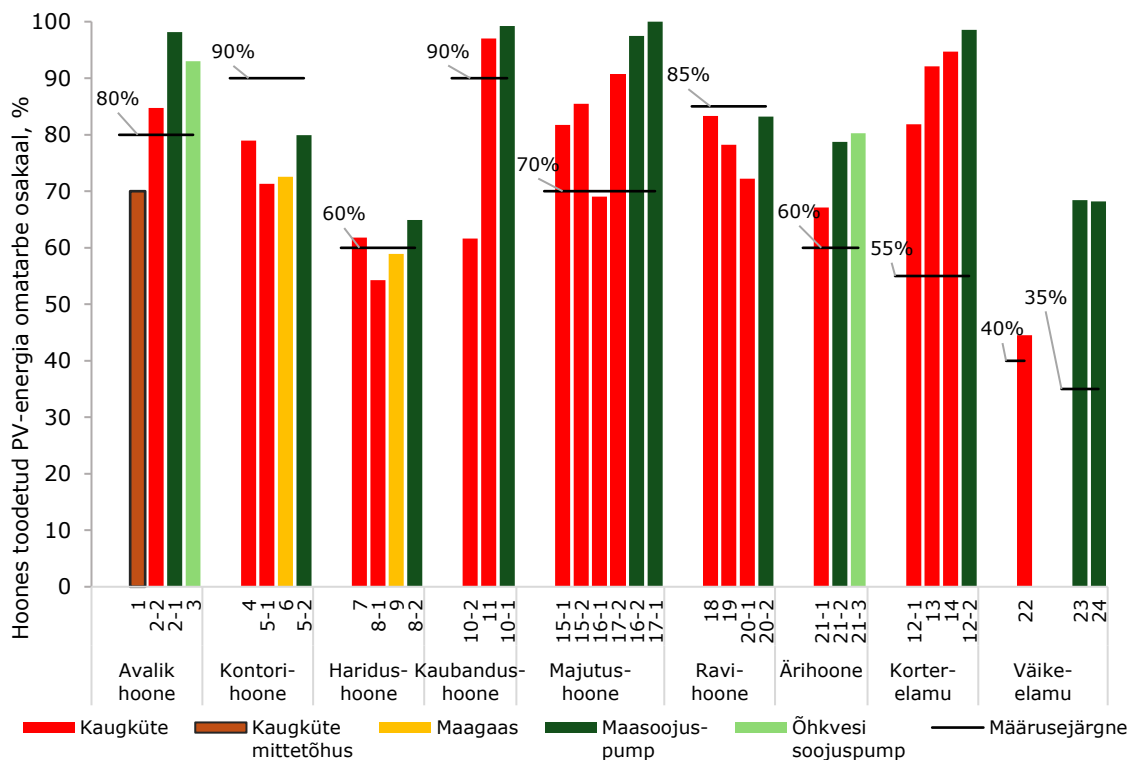
Joonis 29 Liginullenergia hoone tingimuste täitmiseks vajaliku PV-paneelide koguvõimsuse (kW) ja hoone köetava pinna seos (m²) uuritud korterelamute (objektid 12-1, 12-2, 13 ja 14) puhul.

4.2.1 Arvutuslikud omatarbe osakaalud hoonetüüpide lõikes

Kõikidele valimi objektidele teostati detailne tunnipõhine arvutus, mille tulemuste alusel määrati hoonete arvutuslikud omatarbe osakaalude väärtused. Tulemused hoonetüüpide lõikes on visualiseeritud Joonis 30.

Objektid on soojusallika kaupa värvikoodiga eristatud. Elektrilised soojusallikad (maasoojuspump ja õhk-vesi soojuspump) on tähistatud roheliste toonidega ja mitteelektrilised soojusallikad (kaugküte, mittetõhus kaugküte ja maagaas) on tähistatud punaste ja kollaste toonidega.

Objektide tähistuses tähistab esimene number unikaalset hoonet ning täiend -1/-2/-3 tähistab olukorda, kus sama hoone on arvatud läbi erinevate soojusallikatega.



Joonis 30 Valimi määrusejärgsed ja arvutuslikud toodetud taastuenergia omatarbe osakaalud (%) hoonetüüpide lõikes kehtiva hoonete energiatõhususe metoodika määruse põhjal (MKM määrus nr 58).

Arvutuslike omatarbe osakaalude tulemused erinevad hoonetüüpide lõikes märkimisväärselt. Autori hüpotees on, et madalam arvutuslik omatarbe osakaal, on seoses akude paigaldamisel saavutatava energiatõhususarvu vähenemise potentsiaaliga.

Väike- ja korterelamute ja ärihoonete puhul on arvutuslike omatarbe osakaalude tulemused määrusejärgsest kõrgemad kõikidel uuritud juhtumitel. Majutushoonete puhul saavutas määrusejärgsest napilt madalama tulemuse vaid üks objekt (16-1, osakaal 69,4 %).

Kontori- ja ravihoonete puhul on kõikidel uuritud juhtudel arvutuslik omatarbe osakaal madalam kui määrusejärgne.

Avaliku, haridus-, kaubandus- ja majutushoone puhul esineb nii määrusejärgset ületavaid kui ka sellele alla jäävaid arvutusliku omatarbe tulemusi.

Kõikide hoonetüüpide puhul joonistub selgelt välja, et elektril põhinevate soojusallikatega juhtumite puhul on omatarbe osakaalud kõrgemad. Objektidele, kus samat hoonet analüüsiti kaugküttel kui maasoojuspumbal põhinevana on maasoojuspumbaga arvutatud variandi omatarbe osakaal 8,6 – 37,6 ühikut kõrgem.

Hoonetüüpide detailse omatarbe arvutuse tulemustest lähtub, et suurim mõju energiatõhususarvule on eeldatavalt kontori- ja ravihoonete puhul. Väikseim mõju akude paigaldamisel on eelduslikult elu-, majutus- ja ärihoonete puhul. Ülejäänud uuritud hoonegruppides sõltub akude kasutamise kasulikkus konkreetse hoone parameetritest ja tehnosüsteemidest.

4.2.2 Detailse arvutuse mõju omatarbe osakaalule ja energiatõhususarvule

Uuritud juhtumitele arvutati hetkel kehtiva seadusandluse kohaselt detailse tunnipõhise arvutusega omatarbe osakaalud. Mitteeluhoonete tulemused on koondatud Tabel 21 ja eluhoonete tulemused Tabel 22. Tabelites esitatakse hoone määrusejärgne arvutuslik omatarbe osakaal ja sellele vastav energiatõhususarv, detailse arvutuse järgne omatarbe osakaal ja sellele vastav energiatõhususarv ning omatarbe osakaalude ja energiatõhususarvude muutused.

Tabel 21 Analüüsitud mitteeluhoonete omatarbe osakaalude detailse arvutuse tulemused ja mõju hoone energiatõhususarvule.

Objekti andmed		Määrusejärgne		Arvutuslik, akuta		Muutus	
Objekt	Hoone-tüüp	Taastuv-energia omatarbe osakaal, %	ETA A, kWh/a.m ²	Taastuv-energia omatarbe osakaal, %	ETA A, kWh/a.m ²	Taastuv-energia omatarbe osakaal, %	Δ ETA, kWh/a.m ²
1	Avalik hoone	80.0	128.7	70.0	132.5	-10.0	3.9
2-1			134.8	98.2	131.5	18.2	-3.3
2-2			134.8	84.7	133.3	4.7	-1.5
3			134.0	93.0	130.0	13.0	-4.0
4	Kontori-hoone	90.0	109.9	78.9	111.3	-11.1	1.4
5-1			99.8	71.3	106.2	-18.7	6.3
5-2			99.0	79.9	101.2	-10.1	2.2
6			93.5	72.6	99.0	-17.4	5.5
7	Haridus-hoone	60.0	98.4	61.8	98.0	1.8	-0.4
8-1			100.1	54.2	101.6	-5.8	1.5
8-2			99.3	64.9	98.2	4.9	-1.1
9			99.4	58.9	99.7	-1.1	0.2
10-1	Kaubandus-hoone	90.0	159.2	99.2	156.9	9.2	-2.4
10-2			134.9	61.6	156.5	-28.4	21.7
11			159.3	97.0	156.9	7.0	-2.4
15-1	Majutus-hoone	70.0	142.7	81.7	140.4	11.7	-2.3
15-2			144.4	85.5	141.8	15.5	-2.6
16-1			144.4	69.0	144.8	-1.0	0.3
16-2			144.8	97.5	140.4	27.5	-4.3

17-1			144.0	100.0	143.4	30.0	-0.7
17-2			144.3	90.7	141.3	20.7	-3.1
18	Ravihoone	85.0	134.3	83.3	134.8	-1.7	0.5
19			100.2	78.2	102.5	-6.8	2.2
20-1			100.3	72.2	104.6	-12.8	4.3
20-2			99.8	83.2	100.2	-1.8	0.4
21-1	Ärihoone	60.0	127.7	67.1	125.7	7.1	-2.0
21-2			128.6	78.7	122.9	18.7	-5.7
21-3			129.6	80.3	122.8	20.3	-6.8

Mitteeluhoonetes uuritud 28-st juhtumist täpselt pooltel juhtudel on detailse tunnipõhise arvutusega määratud omatarbe osakaal määrusejärgsest kõrgem ning pooltel juhtudel madalam. Mitteiluhoonete löikes on keskmine omatarbe osakaalu muutus 7,8 pügalane tõus.

Vaadeldes eraldi juhtumeid, kus omatarbe osakaal tõuseb on osakaalu keskmine tõus 14,0 ühikut. Vaadeldes vaid juhtumeid, kus omatarbe osakaal langeb, on osakaalu keskmine langus 9,7 ühikut. Samaselt - energiatõhususarvud vähenevad vastavalt keskmiselt 2,8 ühikut ning tõusevad 3,9 ühikut.

Tabel 22 Analüüsitud eluhoonete omatarbe osakaalude detailse arvutuse tulemused ja mõju hoone energiatõhususarvule.

Objekti andmed			Määrusejärgne		Arvutuslik, akuta		Muutus	
Hoone tunnus	Hoone tüüp	Soojusallikas	Taastuvenergia omatarbe osakaal, %	ETA A, kWh/a.m ²	Taastuvenergia omatarbe osakaal, %	ETA A, kWh/a.m ²	Taastuvenergia omatarbe osakaal, %	Δ ETA, kWh/a.m ²
12-1	Korterelamu	kaugküte	55.0	108.3	81.9	103.2	26.9	-5.0
12-2		MSP		105.1	98.5	99.4	43.5	-5.7
13		kaugküte		108.9	92.1	103.7	37.1	-5.2
14		kaugküte		111.3	94.7	106.3	39.7	-5.1
22	Üksikelamu	kaugküte	40.0	119.4	44.5	117.2	4.5	-2.2
23		MSP	35.0	86.5	68.2	76.0	33.2	-10.5
24		MSP		99.7	68.4	86.0	33.4	-13.7

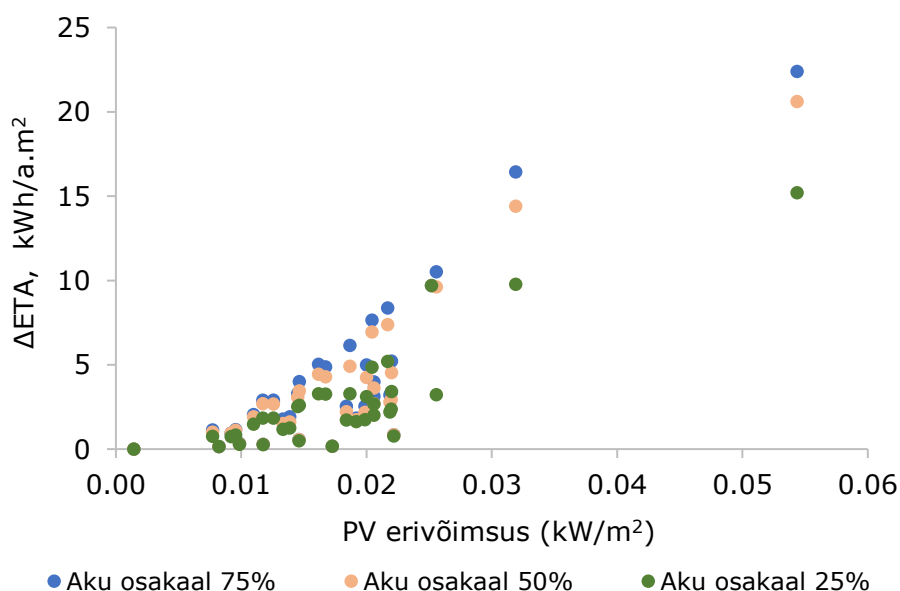
Eluhoonete hulgas on kõikidel uuritud seitsmel juhul arvutuslik omatarbe osakaal kõrgem määrusejärgsest vaikeväärtusest. Keskmine omatarbe osakaalu tõus on 31,2 ühikut. Kasutades arvutuslikke omatarbe osakaalusid väheneb energiatõhususarv keskmiselt 6,8 ühikut.

4.2.3 Aku lisamise mõju hoone energiatõhususarvule

Peale arvutusliku omatarbe osakaalu määramist arvutati hoone päikeseenergia-süsteemile akude lisamise mõju.

Akude maht dimensioneeriti osakaaluna paigaldatud PV-paneelide koguvõimsusest. Aku osakaal tähistab aku mahtuvuse (kWh) ja PV-paneelide koguvõimsuse (kW) suhet. Näiteks, kui PV-paneeli koguvõimsus on 10 kW, siis aku mahtuvusega 5 kWh loetakse aku osakaaluks 50 %. Kõikidel uuritud juhtudel arvutati akude lisamisega kolmes osakaalus – 25 %, 50 % ja 75 %.

Tulemused paigaldatud dimensioneeritud aku mahtude lõikes on toodud Joonis 31.



Joonis 31 Seos PV-paneelide erivõimsuse (koguvõimsus hoone köetava pinna kohta, kW/m²) ja akudega saavutatava energiatõhususarvu võidu vahel (Δ ETA, kWh/a·m²) aku mahtuvuse (kWh) osakaalude 25 %, 50 % ja 75 % kaupa installeeritud PV-paneelide koguvõimsusest (kW).

Joonis 31 on kujutatud kogu valimi hoonete energiatõhususarvude muutused aku osakaalude 25 %, 50 % ja 75 % korral. Graafiku eesmärk on erinevate aku osakaalude korral PV erivõimsuse ja Δ ETA vahelise seose visuaalne hindamine.

Graafikult lähtub, et aku mahtuvuse suurenedes energiatõhususarvu muutus üldtrendis suureneb. Akust saavutatav potentsiaalne võit tõuseb, mida suurem on hoonele paigaldatavate PV-paneelide erivõimsus hoone köetava pinna kohta.

Suurima energiatõhususarvu muutusega punktid on objektide 10-2 (PV erivõimsus 0,054 kW/m²) ja 22 (PV erivõimsus 0,032 kW/m²) tulemused.

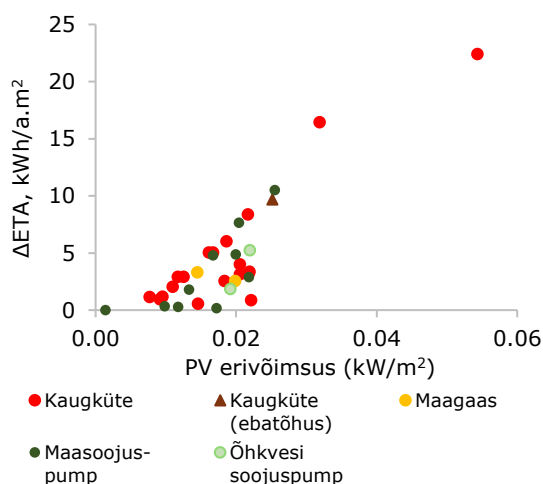
Objekt 10-2 puhul on tegu rekonstrueeritava hoonega, mistõttu on hoonekarbi energiatõhususarv enne taastuenergiaallikate arvestamist ülejäänutega võrreldes suhteliselt kõrgem. Sellest tulenevalt on liginullenergiahoone nõude saavutamiseks vajaminevate PV-paneelide erivõimsus ülejäänud objektidega võrreldes 2,3-5,4 korda kõrgem. Kõrgem erivõimsus tingib madalama omatarbe osakaalu, mis suurendab akude lisamisest saadavat võitu.

Hoone 22 näol on tegu kaugkütel väikeelamuga, mille puhul on vastavalt Joonis 26 tulemuste põhjal ootuslik kõrge energiatõhususarvu langus.

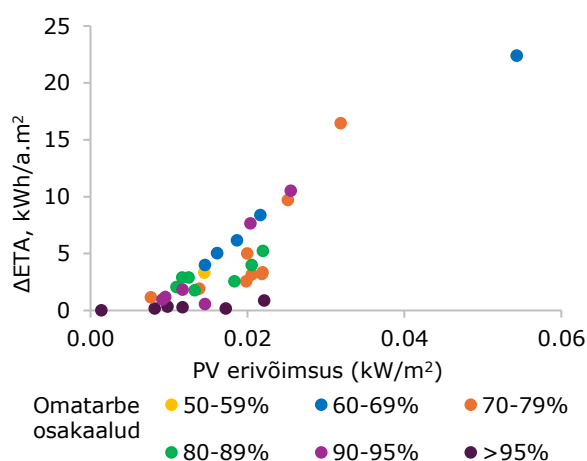
Energiatõhusarvu muutuse illustreerimiseks peamiste soojusallikate ja omatarbe osakaalude lõikes koostati Joonis 32 ja Joonis 33.

Joonis 30 näitab, et hooned käituvad erinevate aku osakaalude korral sarnaselt. Seega kasutati Joonis 32 ja Joonis 33 koostamisel loetavuse huvides andmetena aku mahtuvuse 75% korral saadud tulemusi. Uuritud objektide soojusallikad jaotuvad kaheks – elektril põhinevad nagu maa- ja õhk-vesi soojuspump ning mitteelektrilised nagu kaugkütel ja maagaasil põhinevad soojusallikad.

Valimis on suures ülekaalus tõhusa kaugkütte ja maasoojuspumbaga köetavad hooned ning seetõttu käsitletakse edasises analüüsis peamiselt neid.



Joonis 32 Energiatõhususarvu muutuse (ΔETA , kWh/a.m²) seos paigaldatud PV-paneelide erivõimusega (PV koguvõimsus hoone köetava pinna kohta, kW/m²) soojusallika põhjal, akude osakaalu 75 % puhul.



Joonis 33 Energiatõhususarvu muutuse (ΔETA , kWh/a.m²) seos paigaldatud PV-paneelide erivõimusega (PV koguvõimsus hoone köetava pinna kohta, kW/m²) arvutusliku omatarbe osakaalu (%) põhjal, akude osakaalu 75 % puhul.

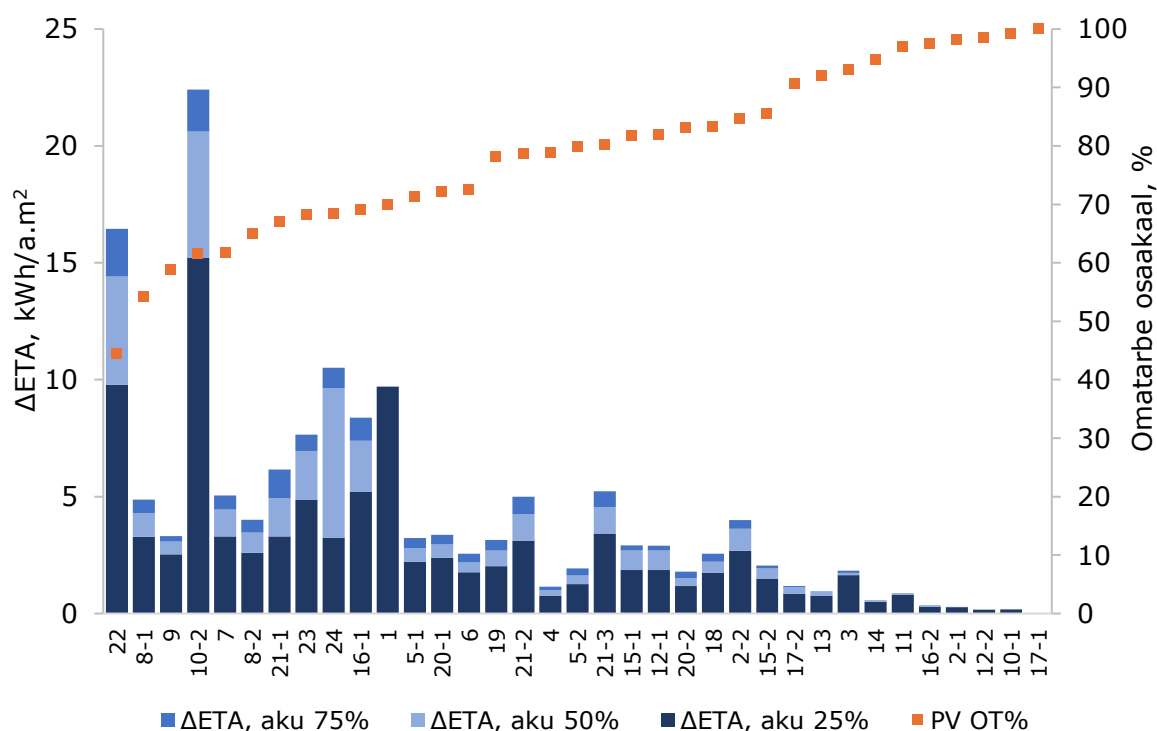
Vasakpoolse graafiku põhjal saab järeldada, et suure üldistusena on mitteelektriliste soojusallikate puhul akude kasutamise potentsiaal energiatõhususarvu vähendamisele

suurem, kui elektriliste soojusallikate puhul. Nii kaugküttega kui maasoojuspumbaga objektide tulemuste puhul on näha, et individuaalsete objektide tulemused võivad üldtrendist tugevalt erineda. Tulemustest järeldub, et soojusallika määramine ei anna piisavat infot akude kasutamise potentsiaali hindamiseks.

Joonis 33 tulemused näitavad ilmsemat seost arvutusliku omatarbe ja energiatõhususarvu muutuse vahel. Järeldusena saab öelda, et detailse tunnipõhise arvutusega määratud omatarbe osakaalu põhjal on sobivam akude kasutamise potentsiaali hinnata. Tulemused näitavad, et arvutusliku omatarbe osakaalu > 90 % korral on energiatõhususarvu vähenemine minimaalne. Kõrge omatarbe osakaalu puhul kasutatakse enamik hoones toodetavast taastuvenergiast kohapeal ära ning aku paigaldamise efekt tarnitavale elektrienergiale ja energiatõhususarvule on minimaalne.

Aku osakaalu mõju energiatõhususarvule

Energiatõhususarvu potentsiaalse vähenemise ja hoone arvutusliku omatarbe osakaalu seose hindamiseks koostati Joonis 34.



Joonis 34 Akudega saavutatav energiatõhususarvu vähenemise (ΔETA , kWh/a.m²) ja hoones toodetud taastuvenergia arvutusliku omatarbe osakaalu (%) seos.

Valimi objektid on järjestatud omatarbe osakaalu kasvavas järjekorras. Omatarbe osakaalu vahemikus 85 – 100 % vastab trend hüpoteesile – madalam omatarbe osakaal tähendab suuremat ETA alandamise potentsiaali.

Omatarbe osakaalude vahemiku 70 – 85 % puhul ei joonistu selget trendi.

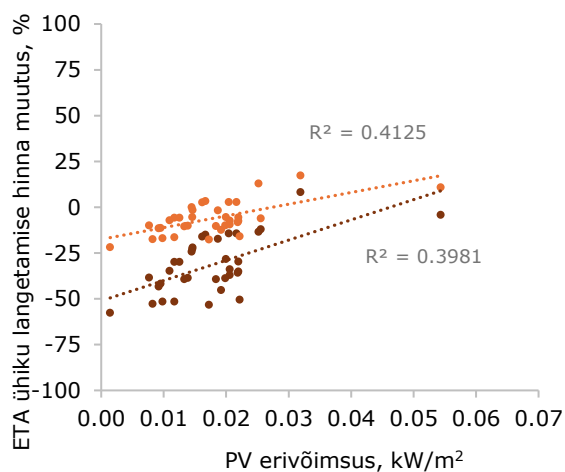
Juhtumid, mille omatarbe osakaalud on vahemikus 54 – 70 % järgivad enamjaolt hüpoteesi, välja arvatud valimi objekt 10-2 ja 22 tulemused. Antud näidete puhul on tegu erisustega, mille põhjused on käsitletud peatükis 4.2.3.

Pea kõikide objektide puhul toimub energiatõhususarvu suurim langus aku mahtuvuse 25 % korral.

Aku kasutamise majandusliku tasuvuse piirid ja järeldused

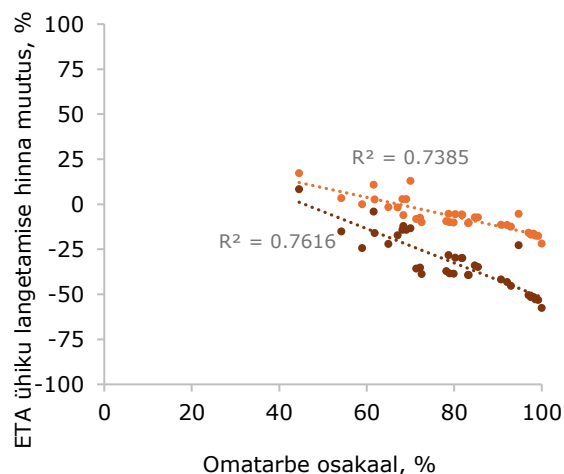
Tulenevalt Joonis 34 järeldustest annab energiatõhususarvu vähendamisel proportsionaalselt kõige suurema efekti uuritud variantidest aku mahtuvuse (kWh) dimensioneerimine PV paneelide koguvõimsusest (kW) 25 % juurde. Esmaseks variantide hindamiseks võrreldi hoone energiatõhususarvu ühiku langetamiseks vajalikku investeeringu muutust akudeta olukorra suhtes akude mahtuvuse 25 % ja 75 % korral. Selles koostati Joonis 35 ja Joonis 36

Graafikute parema loetavuse huvides jäeti kõrvale aku mahtuvus 50 %, mille tulemus on esitatud andmete vahepealne.



● 75% aku ● 25% aku
..... Linear (75% aku) Linear (25% aku)

Joonis 35 PV erivõimsuse (PV koguvõimsus hoone köetava pinna suhtes, kW/m²) ja energiatõhususarvu (kWh/a.m²) ühiku langetamiseks vajaliku taastuvenergia süsteemi investeeringu muutuse (%) seos akude osakaalude 25 % ja 75 % puhul.



● 75% aku ● 25% aku
..... Linear (75% aku) Linear (25% aku)

Joonis 36 Hoones toodetud taastuvenergia arvutusliku omatarbe osakaalu (%) ja energiatõhususarvu (kWh/a.m²) ühiku langetamiseks vajaliku taastuvenergia süsteemi investeeringu muutuse (%) seos akude osakaalude 25 % ja 75 % puhul.

Energiatõhususarvu ühiku langetamiseks vajaliku investeeringu kasumlikkus ei ole PV-erivõimsusega (kW/m²) tugevas seoses. Kuigi investeeringu kasumlikkuse seos

kohapeal toodetud taastuenergia omatarbe osakaaluga (%) on nõrgem kui üksikelaamute detailse analüüsi vastavad tulemused (Joonis 13, Joonis 20 ja Joonis 27), võib seda pidada arvestatavaks seoseks.

Tulemused kinnitavad, et aku mahu (kWh) dimensioneerimine 25 %-na paigaldatavast PV paneelide koguvõimsusest (kW) on kuluefektiivsem teistest uuritud aku osakaaludest.

PV-paneelide erivõimsuse (kW/m²) ning energiatõhususarvu ühiku langetamiseks vajaliku investeeringu (€/m²) seost analüüsitakse alljärgnevatel lõikudes Joonis 35 näidatud „aku osakaalu 25%“ tulemuste põhjalcaudu.

PV-paneelide erivõimsuse vahemikus 0,001 – 0,015 kW/m² ei anna aku lisamine taastuenergiatasüsteemi energiatõhususarvu ühiku alandamiseks vajalikus investeeringus säästu. Vahemikus 0,016 – 0,054 kW/m² saavutab aku lisamine investeeringu vähendamise 35 % uuritud juhtudest.

Erinevalt peatükk 4.1.6 toodud tulemustest ei kujune antud valimi puhul välja PV erivõimsust, millest kõrgematel väärtustel on aku lisamine püsivalt kasumlik. Selle asemel defineeritakse „tinglik tasuvuspiir“ millest kõrgema PV erivõimsuse korral on aku lisamine taastuenergiatasüsteemi lisamine potentsiaalselt kasumlik.

Vahemiku 0,016 – 0,054 kW/m² alumisel piiril on valimi haridushoonete tulemused. Haridushoonete aastane energiakasutusprofiil erineb suvise koolivaheaja kasutusprofiili tõttu oluliselt kõikidest teistest hoonetüüpidest [3]. Seda kinnitab ka Joonis 30 toodud tulemused arvutuslike omatarbe osakaalude kohta. Seega on PV erivõimsuse puhul põhjendatud haridushoonete teistest hoonetüüpidest eraldi vaatlemine.

Jättes vaatlusest kõrvale haridushoonete tulemused, on kõikide teiste hoonetüüpide tulemuste põhjal tasuvuspiiriks 0,020 kW/m². See ühtib peatükis 4.1.6 esitatud väikeelamu tulemuste vahemikuga.

Arvutusliku omatarbe osakaalu (%) ning energiatõhususarvu ühiku langetamiseks vajaliku investeeringu (€/m²) seost analüüsitakse täpsemalt aku osakaalule 25% vastavaid tulemuste caudu.

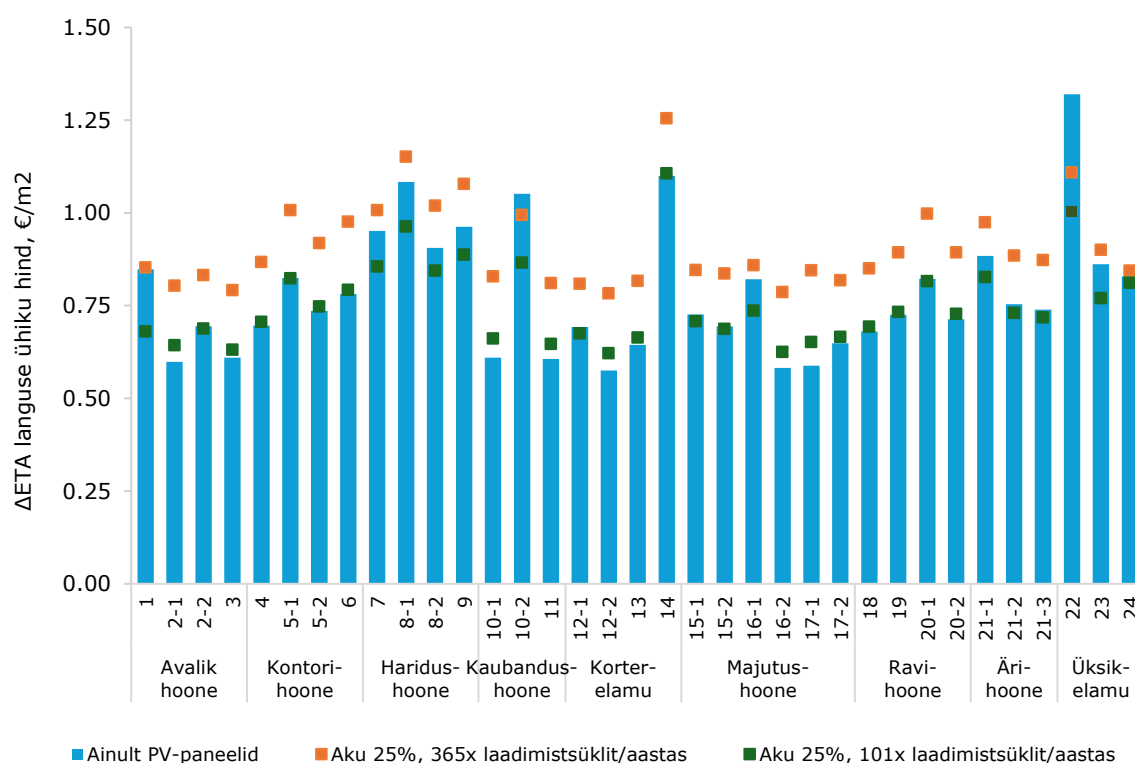
Omatarbe osakaalu vahemikus 71,3 – 100 % ei ole aku lisamine kasumlik ühelgi uuritud juhtudest. Vahemikus 44,5 – 70,0 % on aku lisamine kasumlik 63 % juhtudest.

Erinevalt peatükk 4.1.6 toodud tulemustest ei kujune antud valimi puhul välja omatarbe osakaalu, millest madalamatel väärtustel on aku lisamine püsivalt kasumlik. Selle

asemel defineeritakse välja kujunenud „tinglik tasuvuspiir“ < 70 %, millest madalamatel omatarbe osakaalude puhul tasub aku lisamist taastuenergiasüsteemi kaaluda.

Tasuvus tehnosüsteemide elutsükli jooksul

Akude lisamise tasuvuse hindamiseks jagati objekti taastuenergiasüsteemi rajamise kulu PV-paneelide eluea jooksul saavutatud hoone energiatõhususarvu vähendamisega ühikutes ning taandati hoone kõetava pinna ruutmeetritega. Valimisse koondati kõik analüüsitud objektid uuritud hoonetüüpidest. Tulemused on koondatud Joonis 37.



Joonis 37 Aku kasutamise kulu hoone energiatõhususarvu ühiku võrra langetamiseks hoone kõetava pinna ruutmeetri kohta PV-paneelide elukaare jooksul.

Akude elutsükli pikkus arvestatakse läbitud laadimistsüklite järgi. Joonis 37 on toodud valimi hoonetes akude kasutamise elutsükli hinda, kahe erineva aastase laadimistsüklite arvu puhul (101 laadimistsükli ja 365 laadimistsükli aastas).

Aku laadimistsüklite defineerimise keerukuse tõttu hoonete keskkonnas ei ole käesoleva töö mahus akude kasutamise tasuvusanalüüsi koostamine. Joonis 37 andmed on mõeldud demonstreerimaks aku kasutamise profiili mõju selle tasuvusele.

Aku aastane laadimistsüklite arv 101 kujutab olukorda, kus aku on kasutusel vaid toodetud PV-energia ülejäägi ajutiseks salvestamiseks. Aku laadimistsüklite arv 365 iseloomustab tinglikult olukorda, kus akut kasutatakse lisaks toodetud PV-energia ülejäägi salvestamisele ka ostetava börsielektri hinna optimeerimiseks ja

elektrisõidukite laadimiseks. Sel juhul hinnatakse aku elueaks poolt PV-paneelide elueast. Aku, kui meetme hinnas arvestatakse akude ühekordse välja vahetamisega PV-paneelide eluea jooksul. Laadimistsükli aastase arvu 365 puhul on akude lisamine kasumlik vaid kahel juhul. Metoodikas ei arvestata parameetrite määramatuse mahu tõttu nimetatud lisakasutusest tuleneva majandusliku lisakasuga. Seetõttu mõnab autor, et selliselt kasutatava aku tasuvus elutsükli raames on suure tõenäosusega oluliselt kõrgem Joonis 37 tulemustest.

4.3 Edasised uurimisküsimused

Antud magistritöös on kasutatud mitmeid lihtsustusi ning töös on kajastatud piiratud arvul uurimisküsimusi. Edaspidisteks akude tasuvuse uuringuteks pakub autor välja järgnevad:

- Akude kasutamise potentsiaal börsielektri turul kauplemisel hinna optimeerimisel ja selle mõju aku kasutamise majanduslikule tasuvusele
- Akude kasutamise majanduslik tasuvus elukaare jooksul – aku laadimistsükli profiil hoone taastuenergiastüsteemi ühendatuna
- Uurida akude kasutamise potentsiaali eri hoonetüüpides laiendatud valimiga ja määruse nr 58 „Hoone energiatõhususe arvutamise metoodika“ 01.03.2025 jõustuva redaktsiooni põhjal.
- Uurida akude kasulikkust reaalsete hoonete tarbimisandmete põhjal – analüüsida hoonete energiatarbimise ja PV-paneelide tootmisprofiilide kattuvus ning vastav aku dimensioneerimine

5. KOKKUVÕTE JA JÄRELDUSED

Käesoleva lõputöö eesmärgiks oli uurida akude kasutamise potentsiaali hoonete energiatõhususe miinimumnõuete täitmisel. Seoses energiatõhususe valdkonda puudutava seadusandluse eesootavate muutustega teostati analüüs määruse nr 58 „Hoone energiatõhususe arvutamise meetodika“ hetkel kehtiva kui ka aasta pärast jõustuva redaktsiooni põhjal.

Esmalt teostati detailne analüüs valitud tüüphoonele – väikeelamu – kasutades määruse nr 58 01.03.2025 jõustuva redaktsiooni andmeid. Valimi koostamiseks varieeriti hoonekarbist ehitusfüüsikalisi parameetreid ja käsitleti erinevaid kolme soojusallikat – maasoojuspump, õhk-vesi soojuspump ja tõhus kaugküte. Uurimisjuhtumidele arvutati liginullenergiahoone nõude täitmiseks vajalik PV-paneelide koguvõimsus ja seejärel dimensioneeriti hoonele optimaalne kombinatsioon PV-paneelidest ning akust.

Mõlemale lahendusele arvutati rajamismaksumus. Saavutatavat säästu vaadeldi kahe muutuja suhtes – hoones lokaalselt toodetud taastuenergia osakaalu ja hoonesse paigaldatava PV-paneelide erivõimsuse suhtes (koguvõimsuse ja hoone toatemperatuuriga pindala jagatis).

- Kõikide vaadeldud soojusallikate puhul on aku lisamise investeering kasumlik, kui hoone esialgne taastuenergia omatarbimise osakaal on < 60 %.
- PV-erivõimsuse (kW/m²) puhul on erinevate soojusallikate puhul tasuvuspiirid veidi erinevad ja jäävad vahemikku > 0,019 ... >0,023 kW/m².

Teises valimi analüüsiga sooviti uurida, kas leitud seosed on leitavad ka teiste hoonetüüpide puhul. O3 Technology OÜ poolt aastatel 2021 – 2024 teostatud projektidest valiti 24 hoonet, millest koostati 35 uurimisjuhtu ja kuulusid üheksasse hoonetüüpi. Antud valimi objektide arvutused teostati määruse nr 58 hetkel kehtiva redaktsiooni alusel (jõustumise kuupäev 08.07.2023).

Antud valimis vaadeldi aku lisamise mõju kolme erineva mahtuvuse korral. Aku mahtuvus dimensioneeriti funktsioonina hoones vajaminevast PV-paneelide koguvõimsusest. Kõikide hoonete puhul vaadeldi aku mahtuvust 25 %, 50 % ja 75 % osakaaluna PV-võimsusest. Konstantselt osutus kõige kuluefektiivsemaks akude osakaal 25 %. Lahendusele arvutati rajamise maksumus, ning vaadeldi saavutatud säästu omatarbe osakaalu ja PV-erivõimsuse suhtes.

- Antud valimi puhul ei kujune omatarbe osakaalu, millest madalamatel väärtustel on aku lisamine püsivalt kasumlik. Selle asemel defineeritakse välja kujunenud „tinglik tasuvuspiir“ $< 70 \%$, millest madalamatel omatarbe osakaalude puhul tasub aku lisamist taastuvenergiasüsteemi kaaluda ja objektipõhiselt arvutada.
- Samuti PV-erivõimsuse (kW/m^2) puhul on tulemustes suurem variatsioon ja ei kujune välja konkreetset tasuvuspiiri. Selle asemel defineeritakse välja kujunenud „tinglik tasuvuspiir“ $> 0,020 \text{ kW/m}^2$, kõrgematel väärtustel tasub aku lisamist taastuvenergiasüsteemi kaaluda ja objektipõhiselt arvutada.
- PV-erivõimsust (kW/m^2) vaadeldes joonistub eraldi välja haridushoonete trend, mille puhul aku lisamine on kasumlik alates PV-erivõimsusest $> 0,016 \text{ kW/m}^2$.
- Haridushoonete eraldamine ja eraldi vaatlemine sarnases analüüsis on soovituslik. Haridushoone energiatarbe profiil erineb nii päikesepaneelide elektritootmise profiilist kui teiste hoonetüüpide tarbimisprofiilist. Haridushoone tulemused võivad valimi tulemusi vähemal või suuremal määral mõjutada.

Kokkuvõtteks leiab autor, et:

- Akude kasutamisel hoone taastuvenergiasüsteemides on hoonetes energiatõhususe miinimumnõuete saavutamiseks vajaliku PV-paneelide koguvõimsuse vähendamisel ja aku kasutamine võib olla majanduslikult tasuv.
- Leiti veenev seos hoone taastuvenergia omatarbe osakaalu ja aku kasutamise kasumlikkuse vahel – laia valimi hoonetüüpide näitel on seose $R^2=0,74\dots0,76$ olenevalt aku mahust.
- Hoones toodetud taastuvenergia omatarbe osakaal $< 70 \%$ tasub aku paigaldamist kaaluda ning selle tasuvust arvutuslikult kontrollida.
- Hoone PV-koguvõimsuse ja kätava pinna suhte $> 0,020 \text{ kW/m}^2$ korral on aku kasutamise tasuvus väga tõenäoline olenemata hoonetüübist.
- Nimetatud seosed on sarnased mõlema valimi ning nii määruse nr 58 „Hoone energiatõhususe arvutamise metoodika“ hetkel kehtiva kui 01.03.2025 jõustuva arvutusmetoodikat kasutades.

6. SUMMARY

The aim of this thesis was to analyse the potential of using batteries in achieving the minimum energy performance requirements of buildings. Methodology for calculating energy performance of buildings was based on the Regulation No. 58 "Methodology for Calculating the Energy Efficiency of Buildings". This regulation is going to be updated significantly within a year of writing this thesis, with the new edition becoming valid on 01.03.2025. In this thesis the analysis and calculations are conducted using both of the relevant editions or the regulation – current (valid from: 08.07.2023) and the forthcoming edition (valid from: 01.03.2025).

In the first part of the analysis, a reference building for a small dwelling was defined. Analysed samples were created by varying the parameters of the thermal properties and the main heat source of the building. The main heat sources analysed were ground source heat pumps, air to water air pumps and efficient district heating. Calculations for this sample were based on the forthcoming edition of the regulation nr 58 (valid from 01.03.2025).

First a necessary total installed power of the solar panels for the building to meet the nearly-zero energy buildings requirements was calculated. Then a combination of solar panels total power and capacity of the battery was designed for each case based on achieving as similar of an energy efficiency rating as possible.

The initial cost for both solutions was then calculated. The change in the investment was analysed for two parameters. The self consumption ratio of the produced solar energy and the PV-to-area ratio (total installed power of the solar panels divided by the heated indoor area of the building, kW/m²).

- Throughout all analysed main heat sources, the use of batteries proved to be financially viable, when the self consumption ratio of the produced solar energy before adding batteries was < 60 %.
- The financially viable limit of PV-to-area ratio results varied between three analysed heat sources and the viability was explored at PV-to-area values between > 0,019 ... >0,023 kW/m².

A second sample was created to analyse if the links found analysing the small dwelling hold up in other building types. Data from 24 projects from O3 Technology (from 2021 – 2024) was used to create 35 research cases. Projects were chosen to represent nine

different building types. Calculations for this sample were based on the currently enforced edition of the regulation nr 58 (valid from 08.07.2023).

In this sample three different capacities of the batteries was analysed. Capacity of the batteries was designed as a function of the total installed solar power. For each studied case, the batteries was designed at a 25%, 50% and 75% ratio from installed solar power. Throughout all reasearch cases the 25% ratio proved to be the most cost efficient.

The initial cost for both solutions was then calculated. The change in the investment was analysed for two parameters - the self consumption ratio of the produced solar energy and the PV-to-area ratio (total installed power of the solar panels divided by the heated indoor area of the building, kW/m²).

- In the results of this sample no single self consumption ratio can be defined as a financial viability limit. Instead a „conditional viability limit“ was defined. When the self consumption ratio of the produced solar energy before adding batteries is < 70 %, the use of batteries may be financially viable and further calculations for each specific building are necessary.
- In the results of this sample no one PV-to-area ratio can be defined as a financial viability limit. Instead a „conditional viability limit“ was defined. When the PV-to-area ratio is > 0,020 kW/m², the use of batteries may be financially viable and further calculations for each specific building are necessary.
- Analysing the results for PV-to-area ratio (kW/m²), a separate trend for education buildings emerges and a lower financial viability limit was explored at a lower PV-to-area > 0,016 kW/m².
- When researching the use of batteries it is recommended to separate education buildings from other building types. This is due to energy usage profiles in education buildings varying significantly from both usage profiles in other building types and from the solar energy production profile. Including the education buildings may affect the results of the entire sample to some degree.

In summary, the author of this thesis finds that:

Potential of using batteries in achieving the minimum energy performance requirements of buildings was proven and use of batteries can be financially viable depending on the specifics of the building.

- A link between the financial viability of using the batteries was found for both self consumption ratio and PV-to-area ratio, links described as follows.
 - When the self consumption ratio of the produced solar energy before adding batteries is $< 70\%$, the use of batteries may be financially viable and further calculation for each specific building are necessary.
 - When the PV-to-area ratio is $> 0,020 \text{ kW/m}^2$, the use of batteries may very likely to be financially viable independent of the building type, however further calculations for determining the viability for the specific building are recommended.
- Both mentioned conclusions were valid regardless of which of the two editions of the regulation nr 58 "Methodology for Calculating the Energy Efficiency of Buildings" was used in calculations.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] "The Energy Performance of Buildings." European Parliament and Council, May 19, 2010. Accessed: Feb. 22, 2024. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/31/oj>
- [2] "Hoone energiatõhususe miinimumnõuded–Riigi Teataja." Accessed: Mar. 02, 2024. [Online]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/113122018014?leiaKehtiv>
- [3] "Hoone energiatõhususe arvutamise metoodika–Riigi Teataja." Accessed: Mar. 02, 2024. [Online]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/107072020012?leiaKehtiv>
- [4] "Trends in photovoltaic applications 2023." The International Energy Agency, 2023. Accessed: Mar. 24, 2024. [Online]. Available: https://iea-pvps.org/trends_reports/trends-2023/
- [5] Y. Zhang, T. Ma, and H. Yang, "A review on capacity sizing and operation strategy of grid-connected photovoltaic battery systems," *Energy and Built Environment*, vol. 5, no. 4, pp. 500–516, Nov. 2024.
- [6] "Hoone energiatõhususe arvutamise metoodika–Riigi Teataja." Accessed: Mar. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/119032024002>
- [7] "Hoone energiatõhususe miinimumnõuded–Riigi Teataja." Accessed: Apr. 22, 2024. [Online]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/119032024005>
- [8] "PV omatarbe kalkulaator." Accessed: Mar. 02, 2024. [Online]. Available: <https://pv-calc.nzeb.site/>
- [9] K. Voss, S. Hendel, and M. Stark, "Solar Decathlon Europe – A review on the energy engineering of experimental solar powered houses," *Energy and Buildings*, vol. 251, p. 111336, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111336.
- [10] P. Couty, D. Torregrossa, and J.-P. Bacher, "Battery storage systems for building applications," *Energy in Buildings and Communities Programme (EBC)*, Mar. 2020, Accessed: Mar. 24, 2023. [Online]. Available: <https://arodes.hes-so.ch/record/8139?ln=en>
- [11] Z. Moradi-Shahrbabak, "Selecting the Economical Energy Storage System for Photovoltaic Power Plants," presented at the 30th International Conference on Electrical Engineering (ICEE), Tehran, Iran, Islamic Republic of: IEEE, 2022, pp. 405–409. doi: 10.1109/ICEE55646.2022.9827378.
- [12] R. Khezri, A. Mahmoudi, and M. H. Haque, "Optimal Capacity of Solar PV and Battery Storage for Australian Grid-Connected Households," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 5, pp. 5319–5329, Sep. 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.2998668.
- [13] R. Best, H. Li, S. Trück, and C. Truong, "Actual uptake of home batteries: The key roles of capital and policy," *Energy Policy*, vol. 151, p. 112186, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.enpol.2021.112186.
- [14] K. Uddin, R. Gough, J. Radcliffe, J. Marco, and P. Jennings, "Techno-economic analysis of the viability of residential photovoltaic systems using lithium-ion batteries for energy storage in the United Kingdom," *Applied Energy*, vol. 206, pp. 12–21, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.08.170.
- [15] G. Huaccha, "Regional persistence of the energy efficiency gap: Evidence from England and Wales," *Energy Economics*, vol. 127, p. 107042, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.eneco.2023.107042.
- [16] J. Kurnitski *et al.*, "Hoonete arvutuslike energiamärgiste vastavus tegelikule tarbimisele. Uuringu lõpparuanne," Tallinna Tehnikaülikool., 2016.
- [17] Md. S. Chowdhury *et al.*, "An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling," *Energy Strategy Reviews*, vol. 27, p. 100431, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.esr.2019.100431.