

TARTU ÜLIKOOL
LOODUS- JA TEHNOLOOGIATEADUSKOND
Ökoloogia ja maateaduste instituut
Geograafia osakond

Evert Eero

**ELEKTRIENERGIA TARBIMISE AJALINE KATTUVUS
PÄIKESEPANEELIDE TOOTLIKKUSEGA
LIGINULLENERGIAHOONES**

Magistritöö keskkonnatehnoloogias (30 EAP)

Juhendaja: PhD Tõnu Mauring

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja:

Osakonna juhataja:

Tartu 2015

Sisukord

Sissejuhatus	4
1. Valdkonna ülevaade	6
1.1. Päikesepaneelide jagunemine.....	6
1.2. On-grid ja off-grid süsteemid	7
1.2.1. Võrku ühendatud päikeseelektrijaamad ehk on-grid süsteemid.....	7
1.2.2. Võrguga mitte ühendatud päikeseelektrijaamad ehk off-grid süsteemid.....	10
1.3. Tootmise ja tarbimise ajastamise probleem.....	12
1.3.1. Elektriseadmete ajastamine uurimistöö näitel.....	13
1.4. Elektrienergia tarbimine.....	14
1.4.1. 22 kodu elektrienergia kasutus minutis	15
1.5. Elektrienergia ostmine ja müümine.....	16
1.5.1. Elektrienergia ostmine võrgust	16
1.5.2. Elektrienergia müümine võrku ja taastuenergia toetus.....	17
2. Materjal ja meetodika	19
2.1. Katse püstitus.....	19
2.2. Uuritava objekti päikesepaneelide iseloomustus.....	20
2.3. Elektrienergia tarbimine eramus	21
2.3.1. Elektrienergia tarbimise monitoorimine tunni täpsusega.....	21
2.3.2. Elektrienergia tarbimise monitoorimine minuti täpsusega.....	21
2.3.3. Minuti sammuga monitooritud elektroonikaseadmed.....	25
2.3.4. Intervjuu Eva Leisiga.....	27
2.4. Päikesekiirus 2014 ja keskmistatud aastal (1970–2014).....	28
2.5. Elektrienergia ostmine ja müümine eramus	29
3. Tulemused ja arutelu	30
3.1. Aastane elektrienergia bilanss.....	30
3.1.1. Elektrienergia tarbimine ja PV paneelide tootmine 2014. aasta päevas	32
3.2. Aastaaegade päevane elektrienergia tarbimine ja PV paneelide tootlikkus	36
3.2.1. Kevad.....	36
3.2.2. Suvi.....	37
3.2.3. Sügis.....	39
3.2.4. Talv.....	40
3.3. Seadmete tarbimine ja PV paneelide tootlikkus 5 minuti sammuga	41

3.3.1. Maasoojuspump.....	42
3.3.2. Sauna elektrikeris	45
3.3.3. Kõõgiahi	45
3.3.4. Ventilatsiooniseade.....	47
3.3.5. Pesumasin ja trummelkuivati.....	47
3.3.6. Külmkapid	49
3.3.7. Televiisor, digibox ja võimendaja	50
3.3.8. Nõudepesumasin ja kohvimasin.....	51
3.3.9. Valgustid	52
3.4. Müügist saadud tulu 2014. aastal.....	54
3.4.1. Võrku müüdnud elektrienergia	54
4. Kokkuvõte	56
5. Summary.....	58
6. Kasutatud kirjandus	60

Sissejuhatus

Koduses majapidamises on taastuenergiast elektrienergia tootmine lähiaastatel Euroopas muutumas üha tavalisemaks. Üks võimalus Eestis iseseisvalt elektrienergiat toota on paigaldada päikesepaneelid maapinnale või maja katusele. Paneelide kasutamise juures on probleemiks elektrienergia tarbimise aegade erinevus päikesepaneelide tootlikkuse kellaaegadest. Tarbimise tipud on peamiselt hommikuti enne tööle minemist ja õhtuti töölt koju tulles, kuid päikesepaneelide tootlikkus on parim keset päeva.

Uurimistöö eesmärk on välja selgitada Põlvas asuva Eesti esimese sertifitseeritud passivmaja päikesepaneelide elektrienergia tootlikkus ning majas kasutatavate seadmete elektrienergia tarbimine. Uurimisobjekt on 2013. aastal valminud ühepereelamu, mille katusele on paigaldatud 12,94 kW võimsusega päikesepaneelid. Tänapäeval toimub energiakulu monitoorimine üldjoontes kuu täpsusega, kuid tänu uutele kaugloetavatele elektriarvestitele on võimalik jälgida pere elektrienergia tarbimist tunni täpsusega. Samas tuleb arvesse võtta, et paljud majapidamiseseadmed töötavad lühemal perioodil kui üks tund. Näiteks kohvimasin või elektriahi, mille kasutusaega loetakse tihti minutites.

Täpsemate elektritarbimist näitavate andmete saamiseks suheldi otse eramus elava perega, tänu kellele saadi päikesepaneelide toodetava elektrienergia hulk ja majas tarbitud elektrienergia kulu kalkuleeritud tunni täpsusega. Lisaks tunnise sammuga arvesti näitudele oli võimalus käia kahe kuu vältel iga nädal Põlvas elektrienergia minutipõhiseid tarbimise võimsusi monitoorimas.

Majas elaval perel on tavapärane käia neli kuni viis korda nädalas elektrikerisega saunas ning kasutada kütteperioodil maja kütmiseks maasoojuspumpa. Sellest tulenevalt oli aastane elektrienergia vajadus 11 153 kWh. Uurimistöös on näidatud, milliste seadmete tarbimisse selline kogus elektrit kulus ning kuidas need kattusid samal perioodil päikesepaneelide tootlikkusega. Tulemusi analüüsiti aasta, kuu, päeva, tunni ja minuti täpsusega.

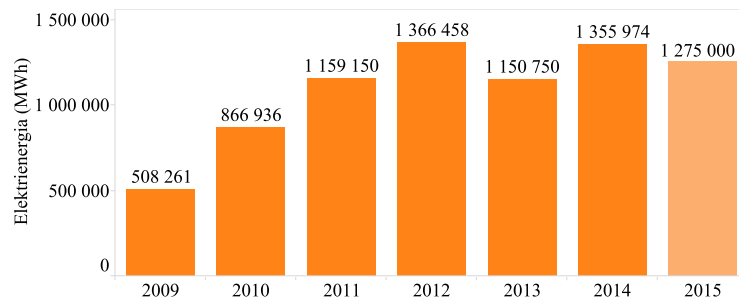
Tabel 1. Töös kasutatud mõistete ja lühendite loetelu.

Mõiste	Seletus
Liginullenergiahoone	Energiatõhus ja taastuvenergiatehnoloogiate lahendustega ehitatud hoone, mille energiatõhususarv väikeelamutes ei tohi ületada 50 kWh/m ² a [1].
Passiivmaja	Väga energiatõhus ja heade ehitustehniliste näitajatega hoone, millele väljastatud Darmstadt'i Passiivmaja Instituudi sertifikaat [2].
PV paneel	Fotoelektriline päikesepaneel (ingl <i>photo voltaic</i>), mille abil on võimalik toota päikeseenergiast elektrienergiat.
Energiatõhususarv	Hoone tavakasutusel summaarne tarnitud energiatega kaalutud erikasutus, millest arvutatakse maha summaarne eksporditud energiatega kaalutud erikasutus [1].

Tähis	Ühik	Kirjeldus
P	vatt (W), kilovatt (kW). 1kW = 1000 W	Võimsus. Näitab kui palju teeb tööd elektrivool elektriseadme töötamisel ajaühikus [3]. 1 võimsuse ühik = 1 pinge ühik korrutatuna 1 voolutugevuse ühik [4].
E	kWh (kilovatt-tund). 1 kWh = 1000 Wh = 3,6 x 10 ⁶ J	Energia. Üks kilovatt-tund on energia, mida toodab (või tarbib) ühtlasel võimsusel ühe kilovati võimsusega seade ühe tunni jooksul.
	Wh/5min	Viie minuti jooksul tarvitatud elektrienergia kogus.
I	amper (A)	Voolutugevus. Näitab ajaühikus ristlõiget läbinud elektrilaengu hulka.
U	U-arv W/m ² *K	Soojajuhtivus (soojuslähikandetegur). Näitab kui palju soojust läbib ühe ruutmeetri suurust piiret, kui temperatuuride erinevus soojusülekanne suunaga risti olevate pindade vahel on üks kelvin [5].

1. Valdkonna ülevaade

Viimastel aastatel on maailmas ja ka Eestis suurenenud taastuvatest allikatest elektrienergia tootmine. Aastatel 2012–2040 kasvab maailmas taastuvenergia poolt toodetud elektrienergia arvestuslikult 69% ning päikese abil toodetava elektrienergia kogus 2012–2040 7.5% aastas [6]. 2007. aastal oli elektrienergia kogumahust taastuvenergia osakaal 1,5%, 2011. aastal 12,7 ja 2014. aastal 14,8% [7], [8]. 2020. aastaks on Eesti võtnud kohustuse viia kogutarbimise taastuvenergia osa 17,6 protsendini. 56% taastuvenergia toodangust andsid 2014. aastal jäätmed, biomass ja biogaas, kuid suurima kasvuga oli päikeseenergia, mille maht kasvas 117 megavatt-tunnilt 524 megavatt-tunnini. Kokku on 2015 aasta esimese kvartali seisuga 211 päikesepaneelide abil elektrienergia tootjat (kellest enamus on mikrotootjad – paneelide võimsus kuni 11 kW) [9][10]. Eramu elektrienergia tarve sõltub elanike tarbimisharjumustest, sissetulekust, maja vanusest, elanike arvust ja vanusest [11].



Joonis 1. Taastuvenergia toodang Eestis 2009–2014. aastal (2015. aasta prognoositav). [12].

1.1. Päikesepaneelide jagunemine

Päikesepaneelide tehnoloogia on üks võimalus mitmest toota päikesest energiat. Tänu päikesepaneelidele on võimalik toota iseseisvalt sooja- või elektrienergiat ning seda majapidamises edukalt ära kasutada. Päikese abil toodetud energia tootmise tehnoloogiad jagunevad kolme põhilisse kategooriasse.

Esiteks päikesepaneelid, mille abil toodetakse elektrienergiat, on fotoelektrilised päikesepaneelid ehk PV paneelid, milles kasutatakse fotogalvaanilist elementi (ingl PV – *photovoltaic cell*). Teiseks on suure päikese intensiivsusega piirkondades elektrienergia tootmiseks ehitatud päikese soojuselektriijaamad (ingl CSP – *Concentrated solar power*), kus päikeselt tulev kiirgus koondatakse peeglite abil keskel asuvasse torni ning turbiinide abiga toodetakse elektrienergiat. Kolmas võimalus päikese abil energiat toota on

kasutada päikesekollektoreid (ingl STE – *Solar Thermal Energy*), mille abil köetakse maja või soojendatakse majapidamises kasutatavat vett [13].

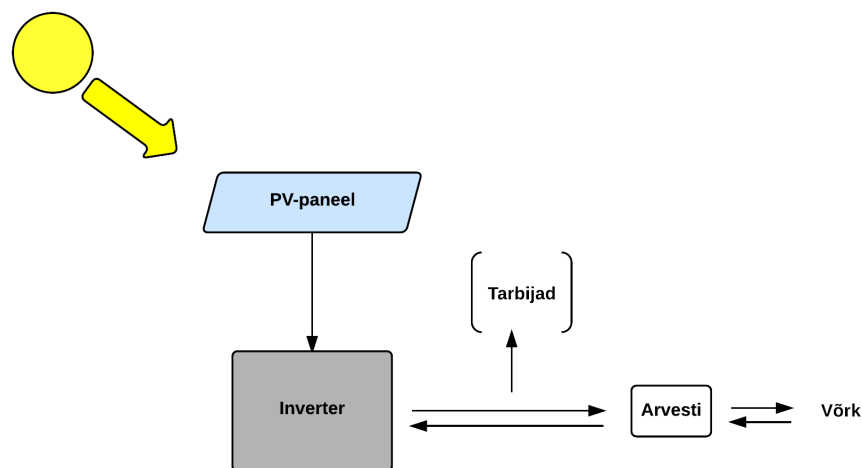
PV paneelide kasutus elektrienergia tootmiseks on saamas koduses majapidamises järjest levinumaks, sest paneelide hinnad aastatega langevad ning PV paneelidelt saadav elektri hind on saavutamas pariteeti võrgust ostetava elektrienergiaga [14]. PV paneelide tööpõhimõte seisneb pooljuhtide fotoelektriliste omaduste kasutamises, konverteerides päikeselt tuleva valgusenergia elektrienergiaks. Tänu sellele, et PV paneelidel puuduvad liikuvad osad, on nad väga töökindlad ning neil on väikesed hoolduskulud. PV paneelid kujutavad endast omavahel jadamisi ühendatud elemente, mis on paigaldatud metallkarkassi ning kaetud peegeldust vähendava pinnatöötuse klaasiga. Suurema osa PV-materjalist moodustab räni, mille tüübist sõltub ka päikesepaneelide hind. Räni jaotatakse amorfseks (a-Si), polü(multi) kristall (poly(mc)-Si) või monokristalliliseks räniks (c-Si). Tulenevalt omadustest on turul eri tüüpi elektrienergiat tootvaid päikesepaneele nagu näiteks mono-, multi- ja polükristallilised PV paneelid. Monokristallilised päikesepaneelid on tootmistsükli keerukuse tõttu kõige kallimad, kuid teiste paneelidega võrreldes efektiivsemad (efektiivsus 11...18%) [3].

1.2. On-grid ja off-grid süsteemid

Päikesepaneelide kasutusele võtmisel peab arvestama, et lisaks paneelidele on vaja paigaldada ka muud tehnilised seadmed ja ühenduskaablid, sest toodetava voolu ja pingega paremeetrid kõiguvad suurtes piirides ning ei ole sobivad meie majapidamises lubatud 230 V vahelduvvoolu kasutustingimustele [3]. PV paneelide tehnoloogial põhinevaid süsteeme klassifitseeritakse nende ühendatavuse poolest võrguga seotuteks (ingl *on-grid*), mille puhul ülejääv elektrienergia müüakse edasi võrku, ja võrgust eraldatuteks (ingl *off-grid*), mille puhul ülejääv elektrienergia kas kasutatakse või salvestatakse.

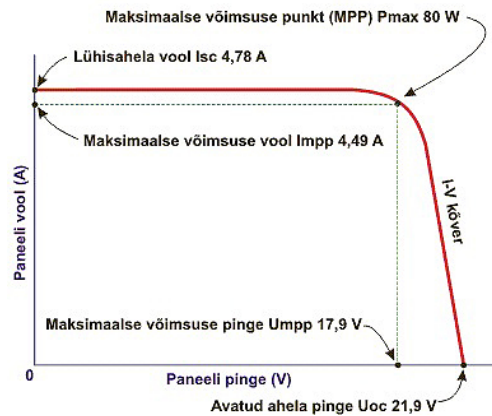
1.2.1. Võrku ühendatud päikeseelektriijaamad ehk on-grid süsteemid

Võrguga ühendatud päikeseenergia tootmissüsteemis PV paneelide poolt toodetud tarbimata elektrienergia müüakse edasi võrku või väikese tootlikkuse puhul ostetakse võrgust vajaminevat elektrienergia võrgust juurde. Eesti kliimas müüakse võrku peamiselt suvel, kui ilmad on päikesepaistelisemad, ning ostetakse juurde talvel, kui ilmad on pilves ja paneelide tootlikkus ei kata elektrienergia vajadust [3].



Joonis 2. Võrguga ühendatud ehk on-grid süsteem, milles tarbimata jäänud elektrienergia müüakse edasi võrku. [3].

PV paneelide valikul peab arvestama kui mitu vatti ühe ruutmeetri suurune paneel toodab (W/m^2). Päikesepaneeli maksumus ühe W kohta on sõltuvalt tootjariigist 0,6...3 €/W, millele lisanduvad veel transport, käibemaks ja muud kulud [15]. Päikesepaneelide elektrilisi omadusi iseloomustatakse amper-volt karakteristiku ehk I-V kõvera kaudu, milles märgitakse MPP (ingl *maximum power point*) ehk maksimaalne punkt, kus kattuvad lühis (I_{sc}) ja avatud ahel (U_{oc}). Selles punktis on toodetav võimsus (P_{max}) kõige suurem ning see sõltub temperatuurist ja päikesekiirguse intensiivsusest. Mida intensiivsem on päikesekiirgus, seda suurem on voolutugevus (I) ning mida madalam on temperatuur, seda suurem on pinge (U) [16]. Punktis saadud energia muudetakse väikeste kadudega võrguinverteris vahelduvvooluks (230V) või aku laadimiskontrolleris laadimispingele sobivaks alalisvooluks (12/24/48V) [17].



Joonis 3. 80 W päikesepaneeli I-V kõver, millele on märgitud MPP ehk maksimaalne võimsuse punkt, milles on PV paneeli tootlikkus kõige efektiivsem [17].

Inverteri ülesanne on muundada ühtlase suunaga PV paneelidelt tulev alalisvool (ingl *DC – direct current*) meie majapidamises kasutatavaks perioodiliselt muutuvaks vahelduvvooluks (ingl *AC – alternating current*). Inverter valitakse vastavalt sellele, kas süsteem on iseseisev või ühendatud võrguga. Võrguinverterid töötavad ilma akuta ning võrguga ühendamisel lisatakse süsteemi kahesuunaline arvesti, mille alusel registreeritakse voolu ostmine ja müümine. Võrguinverterite võimsused jäävad vahemikku 0,2...1500 kW [3].

Merit-orderi efekt

Tulenevalt taastuvenergia tootjate juurde tekkimisest suureneb taastuvenergiast pärineva elektrienergia kogus võrgus. Elektri ostu ja müügi hind määratakse eelmisel päeval järgmise päeva tundide kohta ning kujuneb tarbimise ja pakkumise suhte kaudu. Uuringud Saksamaal on näidanud, et suure koguse taastuvenergia müümisel võrku väheneb osaliselt elektrienergia hind järgmise päeva suhtes ning sellest tulenevalt on tähendatud ka tipptootmise aegadel gaasi hinna langust. Eelkõige on sellist efekti täheldatud PV paneelide kasutuse puhul keskpäeval ajal ning tuulegeneraatorite kasutuse puhul õhtusel ja öisel ajal [18], [19]. Selline efekt võib kaasa tuua tipptootmise tipaegadel olukorra, kus PV paneelide toodetud elektrienergiat ei saa enam suure võrgu koormuse tõttu ära müüa ning tootja peab leidma ise lahenduse kuhu energiat suunata. Üheks selliseks võimaluseks on näiteks elektriautode laadimine [20].

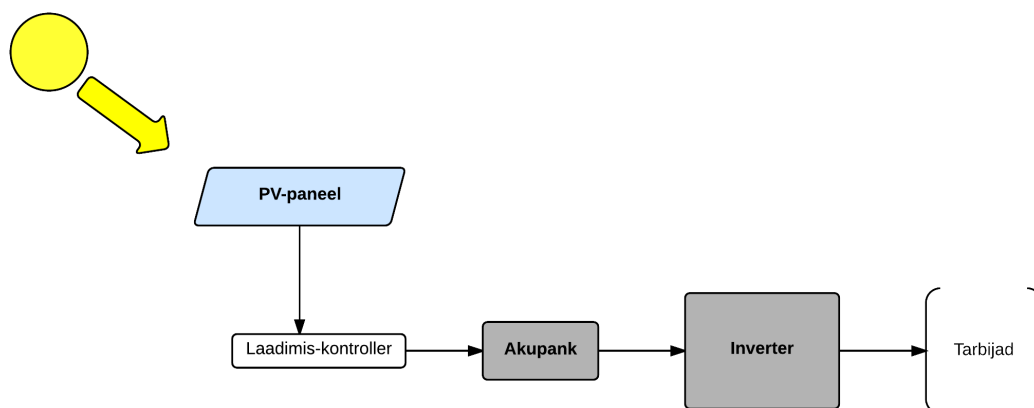
PHEV ehk seinast laetav elektriauto

On-grid süsteemi on võimalik ära kasutada PHEV (ingl *Plug-in hybrid electric vehicle*) ehk seinast laetavate elektriautode kasutuses, mille osakaal on viimastel aastatel järjest

suurenenud. Autode akude laadimisel suureneb koormus elektrivõrgule, kuna tavapärastelt soovivad inimesed autode akusid laadida tipptarbimise perioodidel ehk siis tööle naastes. On leitud, et luues päikesepaneelide abil laadimispunktid inimeste töökohtade või kodude juurde, on võimalik autosid laadida PV paneelidelt tuleneva elektrienergiaga päeval ajal ning seeläbi vähendada võrgu koormust suure tarbimise ja tootmise perioodidel [20].

1.2.2. Võrguga mitte ühendatud päikeseelektrijaamad ehk off-grid süsteemid

Võrgust eraldiseisvas süsteemis on võrku ühendamata PV paneelid, milles ei osteta ega müüda elektrienergiat. Selline süsteem on mõeldud majapidamisele, kus ühendamine üldisesse elektrivõrku on võimatu või liiga kallis. Off-grid süsteemis laeb laadimis-kontroller akupanka, mille tulemusel on võimalik elektrienergiat tarbida ka öösel ja pimedatel õhtutundidel, kui päikesepaneelid elektrienergiat enam ei tooda. [3]



Joonis 4. Off-grid süsteem, mis ei ole ühendatud võrguga ning mis kasutab elektrienergia salvestamiseks akupanka [3].

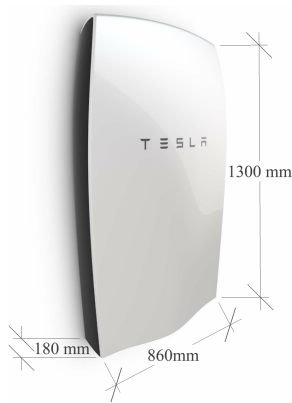
Akude kasutus

Päikesepaneelide toodetud elektrienergia tarvitatakse esmaselt ära majas olevate tarbijate poolt. Kui toodetud energia hulk on suurem kui elektrienergia nõudlus, siis ülejääv energia salvestatakse akudesse. Olukorras, kus akud on täis laetud ning süsteem on võrguga ühendatud, müüakse ülejääv elektrienergia edasi võrku. Kui aga päikest enam ei paista ja paneelid energiat juurde ei tooda, hakatakse puudujäävat elektrienergiat akudest juurde võtma. Kui ka akudest ei piisa, siis ostetakse võrgust elektrienergiat juurde [21].

Eestis on levinud metall-hübriid ja liitium-ioon akud. Eramu omanikud, kes soovivad paigaldada lisaks taastuvenergia süsteemile elektrienergia salvestamiseks akusid, peaksid valima süvatsükli pliiakud ning VRLA akud (ingl *Valve Regulated Lead acid Battery*), sest need taluvad pikaajalist väikese vooluga tühjakslaadimist ning võivad pikemat aega olla lubatud tühjenemise piiril. Akude valikul tuleb meeles pidada, et akupank peab koosnema ühesugustest akupatareidest, mis on ka töötamisaja poolest ühesuguse kasutusega. Keskmise suurusega koduelektrijaamades kasutatakse tavaliselt 12 V akupatareid mahutavusega 75...230 Ah ja 6 V akupatareid mahutavusega 200...400 Ah. Suuremate süsteemide korral on vaja kasutada 2 V nimipingega ja suure mahutavusega 500...3500 Ah akusid. Odavate püsitoiteakude kasutusiga on tavaliselt 2–6 aastat ning parematel akudel 9–20 aastat. Akude kasutuse suurim probleem seisneb soetamise hinnas, sest kvaliteetsemad akud on kallid. Kui oleks tegemist Lõuna-Eestis asuva päevase 1820 Wh tarbimisega suvilaga, tuleks paigaldada 705W võimsusega PV paneelid. Sellise võimsusega paneelide kasutuse juures tuleks süsteemi paigaldada akupank 12x625 Ah, mille maksumuseks kujuneb ca 3100 € [3].

Tesla Powerwall

Eramutes kasutatavad akud on enamasti suured ja kallid ülevad pidada. 30. aprillil 2015 esitles TESLA, maailma üks juhtivamaid elektriautode tootjaid, uut tüüpi liitium-ioon akusid Powerwall, mida on lihtne paigaldada ning mis ei nõua erilist hooldust. 7 kWh akupanga maksumus on 3000 dollarit ning 10 kWh mudeli hind 3500 dollarit. Süsteemi maksimaalne võimsus on 3,3 kW ning kui kodune tarbimine on tipptarbimise perioodidel suurem, siis on lihtne ühendada ka kaks või enam Powerwall süsteemi kokku [22]. Aku soetamisel tuleb arvestada, et PV paneelide ühendamiseks tuleb lisaks akule juurde soetada ka veel inverter, kaablid ja muud ühendused. Arvutused on näidanud, et sõltuvalt riigist, maksudest ja elektri hinnast on Powerwall akude kasutuse tasuvusperiood koduses majapidamises mitmeid aastaid [23].

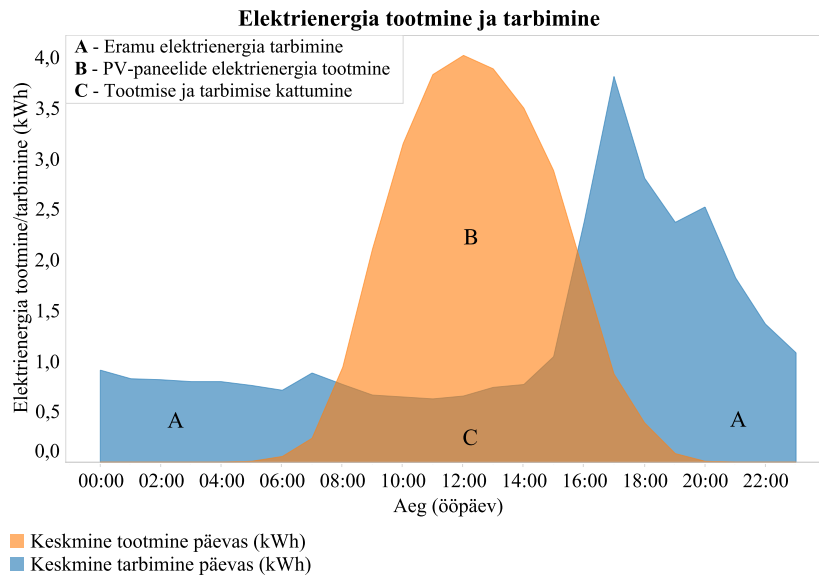


Joonis 5. 1. mai 2015 avalikustatud Tesla ettevõtte loodud Powerwall [22].

1.3. Tootmise ja tarbimise ajastamise probleem

PV paneelide poolt toodetud ja inimeste tarbitud elektrienergia kasutus sõltub päevasest päikese intensiivsusest ning elanike tarbimisharjumustest. Peamine probleem päikeseenergia maksimaalses kasutamises seisneb ajastamises, sest PV paneelide tootlikkuse tipud ei lange kokku hoone energiavajaduse tippudega. Päevas tekivad kaks tarbimise tippaega: esiteks hommikuti enne tööle minemist (07:00–08:00) ning teiseks pärast töölt koju jõudmist (17:00–18:00). Soovides vähendada kasutatava elektri maksumust, on võimalik muuta seadmete ajastamist sõltuvalt odavamale elektri hinnale või PV paneelide olemasolu korral kasutades suure tarbimisega seadmeid siis, kui käike paistab [24].

Joonis 6 iseloomustab PV paneelide ajalist kattuvust elektrienergia tarbimise tippudega. "A" märgib eramu poolt tarbitud elektrienergiat, mille moodustavad erinevad tehnosüsteemid ja elektroonikaseadmed. "B" tähistab PV paneelide poolt toodetud elektrienergiat ning "C" näitab, kui palju tootmine ja tarbimine kattuvad.



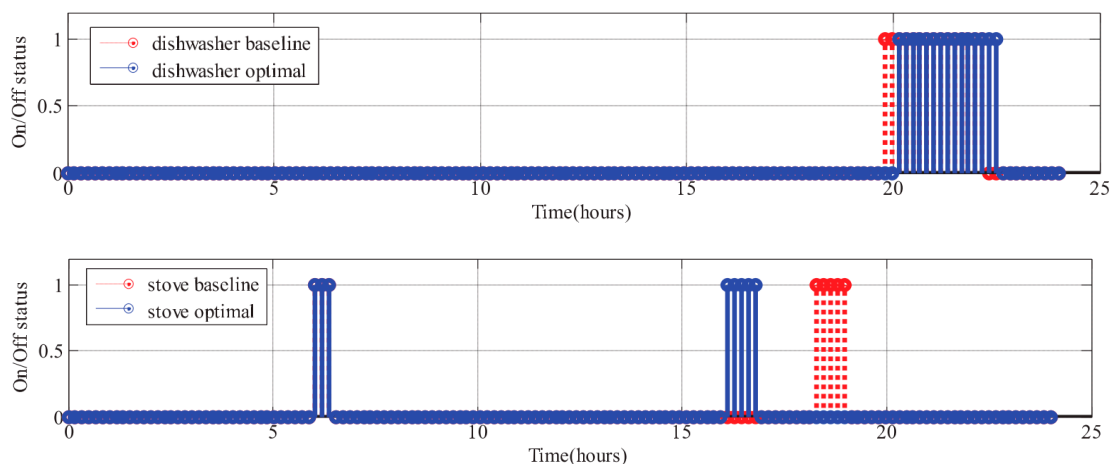
Joonis 6. Tüüpiline aastane elektrienergia tootmine ja tarbimine ööpäevas (uuritava eramu kõikide 2014. aasta päevade keskmise).

Päikesepaneelide tootlikkuse ja eramu elektrienergia tarbimise kokkuvõimise juures peab arvestama kahte põhilist kriteeriumi. Esiteks, kui suur on kohapeal toodetud energia hulk ehk palju suudavad päikesepaneelid erinevatel aegadel elektrienergiat toota ning teiseks, kui suur on toodetud energia kasutus ehk palju sellest toodetud energiast on võimeline maja ära tarbima enne, kui paneelide toodetud energia võrku edasi müüakse. [25]

1.3.1. Elektriseadmete ajastamine uurimistöö näitel

Setlhaolo, D., Xia, X., Zhang, J., 2014. aasta artiklis [26] analüüsiti kümne seadme elektrienergia tarbimist ja elektrienergia muutmist. Töö eesmärk oli leida parimad kellaajad seadmete kasutamiseks, et vähendada 25% ulatuses elektrienergia kuluvat maksumust. Tänu teadmisele, et elektrienergia hind on tunnise sammuga muutumises ning alati üks päev ette teada, saab muuta elektrit tarbivate seadmete kasutust. Arvutuste tegemisel pandi paika 10-minutiliste intervallidega seadme jaoks kindel kellaeg, mille sees kasutus peaks toimuma ning arvestati odavaimat võimalikku elektrienergia hinda (Lõuna Aafrika Vabariigi elektrienergia hinna järgi). Analüüsid kasutati kindlat algoritmi (ingl MINLP – *mixed integral nonlinear programming*). Selgus, et eramus on võimalik vähendada elektrienergiale kuluvat maksumust rohkem kui 25%. Monitoorimise tulemusel leiti, et kõige tulusam on seadmete kasutust ajastada õhtuses tipptarbimise perioodis. Joonisel 7 näitavad katkendlikud punased jooned seadmete normaalselt kasutatud tööaega ning sirged sinised jooned optimaalset kasutuse kellaega.

Väljavõte nõudepesumasina kasutusest näitab, et parem kasutusaeg oli reaalsest kasutusest üks tund hiljem. Köögiahju analüüsidest leiti, et seda kasutati õhtuti 18:00–18:40, kuid MINLP algoritmi kasutades saavutati elektri hinnast tulenev odavam kasutusaeg 17:00–17:40 juures.



Joonis 7. Näide nõudepesumasina ja köögiahju kasutuse optimeerimisest, et hoida kokku elektrienergiat kuluvat hinda tipparbimise kellaegadel [26].

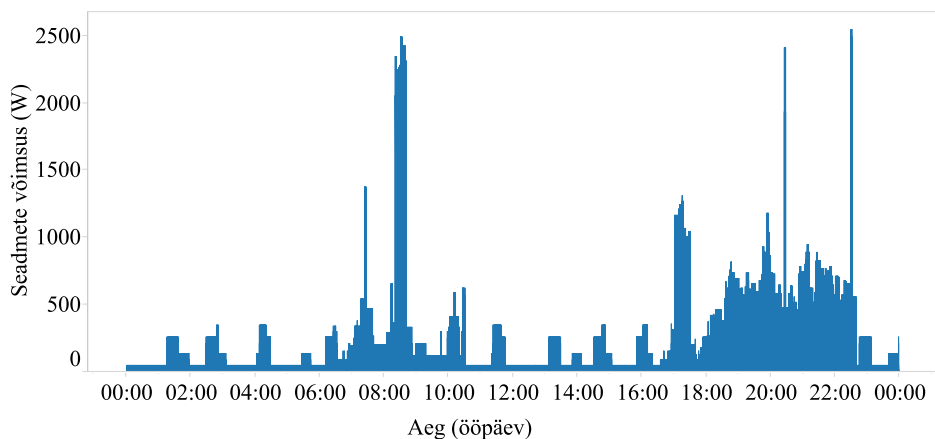
1.4. Elektrienergia tarbimine

Energia tarbimine eramus on ajaliselt väga muutlik ning keskmiselt on 80% elamu energiatarvest seotud siseruumide ja boilerivee soojendamisega. Elamu energia ja elektrienergia tarve sõltub maja arhitektuurist, ilmast, kasutatavatest elektriseadmetest, elanike arvust ja nende käitumisharjumustest [27]. Üldiselt kasutavad enamik seadmeid individuaalselt majapidamises vähem kui 1 kWh elektrienergiat päevas, kuid kõikide seadmete samaaegsel töötamisel tõuseb tarbimise hetkeline võimsus mitme kilovatini. Eramu elektrienergia tipp langeb kokku energiakulukate seadmete, nagu näiteks pliidi, ahju ja teiste köögiseadmete samaaegse kasutamisega, mille tulemusel võib elektrivoolu töö ajaühikus suureneeda isegi 10 kilovatini [28]. Lisaks eeltoodule moodustuvad elektrienergia tarbimise tipud, näiteks suurte sündmuste ja tähtpäevade korral, kui pere on kodus koos sinna saabunud külalistega. Sellisel ajal valmistatakse tavapäraselt köögis toitu, suurendatakse ventilatsiooniseadme võimsust ja lülitatakse saunas sisse elektrikeris. Sääraste tippude tasandamiseks ei ole mõistlik kasutada päikesepaneele, sest aastas on tipptarbimise perioode suhteliselt vähe ning sellised suurema tarbimisega kaasnevad üritused toimuvad ajaliselt perioodidel, kui paneelide tootlikkus on madal.

Eramus kasutatavaid elektroonikaseadmeid saab liigitada nii tööajast kui ka aastaajast sõltuvaks. Näiteks on öösel enamik seadmeid ooterežiimil ning külmkapp töötab temperatuuri hoidmisel sarnaste tsüklitega. Paljud seadmed sõltuvad inimeste käitumisharjumustest, mis on samuti sarnase ja korduva rütmiga. Peaaegu kindlatel aegadel vaadatakse televiisorit, pannakse ärgates tuled põlema ja õhtul enne magama minemist lülitatakse välja kõik elektroonikaseadmed [28]. Tehnoloogia arengu ja inimeste tarbimisharjumuste muutumisega on tänapäeval kodudes ligi kolm korda rohkem elektrienergia tarbijaid, kui oli seda 30 aastat tagasi. Areng on küll toimunud elektriseadmete energiatõhususe parandamisel, kuid inimeste käitumisharjumuste, hooletuse või lihtsalt mugavuse tõttu unustatakse tubades tuled põlema ja jäetakse uued elektril toimivad seadmed võrku ooterežiimile [29].

1.4.1. 22 kodu elektrienergia kasutus minutis

Elektrienergia võimsust 1 minuti sammuga analüüsiti I.Richardsoni, M.Thomsoni, D. Infieldi ja C. Cliffordi teadustöös [30], milles monitooriti Ida-Inglismaal aasta jooksul 22 kodu elektrienergia tarbimist. Uurimistöö jaoks mõeldi välja energiatarbimise mudel ning tekitatud andmeid võrreldi realselt tarbitud elektrienergia tulemustega. Mõõdetud tulemuste põhjal leiti, et inimeste tarbimisharjumused on väga sarnased. Hommikused energiatarbimise tipud tekkisid kell 07:30 ja 08:30 ning õhtusel perioodil kell 17:30. Ööpäeva kõige suurem tarbimine langes õhtusele perioodile vahemikus 17:00–22:30. Leiti, et elektrienergia vajadus kodus sõltub otseselt seal viibivatest inimestest, nende käitumisharjumustest ning seadmetest mida nad kasutavad. Näiteks unustati tulesid põlema või kasutati söögi valmistamiseks elektripliidi asemel gaasipliiti. Keskmist elektrienergia tarbimist iseloomustab joonis 8.






Joonis 8. Elektrienergia keskmine võimsus minutiste intervallidega päevas 22 kodu keskmistatud tulemuste näitel Ida-Inglismaal [30].

1.5. Elektrienergia ostmine ja müümine

1.5.1. Elektrienergia ostmine võrgust

Elektrienergia ostmisel Eestis moodustub selle maksumus kolmest osast: võrguteenusel, elektrienergiast ja riiklikest maksudest ning tasudest (elektriaktsiis, taastuenergia tasu ja käibemaks) [31].

Nimetus	Maksumus
 Elektrienergia	42.81 €
 Võrguteenus	57.74 €
 Taastuenergia tasu ja elektriaktsiis	15.22 €

Joonis 9. Elektrienergia arve näide, mis moodustub kolmest makstavast osast.

Elektrienergia hind sõltub elektri hinnast börsil, klientide elektritarbimisest ja elektrimüüjate konkurentsist. Võrguteenuse hinna kooskõlastab igal aastal konkurentsiamet ning elektrienergiat tarbides kujuneb kaugloetava tunniarvesti puhul igale tarbijale isiklik tunnihind [31]. Selle tulemusel on võimalik elektrienergia tarbimisel tulenevat kulu ise mõjutada, sest iga tunni tarbimine korrutatakse sama tunni börsihinnaga. Hind kujuneb Nord Pool Spot Eesti võõndi tunnihindade järgi [32]. Elektri börsihind on olemusel dunaamiline, sõltudes näiteks riikidevahelisest ülekandevõimsusest, elektri jaamade või merekaabli hooldus- ja avariitöödest, üldisest majanduse olukorrast ja ka ilmast [33].

Võrguteenuse hind kujuneb elektrivõrgu töökindlust tagavate remondi ja taristu ülalhoidmise kuludest. Võrgutasu kooskõlastab Eestis Elering koostöös Konkurentsiametiga kolmeaastaseks perioodiks ning hinna suurust ja põhjendust kontrollitakse korra aastas [34].

Taastuenergiatasu on elektritarbijate poolt rahastatud tasu, mis tuleneb elektrituruseadusest ja mille eesmärk on rahastada taastuenergia toetust [35]. Eleringi analüüsi ja tootjate poolt esitatud andmete põhjal määrab Elering iga aasta 1. detsembriks taastuenergia tasu. Tasu suurus kujuneb eeldatavast toetuste rahastamiseks kuluvast summast, otseliini kaudu tarbitud elektrienergia mahust eelneva aasta ühe kilovatt-tunni kohta ning toetuste rahastamiseks laekunud summast [36].

Tabel 2. Taastuenergia tasu 1. jaanuar–31. detsember 2015 [37].

Taastuenergia tasu	0,89 eurosent/kWh
Käibemaks (KM)	20% (0,178 eurosent/kWh)
Kokku (Taastuenergia tasu + KM)	1,07 eurosent/kWh

Võrdlusena 2015. aastale oli eelmistel aastatel tasu kokku: 2014 – 0,92 €/kWh, 2013 – 1,04 €/kWh, 2012 – 1,16 €/kWh [38]-[40].

Lisaks taastuenergiatasule on riik kehtestanud ka elektriaktsiisi, mis on vastavalt tubaka-, alkoholi-, kütuse- ja elektriaktsiisi määra järgi (1. märts 2010) 4,47 EUR/MWh elektrienergia kohta, millele lisandub käibemaks [41]. Aktsiisi koguvad tarbitud elektrienergia pealt võrguettevõtjad, kes kannavad raha edasi riigile ning millest rahastatakse keskkonnahoidu [31], [42].

1.5.2. Elektrienergia müümine võrku ja taastuenergia toetus

Euroopa Liidu energeetikavaldkonna eesmärk on ladesalt toimiva elektrituru teke, kus tootjate konkurents on tagatud elektrienergia kättesaadavus inimestele ning selle läbipaistev hind kõigile inimestele. Eesti jaoks on selle eelduseks ühtne Balti- ja Põhjamaade elektritur, mille integreerimist haldab ettevõtte Elering AS [43].

PV paneelide paigaldamisega saab tekitada võrguga liitumispunktis kaheksakuulise liidluse, kus võrgust ostetakse elektrit juhul, kui oma toodetud elektrist tarbimise

katmiseks ei piisa ning võrku müüakse olukorras, kus toodetakse rohkem, kui endal vaja on. Võrgust võetud ja võrku antud energiakogused mõõdab võrguettevõtja, kellega sõlmitakse vastavasisuline leping [43]. Elektrienergia tootjaid võib jagada kaheks:

- Mikrotootja on väikeses koguses elektrienergiat võrku müüv tootja. Võimsus kuni 11 kW ja peamiselt eramu tarbeks.
- Suurtootja toodab elektrit peamiselt müümiseks tootmisseadmetega ning mille võimsus on rohkem kui 11 kW.

Eesti Energia ostab mikrotootjatelt võrku antud elektrienergiat Nord Pool Spot Eesti piirkonna börsihinnaga, millest lahutatakse maha elektrienergia müügilepingus kokkulepitud marginaal [43]. Lisaks müüdud elektrienergiale makstakse toetust saldeeritud võrku antud toodangu eest iga tunni kohta. Võrreldakse iga tunni tootmist ja tarbimist. Kui tootmine ületab tarbimist, siis see müüakse edasi võrku ning kui tarbitakse ära kõik toodetud taastuvenergia, siis selle eest tasu ei maksta [44]. Päikeseenergia abil toodetud taastuvenergia toetuse suurus on Elektriturseaduse §59 alusel on 0,0537 EUR/kWh ning seda maksab välja põhivõrguettevõtja Elering AS [44].

2. Materjal ja metoodika

2.1. Katse püstitus

Uuritav hoone on Eesti esimene sertifitseeritud passivmaja aadressil Metsa tn 5A, 63305, Põlva (58°3'0.28'', 27°3'24.85'') [45]. Tegu on kolmekorruselise eramuga, mille kavandamisel on esimestest ehituslikest etappidest alates järgitud energiatõhususe põhimõtteid. Hoone katusele on paigutatud fotoelemendid elektrienergia tootmiseks ja primaarenergiavajaduse vähendamiseks. Kõetavat pinda on 284,5 m², tubade arv on 6 ja passivmaja valmimisaasta on 2013. Maja arhitektid on Georg W. Reinberg ja Martha Enriquez Reinberg [46]. Eramu kõogi ja tehnosüsteemide elektroonika on valitud peamiselt A ja kõrgema klassi energiamärgisega. Maja kütmiseks kasutatakse solar thermal päikesepaneelid ning päikese puudumisel ja madalate välistemperatuuride korral maasoojuspumpa. Maja ehitustehnilised andmed on välja toodud tabelis 3. Eramus ei kasutata elektrienergia salvestamiseks akusid ning kõik toodetud energia tarvitatakse või müüakse suure tootlikkuse korral edasi võrku.



Joonis 10. Uuritav eramu, Eesti esimene sertifitseeritud passivmaja Põlvas.

Tabel 3. Hoone ehitustehnilised andmed [47]:

Piirdetarindid	
Sein	$U = 0,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Katus	$U = 0,08 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Vundament	$U = 0,07 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Põrand	$U = 0,09 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Aken	$U_{\text{raam}} 0,6 \dots 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}),$ $U_{\text{klaas}} 0,54 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}),$ $g 0,50$
Õhulekkearv	$n50 = 0,36 \text{ h}^{-1}$
Tehnosüsteemid	
Maasoojuspump	2 x 80m vertikaalne kollektor, 5,9 kW
Päikesekollektorid	12m ² katusega integreeritud, 13m ² vertikaalne
PV paneelid	90m ²
Sissepuhke-väljatõmbe ventilatsioon	(PHI: 93% soojatagastus)

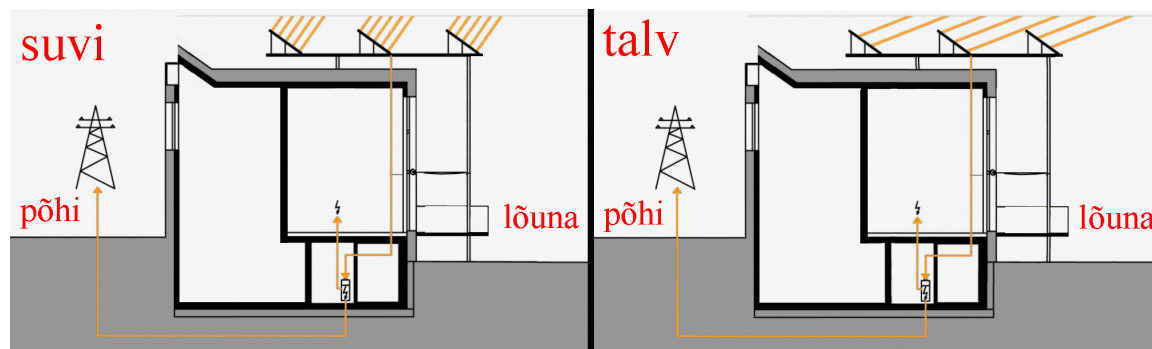
2.2. Uuritava objekti päikesepaneelide iseloomustus

Maja katusele on paigaldatud lõuna suunas 38° nurga alla 66 Sunmodule Plus SW 196 Vario poly päikesepaneelid, mille koguvõimsus on 12,94 kW. Süsteem on ühendatud Solutronic SOLPLUS 120 inverteriga, mille abil muudetakse päikeselt tulev energia majas kasutatavaks elektrienergiaks [48]. Uurimistöös on kasutatud PV paneelide 2014. aasta ühe tunni tootlikkuse andmeid ja neid on võrreldud sama tunni tarbimise andmetega. Lisaks saadi <http://www.suntröl-portal.com/> veebilehe serverist viie minuti sammuga PV paneelide tootlikkuse andmed ning käidi kohapeal monitoorimas ka ühe minuti sammuga seadmete võimsust. Uurimistöös kasutatakse viie minuti jooksul toodetud või tarbitud kilovatt tunni esitamiseks ühikut kWh/5min ning tarbitud vatt tunni esitamiseks ühikut Wh/5min.



Joonis 11. 12,94 kW võimsusega päikesepaneelid uuritava eramu katusel [46].

Arhitektid on eramu dimensioneerinud nii, et PV paneelid on suunatud täpselt lõunasse ning paneelid on paigutatud üksteise suhtes vahekaugusele, kus vari ei kataks ka kõige madalama päikese korral selle taga paiknevat paneeli.



Joonis 12. Päikesekiirguse langemine suvel ja talvel uuritava eramu PV paneelidele [46].

2.3. Elektrienergia tarbimine eramus

2.3.1. Elektrienergia tarbimise monitoorimine tunni täpsusega

Uurimisobjekti on paigaldatud kaugloetav arvesti, mille abil registreeritakse igas tunnis tarbitud elektrienergia kogus kilovatt-tundides. Tänu kaugloetavatele seadmetele toimub arveldamine arvesti loetud koguste järgi [49]. Kasutatakse Landis-Gyr E450 arvestit, mis registreerib tunni täpsusega elektrienergia ostmise ja müümise.

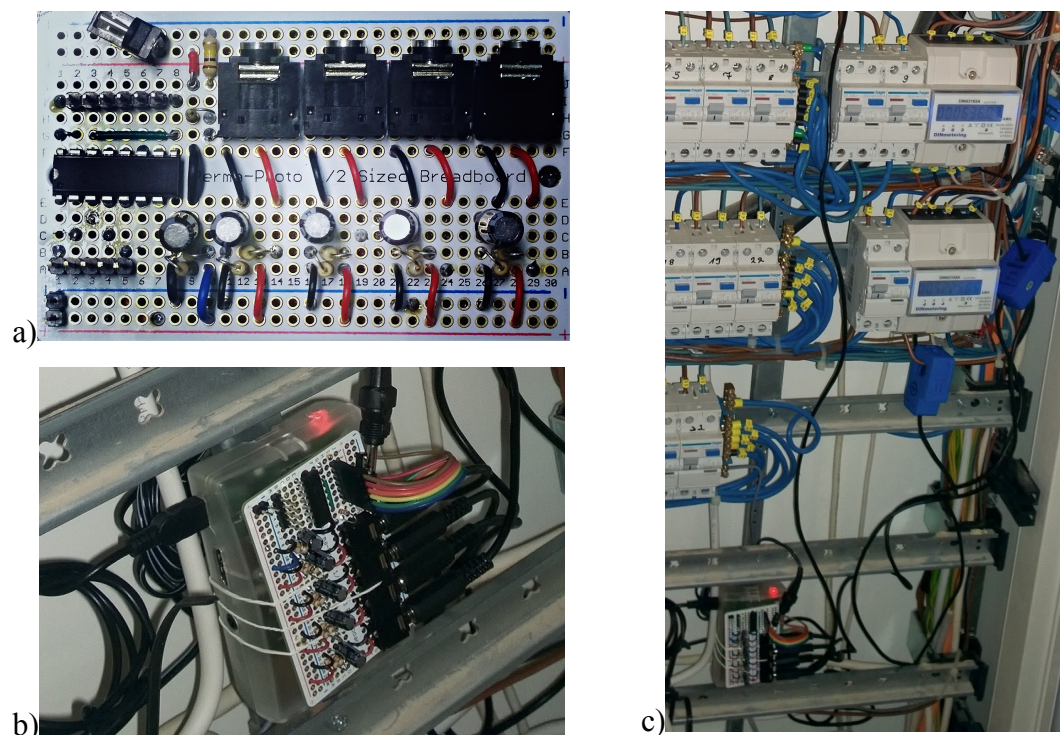


Joonis 13. Elektriarvesti Landis-Gyr E450 tunni andmete tootmise ja tarbimise monitoorimiseks eramus.

2.3.2. Elektrienergia tarbimise monitoorimine minuti täpsusega

Kaubanduses on levinud erinevat tüüpi elektrikulu monitoorimise seadmed, mida on lihtne paigaldada pistikupesa ja energiat tarbiva seadme vahele. Odavamad seadmed

näitavad ja summeerivad tulemuse ning kallimad seadmed võimaldavad monitooritavat seadet ka internetist juhtida. Uurimistöö raames otsiti loggerit, mis suudaks minuti täpsusega seadme elektrienergia võimsust monitoorida ning csv, txt, xlsx või mõne muu faili formaadina edastada. Tulenevalt vajaminevate seadmete väga kallist turuhinnast otsutati vastav seade raspberry-pi miniarvuti abil ise valmis ehitada. Selle jaoks osteti juurde 4 vooluandurit, pingetrafo, analog-digital konverter, mikrokontroller, toide ja SD kaart ning muud elektroonika komponendid. Valmis ehitatud prototüüp hakkas küll tööle, kuid kahjuks tõrgetega, mille põhjuseks olid tõenäoliselt liiga paksud eramu seinad, mis ei taganud stabiilset WIFI signaali.



Joonis 14. Esimene katsetus mõõta raspberry-pi miniarvutile ehitatud seadmega elektrienergia tarvet: a) ise ehitatud prototüüp; b) prototüüp elektrikilbis ühendatud raspberry-pi miniarvutiga; c) elektrikilpi paigaldatud prototüüp koos mõõtmistangidega faaside ümber.

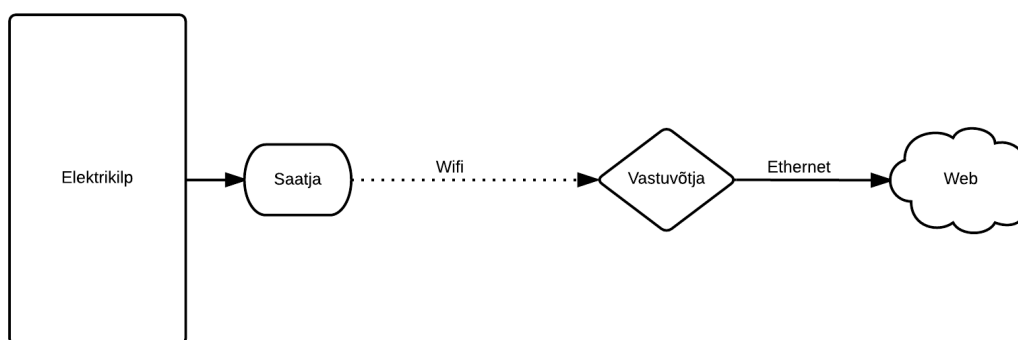
Järgmise variandina soetati viis Efergy Technologies Limited energiakulu monitoorimise seadet. Seadmete abil monitooriti nädalaste tsüklite kaupa eramu seadmete võimsust 1-minutilise sammudega. Minutiliste võimsuse andmete põhjal arvutati seadmete tarbimisandmed viie minuti kohta. Seadmete kalliduse tõttu osteti ainult viie grupi

mõõtmiseks sobivad saatjad ja ampertangid, mida käidi perioodil 24.03–12.05.2015 igal nädalal Põlvas uutele gruppidele ümber seadistamas.

Tabel 4. Efergy elektrikulu monitoorimisseadme tehnoloogilised andmed.

Mudeli nimi	Engage hub
Mudeli number	HH-1.0
Sagedus	433,5 MHz
Edastusaeg	10, 15 või 20 sekundit
Edastus distants	40...70m
Täpsus	+/- 10% (kalibreerimisel täpsus kuni 2%)

Seade koosneb ampertangidest, mis kinnitatakse elektrikilbis olevate mõõdetavate gruppide faasijuhtmete ümber. Seade on võimeline monitoorima kaudsel meetodil nii ühte faasi kui ka summeerides kolme faasi. Ampertangid ühilduvad saatjaga, mis saadab info edasi vastuvõtjasse. Tehnorumis asuv vastuvõtja on ühendatud võrguga, mille abil laetakse info automaatselt tootja veebiserverisse www.efergy.com. Veebist on võimalik andmed 1 minuti täpsusega CSV failina alla laadida.



Joonis 15. Efergy elektrivoolu monitoorimisseadme lihtsustatud skeem.



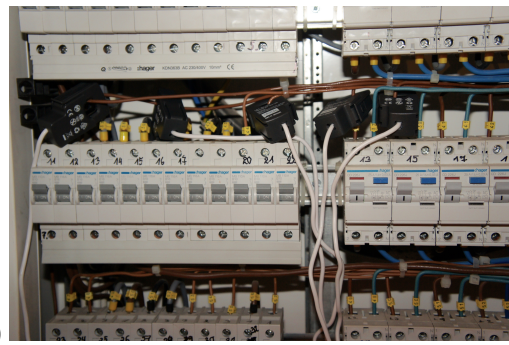
a)



b)



c)



d)



e)



f)

Joonis 16. Autori fotod mõõteseadmetest: a) eramu elektrikilp; b) eramu elektrikilp, millel on katted pealt võetud; c) efergy saatjad, millesse kinnituvad ampertangid; d) ampertangid kinnitatuna faasijuhtmete külge; e) efergy saatjate vastuvõtja, mis annab info edasi ethernet kaabli abil võrku; f) efergy vastuvõtja ühendatud ethernet kaabli abil võrku.

2.3.3. Minuti sammuga monitooritud elektroonikaseadmed

Kuuel nädalal oli võimalus mõõta minuti sammuga seadmete võimsust (tabel 5). Esimesel nädalal mõõdeti saatjate ja ampertangide piiratud arvu tõttu ainult ühte gruppi. Selleks seadmeks valiti maasoojuspump, sest talv hakkas lõppema ning pump, mis on ühendatud päikesekollektorite süsteemiga, hakkab tööle ainult siis kui vähese päikese tõttu ei suudeta paagis vajalikku temperatuuri etteantud temperatuuril hoida. Teisel nädalal osteti juurde kaks saatjat ning monitooriti kolme gruppi korraga. Kolmandal nädalal selgus, et Efergi mõõteseadme vastuvõtjat saab siduda kuni viie saatjaga, mille tulemusel osteti juurde veel 2 saatjat ning monitooriti korraga viit gruppi. Monitooritavad seadmed valiti nende kasutuse tiheduse ning võimsuse järgi.

Tabel 5. Nädalad, millal mõõdeti minuti sammuga peamiste elektrit tarbivate seadmete kasutust.

Nädal	Monitooritav seade
24/03/2015–05/04/2015	Maasoojuspump
06/04/2015–12/04/2015	Fassaadi valgus, puude ja põõsaste valgus, esiku valgus
13/04/2015–19/04/2015	Külmkapp, nõudepesumasin, köögiahi, valgus (köök, elutuba), pesumasin/kuivati
20/04/2015–26/04/2015	Veinikülmik, elutoa televiisor (koos digiboxi ja võimendajaga), valgustus 2. korrusel (garderoob, tuba 1, koridor, galerii), trepi valgus, ventilatsioon
27/04/2015–03/05/2015	Saunakeris, pliit, köögikubu
04/05/2015–10/05/2015	Kohvimasin, 2. korruse vannitoa pistikud (kasutatakse fööni, kuid uuritud nädala jooksul ei kasutatud), esimese korruse koridor (kasutatakse tavaliselt tolmuimejat, kuid uuritud nädala jooksul ei kasutatud).

Tabelis 6 on välja toodud monitooritud seadmete tehnilised omadused. Tegemist on väga energiatõhusa hoonega ning selle jaoks, et saavutada minimaalset elektrienergiale kuluvat hinda, on kasutatud ka parimaid turul olevaid seadmeid.

Tabel 6. Ühe minuti täpsusega tarbimist monitooritud seadmete tehnilised omadused.

Seade	Täpne nimetus	Võimsus	Energiaklass
Nõudepesumasin	SN66U094EU	2400 W	A+++
Külmkapp	Siemens KS36VAI41	Võimsus 90 W 75 kWh aastas	A+++
Veinikülmik	Bosch KTW18V90	Võimsus 80 W 153 kWh/aastas	B
Sügavkülmik	Siemens GS36NAI30	Võimsus 90 W 234 kWh/aastas	A++
Köögiahi	Siemens HB78G1570S	Võimsus 3650 W	A
Pliit	Siemens EH601ME21E	Võimsus 7200 W.	Puudub
Pesumasin	Siemens WM16Y890DN	2300 W 189 kWh/aastas	A+++
Trummelkuivati	Siemens WT48Y890DN	90 kWh/aastas	A+
Keris	SAWO TH9105Ni	15 kW	Puudub
Televiisor	Philips 5000 series	Võimsus 55 W Ooterežiimi tarbimine 0.5W	Puudub
Võimendaja	Sony STRDH720	135 W	Puudub
Kohvimasin	ENA5	Võimsus 1450 W	Puudub
Maasoojuspump	Viessmann Vitocal 300 G	Küttevõimsus 5,9 kW	Puudub
Ventilatsioonisüsteem	Paul Novus 300	0,23 W/m ³ h (93% soojustagastus)	Puudub
Tolmuimeja	Philips FC 8726	650 W	A
Föön	SalonDry Active	1800 W	Puudub

2.3.4. Intervjuu Eva Leisiga

Tarbimisandmete paremaks iseloomustamiseks toimus pereema Eva Leisiga intervjuu, mille käigus uuriti pere nädalast käitumismustrit ning seadmete kasutust.

Mis kellast pere ärkab tööpäevadel ja nädalavahetustel?

Esmaspäevast reedeni ärगतakse 06:50 ja nädalavahetustel kell 08:00–08:30.

Millised on tavalised hommikused tegevused ja mis kellani seadmed hommikul töötavad?

Hommikul lülitatakse köögis sisse kohvimasin ja elutoas televiisor, mis mõlemad töötavad keskmiselt kella 08:00ni. Talveperioodil, kui väljas on hommikuti pime, lülitatakse sisse ka LED valgustus ja elutoas seinalambid. Hommikuti pannakse tavaliselt tööle ka nõudepesumasin.

Millised on päevased toimetused?

Pereema on kodune, mis tähendab, et terve päeva jooksul on keegi tavaliselt kodus, mille käigus toimub koristamine, söögi valmistamine jne.

Mis kellast toimub õhtusöök ja mis on õhtused tegevused?

Õhtusöök toimub sõltuvalt päevast 17:00–18:00 ning kell 17:00–23:00ni käib elutoas televiisor. Peamiselt tehakse sööki õhtuti ahjuga ning 1–2 korda nädalas ka pliidiga, mil pliidi kasutamise ajal pannakse tööle ka köögikubu.

Millised on nädalavahetuse tegevused, mis üldjoontes korduvad?

Tavaliselt toimub nädalavahetustel pesu pesemine. Talvel kasutatakse pesu kuivatamiseks kuivatit, suvel viib pereema riided välja kuivama.

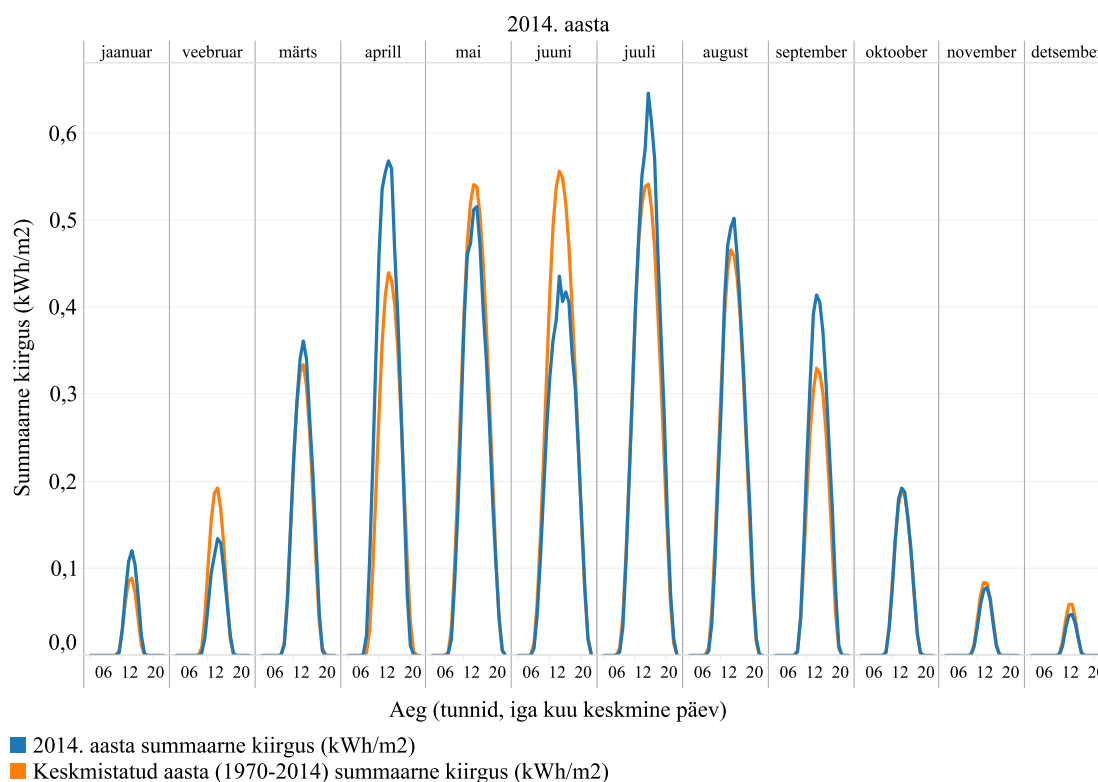
Kas on ka muid iganädalasi tegevusi?

Pere käib saunas keskmiselt 4–5 korda nädalas ning kasutatakse vastavalt vajadusele elektrikerist ja aurusauna. Sauna külastuse ajal vaadatakse maja teist televiisorit, mis on ühendatud võimendaja ja kõlaritega. Samuti on sauna eesruumis B-klassi veinikülmik. Öisel ajal põleb maja ümber puude ja põõsaste, fassaadi ning väliskoridori LED-valgustus.

2.4. Päikesekiirus 2014 ja keskmistatud aastal (1970–2014)

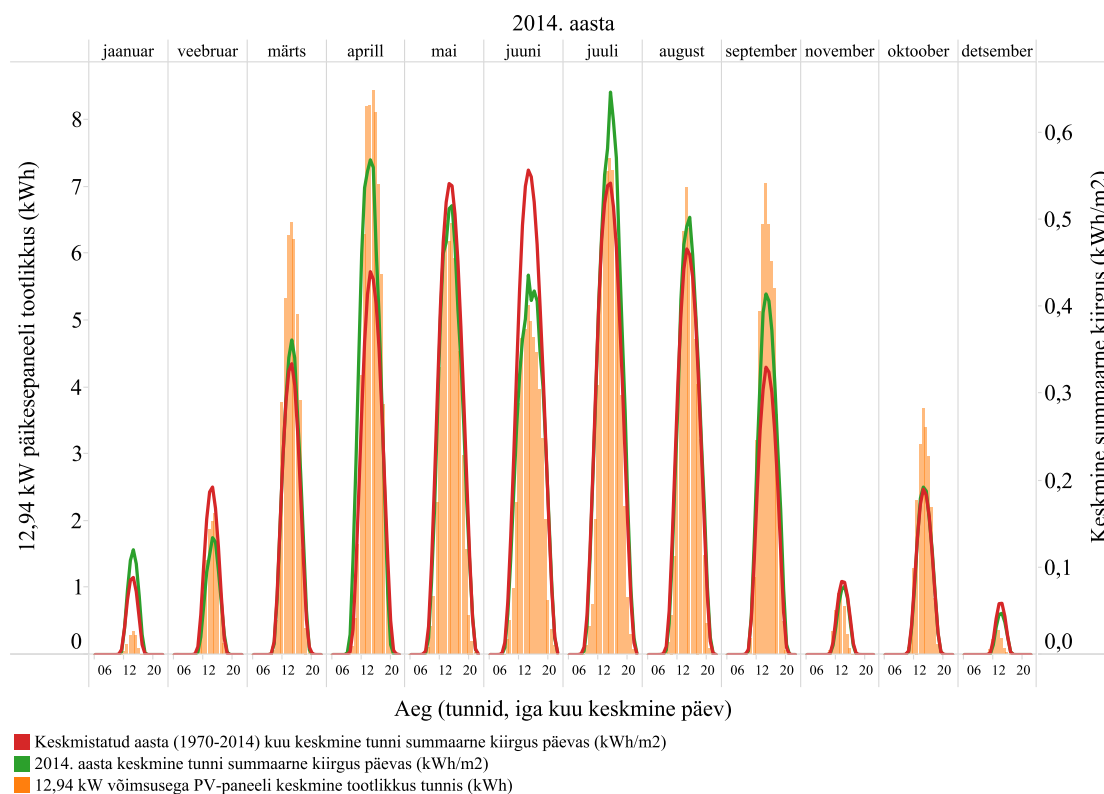
PV paneelide elektrienergia tootlikkus sõltub otseselt päikesest. 2014. aasta oli poole sajandi üks kõige soojemaid ja kuivemaid aastaid. Eesti keskmine õhutemperatuur oli 7,0 °C (norm 5,6 °C) ning keskmine sajuhulk 591 mm (norm 646 mm). Kõige soojem kuu oli juuli 19,6°C (norm 16,7°C) ja kõige külmem jaanuar –6,4°C (norm 4,0°C). Püstitati ka mitmeid soojarekordeid mais ja augustis. [50]

2014. aasta ja keskmise Eesti aastase päikesekiirguse võrdlemiseks kasutati keskkonnaministeriumi antud 1970–2014 aasta summaarse tunni päikesekiirguse Riigi ilmateenistuse Tõravere meteoroloogiajaama andmeid. Joonisel 17 on näha, et võrreldes keskmise aastaga oli 2014. aastal päikesekiirguse intensiivsus suurem kuuel kuul aastast: märtsis, aprillis, juulis, augustis ja septembris, millest tulenevalt peab arvestama, et ka PV paneelide tootlikkus oli suurem kui keskmisel aastal.



Joonis 17. Keskmistatud (1970–2014) ja 2014. aasta iga kuu keskmine päikesekiirguse intensiivsus päevas (kWh/m²).

Uuritav passivmaja asub Tõravere meteoroloogiajaamast linnulennult 42 km kaugusel [45]. Võrreldes joonisel 18 Tõravere andmeid ja paneelide tootlikkust, on näha seost hoone katusel olevate 12,94 kW võimsuse päikeseelektrijaama elektrienergia tootlikkuse ja päikese kiirguse intensiivsuse vahel.



Joonis 18. Keskmine päevane päikesekiirguse intensiivus ja PV paneelide tootlikkus iga kuu lõikes. Keskmistatud (1970–2014) aasta ja 2014. aasta keskmine tunni summaarne päikesekiirus ning 12,94 kW suuruse päikeseelektrijaama toodetud elektrienergia müük võrku 2014. aastal (kõikide kuude keskmised päevad).

2.5. Elektrienergia ostmine ja müümine eramus

Eramus on sõlmitud Eesti Energia muutuva börsi hinnaga Rohelise Energia pakett, millest tulenevalt kasutatakse majas 100% taastuvatest energiaallikatest pärinevat elektrit[51]. Sisse ostetakse elektrienergiat Nord Pool Spot AS (NPS) börsihinnaga, millele liidetakse Rohelise Energia tasu (KM–ga). Müüakse börsi hinnase marginaali võrra madalamalt, millele omakorda liidetakse taastuenergia toetus (5,37 €senti/kWh) [52]:

Ostetav elektrienergia hind =

NPS hind + 0,47 €senti/kWh

Müüdav elektrienergia hind =

(NPS börsihind – 0,22 €senti/kWh) + taastuenergia toetus

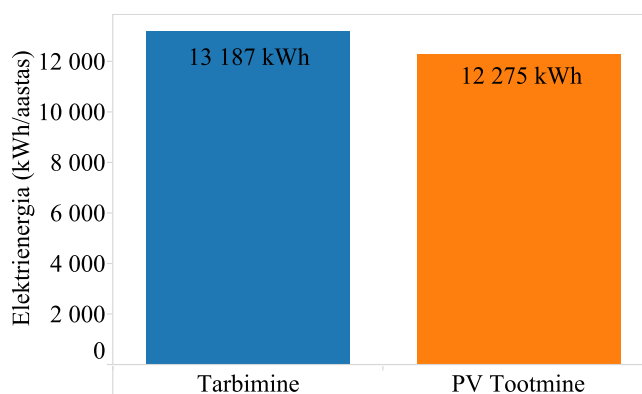
3. Tulemused ja arutelu

3.1. Aastane elektrienergia bilanss

Eramu 2014. aasta tarbitud elektrienergia oli 13 187 kWh ning PV paneelide toodetud elektrienergia 12 275 kWh (joonis 19). Võrgust osteti juurde 11 072 kWh ja võrku müüdi 10 160 kWh elektrienergiat, millest 9787 kWh eest maksti Eleringi poolt taastuvenergia toetust. Uurides eramu omanikult, miks Elering väiksema toodetud mahu eest toetust maksis, siis saadi vastuseks, et see olevat tingitud saldeeritud võrku antud toodangu eest, kus igatunniselt leitakse tootmise ja tarbimise vahe [52].

Tabel 7. Elektrienergia 2014. aasta tabimine/tootmine/müük/ost.

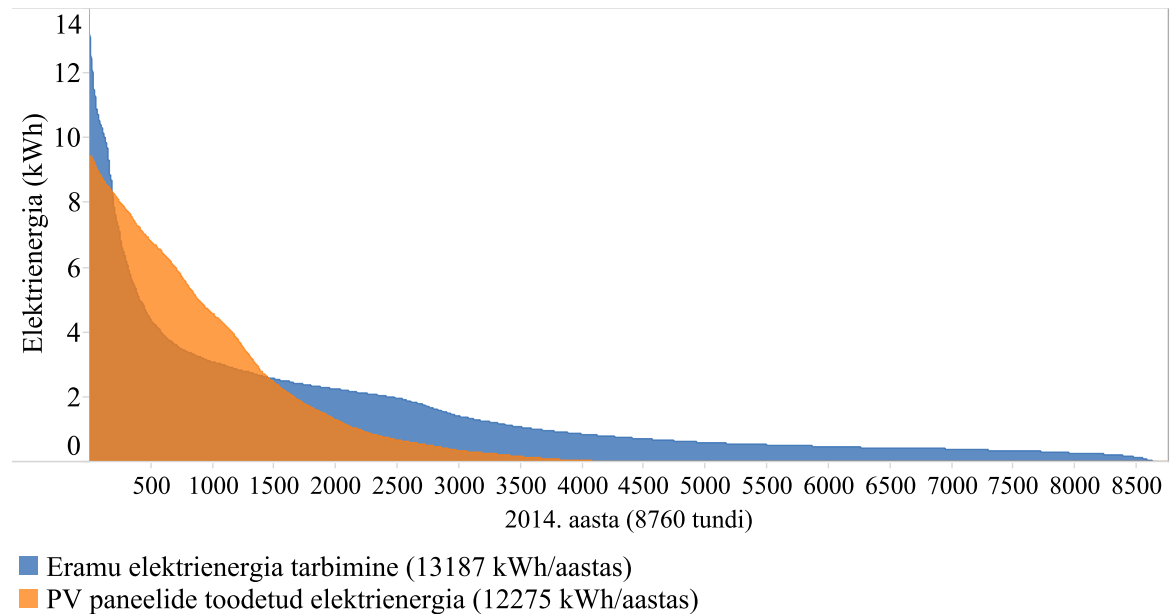
Tarbitud	13 187 kWh
Ostetud võrgust	11 072 kWh
PV paneelide toodetud	12 275 kWh
Müüdnud võrku	10 160 kWh Eesti Energiale (millest 9787 kWh eest saadi Eleringist taastuvenergia toetust)



Joonis 19. 2014. aasta elektrienergia tarbimine ja 12,94 kW PV paneelide tootmine (kWh/aastas).

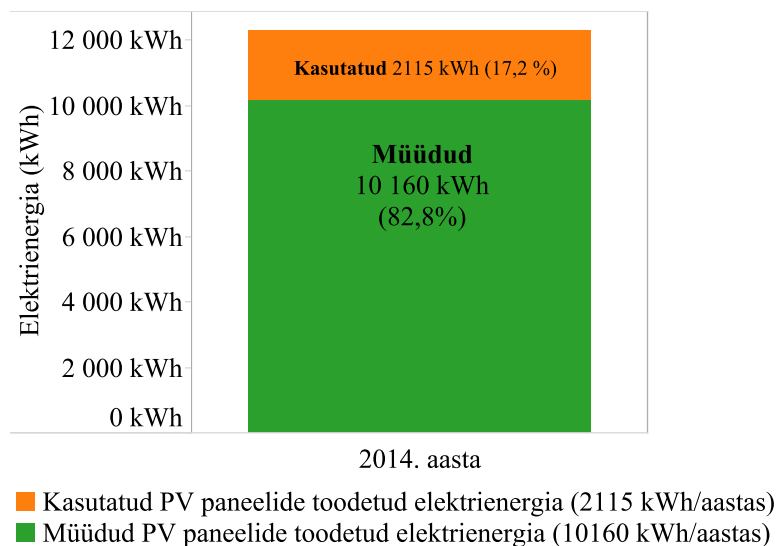
Joonisel 20 on kestvuskõvera alusel võrdluses 2014. aasta kõikide tundide lõikes toodetud ja tarbitud elektrienergia kogus. Aastane elektrienergia tipptarbimine oli 2,69 kWh võrra suurem kui PV paneelide tootmine. Kõige suuremad tarbijad olid 15 kW võimsusega sauna elektrikeris ning 5,9 kW võimsusega maasoojuspump. Maksimalne tipptarbimine tunnis oli 13,79 kWh ning maksimalne tootlikkus tunnis 11,1 kWh. Aasta

jooksul oli keskmine tarbimine 1,51 kWh ning keskmine tootlikkus 1,4 kWh. Ajaliselt kattus PV paneelide tootlikkus seadmete tarbimisega 4641 tunnil.



Joonis 20. Elektrienergia tootmine ja tarbimine tunnis 2014. aastal.

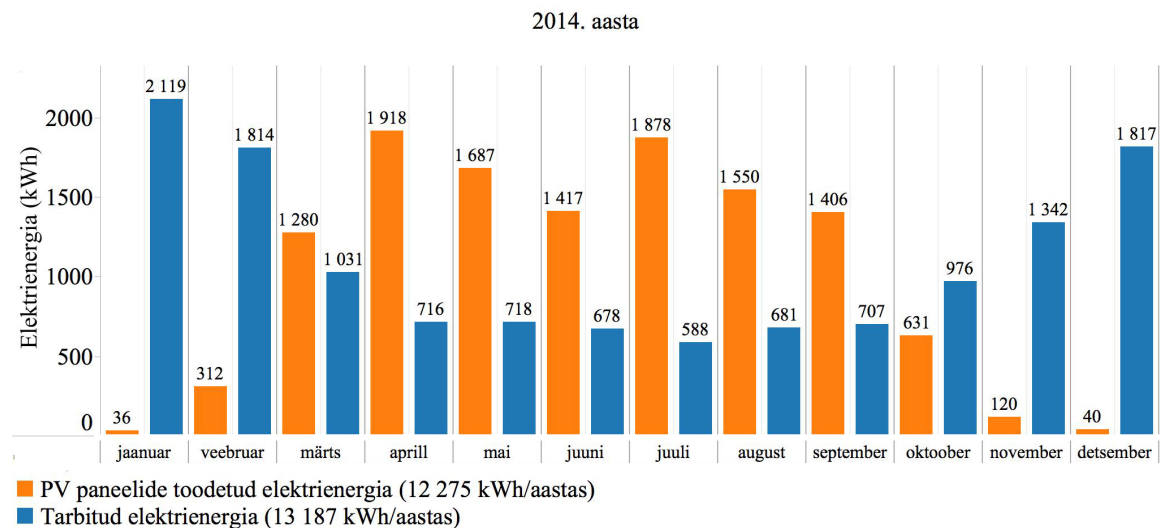
Tulenevalt elektrienergia kasutuse ja PV paneelide tootlikkuse kellaaegade erinevusest suudeti eramus ära kasutada ainult 2115 kWh ehk 17,2% toodetud elektrienergiast (joonis 21). Ülejäänud 10 160 kWh ehk 82,8% müüdi vastavalt börsi muutuvale hinnale edasi võrku.



Joonis 21. PV paneelide toodetud ning võrku müüdüd elektrienergia kogus 2014. aastal.

Kõige suurem tarbimine oli 2014. aasta jaanuaris, kui kuuga tarvitati 2119 kWh elektrienergiat. Tarbimine ületas tootlikkust veel veebruaris, oktoobris, novembris ja detsembris, mis olid ühtlasi ka kõige külmemad ja päikesevaesemad kuud aastas.

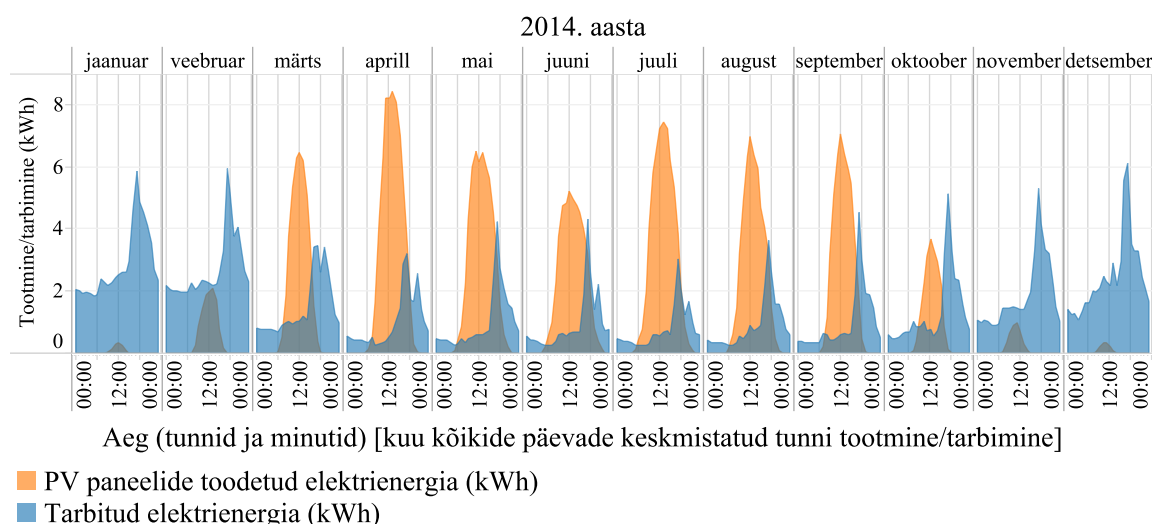
Tarbimise suurenemise tavekuudel põhjustas 5,9 kW võimsusega maasoojuspumba eksploateerimine ning valgustite rohke kasutus. Kõikidel teistel kuudel aastast oli PV paneelide tootlikkus tarbimisest suurem ning väga päikesepaistelise kevade tõttu oli parim tootlikkus aprillis, kui toodeti kokku 1918 kWh ning millest müüdi võrku edasi 1660 kWh ehk 86,5% elektrienergiat. Kõige väiksema päikese intensiivsusega kuul jaanuaris oli paneelide tootlikkus 36 kWh ehk 98,12% vähem, kui prima produktsiooniga kuul.



Joonis 22. 2014. aasta kuude summaarne elektrienergia tootmine ja tarbimine kuus (kWh).

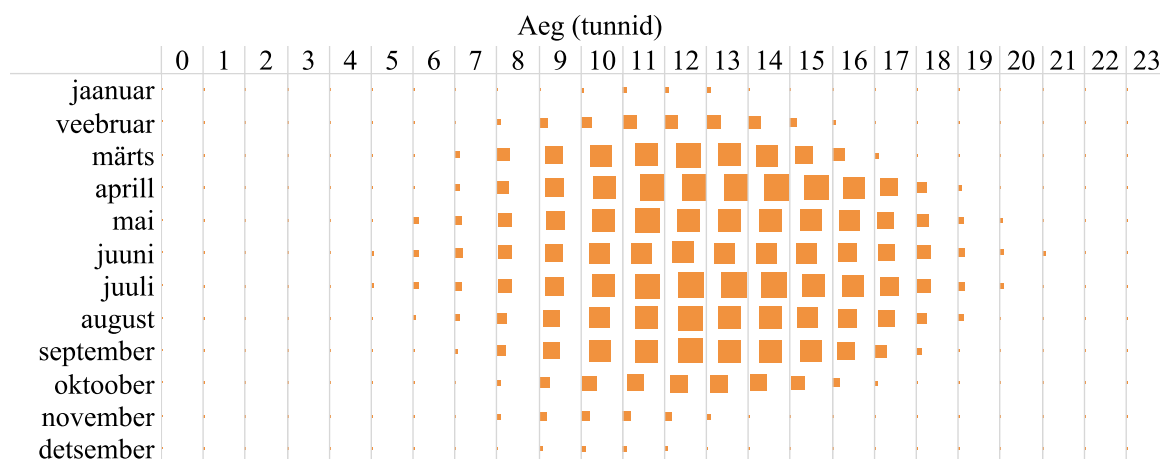
3.1.1. Elektrienergia tarbimine ja PV paneelide tootmine 2014. aasta päevas

Igakuine keskmistatud päevane tootlikkus kõikide kuude lõikes (joonis 23) näitab pereema kirjeldatud päevase tarbimise tipp kõikide kuude õhtutel ajavahemikus 17:00–20:00. Pärast kella kaheksat hakkab maksimaalne tarbimine langema, sest selleks ajaks on õhtusöök söödud ja saunas käidud. Päikesepaneeli tootlikkuse kasvuga päeva keskel väheneb eramus elektrienergia tarbimine, sest suure tarbimisega seadmeid ei kasutata ning maja kütmiseks kasutatakse ära passiivset päikeseenergiat. Aasta lõikes keskmiselt kella ühest päeval algab paneelide tootlikkuse vähenemine ning õhtust tarbimise tippu paneelid täies ulatuses enam ei kata. 2014. aasta kõige parema keskmise päevase tootlikkusega kuu oli aprill, kui päevane tootlikkuse tipp ajavahemikul 11:00–13:00 oli keskmiselt 7,84 kWh.



Joonis 23. Keskmistatud päevane PV paneeli tootlikkus ja eramu elektrienergia tarbimine kuus 2014. aasta 1. tunni andmete põhjal.

12,94 kW suuruse päikeseelektrijaama aastane keskmine tootlikkus kõikide tundide alusel oli 1,4 kWh. See tulenes päikeseenergia puudumisest öisel ajal ning päikeseenergia piiratusel pilvisel ajal. Joonisel 24 on näha, et kõige suurem tootmine toimus märtsis ja septembris vahemikus 11:00–14:00. Jaanuaris, veebruaris, novembris ja detsembris oli keskmine tootlikkus kõikide kuude osas kõige väiksem. Öhtusel ja öisel ajal vahemikus 19:00–05:00 oli tootmine kõikides kuudes maksimaalselt 0,080 kWh/tunnis.

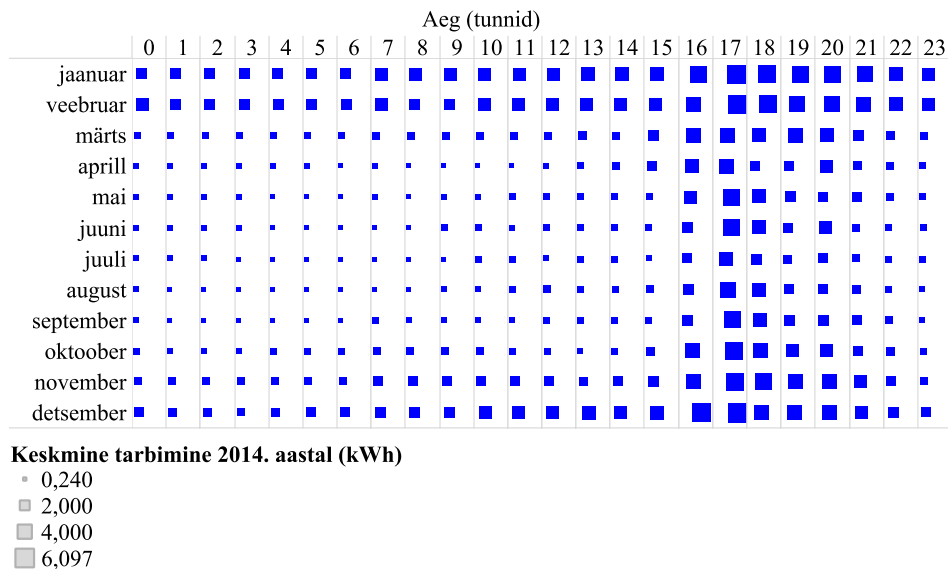


Keskmine PV paneelide tootlikkus päevas 2014. aastal (kWh)

- 0,000
- 2,000
- 4,000
- 6,000
- 8,438

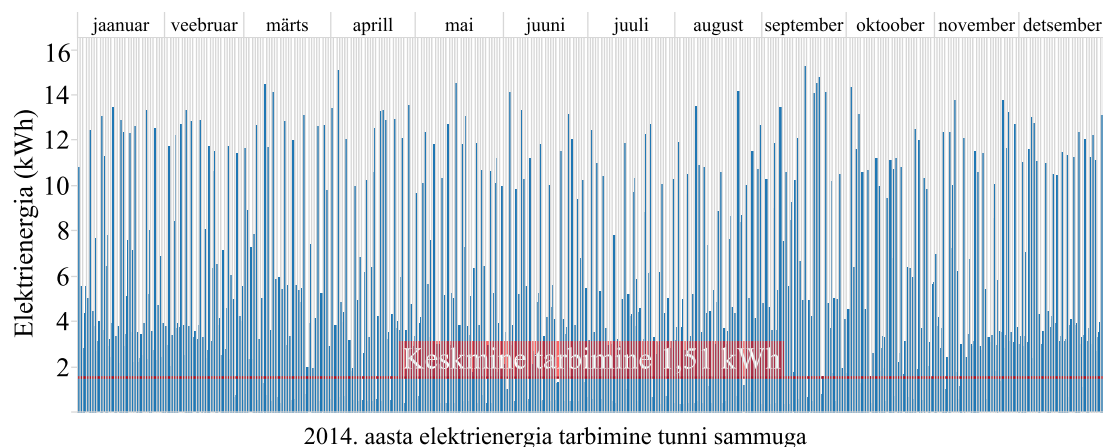
Joonis 24. PV paneelide elektrienergia tootlikkus 2014. aastal (keskmistatud tüüpiline päev, arvatuna kuu kõikide päevade tunni andmete põhjal).

Võrreldes PV paneelide tootlikkuse aegsid tarbimise kellaaegadega, selgub, et suurim tarbimine toimus õhtusel perioodil vahemikus 16:00–20:00 (joonis 25). Kõige väiksem tarbimine oli öösel, sest töötasid ainult õues olevad LED valgustid, ventilatsioonisüsteem, laadijad ja teised ooterežiimil olevad seadmed.



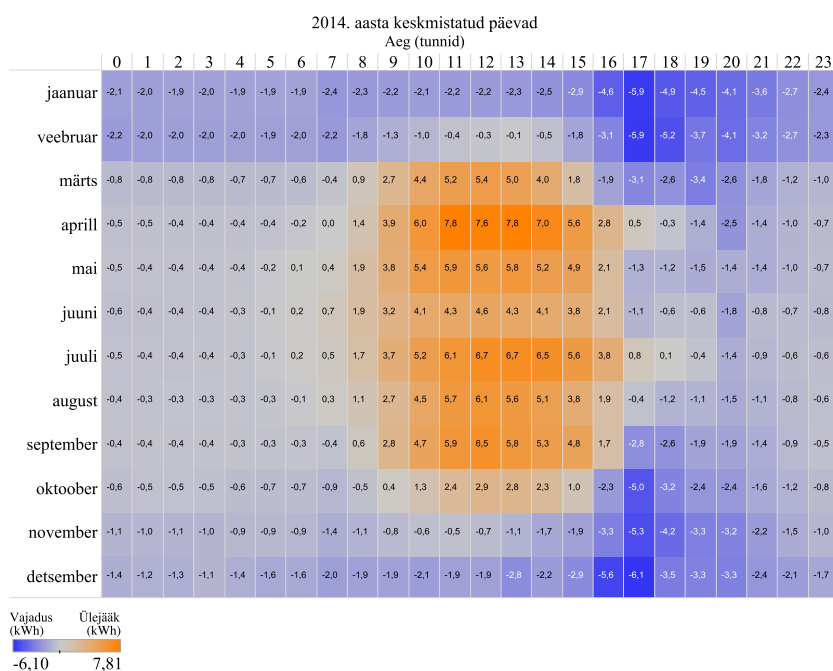
Joonis 25. Elektrienergia tarbimine keskmiselt päevas 2014. aastal (keskmistatud tüüpiline päev, arvatuna kuu kõikide päevade tunni andmete põhjal).

Majas elavale perele on harjumuspäraseks käia 4–5 korda nädalassaunas, mida iseloomustab joonis 26 [52]. Joonisel on näidatud tunni sammuga elektrienergia tarbimine terve aasta jooksul. Kerise kasutust iseloomustavad üle 9 kWh tarbimise tipud, mida põhjustas 15 kW võimsusega elektrikeris. Aasta kõikide päevade keskmine elektrienergia tarbimine tunnis oli 1,51 kWh.



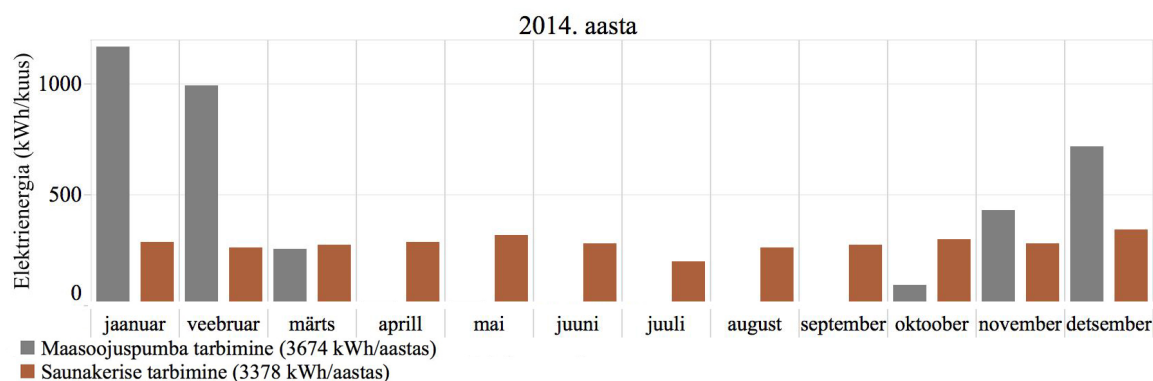
Joonis 26. 2014. aastane elektrienergia tarbimine tunni sammuga ja keskmine tarbimine tunnis.

Lahutades PV paneelide produtseeritud elektrienergiast eramu poolt tarvitatud elektrienergia, saame teada, kui palju keskmisest tarbimisest puudu jäi ning üle toodeti. Sarnaselt joonisele 23 on ka järgneval joonisel 27 näha, et aprillis kell 11:00–13:00 oli terve aasta lõikes kõige kõrgema 7,8 kWh keskmise tootlikkusega tunnid ka siis, kui tootlikkusest oli maha arvatud seadmete tarbitud elektrienergia. Kõige rohkem tarbiti detsembris kell 17:00, kui keskmiselt osteti võrgust juurde 6,1 kWh elektrienergiat.



Joonis 27. Tarbimisest puudu jääv ja tootmisest üle jääv elektrienergia 2014. aastal (võrku toodetud kogusest on lahutatud samal tunnil tarbitud elektrienergia kogus).

Kahe suurema tarbija igakuine tarbimine on välja toodud joonisel 28. Sauna keris kasutas aastas kokku 3378 kWh ja Viessmanni maasoojuspump 3674 kWh elektrienergiat. Maaküte hakkab tööle peamiselt talvekuudel, kui ilmad on jahedad ning kui päike ei suuda solar thermal paneelide abiga maja piisavalt soojaks kütta. Juunist septembrini maasoojuspumpa ei kasutatud, sest päike suutis maja ja boileri täielikult ära kütta.



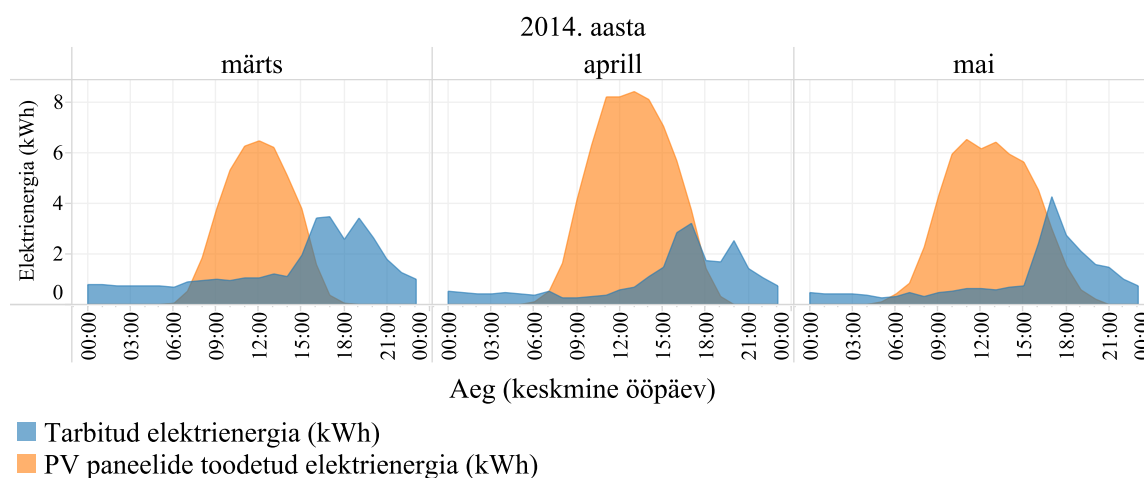
Joonis 28. Maasoojuspumba ja sauna kerise kasutus 2014. aastal.

3.2. Aastaaegade päevane elektrienergia tarbimine ja PV paneelide tootlikkus

Analüüsidest täpsemalt erinevate kuude tarbimist on välja toodud kõigi nelja aastaaja kuu keskmised tootmised ja tarbimised ning summaarne kasutatud ja müüdnud elektrienergia päevas.

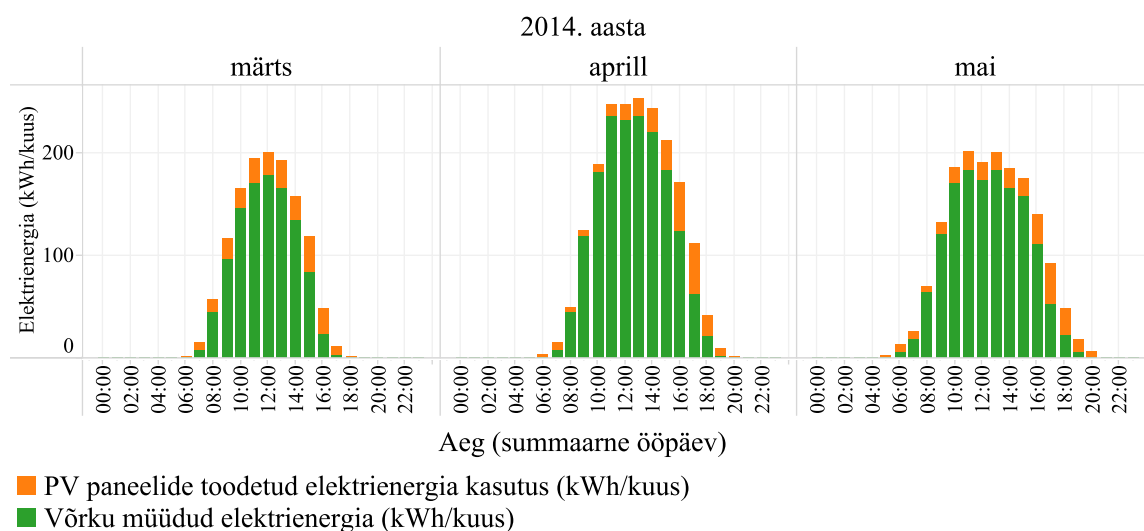
3.2.1. Kevad

Märtsikuu elektrienergia tarbimine oli kevadkuudest kõige suurem. Öhtusel ajal moodustusid kaks peamist tarbimise tippu – öhtune elektrikerise tööle panemine ajavahemikus 16:00–17:00 tarbimisega 3,44 kWh ning köögiahju kasutus kell 19:00 tarbimisega 3,43 kWh. Aprillis päikese intensiivsus suurenes ning seetõttu tootsid ka PV paneelid kevadkuudest kõige rohkem. Joonisel 29 on näha, et aprillis langes esimene tarbimise tipp (kell 17:00) ka PV paneelide elektrienergia tootmise aja sisse. Mais esines kõikide päevade keskmistatud tulemuse põhjal ainult üks 4,24 kWh elektrienergia kasutus kell 17:00 ning kuna päike loojub mais hiljem kui märtsis, siis ei kasutatud öhtust elutoa valgustust, mille tulemusel vähenes mai teine tarbimise tipp 1,47 kilovatt-tunnini.



Joonis 29. Keskmise elektrienergia tootmine ja tarbimine ööpäevas kevadel 2014 (kuu keskmine päev).

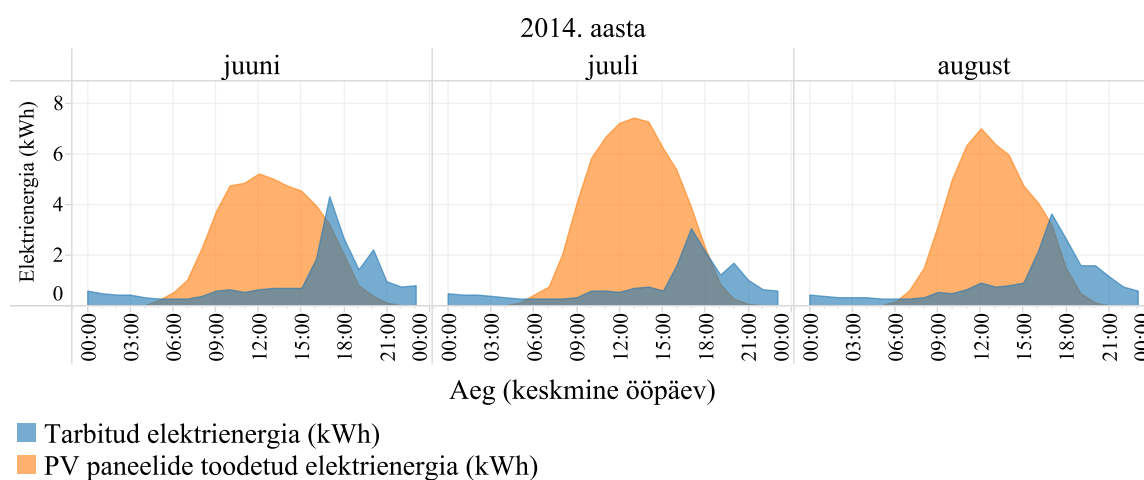
Summeerides kevadkuude kõikide päevade tootmised igas tunnis ja lahutades maha kuu kõikide päevade müüdnud elektrienergia igas tunnis, selgub, et tipptootmise kellaaegadel vahemikus 11:00–13:00 kasutati ära keskmiselt 10,2% toodetud elektrienergiast (joonis 30). Kõige rohkem kasutati paneelide toodetud energiat märtsis kell 15:00 (35,3 kWh), aprillis kell 17:00 (49,3 kWh) ja mais kell 17:00 (40,8 kWh).



Joonis 30. Summaarne kasutatud ja müüdud elektrienergia kogus päevas, kevadkuudel 2014. aastal.

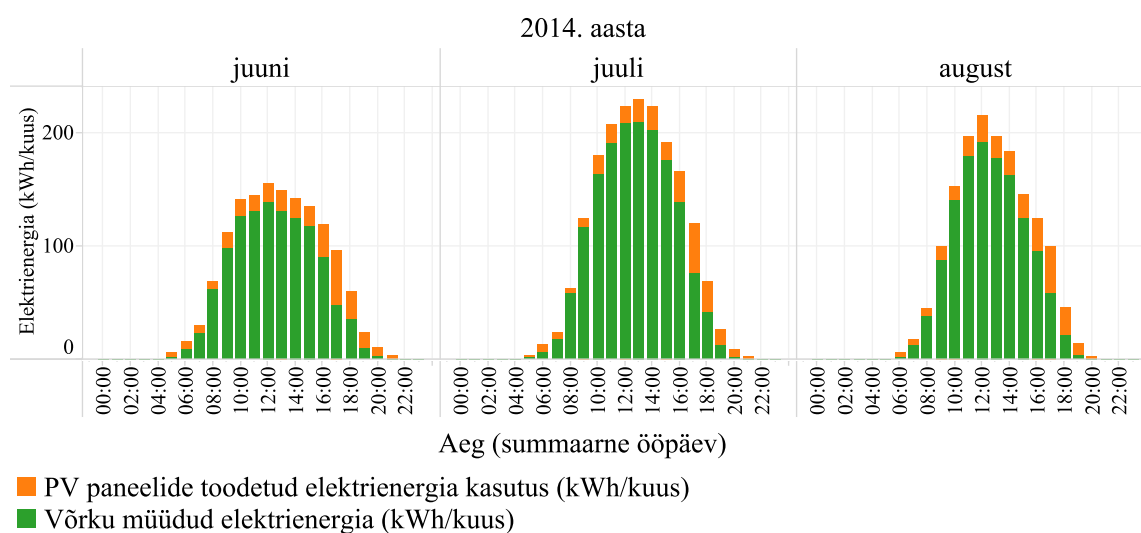
3.2.2. Suvi

Kõige päikesepaistelisemal aastaajal oli ka PV paneelide tootlikkus väga kõrge. Keskmise toodetud elektrienergia tarbimise tipp oli juunis kell 12:00 (5,203 kWh), juulis kell 13:00 (7,423 kWh) ja augustis kell 12:00 (6,98 kWh). Joonisel 31 selgus, et tarbimise kaks suuremat tippu päeva teises pooles tekkisid kõikidel suvekuudel kell 17:00 ja 20:00. Kõikidel kuudel saavutati PV paneelide kasutusega õhtuse esimese tippu tarbimise katmine rohkem kui 75% ulatuses.



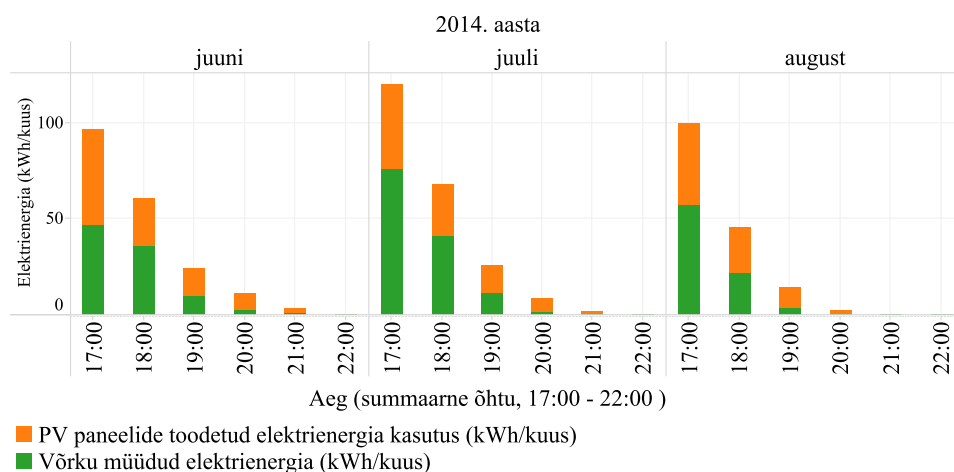
Joonis 31. Keskmise elektrienergia tootmine ja tarbimine ööpäevas suvel 2014 (kuu keskmine päev).

Suvekuudel toimus elektrienergia tootmine kõige rohkemate tundidega päevas aastast – keskmiselt ajavahemikus 05:00–21:00. Pereema kirjelduse järgi kasutatati hommikuti suuremate tarbijatena kohvi- ja nõudepesumasinat. Joonisel 32 on näha, et nende seadmete poolt kasutatud päikeseenergia kasutus jääb päevases osas marginaalseks.



Joonis 32. Summaarne kasutatud ja müüdüd elektrienergia kogus päevas, suvekuudel 2014. aastal.

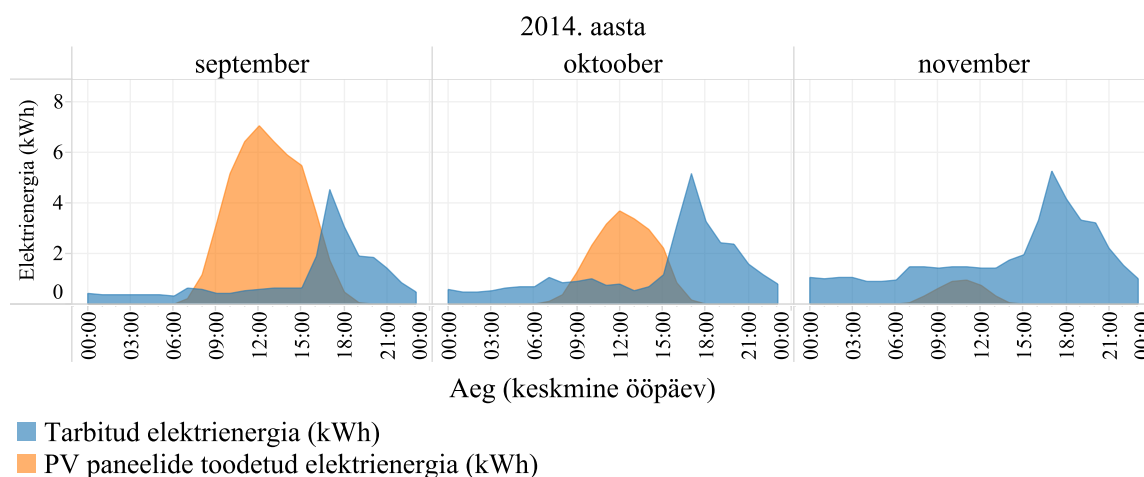
Suvekuudel oli kõige suurem õhtuse perioodi (17:00–22:00) enda toodetud elektrienergia kasutus, sest päikese energiat kasutati mõnel päeval isegi kella 22:00ni (joonis 33). Parim toodetud energia kasutus kõikidel päevadel oli kell 17:00, kui keskmiselt kasutati ära 56,3% toodetud elektrienergiast. 100% toodetud energiast kasutati ära augustis kell 21:00, sest siis tootlikkus on selleks hetkeks juba väga väikene ning kogu toodetud elektrienergia tarvitati koheselt ka ära.



Joonis 33. Summaarne suvekuude 17:00–22:00 müüdüd ja kasutatud elektrienergia 2014. aastal.

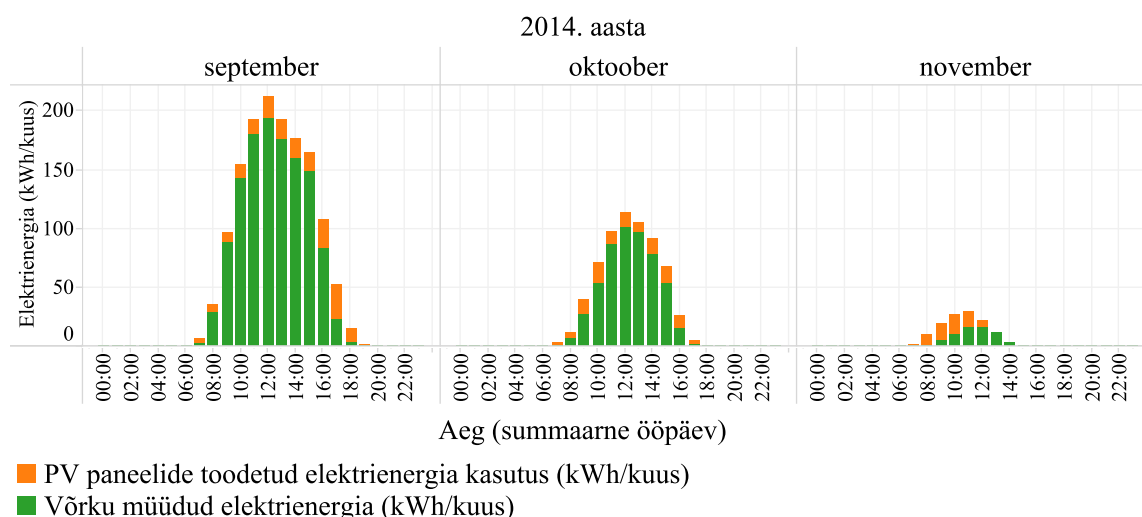
3.2.3. Sügis

Iga järgneva kuuga elektrienergia tootlikkus sügisel vähenes ning keskmine tarbimine suurenes. Joonisel 34 selgus, et kui septembris oli keskmine tarbimise tipp 4,53 kWh, siis novembris juba 5,13 kWh. Võrreldes kevade ja suvega on näha, et sügisel moodustus ka hommikune 07:00 tarbimise väike tõus, sest pere ärkas igapäevaselt 06:50 ning mida lähemale talvele, seda rohkem lülitati sisse elutoa ja köögi valgustus. Pärast kella 08:00 kui pereisa on tööle läinud ja lapsed koolis, siis tarbimine väheneb ning hakkab uuesti tõusma õhtu saabudes, kui PV paneel elektrienergiat enam ei tooda ning algab õhtune söögi valmistamine. Tulenevalt pilvkatte tihenemisest ja päikesekiirguse vähenevast paneelideni jõudmisest oli nende tootlikkus oktoobris ja novembris väiksem, kui tarbitud elektrienergia kogus. Novembris tootsid paneelid tipptootmise hetkel keskmiselt ainult 0,97 kWh elektrienergiat.



Joonis 34. Keskmine elektrienergia tootmine ja tarbimine ööpäevas sügisel 2014 (kuu keskmine päev).

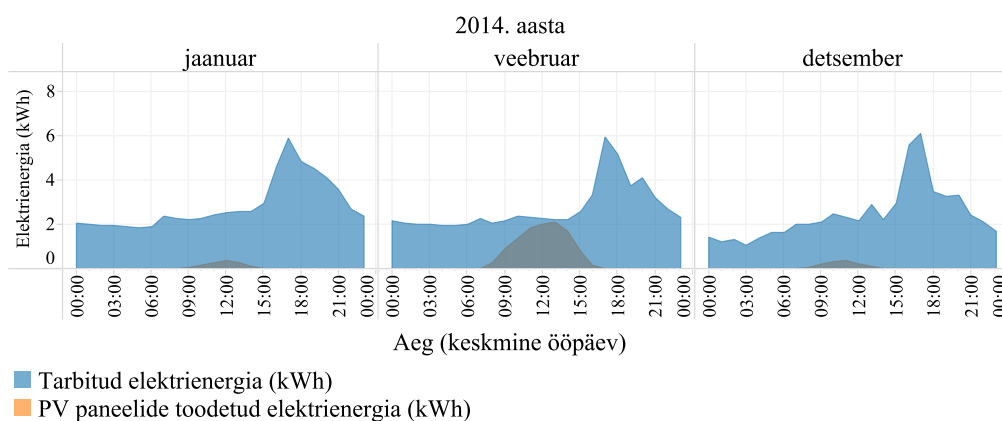
Sarnaselt joonisele 34 on näha ka joonisel 35, kuidas elektrienergia tootlikkus ning seeläbi ka kasutus tunnis vähenes iga kuuga. Novembris kasutati ära kõige rohkem hommikusel perioodil vahemikus 07:00–11:00 toodetud elektrienergiat 55,89 kWh (64%) ja alates 12:00–15:00 ainult 2,44 kWh (7,5 %).



Joonis 35. Summaarne kasutatud ja müüdüd elektrienergia kogus päevas, sügiskuudel 2014. aastal.

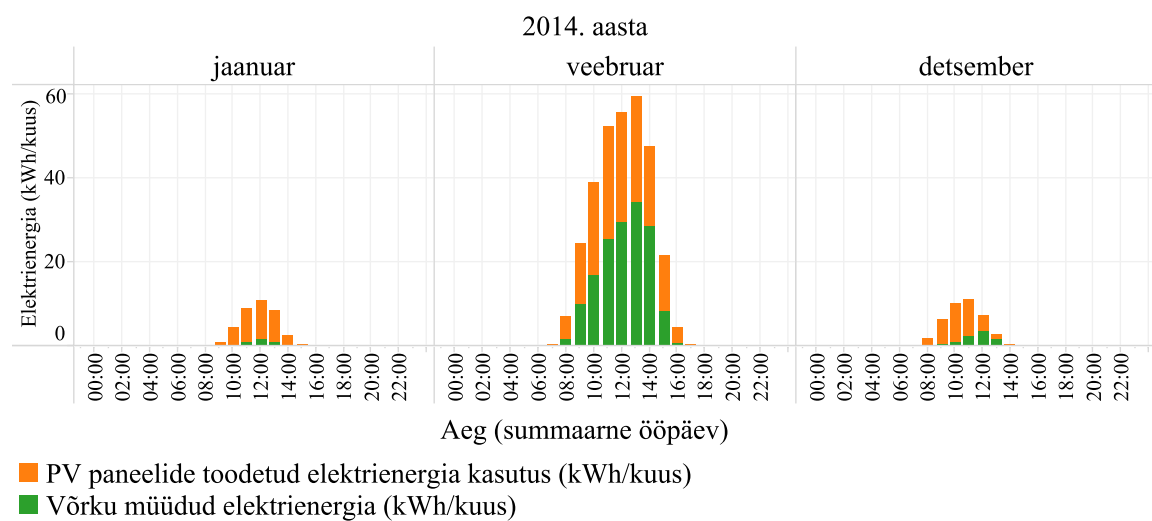
3.2.4. Talv

Tulenevalt uuritava objekti paiknemisest Eestis ei suuda 12,94 kW suurused PV paneelid toota talvisel perioodil piisavalt elektrit tarbimise vajaduse katmiseks. Õhtuse tipptarbimise perioodil kell 17:00 on paneelide tootlikkus 0 kWh (joonis 36). Kõige suurem keskmine tarbimine oli detsembris kell 17:00 (6,1 kWh). Minimaalne tarbimine oli keskmiselt 1,06 kWh detsembris kell 03:00 öösel. Veebruaris hakkas päikese suurema intensiivsuse tõttu PV paneelide tootlikkus tõusma. Jaanuaris ja veebruaris joonistusid välja hommikused tarbimise tipud kell 07:00. Detsembris oli kuu kõikide päevade keskmise tulemuse põhjal kell 13:00 2,89 kWh tipp, mis võis olla põhjustatud maasoojuspumba tööle hakkamisest, kuna on näha, et päikese kiirguse intensiivsus langeb ning järelkult ei kasutata majas enam ära solar thermal paneelide toodetud päikeseenergiat.



Joonis 36. Keskmine elektrienergia tootmine ja tarbimine ööpäevas talvel 2014 (kuu keskmine päev).

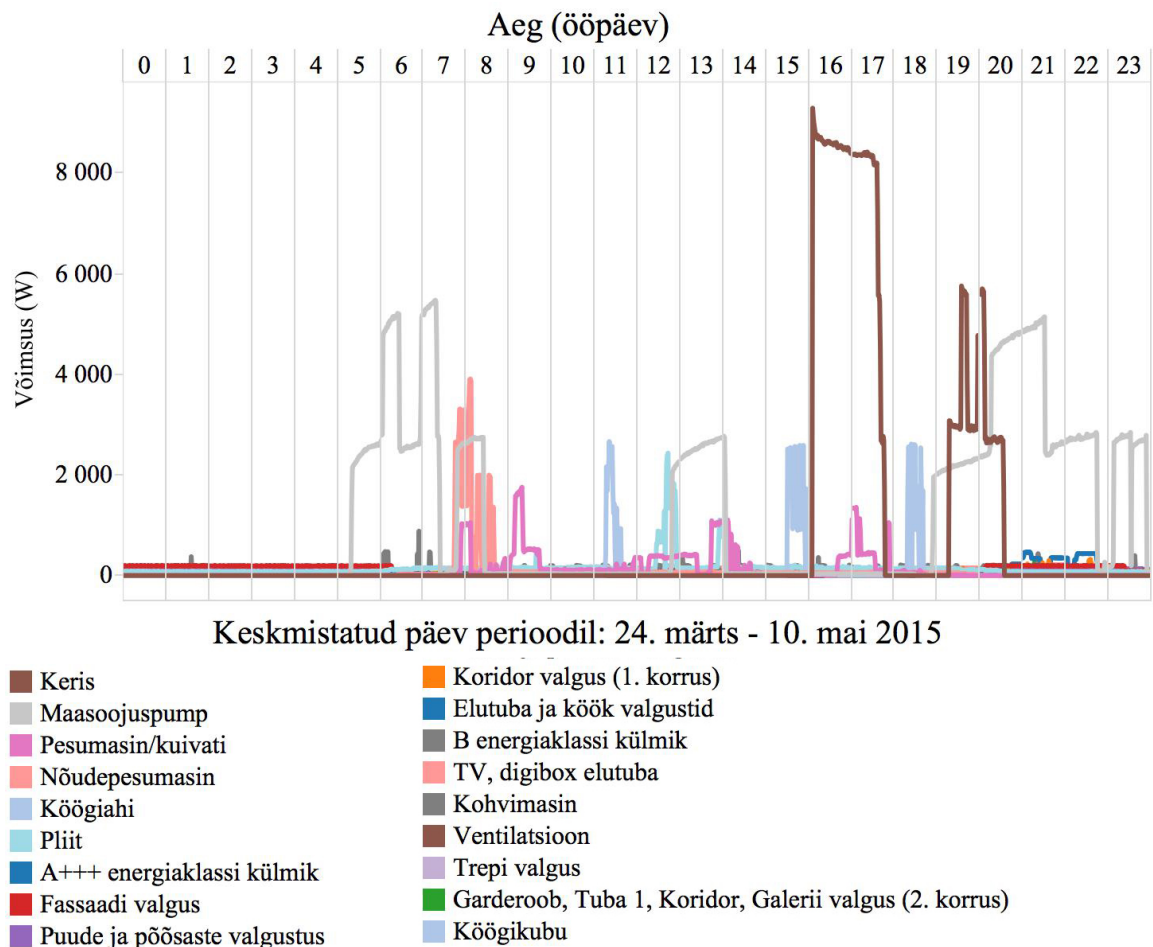
Detsembris tootsid PV paneelid tunni andmete põhjal elektrienergiat vahemikus 09:00–15:00, jaanuaris vahemikus 10:00–15:00 ning veebruaris vahemikus 08:00–16:00. Väikese tootlikkuse tõttu oli paneelide toodetud elektrienergiaga kasutus kõige suurem jaanuaris kui kasutati ära 32,29 kWh (89,88%) paneelide toodetud elektrienergiast. Detsembris kasutati ära 30,82 (77,6%) ning veebruaris 219,8 kWh (62,32%) toodetud päikeseenergiast. Tulemustest selgus, et novembrist veebruarini kasutati ära rohkem hommikust päikest ning ülejäänud kuudel aastast kasutati ära peale kella 12:00 paistnud päikest.



Joonis 37. Summaarne kasutatud ja müüdüd elektrienergia kogus päevas, talvekuudel 2014. aastal.

3.3. Seadmete tarbimine ja PV paneelide tootlikkus 5 minuti sammuga

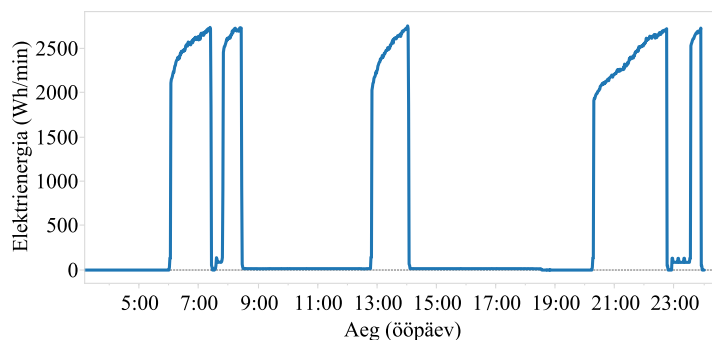
Et täpsemalt lahti seletada eramu 13 187 kWh suurune aastane elektrienergiavajadus, monitooriti minuti sammuga erinevate seadmete võimsust (joonis 38). Kõikide monitooritud seadmete tulemuste kujutamine ühel tüüpilisel keskmistatud nädalal on raske, kuna maasoojuspump ja sauna elektrikeris on teistest tarbijatest väga palju võimsamad (joonis 38). Sarnaselt I.Richardsoni, M.Thomsoni, D. Infieldi ja C. Cliffordi teadustööle [30], milles uuriti uuriti 22 kodu elektrienergia tarbimist Ida-Inglismaal (joonis 8), on näha, et ajavahemikul 07:00–08:00 moodustus ka käesolevas uurimistöös hommikune tarbimise tipp.



Joonis 38. Seadmete elektrienergia võimsus minutiste intervallidega (tüüp nädala keskmine tarbimine kõikide monitooritud seadmete kohta).

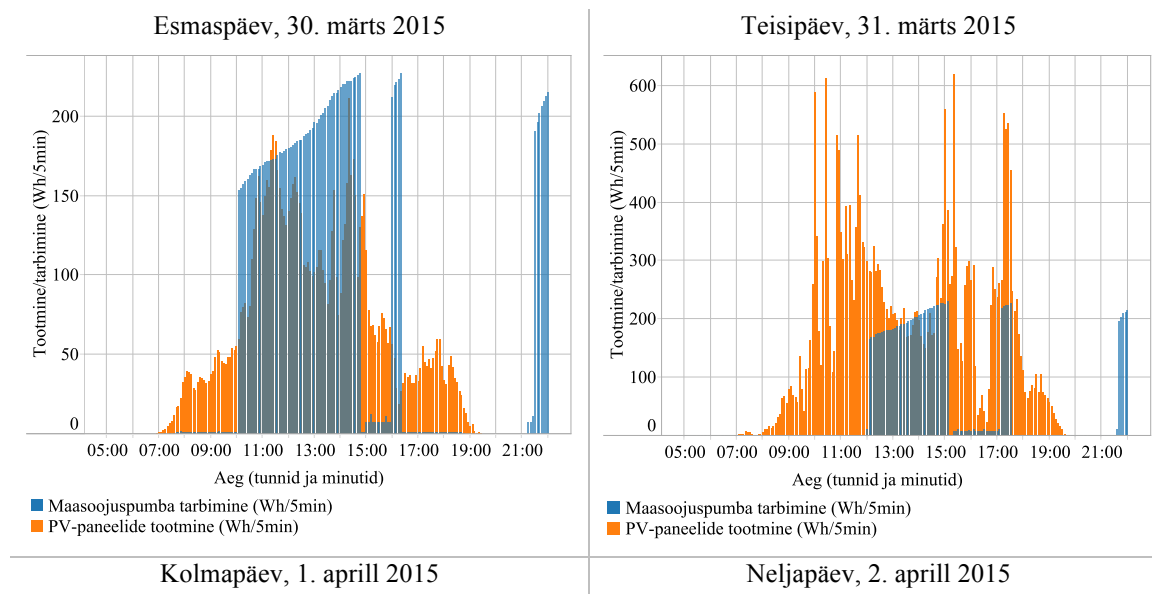
3.3.1. Maasoojuspump

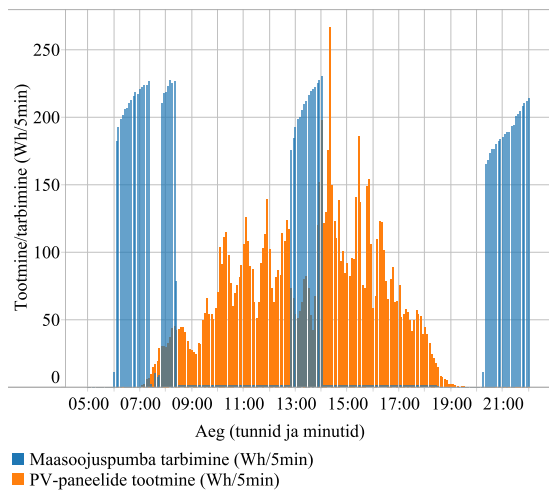
Maasoojuspump töötab uuritavas eramus ainult siis, kui päikesekütte kollektor ei suuda vähese päikese tõttu maja ära kütta (keskmine temperatuur eramus on 24°C) [47]. Maasoojuspumba tööd monitooriti ajavahemikus 24.03–05.04 2015 (joonis 40). Sellel perioodil oli ilm väga pilves ning keskmine temperatuur Võru ilmajaama andmetel 1,0°C...5,8°C [53]. Tulemustest selgus, et pump käivitub juhuslikel aegadel päevas ning moodustab ühe ja kahekordseid tippe, mille käigus algab töötuskel 2,114 kW juures ning tõuseb ca 60 minutiga keskmiselt 2,728 kW-ni (joonis 39). Seejärel on 20–30 minutit jooksul tarbimine madalamal võimsusel ning pump käivitub uuesti keskmiselt 25-minutiliseks tsükliks. Pumba käivitumise tihedus on sõltuvuses päikesekollektori paagi temperatuurist, mida hoitakse kindla temperatuuri juures.



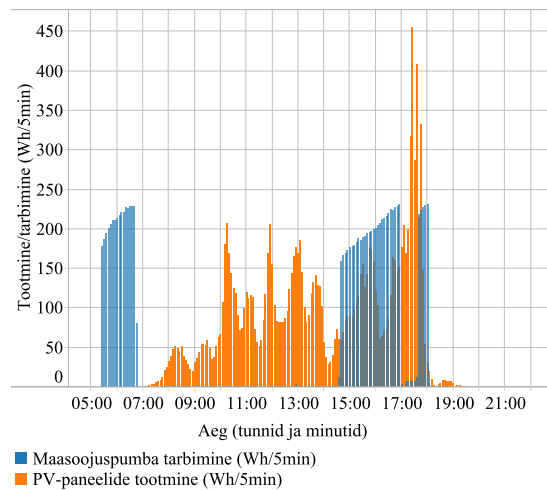
Joonis 39. Maasoojuspumba võimsus keskmiselt minutis 1. aprillil 2015.

Maasoojuspumba elektrienergia kasutuse ja PV paneelide tootlikkuse kattuvuse analüüsist selgub, et paneelide tootlikkuse vähenemine on teatud päevade osas seotud maasoojuspumba tööle hakkamisega. Joonisel 40 on võrreldud nädalasel perioodil vahemikus 30.03–05.04 2015. aastal toodetud ja tarbitud elektrienergia kogust. Kõige suurem negatiivne ajaline kokkulangevus oli 30.03–01.04, kui pump hakkas tööle keset päeva hetkest, kui tootlikkuse kõver oli languses. See tulenes tõenäoliselt pilvkatte tihenemisest ning seeläbi temperatuuri langemisest. 04. aprillil hakkas pump tööle kell 16:00 ning tänu sellele kasutati koos teiste elektriseadmetega, 1,3 kWh PV-toodetud elektrienergiast, mis terve päeva toodetud kogusest moodustas 13,9%. Pühapäeval, 5. aprillil oli paneelide tootlikkuse tipp ajavahemikus 16:10–16:25 ning see langes kokku kell 16:05 alanud pumba tööga.

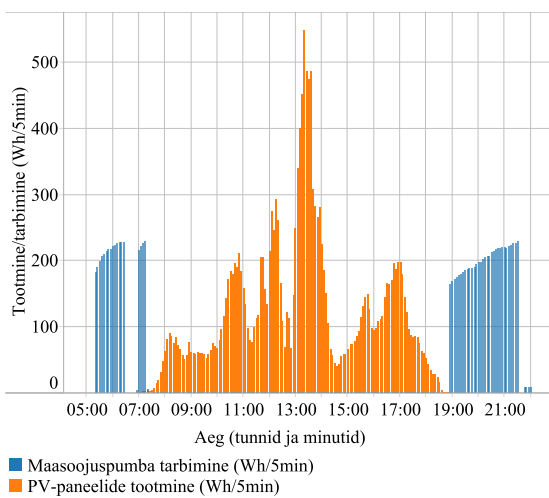




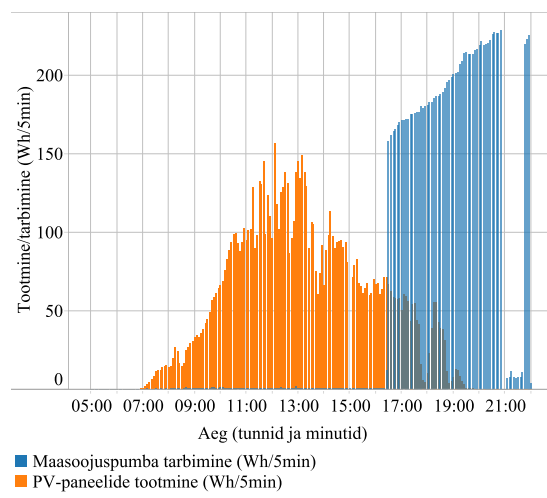
Reede, 3. aprill 2015



Laupäev, 4. aprill 2015



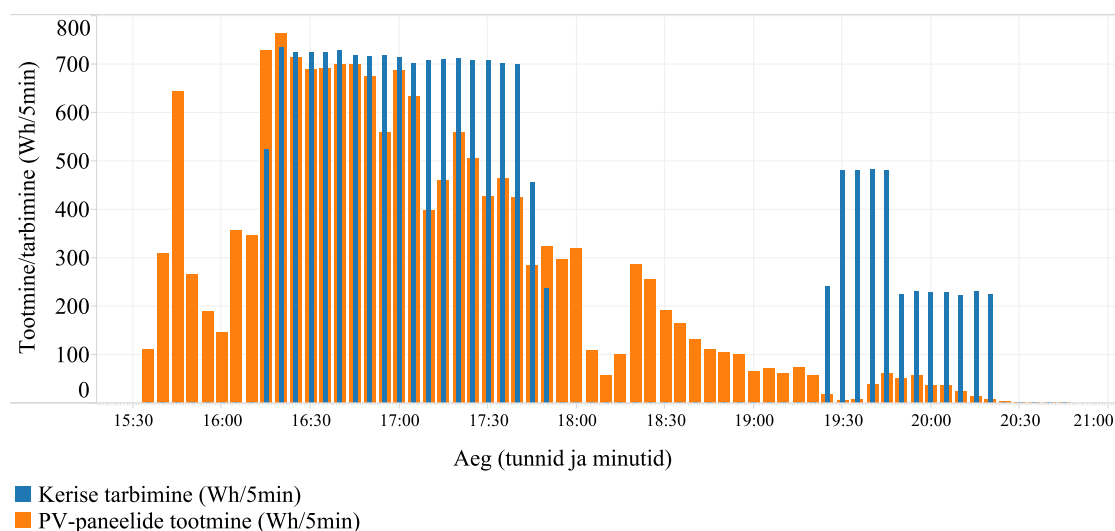
Pühapäev, 5. aprill 2015



Joonis 40. Maasoojuspumba tarbimine ja PV paneelide toodetud elektrienergia kattuvus perioodil 30.03–5.04 2015.

3.3.2. Sauna elektrikeris

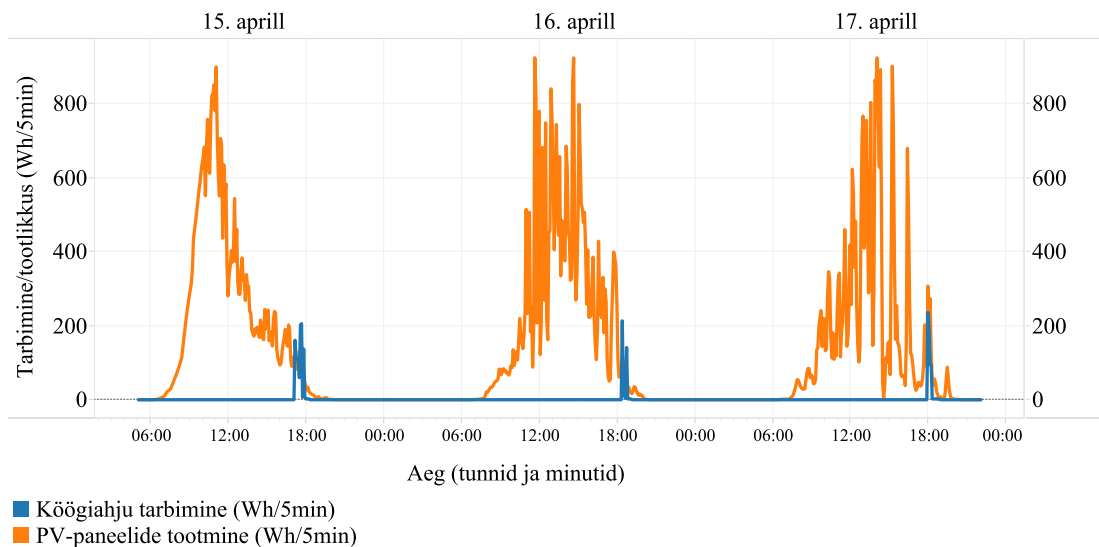
15 kW võimsusega elektrikeris pannakse eramus tööle tavapäraselt vahemikus 16:30–17:30. Kerisele on sisse programmeeritud tööaeg 104 minutit ning see on hästi nähtav ka joonisel 41, kus keris töötas 3. mail vahemikus 16:14–17:55 (tarvitati 13,4 kWh elektrienergiat). Seejärel oli piisav kuumus saavutatud ning kell 19:24 pandi elektrikeris uuesti pereisa poolt tööle (teine tarbimine 3,75 kWh). Elektrikerise teise töötamise perioodi jooksul jäi maksimaalne võimsus varasema tipu 8,82 kW asemel 5,78 kilovatt-tunnini, kuid sellest hoolimata langes PV paneelide tootlikkus iga mõõdetud minutiga ning esimese ajalise kattuvuse 90% asemel kattus teine sisselülitumine PV paneelide tootlikkusega 9,5% ulatuses (eeldusel, et sauna keris oli ainuke tarbija sellel hetkel). PV paneelide tootlikkus langes sellel päeval kokku sauna esimese tarbimisega, kui kasutati 12,21 kWh ja toodeti 10,32 kWh ehk kõik toodetud energia kasutati ära nii elektrikerise kui ka teiste majas olevate seadmete poolt.



Joonis 41. Sauna elektrikerise tarbimine ja PV paneelide tootlikkus 3. mail 2015.

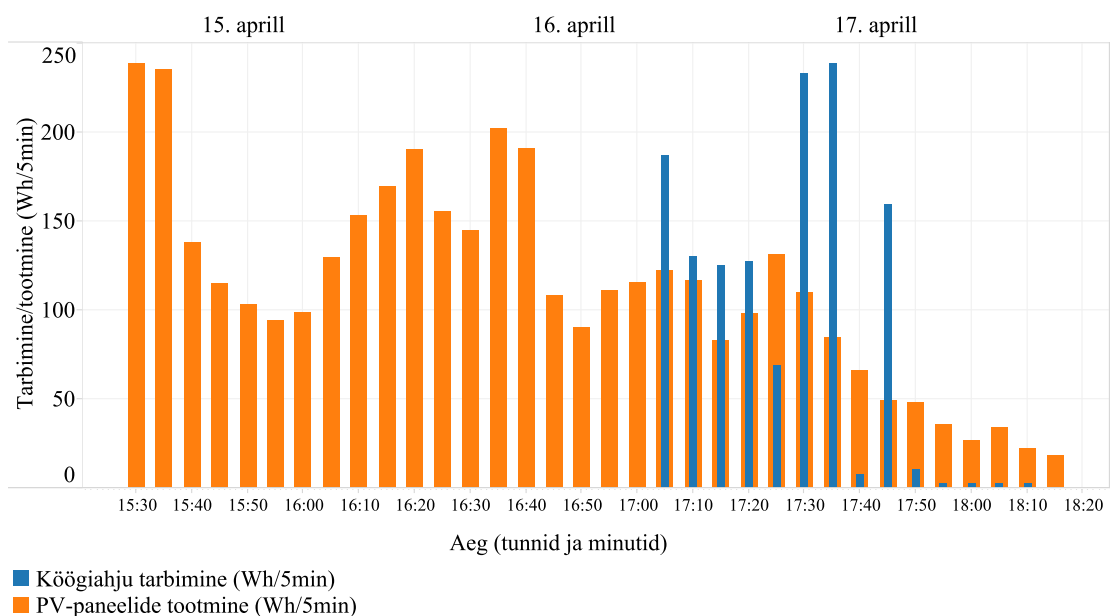
3.3.3. Köögiahi

Söögi valmistamiseks kasutatakse uuritavas eramus peamiselt elektriahju, ajavahemikul 17:00–18:30. Ahju töötsükkel on keskmiselt üks tund ning 15. aprillil kulutati 55-minutilise tsükli jooksul 1,11 kWh (tootlikkus sama perioodil 1,02 kWh). Joonisel 42 on näha, et PV paneelide keskmine tootlikkus on õhtusel perioodil langevas joones ning mida hilisemaks ahju kasutust lükata, seda vähem kasutatakse ära PV paneelide toodetud elektrienergiat.



Joonis 42. Köögiahju elektrienergia kasutus ja PV paneelide tootmine 14.–16. aprillil 2015.

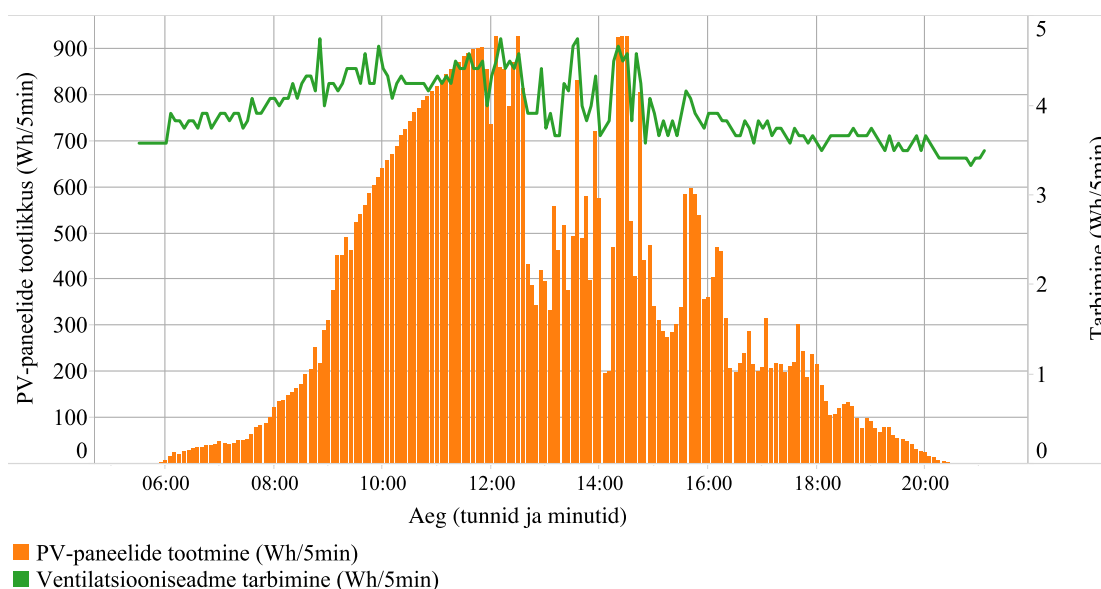
Setlhaolo, D. Xia, X., Zhang, J. artiklis [26]), joonisel 7 näidati, et ahju ühe tunni võrra varasemaks nihutamisega saavutati väiksem kasutatava elektrienergia maksumus. Käesolevas uurimistöös kasutatud PV paneelide andmeid kasutades saab samuti teha järelduse 15. aprillist, kus on joonisel 43 näha, et 60 minuti võrra ahju kasutust varasemaks muutes, oleks olnud kasutada 49% rohkem PV paneelide toodetud elektrienergiat. Perioodil 16:05–17:10 toodeti 2,0 kWh ja perioodil 17:05–18:10 1,02 kWh elektrienergiat.



Joonis 43. Köögi elektriahju tarbimine ja PV paneelide tootlikkus 15. aprillil 2015.

3.3.4. Ventilatsiooniseade

Eramus kasutatakse Paul Novus 300 soojatagastusega ventilatsiooniseadet. Seade on aastaringselt töös ning kasutatav kolmel erineval režiimil. Tavapäraselt hoitakse töös režiim kahte, mille võimsus minutis on keskmiselt 46,9 W. Joonisel 44 selgus, et paneelide tootlikkus oli otseselt seotud ventilatsiooniseadme tarbimisega. Näiteks kell 11:55 langes ventilatsiooniseadme tarbimine 4,5 Wh/5min tarbimiselt 4,0 Wh/5min ning viis minutit hiljem tegid sarnase sammu järgi ka päikesepaneelid. Sarnaseid mustreid tekkis päeva jooksul ka võimsuse suurenedes. Näiteks kell 15:25 tõusis ventilatsiooniseadme tarbimine 3,6 Wh/5min-ilt 4,2 Wh/5min-ni ning perioodil 15:15–15:35 tõusis ka paneelide toodang 274,8 Wh/5min tootlikkuselt 586,0 Wh/5min–ni. Sellest tulenevalt saab järeldada, et kui ventilatsiooniseadme tarbimine langeb, siis langeb 5 minutit hiljem ka tootlikkus ning kui PV paneelide tootlikkus tõuseb, siis 5 minutit hiljem tõuseb ka ventilatsiooniseadme võimsus.



Joonis 44. Paul Novus 300 ventilatsiooniseadme elektrenergia tarbimine ja PV paneeli tootlikkus 25. aprillil 2015.

3.3.5. Pesumasin ja trummelkuivati

Tänu heale koostööle pereemaga pesti pesu 15. aprillil 5 korda järjest ning mõõdeti erinevate programmide ajalist kestvust ja elektrenergia tarbimist. Kokku katsetati nelja pesumasina ja kahte trummelkuivati programmi (joonis 45).

Automaatprogramm 40°C juures kestis ajavahemikus 07:35–08:45. Selle perioodi jooksul tarvitati 0,29 kWh elektrenergia ning toodeti 0,46 kWh. Esimese programmi kasutus oli päevas ka ainuke, mille jooksul PV paneelide toodetud elektrenergia

tootlikkus hommikuste varajaste tundide tõttu ei olnud tarbimisest suurem (eeldusel, et pesumasin on ainuke tarbija).

Pesumasina puuvilla programm 50°C juures ja trummelkuivati töötavad koos talvel, kui õue ei saa pesu kuivama viia. Ajavahemikus 08:46–09:40 tarbiti kokku 0,56 kWh elektrienergia ning toodeti PV paneelidega 0,98 kWh.

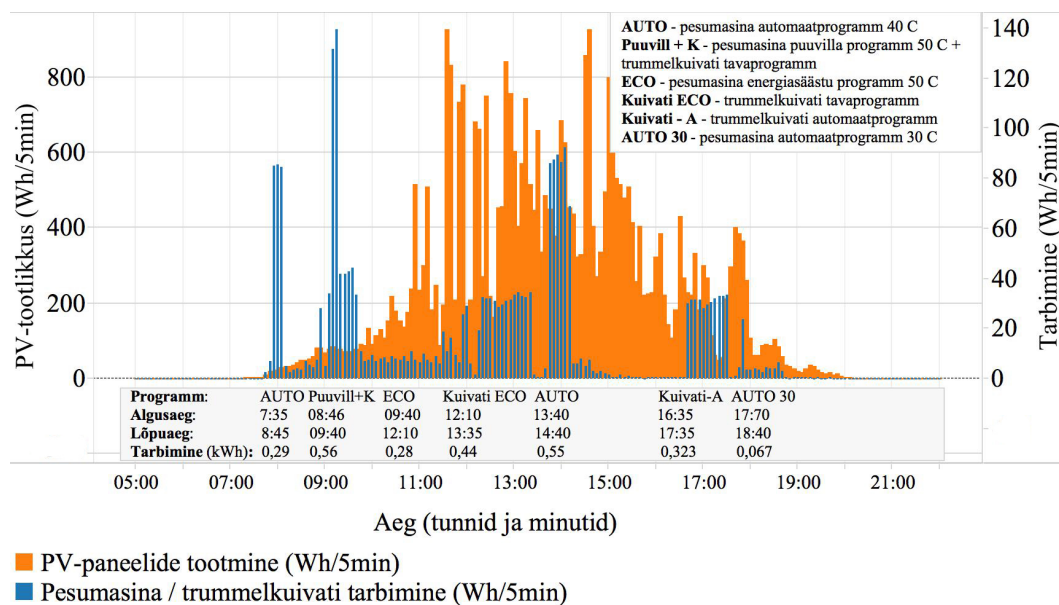
ECO programmiga loodeti saavutada kõige ökonoomsem tarbimine. Tulemustest selgus, et ECO programmi tööaeg 50°C juures oli 09:40–12:10 ehk 2,5 tundi ning tarbitud energia 0,288 kWh. Siinkohal saab järeldada, et ECO programmi kasutus on hea madala PV paneelide tootlikkusega päevade korral, sest siis jaotatakse pesumasina tarbitud summaarne elektrienergia pikema perioodi peale laiali.

Trummelkuivati ECO programmi kasutati perioodil 12:10–13:25 ning selle perioodi jooksul tarvitati 0,44 kWh elektrienergiat ehk erilist energiasäästu ei saavutatud.

Pesumasina automaatprogrammi 40°C juures kasutati uuesti ajavahemikul 13:40–14:40 ning sellel korral oli tarbimine suurem kui hommikul (0,55 kWh). Suurem tarbimine võis olla põhjendatud suuremast pesu kogusest masinas.

Viimase kuivati programmina kasutati tavalist automaatprogrammi, mis töötas 16:35–17:35 ning mis oli kuivati ECO programmist 15 minutit lühem ja 0,12 kWh võrra väiksema kogutarbimisega (tarbis 0,32 kWh).

Viimasena testiti 30° C veega automaatprogrammi ajavahemikul 17:40–18:40, mille jooksul tarbiti ainult 0,067 kWh elektrienergiat.

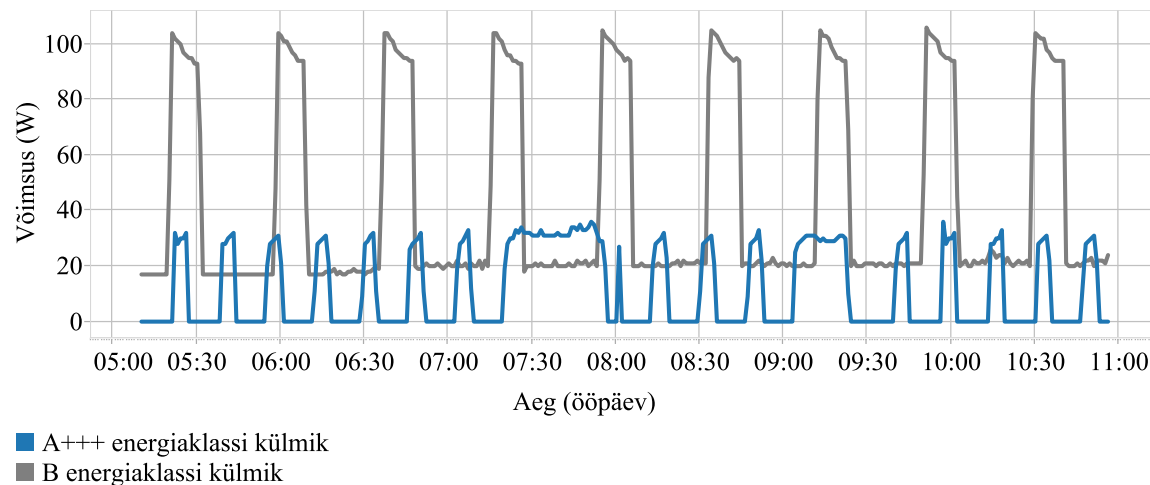


Joonis 45. A+++ energiaklassi pesumasina ja A+ klassi trummelkuivati elektrienergia tarbimine ja PV paneeli tootlikkus viies minutis 15. aprillil 2015.

3.3.6. Külmkapid

Uuritavas eramus on kasutuses külmkapp (energiaklass A+++), veinikülmik (energiaklass B) ja sügavkülmik (energiaklass A++). Sügavkülmiku mõõtmistulemused ei osutunud tõseks, kuna sügavkülmik oli elektrikilbist elektrikute poolt valesti grupeeritud ning monitoorimisel ei olnud seega võimalik saada arvestusteks adekvaatseid tulemusi. A+++ klassi külmik tarvitas üle kolme korra vähem voolu minutis, kui B klassi külmik (joonis 41). Külmkapid on programmeeritud tegema päevas samasuguseid tsükleid ning selle täpsemaks näiteks on tehtud väljavõtte 14. ja 21. aprilli hommikustest perioodidest. Pere ärkamisega kell 06:50 järgneb ka külmkapi avamine 10–30 minuti pärast. Kui külmik avada, siis liigub külm õhk sellest välja ning temperatuur tõuseb. Programmeeritud temperatuuri uuesti saavutamiseks hakkab kompressor intensiivsemalt tööle ning selle tulemusel toimub kell 07:20 ca 30 minutit jooksul suuremal võimsusel elektrienergia tarbimine.

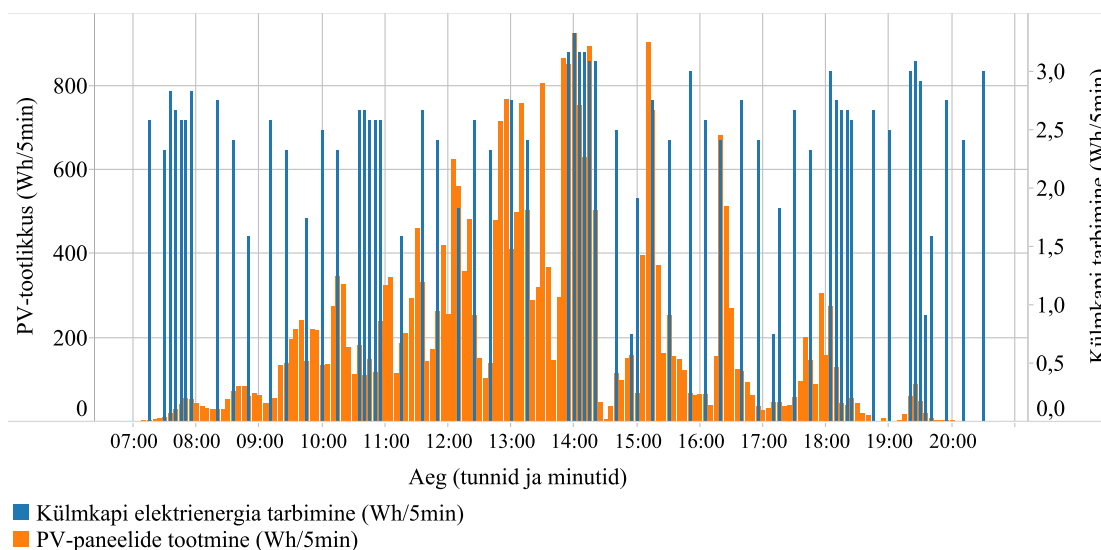
A+++ klassi külmiku maksimaalne kasutatud minutine energiatarve oli 36 W ning iga kümne mitte töötamise minuti tagant käivitus külmik uuesti seitsmeks minutiks. Samas ei lülitunud veinikülmik kordagi välja, olles minimaalselt 17 W võimsuse juures 25-minutiliste perioodidena ning kümne minutiliste tsüklite kaupa 93...104 W.



Joonis 46. Väljavõtte 14. aprilli 05:00–11:00 külmkapi (energiaklass A+++) ja 21. aprilli 05:00–11:00 veinikülmiku (energiaklass B) minuti näiduga elektrienergia võimsusest (W).

Joonisel 47 on välja toodud A+++ energiaklassi külmiku elektrienergia tarbimine ja PV paneelide tootlikkus 16. aprillil 2015 aastal. Tootmise ja tarbimise vahel ei tekkinud loogilist seost, sest külmiku tarbimine ja PV paneelide tootlikkus olid juhusliku sammuga. Siinkohal peame arvestama, et külmiku tarbimine on väga madal ning seetõttu jääb tema elektrienergia kasutus toodetud paneelide elektrienergia sisse ka madalama kui

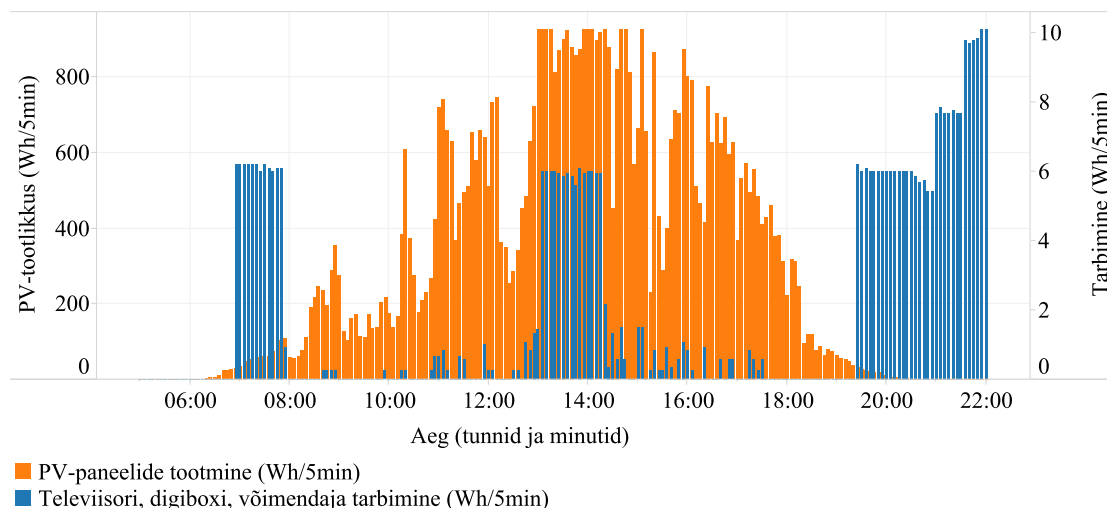
4 Wh/5min tootlikkusega minutite korral (eeldusel, et külmik oleks ainuke seade, mis tarvitaks majas elektrienergiat).



Joonis 47. Külmkapi tarbimine ja PV paneelide elektrienergia tootmine 09:50–16:15, 16. aprillil 2015.

3.3.7. Televiisor, digibox ja võimendaja

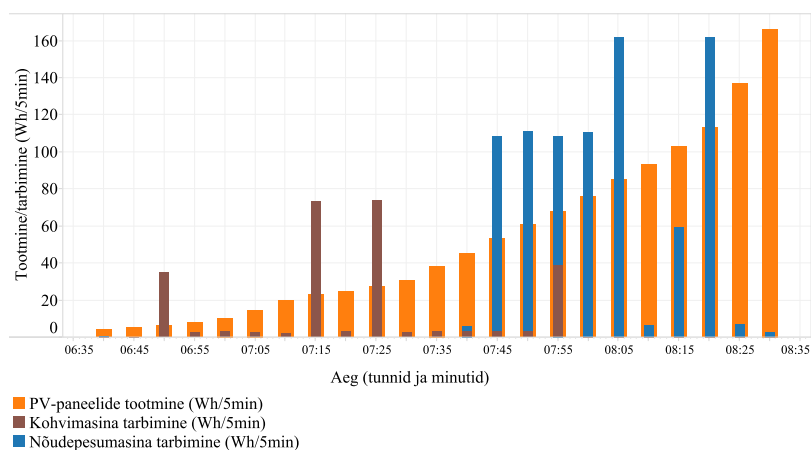
55W võimsusega televiisori kasutus koos võimendaja ja digiboxiga samast pistikust tõi 23. aprillil välja kolm päevast tarbimise tippu. Hommikuti, kui ärgati pandi televiisor kell 06:55 tööle ning lasti sellel töötada kella 07:55ni. Joonisel 48 on näha, et PV paneelide tootlikkus on sadades kordades suurem kui teleri ja teiste teda toetavate seadmete tarbimine, mille tulemusel katavad need päeval ajal teleri elektrienergia vajaduse. 23. aprilli ööpäevane PV paneelide tootlikkus oli 64,59 kWh ja teleri ning teda toetavate seadmete kasutus 0,47 kWh. Alates kell 21:00 lülitati sisse ka võimendaja, mille kasutamine põhjustas tarbimise kaheastmelise kasvu 9,3 Wh/5min-ni.



Joonis 48. Televiisori ja teda toetavate seadmete kasutus ja PV paneelide tootlikkus 23. aprill 2015.

3.3.8. Nõudepesumasin ja kohvimasin

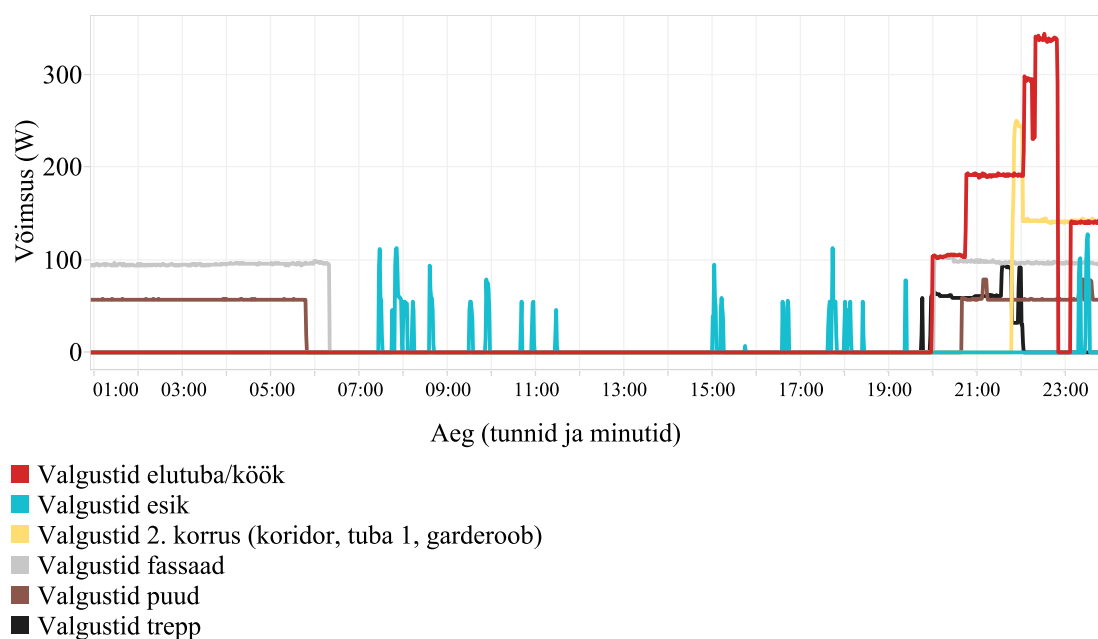
A+++ klassi nõudepesumasin pannakse tavakasutuse juures tööle hommikuti pärast söömist. Joonisel 49 on võrdluses 14. aprilli nõudepesumasina ja 5. mai kohvimasina tarbimine ning PV paneeli tootlikkus 5. mai hommikul. Kuupäevade erinevus tuleneb mõõtmiste erinevast ajast, kuid pereema ütles, et hommikuti on nende seadmete kasutus alati samadel aegadel. Nõudepesumasina kiirprogrammi töötükkel oli 07:43–08:11 ning kohvimasinal 6:50, 7:15 ja 7:25. Tulemustest selgus, et perioodil 06:35–08:30 toodeti 1,21 kWh ning tarvitati kohvimasina poolt 0,24 kWh ja nõudepesumasina poolt 0,86 kWh elektrienergiat.



Joonis 49. Nõudepesumasina kiirprogrammi tarbimine ja PV paneelide tootlikkus 14. aprillil ning kohvimasina kasutus 5. mai hommikul 2015. aastal.

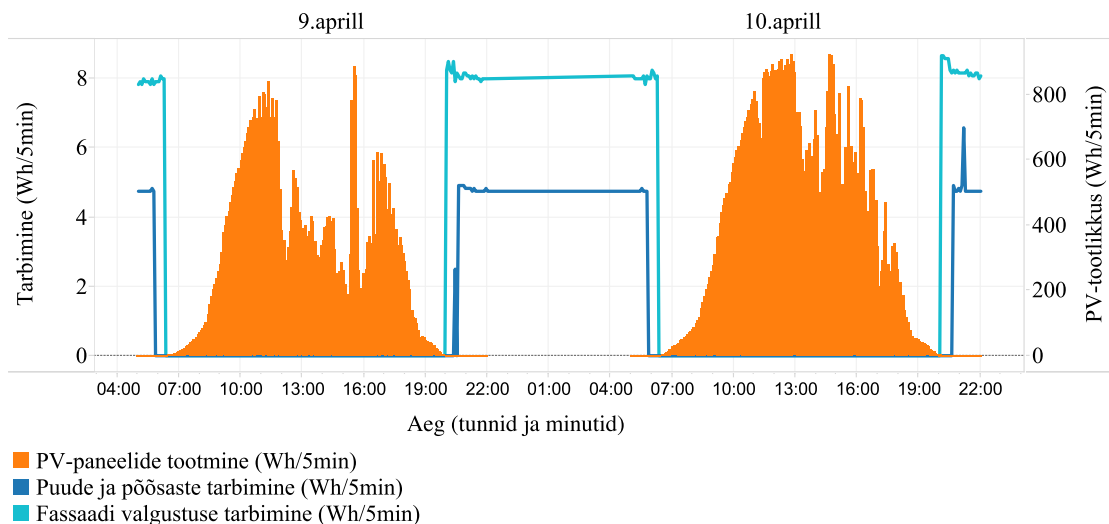
3.3.9. Valgustid

Valgustite kasutuse osas analüüsiti välisvalgustite ja suurema kasutusega sisevalgustite töötamist (joonis 50). Tulemustest selgus, et fassaadi ja puude LED-valgustus töötas terve öö jooksul ning nende töösükkel algas ja lõppes sünkroonis PV paneelide tootlikkusega, sest valgustid on programmeeritud ainult pimedas töötama (joonis 51). Päeva keskel kasutati kõige rohkem automaatselt lülituvat koridori valgustust, mis hakkab tööle majja sisenedes. Öhtusel perioodil kasutati peamiselt elutoa, köögi ning tubade valgusteid.



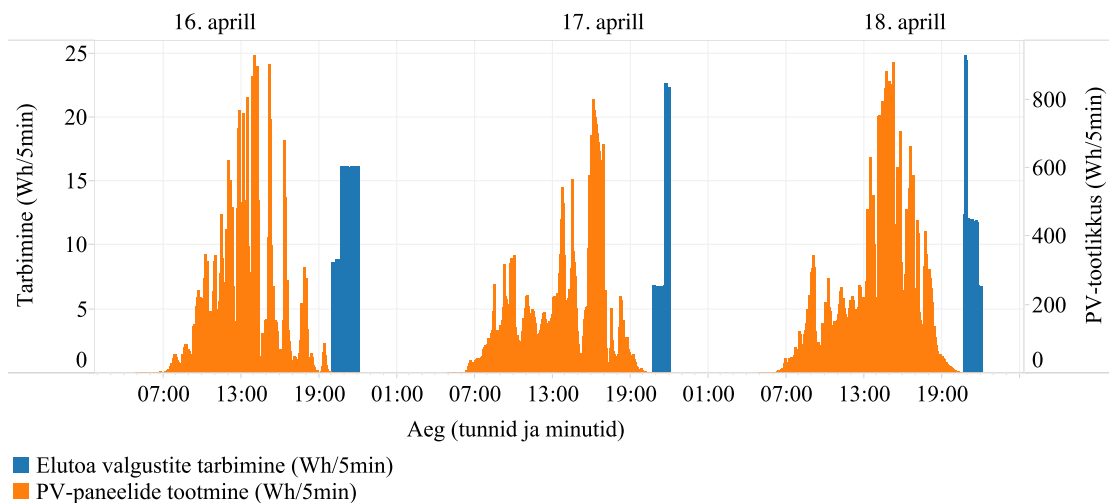
Joonis 50. Mõõdetud valgustite võimsus minuti sammuga, keskmistatud päeval aprillis 2015.

Joonis 51 näitab 9. ja 10. aprilli fassaadi ja puude ning põõsaste LED-valgustuse kasutust, mis oli otseselt seotud päevase valguse puudumisega. Öhtusel ajal, kui päike oli loojunud, hakkasid valgustid automaatselt tööle, ning hommikusel perioodil, kui päike hakkas paistma ning PV paneelid tootma, siis valgustid kustusid. Tootlikkus ja tarbimine ei kattunud erinevate aegade tõttu ühelgi minutil.



Joonis 51. LED välisvalgustite automaatne sisselülitus öösel ja välja lülitumine hommikul ning PV paneelide tootlikkus päeval 9. ja 10. aprillil 2015.

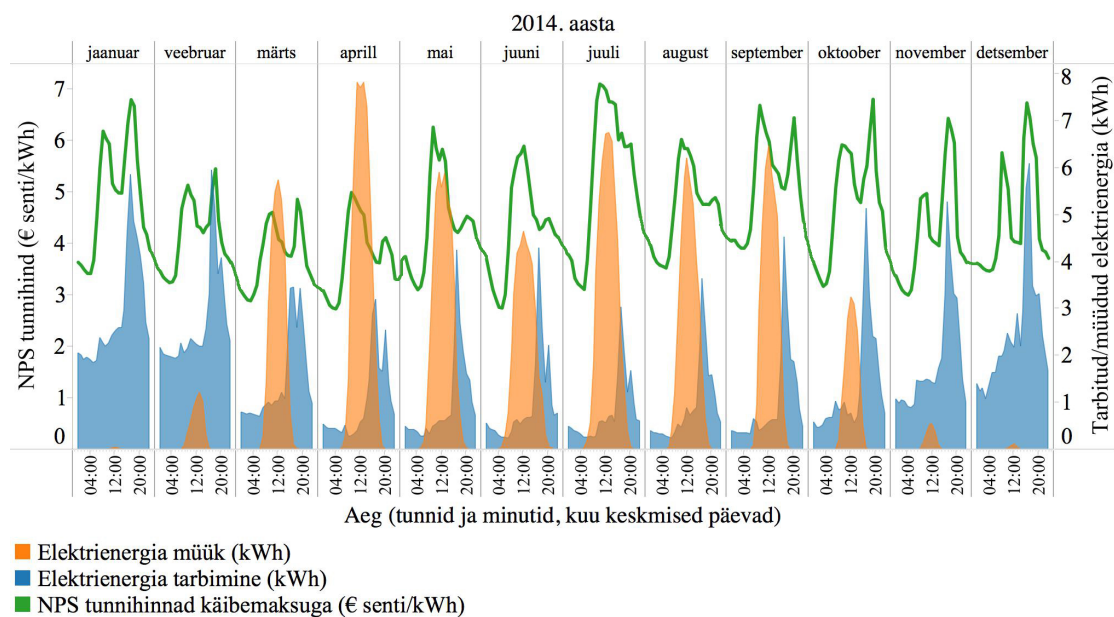
Kõige suurema võimsusega valgustid asuvad uuritavas eramus elutoas ja köögis. Joonisel 52 on näha, et alates minutist, kui PV paneelid enam ei tooda, lülitatakse sisse elutoa ja köögi valgustus ning nii kõikidel uuritud päevadel. Sellest tulenevalt saab järeldada, et kui soovitakse kööki ja elutuba valgustada PV-paneelidelt tuleneva elektrienergiaga, siis peab paigadama eramusse akud, mis annaksid pimeduse saabudes tagasi päeval tipptootmise perioodil toodetud elektrienergiat.



Joonis 52. Elutoa ja köögi valgustite kasutus ning PV paneelide tootlikkus 16. – 18. aprillil 2015.

3.4. Müügist saadud tulu 2014. aastal

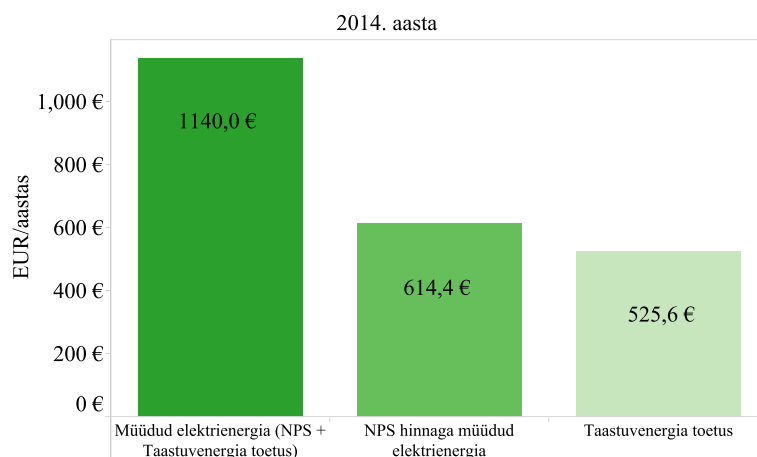
Uuritavas eramus ostetakse ja müüakse elektrit Nord Pool Spot AS (NPS) ettevõtte määratud elektribörsi hinnaga. Joonisel 53 on näha NPS hind elektri tarbimisega sarnases seoses. Elektrienergia tarbimine ja NPS hinna muutumine oli sarnane külmematel kuudel hommikuti kell 07:00–09:00 ja õhtuti kell 16:00–19:00. Juuni oli ainuke kuu aastas, kus tootlikkuse kella 12:00 tipp langes kokku NPS hinna tipuga ning sellest tulenevalt müüdi juunis keskmiselt parima hinnaga PV paneelide toodetud elektrienergiat.



Joonis 53. Keskmise tarbitud, keskmise PV paneelide müüdüd ja keskmise elektrienergia hind 2014. aastal (keskmistatud päevad kõikides tunni andmete põhjal).

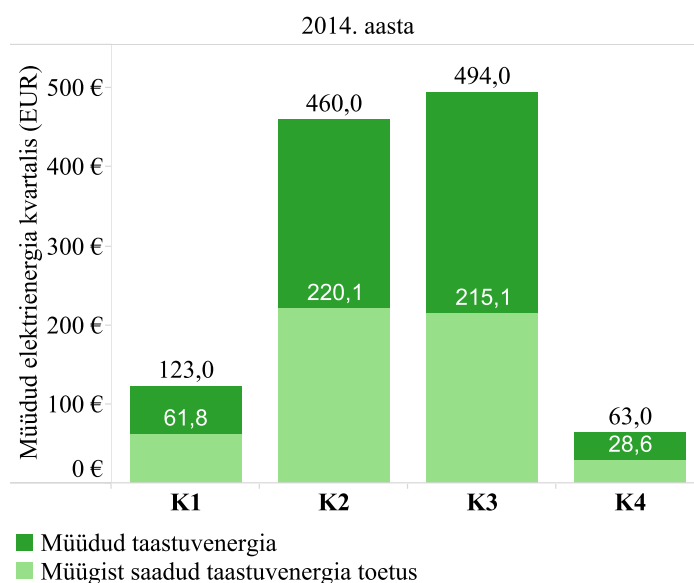
3.4.1. Võrku müüdüd elektrienergia

Seonduvalt elektrituruseadusele sai majaomanik kasutamata jäänud 10160 kWh elektrienergiat võrku tagasi müüa. Tunni põhiselt müüdi Nord Pool Spot börsihinnaga kasutamata jäänud elektrienergiat. Samuti maksti iga toodetud kWh eest taastuvenergia toetust. Kokku osteti juurde 1422 € ja müüdi 1140 € eest elektrienergiat ehk tervele maja kulutatud elektrienergia aastas oli 282 €. Müüdüd taastuvenergiast moodustas 614,4 € (53,9%) börsi hinnaga saadud tulu ning 525,6 € (46,1%) taastuvenergia toetus.



Joonis 54. Elektrienergia müük 2014. aastal

Kvartali kaupa müüdi taastuenergiat kõige rohkem kolmandas kvartalis – 494 €, kuid siinkohal peab arvestama, et saadud taastuenergia toetus oli sellest 43,5% ehk kõikide teiste kvartalite võrreldes kõige väiksem. Vähim müüdi neljandas kvartalis, kui müügi pealt teeniti 63,0 €.



Joonis 55. Müüdüd taastuenergia ja selles sisalduv taastuenergia toetus kvartalis 2014. aastal. K1 (jaanuar, veebruar, märts), K2 (aprill, mai, juuni), K3 (juuli, august, september), K4 (oktoober, november, detsember).

Kokkuvõte

Elektrienergia tarbimise ajaline kattuvus päikesepaneelide tootlikkusega liginullenergiahoones sõltub päikesekiirguse intensiivsusest ja elanike tarbimisharjumustest. Elektrit tootvate päikesepaneelide elektrienergia tootlikkuse maksimumid ei lange päeva lõikes kokku eramus kasutatava elektrienergia tarbimise tippudega. Magistritöö eesmärk oli analüüsida elektrienergia tootlikkust ja tarbimist 2014. aastal liginullenergiahoone eramu näitel.

Tulemustest selgus, et elektrienergia tarbimise tipud moodustuvad õhtusel perioodil vahemikus 17:00–20:00, kui kasutatakse kõõgi elektriahju, käiakse elektrikerisega saunas ja tehakse õhtuseid toimetusi. PV paneelide energiatootlikkuse tipud langesid keskpäevasele ajavahemikule 11:00–13:00. Enda toodetud elektrienergiast kasutati ära 2115 kWh ehk ainult 17,2%, mis tulenes paneelide suurest tootlikkusest päeva keskel ning majas elava pere väikesest tarbimisest päevasel ajal.

Aastas tarbiti 13 187 kWh, toodeti 12 275 kWh, osteti võrgust juurde 11 072 kWh ja müüdi tagasi võrku 10 160 kWh elektrienergiat. Parima tootlikkusega kuul aprillis toodeti 1918 kWh elektrienergiat. 86,6% sellest müüdi vähese tarbimise tõttu edasi võrku, sest eramul puuduvad energia salvestamiseks vajalikud akud.

Minu analüüs näitas, et kõige suuremad tarbijad olid maasoojuspump ja sauna elektrikeris, mis tarbisid kokku 7052 kWh aastas. Ajavahemikul 24.03–05.04.2015 teostati maasoojuspumbale ka minutipõhine tarbimise analüüs, millest selgus, et PV paneelide suure tootlikkusega päevadel hakkas pump tööle siis, tootlikkus oli samal minutil languses. Perioodil 27.04–03.05.2015 uuriti eramu teise suurema tarbija elektrikerise kasutust ning selgus, et ühe saunakülatuse käigus kasutatakse 17,1 kWh elektrienergiat. 3. mail uuritud kerise kasutus näitas kahte tarbimise tsüklit. Kell 16:15 tööle pandud elektrikerise tarbimine langes kokku 90% ulatuses PV paneelide toodetud elektrienergiaga ning teise, 19:25 tööle pandud tsükliga oli kokkulangevus madala tootlikkuse tõttu ainult 9,5%.

Õhtusel perioodil kasutatava köögi elektriahu elektri tarbimist analüüsid leiti, et kui 15. aprillil oleks pereema seda kasutanud 60 minutit varasemal perioodil, siis oleks olnud potentsiaal ära kasutada 49% rohkem päikesepaneelide toodetud elektrienergiast.

Koos taastuenergia toetusega teenis eramu omanik elektrienergia müügist 1140 €, millest 614,4 € moodustas Nord Pool Spot börsihinnaga müüdüd elektrienergia ning 525,6 € taastuenergia tootjatele välja makstav toetus. Siinkohal peab arvestama, et kui riik lõpetab taastuenergia toetuse maksmise, siis eelkõige oleks otstarbekas PV paneelide toodetud elektrienergiat võrku müümise asemel ise seadmeid ajastades ära kasutada või näiteks leida uut tüüpi lahendusi, kuidas elektrienergiat salvestada.

Antud uurimistöö jätkamiseks oleks vaja uurida katusel olevate solar thermal päikesepaneelide tööd, mille eesmärk on maja kütmine ja boilerivee soojendamine, sest päikese puudumisel toimub kütmine maasoojuspumbaga. Samuti oleks otstarbekas uurida PV paneelide toodetud elektrienergia kasutuse majanduslikku tasuvust tunni täpsusega ning näha, kui palju on võimalik rahaliselt kokku hoida seadmete ajastamisel päikesepaneelide suure tootlikkusega perioodidel. Arvestades järjest kasvavat trendi elektriautode soetamise osas, saab välja töötada kasutusmudeleid ja teha arvutusi, mille abil saab analüüsida auto akude laadimise otstarbekust PV paneelide tipptootmise ajal. See muutub eriti aktuaalseks peale seda, kui taastuenergia toetust enam ei maksta, misjärel oleks mõistlik PV paneelide abil toodetud elektrienergiat ära kasutada pere või ettevõtte transpordikulude ning keskkonna saastamise vähendamiseks.

The supply and demand of electricity in a nearly zero-energy building

5. Summary

The supply and demand of electricity in a nearly zero-energy building that uses solar panels to produce power depend on the availability of direct sunlight and the residents' electricity usage habits. However, the production peak times of PV panels do not match with the electricity peak needs of the family. The main goal of this thesis was to find out where the supply and demand of electricity overlap in 2014.

The most amount of power was consumed in the evening between 17:00–20:00 when the family used the oven, went to the sauna and turned the indoor lighting on. PV panels' production peaked at noon, around 11:00–13:00. The results showed that the self-consumption of PV panels was 17.2% (2115 kWh) of the total production. In 2014, the nearly zero-energy building consumed 13,187 kWh, produced 12,275 kWh, bought 11,072 kWh from the grid and sold 10,160 kWh of energy to the grid. The best production month was April when the panels produced 1918 kWh power.

The usage of electricity was monitored with hourly intervals through 2014 and with one-minute intervals between March and April of 2015. The two biggest power consumers were the house's geothermal heat pump and the sauna steam. The heat pump was mainly used during winter when the weather was cold and there was not enough sunlight available. The results also showed that a single visit to the sauna produces two peaks during its period of peaking demand. For instance, on May 3 when the sauna steam was switched on at 16:15, it used nearly 90% of the PV panels' produced energy. After 1.5 hours, it automatically stopped. When the steam was manually turned on again at 19:15, it used less than 9.5% of the panels' electricity.

The one-minute interval analysis of the electricity usage of the oven showed that if the family were to reschedule the usage of the oven by 1 hour, they would need to buy 49% less energy from the grid, since their own production would suffice.

The total amount of electricity that was sold to the grid yielded a €1140 revenue, of which 54% was actually sold at the market price (Nord Pool Spot) – the rest comprised of government support. In the future the attention towards the self-consumption of PV panels will most likely grow. Once the government stops their support, it would be financially more reasonable to cover the electricity consumption needs from the PV panels' production.

6. Kasutatud kirjandus

- [1] "Energiatõhususe miinimumnõuded – Riigi Teataja."
URL: <https://www.riigiteataja.ee/akt/105092012004?leiaKehtiv>.
(Viimati külastatud 13/04/2015).
- [2] "Avaleht» Passiivmaja | Definiitsioon."
URL: <http://www.passiivmajaliit.ee/et/passiivmaja-moisted>.
(Viimati külastatud 13/04/2015).
- [3] "Hoonete energiatõhususe arvutamise meetodika – Riigi Teataja."
URL: <https://www.riigiteataja.ee/akt/118102012001?leiaKehtiv>. (Viimati külastatud 13/04/2015).
- [4] M. P. Merike Pinn, Rein Pinn, "Elekter päikesest ja tuulest", no.1, lk 109-149, 2012.
- [5] K. Timpmann, "Füüsika, Elektriõpetus.". Tallinn: Koolibri, lk 75-79, 2014.
- [6] W. Feist, "PHPP Passive House Planning Package.", lk. 13, Veb. 2007.
- [7] "Annual Energy Outlook 2014."
URL: [http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383\(2014\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383(2014).pdf). (Viimati külastatud 13/04/2015).
- [8] Statistika amet, "Eesti arve ja fakte.", lk 44, 2014.
- [9] Statistika amet, "Eesti statistika aastaraamat." (ingl Statistical yearbook of Estonia), lk 36, 2014.
- [10] "Estonian Windpower Association. "
URL: <http://www.tuuleenergia.ee/2015/04/tuuline-aasta-algus-upitas-taastuenergia-toodangut-paikesel-on-veel-palju-anda/>. (Viimati külastatud 20/04/2015).
- [11] "Elering - Taastuenergia moodustas 2014. aastal 14,8 protsenti elektri kogutarbimisest."
URL: <http://elering.ee/taastuenergia-moodustas-2014-aastal-148-protsenti-elektri-kogutarbimisest/>. (Viimati külastatud 15/05/2015).
- [12] D. Fischer, A. Härtl, and B. Wille-Haussmann, "Model for Electric Load Profiles With High Time Resolution for German Households," Energy Build., nr. 92, lk. 170–179, Veb. 2015.

- [13] "Elering - Taastuenergiast toodetud kogused ja prognoos."
URL: <http://elering.ee/toodangu-prognoos-2/>. (Viimati külastatud 2/05/2015).
- [14] "Solar Power World - 2015 Renewable Energy Handbook"
URL: http://www.solarpowerworld-digital.com/solarpowerworld/2015_renewable_energy_handbook#pg1. (Viimati külastatud 2/05/2015).
- [15] I. Heras-Saizarbitoria, E. Cilleruelo, and I. Zamanillo, "Public acceptance of renewables and the media: an analysis of the Spanish PV solar experience," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, nr. 15, lk 4685–4696, Dets. 2011.
- [16] "China Solar Power, Solar Power Manufacturers & Suppliers - Made-in-China.com."
URL: http://www.made-in-china.com/products-search/hot-china-products/Solar_Power.html. (Viimati külastatud 13/05/2015).
- [17] "Päikesepaneeli ehitus | Taastuenergia OÜ."
URL: <http://www.taastuenergia.ee/paikesepaneel-ehitus-efektiivsus-monokristall-polukristall.html>. (Viimati külastatud 11/05/2015).
- [18] "MPPT kontrolleri tööpõhimõte | Taastuenergia OÜ."
URL: <http://www.taastuenergia.ee/mppt-kontroller.html>. (Viimati külastatud 11/05/2015).
- [19] F. Paraschiv, D. Erni, and R. Pietsch, "The impact of renewable energies on EEX day-ahead electricity prices," *Energy Policy*, nr. 73, lk. 196–210, Okt. 2014.
- [20] S. Clò, A. Cataldi, and P. Zoppoli, "The merit-order effect in the Italian power market: The impact of solar and wind generation on national wholesale electricity prices," *Energy Policy*, nr. 77, lk. 79–88, Veb. 2015.
- [21] P. Goli and W. Shireen, "PV powered smart charging station for PHEVs," *Renew. Energy*, nr. 66, lk. 280–287, Jun. 2014.
- [22] S. Cao and K. Sirén, "Impact of simulation time-resolution on the matching of PV production and household electric demand," *Appl. Energy*, nr. 128, lk. 192–208, Sep. 2014.
- [23] "Powerwall | Tesla Motors."

- URL: <http://www.teslamotors.com/powerwall>. (Viimati külastatud 16/05/2015).
- [24] “Why Tesla’s Powerwall Is Just Another Toy For Rich Green People - Forbes.”
URL: <http://www.forbes.com/sites/christopherhelman/2015/05/01/why-teslas-powerwall-is-just-another-toy-for-rich-green-people/>. (Viimati külastatud 15/05/2015).
- [25] R. Luthander, J. Widén, D. Nilsson, and J. Palm, “Photovoltaic self-consumption in buildings: A review,” *Appl. Energy*, nr. 142, lk. 80–94, Mar. 2015.
- [26] J. Widén, “Improved photovoltaic self-consumption with appliance scheduling in 200 single-family buildings,” *Appl. Energy*, nr. 126, lk. 199–212, Aug. 2014.
- [27] D. Setlhaolo, X. Xia, and J. Zhang, “Optimal scheduling of household appliances for demand response,” *Electr. Power Syst. Res.*, nr. 116, lk. 24–28, Nov. 2014.
- [28] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, and C. Pout, “A review on buildings energy consumption information,” *Energy Build.*, nr. 40, lk. 394–398, 2008.
- [29] G. Wood and M. Newborough, “Dynamic energy-consumption indicators for domestic appliances: environment, behaviour and design,” *Energy Build.*, vol. 35, nr. 8, lk. 821–841, Sep. 2003.
- [30] M. Martiskainen and J. Coburn, “The role of information and communication technologies (ICTs) in household energy consumption-prospects for the UK,” *Energy Effic.*, nr. 4, lk. 209–221, 2011.
- [31] I. Richardson, M. Thomson, D. Infield, and C. Clifford, “Domestic electricity use: A high-resolution energy demand model,” *Energy Build.*, nr. 10, lk. 1878–1887, Okt. 2010.
- [32] “Arved ja tasumine - Eesti Energia.”
URL: <https://www.energia.ee/arved>. (Viimati külastatud 20/04/2015).
- [33] “220 Energia » Korduma kippuvad küsimused.”
URL: <http://220energia.ee/kkk/>. (Viimati külastatud 20/04/2015).
- [34] “Elektri börsihind - Eesti Energia.”

- URL: <https://www.energia.ee/elektrituruhind>. (Viimati külastatud 20/04/2015).
- [35] "Kuidas hind kujuneb? - Elektrilevi."
URL: <https://www.elektrilevi.ee/et/hinna-kujunemine>. (Viimati külastatud 20/04/2015).
- [36] "Elektrituruseadus – Riigi Teataja."
URL: <https://www.riigiteataja.ee/akt/112072014021?leiaKehtiv>. (Viimati külastatud 20/04/2015).
- [37] "Elering - Taastuenergia tasu 2015."
URL: <http://elering.ee/taastuenergia-tasu-2012/>. (Viimati külastatud 20/04/2015).
- [38] "Elering - Taastuenergia tasu."
URL: <http://elering.ee/taastuenergia-tasu/>. (Viimati külastatud 20/04/2015).
- [39] "Elering - Taastuenergia tasu 2012."
URL: <http://elering.ee/taastuenergia-tasu-2012/>. (Viimati külastatud 20/04/2015).
- [40] "Elering - Taastuenergia tasu 2013."
URL: <http://elering.ee/taastuenergia-tasu-2013/>. (Viimati külastatud 20/04/2015).
- [41] "Elering - Taastuenergia tasu 2014."
URL: <http://elering.ee/taastuenergia-tasu-2014/>. (Viimati külastatud 20/04/2015).
- [42] "Alkoholi-, tubaka-, kütuse- ja elektriaktsiisi seadus – Riigi Teataja."
URL: <https://www.riigiteataja.ee/akt/13152698?leiaKehtiv>. (Viimati külastatud 20/04/2015).
- [43] "Taastuenergia tasu ja elektriaktsiis - Elektrilevi."
URL: <https://www.elektrilevi.ee/taastuenergia-tasu>. (Viimati külastatud 20/04/2015).
- [44] "Avaleht - Eesti Energia."
URL: <https://www.energia.ee/et/avaleht>. (Viimati külastatud 20/04/2015).
- [45] "Elering - Taastuenergia toetus."

- URL: <http://elering.ee/taastuenergia-toetus/>. (Viimati külastatud 20/04/2015).
- [46] “Maa-amet: Geoportaal: Avaleht.”
URL: <http://geoportaal.maaamet.ee/>. (Viimati külastatud 15/05/2015).
- [47] “Seiretulemused, energiatõhusus.”
URL: http://www.tuit.ut.ee/sites/default/files/tuit/seiretulemused_energiatohusus_mauring_2014-12-01.pdf. (Viimati külastatud 12/04/2015).
- [48] “Seiretulemused: soojuslik mugavus ja piirete toimivus.”
URL: http://www.tuit.ut.ee/sites/default/files/tuit/seiretulemused_soojuslik_mugavus_piirete_toimivus_kalamees_2014-12-01.pdf. (Viimati külastatud 12/04/2015).
- [49] “Suntrol Portal | Päikeseelektrijaam 12.94 kW Põlvas (63305 Põlva).”
URL: <http://www.suntrol-portal.com/en/page/paikesepaneelid-polva>. (Viimati külastatud 17/05/2015).
- [50] “Kauglugemine - Elektrilevi.”
URL: <https://www.elektrilevi.ee/kauglugemine>. (Viimati külastatud 17/05/2015).
- [51] A. de Almeida, P. Fonseca, B. Schlomann, and N. Feilberg, “Characterization of the household electricity consumption in the EU, potential energy savings and specific policy recommendations,” *Energy Build.*, nr. 8, lk. 1884–1894, Aug. 2011.
- [52] “2014. aasta ilmaülevaade | Riigi Ilmateenistus.”
URL: <http://www.ilmateenistus.ee/2015/01/2014-aasta-ilmaulevaade/>. (Viimati külastatud 17/05/2015).
- [53] “Roheline energia - Eesti Energia.”
URL: <https://www.energia.ee/roheline-energia>. (Viimati külastatud 15/04/2015).
- [54] L. Kuldar, “Suulised andmed ja e-mail,” 2015.
- [55] “Vaatlusandmed - Riigi IlmateenistusRiigi Ilmateenistus.”
URL: <http://www.ilmateenistus.ee/ilm/ilmavaatlused/vaatlusandmed/>. (Viimati külastatud 18/05/2015).

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Evert Eero, (sünnikuupäev: 07.02.1990)

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose "Elektrienergia tootmine ja tarbimine liginullenergia hoone näitel", mille juhendaja on

Tõnu Mauring,

1.1 reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

1. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
2. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 19.05.2015