

Delia Reimann

**PÄIKESEELEKTRIJAAMA
TOOTLIKKUSE ANALÜÜS JA TOODETUD
ELEKTRI OSAKAAL HOONE
ELEKTRITARBIMISES BERNHARD
SCHMIDTI BÜROOHOONE NÄITEL**

LÕPUTÖÖ

Tehnoloogia ja ringmajanduse instituut
Keskkonnatehnoloogia ja -juhtimise õppekava
Juhendajad: Kristo Vaher, Ander Pukk

Tallinn 2021

Mina, Delia Reimann, tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja teostele on viidatud õiguspäraselt.

Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autori/te/le ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

Juhendaja Kristo Vaher (allkirjastatud digitaalselt)

Juhendaja Ander Pukk (allkirjastatud digitaalselt)

Lõputöö on kaitsmisele lubatud tehnoloogia ja ringmajanduse instituudi direktori korraldusega nr 1-14/58 (kuupäev digiallkirjas).

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Delia Reimann

sünnikuupäev: 19.11.1976

annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose **Päikeseelektrijaama tootlikkuse analüüs ja toodetud elektri osakaal hoone elektritarbimises Bernhard Schmidti büroohoone näitel**

1. elektroonseks avaldamiseks kõrgkooli repositooriumi kaudu;
2. kui lõputöö avaldamisele on instituudi direktori korraldusega kehtestatud tähtajaline piirang, lõputöö avaldada pärast piirangu lõppemist.

Olen teadlik, et nimetatud õigused jäävad alles ka autorile ja kinnitan, et:

1. lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid ega muid õigusi.

Tallinnas (allkirjastatud digitaalselt, kuupäev digiallkirjas)

SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	5
1 PÄIKESEENERGIA.....	7
1.1 Päikeseenergia kasutamine Euroopa Liidus.....	7
1.2 Päikeseenergia kasutamine Eestis.....	10
2 PÄIKESEELEKTRIJAAM.....	11
2.1 Võrguühendusega päikeseelektrijaam.....	11
2.2 Võrguühenduseta päikeseelektrijaam.....	12
2.3 Päikesepaneelide tehnoloogia.....	13
2.3.1 Monokristallilised päikesepaneelid.....	14
2.3.2 Polükristallilised päikesepaneelid.....	14
2.3.3 Õhukesekilelised päikesepaneelid.....	14
2.4 Päikesepaneelide efektiivsust mõjutavad tegurid.....	15
2.5 Inverterid.....	15
3 BERNHARD SCHMIDTI MAJA PÄIKESEELEKTRIJAAM.....	16
3.1 Büroohoone üldandmed.....	16
3.2 Päikeseelektrijaama andmed.....	17
4 PÄIKESEELEKTRIJAAMA TOOTLIKKUSE ANALÜÜS.....	19
4.1 Päikeseelektrijaama jõudlussuhe.....	19
4.2 Päikeseelektrijaama prognoositud tootlikkuse ja tegeliku tootlikkuse võrdlevanalüüs.....	21
4.3 Büroohoone elektritarbimine.....	28
4.4 Päikeseelektrijaama toodangu osakaal büroohoone elektritarbimises.....	30
5 JÄRELDUSED.....	32
KOKKUVÕTE.....	35
SUMMARY.....	37
VIIDATUD ALLIKAD.....	39
LISAD.....	42
Lisa 1. Päikeseelektrijaama jõudlussuhte erinevused 2016. aasta kuude lõikes, %.....	43
Lisa 2. Päikeseelektrijaama jõudlussuhte erinevused 2017. aasta kuude lõikes, %.....	44
Lisa 3. Päikeseelektrijaama jõudlussuhte erinevused 2018. aasta kuude lõikes, %.....	45
Lisa 4. Päikeseelektrijaama jõudlussuhte erinevused 2019. aasta kuude lõikes, %.....	46

Lisa 5. Päikeseelektrijaama jõudlussuhte erinevused 2020. aasta kuude lõikes, %.....	47
Lisa 6. Tegeliku ja prognoositud tootlikkuste erinevused 2016. aastal	48
Lisa 7. Tegeliku ja prognoositud tootlikkuste erinevused 2017. aastal	49
Lisa 8. Tegeliku ja prognoositud tootlikkuse erinevused 2018. aastal.....	50
Lisa 9. Tegeliku ja prognoositud tootlikkuse erinevused 2019. aastal.....	51
Lisa 10. Tegeliku ja prognoositud tootlikkuse erinevused 2020. aastal.....	52
Lisa 11. Päikesekiirguse mõjud päikeseelektrijaama süsteemile	53

SISSEJUHATUS

Euroopa Liidu liikmesriigid on seadnud endile ambitsioonikad eesmärgid ning võtnud kohustuse olla juhtrollis ülemaailmses kliimamuutuste vastases võitluses. 2009. aastal võeti vastu Euroopa Liidu liikmesriike siduv kliima- ja energiapakett eesmärkidega 2020. aastani. Euroopa Liit uuendas seatud eesmäärke 2014. aastal võttes vastu „Kliima- ja energiapoliitika raamistiku aastani 2030“. Vastu võetud uue raamistiku peamised eesmärgid on kasvuhoonegaaside heitkoguse vähendamine 40% võrra võrreldes 1990. aastaga. Tarbitavast energiast 27% peab tootma taastuvatest energiaallikatest ning energiatõhusust tuleb suurendada 27% võrra. Taastuenergia osakaalu suurendamise prioriteetideks on elektri-, kütte- ja jahutus- ning transpordisektor. [1], [2]

Euroopa Liidu kliimapoliitika eesmärkidest juhindudes on Eesti Vabariigi Valitsus heaks kiitnud „Energiamajanduse arengukava aastani 2030“. Arengukava meetmete tulemusel aastaks 2030. moodustab taastuvatest energiaallikatest elektri tootmine 50% kogu sisemaisest elektri lõpptarbimisest ning uued hooned vastavad liginullenergiahoone energiatõhususarvu väärtusele. [3]

Eestis kasutatakse elektri tootmiseks erinevaid taastuvaid energiaallikaid. Elektrit toodetakse näiteks puidust, biogaasist ja biomassist. Lisaks toodetakse elektrienergiat hüdroenergiast, tuuleenergiast ja päikeseenergiast. Päikeseenergia kasutus on Eestis viimasel paaril aastal hüppeliselt kasvanud. AS Eleringi andmetel on 2020. aasta seisuga päikesest elektrienergia tootjaid üle 6300. Võrreldes 2019. aastaga on tootjate arv kolmekordistunud. Sealjuures ei ole 2020. aasta arvestuses neid tootjaid, kes aasta viimasel päeval veel deklareerisid tootmisvalmidust. AS Eleringi andmetel on kontrollimisel ja registreerimise ootel üle 4500 kuni 50 kW tootmisvõimsusega elektrijaama. See tähendab, et 2021. aastaks on elektrivõrguga liitunud päikeseelektri tootmisvõimsused Eestis ligikaudu 500 MW mahus. [4]

Üldjuhul paigaldatakse päikeseelektrijaam konkreetse hoone, tööstuse või tootmise tarbeks. Sellega vähendatakse elektri tarbimist elektrivõrgust, millega kaasneb tarbijale elektrikulude vähenemine. Väheneb ka fossiilkütustest tulenev õhku heidetav CO₂ kogus.

Linnakeskkonnas kasutatakse päikeseelektrijaamade paigaldamiseks erinevaid viise. Levinud on linnakeskkonnas paigaldada päikesepaneelid hoone katusele. Katustele on võimalik paigaldada lisaks raamitud päikesepaneelidele ka ehitusintegreeritud päikesepaneelid, mis asendavad katusekattematerjali. Päikesepaneelide kasutamine hoone fassaadil on veel vähelevinud. Hoone

fassaadidel on võimalik kasutada fassaadipaneele ja ehitisintegreeritud päikesepaneele. Viimased täidavad lisaks päikeseenergiast elektrienergia tootmisele fassaadil ka kattematerjali ülesannet.

Lõputöö teema sai valitud ajendatuna autori isiklikust huvist päikeseenergia lahenduste kasutamisel büroohoonete elektri tarbimise vähendamiseks elektrivõrgust ning sellega kaasnevast mõjust hoone elektri tarbimisse.

Käesoleva töö eesmärkideks on võrrelda päikeseelektrijaama jõudlussuhet, prognoositud ja tegeliku tootlikkust ning hinnata toodetud elektri mõju hoone elektritarbimisele. Saadud tulemused on huvipakkuvad nii kinnisvara haldavatele või omavatele ettevõtetele, kui ka hoonete tulevastele üürnikele.

Lõputöö koosneb viiest peatükist. Esimeses ja teises peatükis antakse lõputööle teoreetiline taust, kirjeldatakse päikeseenergia kasutamisest Euroopa Liidus ja Eestis, päikeseelektrijaama tööpõhimõtet, päikesepaneelide ja inverterite tehnoloogiaid.

Kolmandas peatükis esitatakse büroohoone tehnilised andmed. Kirjeldatakse päikesepaneelide paiknemist büroohoone fassaadil ja päikeseelektrijaama lahendust ning kasutatud seadmeid.

Neljandas peatükis võrreldakse päikeseelektrijaama süsteemi jõudlussuhet, teostatakse büroohoone päikeseelektrijaama prognoositud ja tegeliku tootlikkuse võrdlusanalüüs. Analüüsis kasutatud prognoositud tootlikkuse andmed põhinevad kahel erineval arvutusmeetodil. Prognoositud tootlikkuse andmed on saadud PVGIS päikeseenergiakalkulaatoriga ning päikeseelektrijaama paigaldanud ettevõtte arvutusmeetodil. PVGIS (*Photovoltaic Geographical Information System*) võimaldab prognoosida päikeseenergiasüsteemi tootlikkust [5]. Ettevõtte prognoositud tootlikkuse arvutusmeetodi tulemused on ettevõtte poolt sisestatud päikeseelektrijaama jälgimis- ja monitooringusüsteemi Solar-Log. Seega on lõputöös kasutatud andmed saadud reaalsest monitooringusüsteemi andmebaasist. Neljandas peatükis analüüsitakse ka päikeseelektrijaama toodetud elektrienergia mõju kogu hoone elektritarbimisele. Büroohoone elektritarbimise info põhineb hoone haldajalt saadud andmetel ning päikeseelektrijaama toodetud elektri andmed Solar-Log monitooringusüsteemi andmebaasist.

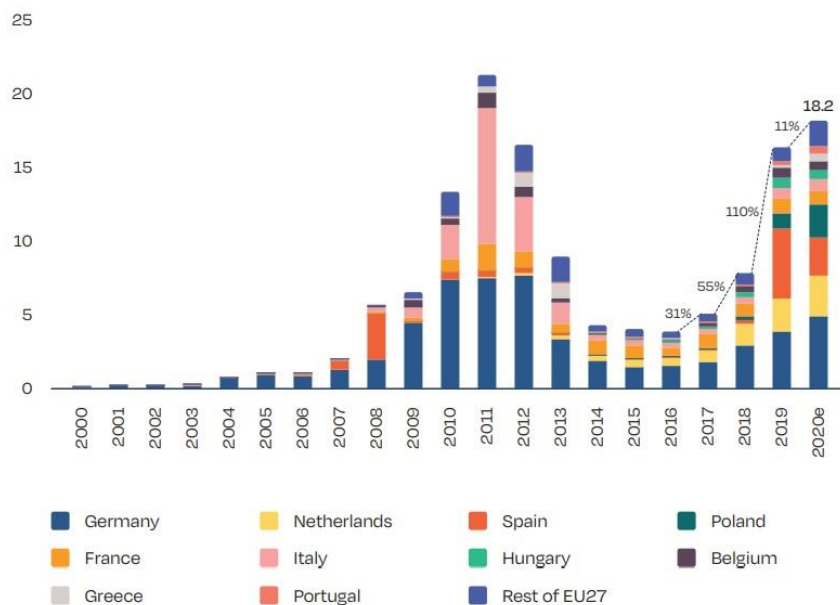
Viiendas peatükis esitatakse järeldused töö peamiste küsimuste kohta – päikeseelektrijaama prognoositud ja tegeliku tootlikkuse paikapidavuse võrdlus ning päikeseelektrijaama toodetud elektri mõju hoone elektritarbimisele.

1 PÄIKESEENERGIA

1.1 Päikeseenergia kasutamine Euroopa Liidus

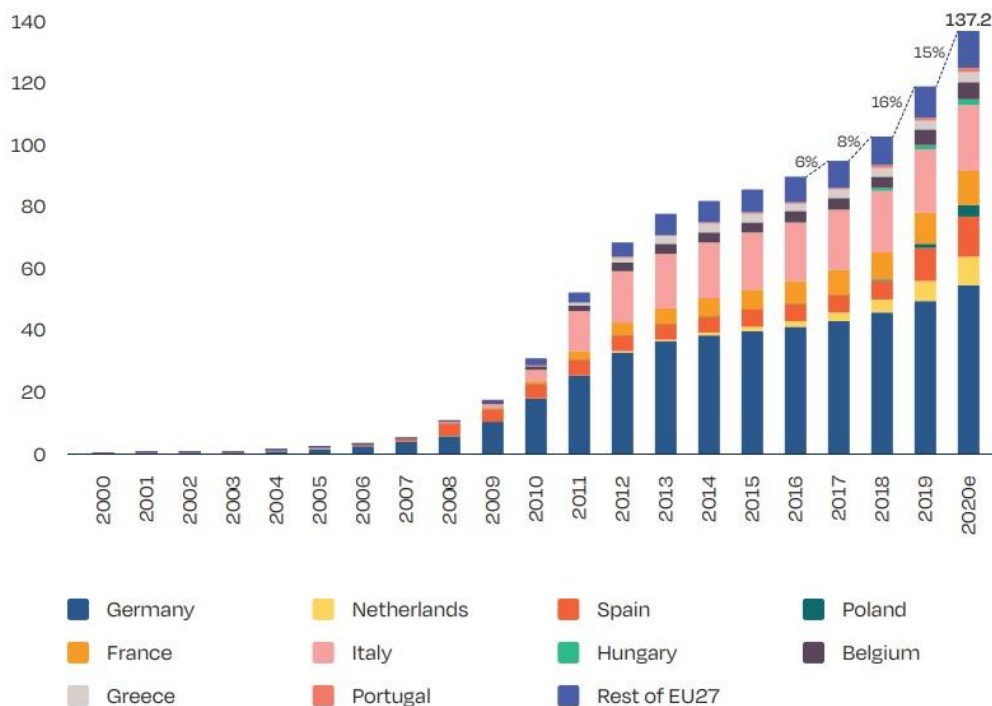
Viimaste aastate kiire päikeseenergia muundamise tehnoloogia areng on soodustanud laialdast tehnoloogia kasutamist. Tehnoloogia arenguga on tõusnud nii päikesepaneelide kasutegur, kui ka pikenenud kasutusaeg. Kiire tehnoloogia areng ja suurenenud huvi päikesest elektri tootmise vastu on ka suurendanud päikeseelektrijaamade komponentide tootjate arvu. Tootjate vaheline tihe konkurents on viimastel aastatel alandanud päikesepaneelide, inverterite ja süsteemi komponentide hinda. Suurem valik ja madalam hind on muutnud päikeseenergia muundamise tehnoloogia kasutamise otstarbekaks ning kättesaadavamaks. Lisaks on oluline roll erinevatel riigi poolsetel taastuvenergia osakaalu suurenemist soodustavatel direktiividel ja toetustel. [6]

Euroopa Liidus lisandus 2020. aastal installeeritud päikeseenergia muundamise võimsust 18,2 GW. Võrreldes 2019. aastaga oli ühes aastal installeeritud võimsuse kasv 11%, kui installeeritud võimsus oli 16,2 GW. Alates 2000. aastast on olnud aastane installeeritud võimsus vaid ühel aastal suurem kui 2020. aastal. 2011. aasta installeeritud võimsus oli 21,4 GW. Arvestades 2020. aastal maailmas valitsevat tervisekriisi, on analüütikute hinnangul 2020. aasta installeeritud võimsuse kasv väga positiivne. Installeeritud võimsused Euroopa Liidus aastate lõikes on esitatud joonisel (Joonis 1). [7]



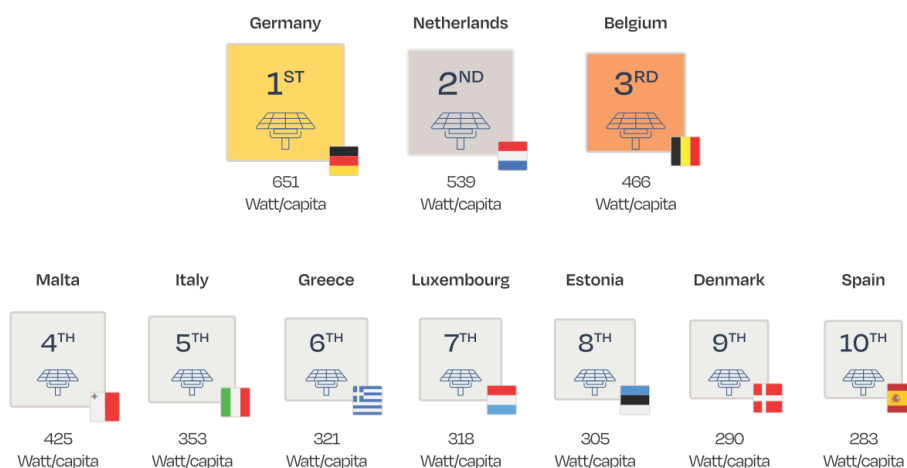
Joonis 1. Euroopa Liidus installeeritud võimsused aastate lõikes, GW [7, lk 10]

Euroopa Liidu kahekümneseitsme liikmesriigi poolt on aastatel 2000 kuni 2020 installeeritud päikeseenergia muundamise võimsust kokku 137,2 GW. Liidripositsiooni hoiab päikeseenergia muundamisel Saksamaa, kus 2020. aasta seisuga on kumulatiivne installeeritud võimsus 54,6 GW. Saksamaale järgnevad Itaalia, Hispaania, Prantsusmaa ja Holland. Itaalias on kumulatiivne installeeritud võimsus 21,3 GW, Hispaanias 13,3 GW, Prantsusmaal 10,9 GW ning Hollandis 9,2 GW. Installeeritud võimsuste areng Euroopa Liidus alates aastast 2000 on esitatud joonisel (Joonis 2). [7]



Joonis 2. Euroopas installeeritud võimsused aastatel 2000–2020, GW [7, lk 15]

Päikeseenergia muundamise liider Saksamaa on suurima rahvaarvuga ka suurim energia tarbija ja tootja Euroopa Liidus [8]. Saksamaal on installeeritud päikeseenergia muundamise võimsust ühe elaniku kohta 651 W. Teisel kohal on Holland, kus vastav näitaja on 539 W. Installeeritud võimsused ühe elaniku kohta esikümnes olevate liikmesriikides on 466 W kuni 283 W kohta. Eestis on vastav näitaja 2020. aasta seisuga 305 W ühe elaniku kohta. (Joonis 3). [7]



Joonis 3. Installeeritud võimsused ühe elaniku kohta 2020. aastal, W [7, lk 16]

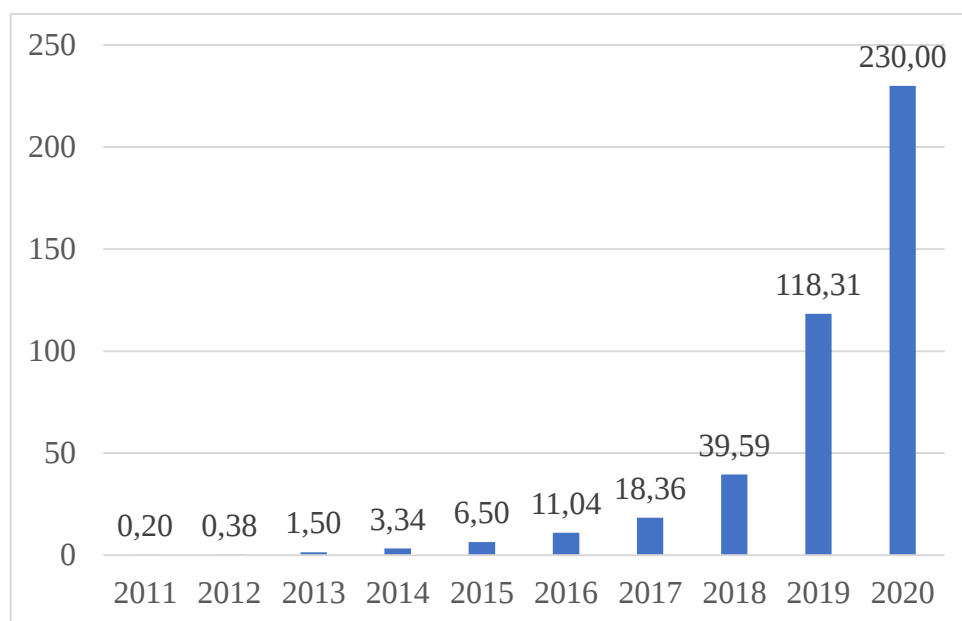
Tuleviku prognoosides näevad analüütikud Euroopa Liidus installeeritud võimsuse kasvu ka järgneval neljal aastal. Optimistliku hinnangu alusel on 2024. aastal installeeritud võimsuse mahuks 292,8 GW. Konservatiivse hinnangu alusel 200,3 GW. Prognooside põhjal hoiab järgneval neljal aastal liidripositsiooni ikka Saksamaa, kellel järgnevad Hispaania, Holland, Itaalia ning Prantsusmaa. Järgmistel aastatel nähakse ette suurte võimsuste installeerimist ka Poolalt. Järgneval joonisel on toodud Euroopa Liidu erinevad stsenaariumid installeeritud võimsuste kasvuga aastatel 2021 kuni 2024 (Joonis 4). [7]



Joonis 4. Installeeritud võimsuste prognoosid Euroopa Liidus aastateks 2021–2024, GW [6, lk 18]

1.2 Päikeseenergia kasutamine Eestis

Eestis algas päikeseenergia muundamise installeeritud võimsuse kasv 2018. aastal ning jätkus 2019. ja 2020. aastal. 2018. aastal oli elektrivõrguga liitunud tootmisvõimsus 39,59 MW. Vastav näitaja oli 2019. aastal juba 118,31 MW. Elektrivõrguga liitunud kiire tootmisvõimsuste kasv 2019. aastal oli tingitud eelneva perioodi taastuenergia toetuse lõppemisest kuni 1 MW võimsusega päikeseelektrijaamadele. 2020. aastal lõppes taastuenergia toetus kuni 50 kW tootmisvõimsusega jaamadele. 2020. aastal liitus elektrivõrguga päikeseenergia tootmisvõimekust 230 MW. Samas peab arvestama, et AS Eleringi andmetel on kontrollimisel ja registreerimise ootel veel üle 4500 kuni 50 kW tootmisvõimsusega elektrijaama. Hinnanguliselt on 2021. aastal elektrivõrguga liitunud päikeseenergia muundamise tootmisvõimsused Eestis kokku ligikaudu 500 MW. Järgneval joonisel on näha Eestis installeeritud võimsuste kasv megavattides aastatel 2011–2020 (Joonis 5). 2020. aasta andmed kajastavad 2021. aasta alguseks elektrivõrguga liitunud tootmisvõimsust. [9], [4]



Joonis 5. Elektrivõrguga liitunud tootmisvõimsused Eestis aastatel 2011–2020, MW [9], [4]

2 PÄIKESEELEKTRIJAAM

Lõputöö teises peatükis antakse ülevaade päikeseenergia elektrienergiaks muundamise tehnoloogiast ehk päikeseelektrijaama süsteemist ning süsteemis kasutatavatest seadmetest.

Päikeseelektrijaam on süsteem, kus on jadamisi omavahel ühendatud erinevad seadmed, millega päikeseenergia muundatakse elektrienergiaks. Elektrienergiaks muundatud päikeseenergiat on võimalik elektritootjal kasutada omatarbeks kui ka elektrivõrguga liitumise korral müüa elektrivõrku. Elektritootja poolt tarbimata elektrienergiat saab võrku müümise asemel või ka elektrivõrguga liitumise puudumisel salvestada akusüsteemi. [10], [11]

Päikeseelektrijaama süsteemi põhilised seadmed on päikesepaneelid ning süsteemi tasakaaluseadmed. Süsteemi tasakaaluseadmed on inverter, akud ning muud komponendid - kaablid, paigaldusraamistik, kinnistusvahendid jne. Süsteemi on võimalik lisada erinevaid monitooringu- ja jälgimisseadmeid. [10]

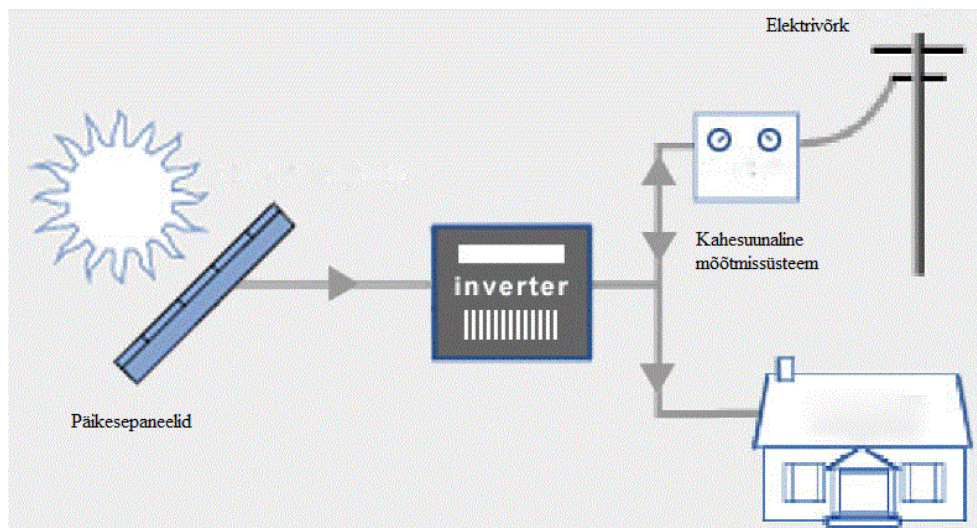
Olenevalt elektrienergia tootja või tarbija vajadusest, elektrivõrguga liitumise tehnilistest tingimustest ja asukoha võimalustest, on võimalik rajada kas võrguga ühendatud või võrguühenduseta päikeseelektrijaam.

2.1 Võrguühendusega päikeseelektrijaam

Võrguühendusega päikeseelektrijaama all mõeldakse süsteemi, mis on ühendatud elektrivõrguga. Võrguga ühendatud süsteemi korral on päikeseenergiast muundatud elektrienergia kogu ja salvestaja elektrivõrk. Päikeseelektrijaama süsteemi ühendatud inverter muundab päikeseenergiast saadava alalisvoolu vahelduvvooluks, mis ühildub hoone elektrisüsteemiga. Elektrisüsteemiga ühendatud inverter kontrollib elektrisüsteemis pinge olemasolu ja ka muid võrguparameetreid nagu sagedus, isolatsioonitakistus jms. Juhul kui elektrivõrgus pinge puudub, lõpetab inverter automaatselt tugevvoolu edastamise võrku. Inverteri tugevvoolu edastamise lõpetamine elektrivõrku tagab ohutuse võrgurikete või elektrikatkestuste korral. Hoone elektrisüsteemi on ühendatud kahesuunaline elektrienergia mõõtmissüsteem. Kahesuunaline mõõtmissüsteem võimaldab elektrienergia tarbijal ning tootjal elektrivõrgust elektrienergiat nii osta kui ka elektrivõrku müüa. [12], [13], [11]

Päikeseelektrijaama süsteem koosneb päikesepaneelidest ja süsteemi tasakaaluseadmetest. Joonisel on toodud võrguühendusega päikeseelektrijaama lihtsustatud skeem (Joonis 6). Võrguühendusega

päikeseelektrijaama süsteemi ei ole üldjuhul ühendatud akusüsteemidega. Akusüsteemi ühendamine päikeseelektrijaama süsteemi tõstab märgatavalt päikeseelektrijaama maksumust, mis omakorda mõjutab oluliselt jaama tasuvusaega. Samas akude lisamine ja hübriidinverteri kasutamine süsteemis tagab päikeseenergia muundamisel saadava elektrienergia salvestamise ning kasutamise võimaluse ka võimalike elektririkete korral. [12], [14], [15]



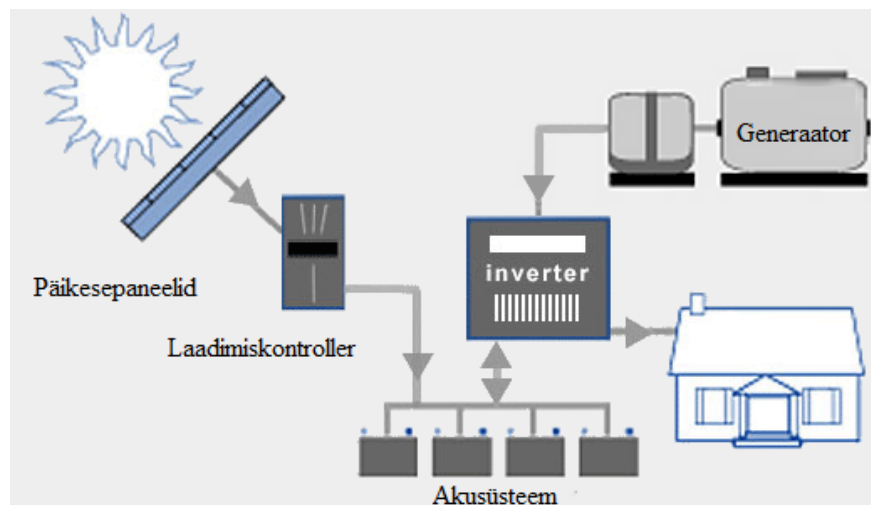
Joonis 6. Võrguühendusega päikeseelektrijaama lihtsustatud skeem [12]

2.2 Võrguühenduseta päikeseelektrijaam

Võrguühenduseta ehk autonoomne päikeseelektrijaama süsteem on elektrivõrgust sõltumatu. Võrguühenduseta süsteemi kasuks otsustatakse üldjuhul kui ühendus elektrivõrguga ei ole võimalik, võrguga ühendamine on väga kulukas või ei soovita sõltuda elektrivõrgust. Päikeseelektrijaama puuduseks on piirang, kus akusüsteemi salvestatud energia on ära kasutatud või ei toodeta piisavalt elektrienergiat ja ei ole seda ka kuskilt juurde võtta. Sarnaselt on süsteemi puuduseks lahendus, kui kohapeal ei tarbita piisavalt elektrienergiat, ei saa elektrienergia ülejääki elektrivõrku müüa ning see läheb lihtsalt kaduma. Enamlevinud autonoomsete süsteemide kasutus maakodudes, suvilates, matkautodel ning veesõidukitel. [16], [17]

Autonoomses päikeseelektrijaama süsteemis on jadamisi ühendatud päikesepaneelid, laadimiskontroller, akusüsteem ja inverter. Süsteemi on võimalik lisada alternatiivne elektritootmise lahendus, mis tagab elektri tootmise juhul kui päikeseelektrijaam ei tooda elektrit. Päikesepaneelid on ühendatud laadimiskontrolleriga, mis reguleerib akudesse minevat alalisvoolu ning kaitseb akusid ülelaadimise eest. Järgneval joonisel (Joonis 7) on toodud võrguühenduseta päikeseelektrijaama

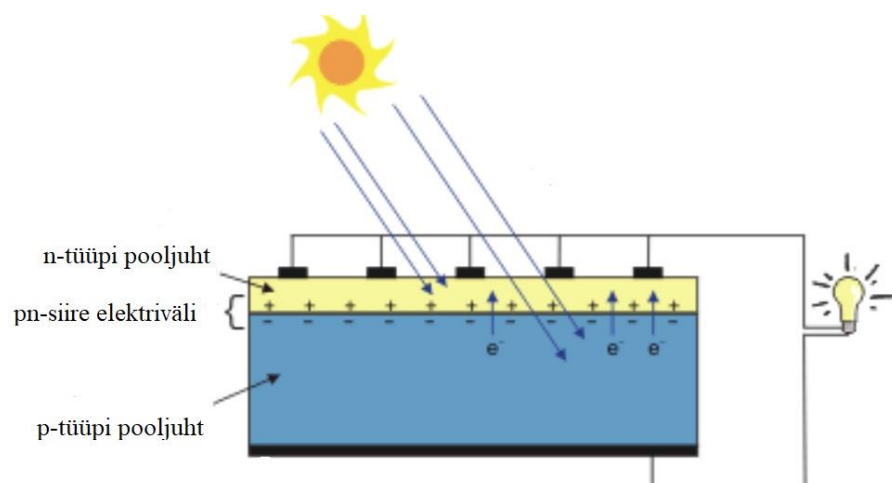
lihtsustatud skeem koos alternatiivse elektritootmise lahendusega. Üldjuhul on alternatiivseks elektritootmise lahenduseks kütusel töötav generaator. [12], [15]



Joonis 7. Võrguühenduseta päikeseelektrijaama lihtsustatud skeem [12]

2.3 Päikesepaneelide tehnoloogia

Päikeseelektrijaamas toimub päikeseenergia muundamine elektrienergiaks päikesepaneelides jadamisi ühendatud päikeseelementide abil. Päikeseelement on elektriline seade, mis muundab fotogalvaanilise efekti abil päikeseenergia otse elektrienergiaks. Päikeseelemendid toodetakse pooljuhtmaterjalidest. Enamasti kasutatakse pooljuhtmaterjalina kristallilist räni, millele on lisatud fosfori ning boori aatomeid. Päikesekiirguses olevad footonid ergastavad pooljuhtmaterjali elektrone, mis omakorda tekitab elektronide liikumise ehk elektrivoolu. Järgneval joonisel (Joonis 8) on toodud lihtsustatud skeem pooljuhtmaterjalis tekkiva elektrivoolu kohta. [18], [15], [19], [20].



Joonis 8. Pooljuhtmaterjalis elektrivoolu tekkimise põhimõte [21], [22]

Päikesepaneelide tehnoloogiaid on võimalik klassifitseerida lähtuvalt päikesepaneelide erinevatest omadustest või kasutusotstarbest. Valdavalt liigitatakse paneele tootmisel kasutatud päikeseelementidest lähtuvalt, kas kristallilised paneelid või õhukesekilelised paneelid. Kristallilised paneelid jagunevad kaheks - monokristallilised ja polükristallilised paneelid. [23], [24]

2.3.1 Monokristallilised päikesepaneelid

Päikesepaneelides on jadamisi ühendatud monokristallilised päikeseelemendid. Elementides kasutatakse pideva ühtse kristallvõrega räni, millel ei ole peaaegu defekte ega muid lisandeid. Räni kõrge puhtusaste päikeseelemendis annab monokristallilisele päikesepaneelile kõrge efektiivsuse. Päikesepaneelide efektiivsus on 14% kuni 15%. Kõrgema hinnatasemega paneelidel tõuseb efektiivsus kuni 20%-ni ja isegi üle selle. Monokristalliliste elementide tootmisprotsess on keerukas ja kulukas, mis omakorda tõstab päikesepaneeli lõpphinda. Polükristalliliste päikesepaneelidega võrreldes on monokristallilised paneelid vähem tundlikud kõrgetele temperatuuridele kui ka vähesele valgusele. [23], [25]

2.3.2 Polükristallilised päikesepaneelid

Päikesepaneelides on omavahel ühendatud polükristallilised päikeseelemendid. Elementides kasutatakse kristallilise räni väiksemaid terasid, mis tootmisprotsessi käigus sulatatakse ning valatakse ühtseks plokiks. Tootmisprotsess on lihtsam ning odavam kui monokristalliliste elementide tootmine. Elemendi odavam tootmisprotsess vähendab päikesepaneeli lõpphinda. Polükristallilise päikesepaneeli efektiivsus on 13 kuni 15%, kõrgema hinnaklassi paneelide efektiivsus kuni 17%. [23], [25]

2.3.3 Õhukesekilelised päikesepaneelid

Õhukesekilelised päikesepaneelid koosnevad amorfsest ränist, puudub kristalliline struktuur. Amorfne räni neelab päikesevalgust efektiivsemalt kui kristallilised paneelid. Eeliseks on tootmisprotsessi madalamad kulud, kuna toormaterjali kulu on väiksem. Päikesepaneelid on õhukesed, mis võimaldab õhukesekilelisi päikesepaneele integreerida erinevate ehitiste arhitektuursete lahendustega. Päikesepaneelil on kõrgem efektiivsus võrreldes kristalliliste päikesepaneelidega. Samas vajab polükristallilise päikesepaneeliga sama võimsuse saavutamiseks rohkem paigalduspinda. Õhukesekilelisi päikesepaneele mõjutavad temperatuuri ja päikesevalguse

muutused võrreldes teiste päikesepaneelidega kõige vähem. Vähesel valguse tingimustes jääb õhukesekilelise päikesepaneeli efektiivsus konstantseks. [23], [25], [22]

2.4 Päikesepaneelide efektiivsust mõjutavad tegurid

Päikesepaneelide efektiivsust mõjutavad nii päikesepaneeli paigaldusviisid kui ka erinevad keskkonnamõjud. Suurimad päikesepaneelide efektiivsuse mõjutajad on keskkonnategurid. Näiteks muudavad paneelide efektiivsust päikesepaneeli temperatuur, päikeseikiirguse peegeldus päikesepaneeli esipinnalt, päikesepaneelide määrdumine ning paneelidele langevad varjud. Päikesepaneeli efektiivsus muutub vastavalt õhutemperatuuri muutusele $\sim 0,5\%$ ühe $^{\circ}\text{C}$ kohta. Päikeseikiirguse levimise muutused võivad mõjutada päikesepaneelide efektiivsust 5...10%. [26]

2.5 Inverterid

Elektrivõrguga ühendatud päikeseelektrijaama süsteemi ühendatakse võrguinverter, mis muundab päikesepaneelide toodetud alalisvoolu elektrivõrgu nõuetele vastavaks vahelduvvooluks. Kasutusel on nii ühefaasilised kui ka kolmefaasilised võrguinverterid. Kolmefaasiline võrguinverter ühendatakse hoone elektrijaotuskilbis kolme faasiga. Sellisel juhul on võimalik toodetud elektrit tarbida läbi kõigi kolme faasi. Lisaks on võimalik tarbimata jäänud toodetud elekter suunata elektrivõrku ükskõik millisest faasist. Ühefaasiline võrguinverter ühendatakse hoone elektrijaotuskilbis ühe faasiga ning toodetud elektrit saab tarbida ning elektrivõrku suunata vaid võrguinverteriga ühendatud faasi kaudu. [22]

Päikesepaneeli poolt muundatud alalisvoolu vahelduvvooluks muutvaid mikroinvertereid ühendatakse enamasti igale päikesepaneelile eraldi. Sellisel juhul toodavad päikesepaneelid elektrit teistest päikesepaneelidest sõltumatult. Mikroinverteriga päikesepaneelide elektri tootmist ei mõjuta päikeseelektrijaama süsteemi ühendatud teised päikesepaneelid. Näiteks kui mõnele päikesepaneelile langevad varjud. Väikese võimsusega päikeseelektrisüsteemis mikroinverteriga päikesepaneelide kasutamine lihtsustab ka süsteemi võimsuse suurendamist. Võimsuse suurendamiseks tuleb süsteemi ühendada vaid mikroinverteriga päikesepaneel. Puudub vajadus võrguinverteri vahetamiseks. Samas, mikroinverteriga päikesepaneelide kasutamine suurema päikeseelektrijaama võimsuse korral suurendab süsteemi investeeringukulu. Võimalike tehniliste rikete korral teostakse hooldustöid igale mikroinverterile eraldi, mis suurendab aga päikeseelektrijaama hoolduskulu. [22], [15]

3 BERNHARD SCHMIDTI MAJA PÄIKESEELEKTRIJAAM

3.1 Büroohoone üldandmed

Bernhard Schmidt Maja büroohoone asub Tallinnas, Ülemiste City linnakus, Lõõtsa tn 5. Büroohoone on 13-korruseline ning hoones asuvad büroo-, kaubandus- ja teeninduspinnad. Ülemiste City linnakus arendatud büroohoone ehitus lõppes 2015. aastal. Tallinna Linnaplaneerimise Amet väljastas 29.09.2015. aastal büroohoonele kasutusloa. [27]

Ehitise üldised tehnilised andmed [28]:

- ehitisealune pind 1004,4 m²;
- maapealse osa alune pind 1004,4 m²;
- maapealsete korruste arv 13;
- maa-aluste korruste arv 0;
- hoone kõrgus 44,9 m;
- hoone suletud netopind 10 817,4 m²;
- hoone köetav pind 10 817,4 m²;
- mitteeluruumide pind 9244,3 m²;
- üldkasutatav pind 1208,5 m²;
- hoone tehнопind 364,6 m².

Büroohoone haldusettevõtte andmetel on hoone soojusvarustus lahendatud oma gaasikatlaga. Gaasikatel varustab hoonet vajaliku sooja tarbevee ning soojusega. Lisaks kasutatakse katlast tulevat soojust ventilatsiooniõhu soojendamiseks. Elektrit kasutatakse ventilatsiooni- ja jahutussüsteemi, valgustuse, liftide, tehnosüsteemide ja üüripindade tarbeks. [29]

Büroohoonele on väljastatud rahvusvaheliselt tunnustatud *LEED GOLD* ehk kuld taseme sertifikaat. *LEED (Leadership in Energy and Environmental Design)* on rahvusvaheline keskkonnasõbralike ehitiste sertifitseerimissüsteem. *LEED* sertifikaat väljastatakse uutele hoonetele, kus hoone projekteerimise etapis arvestatakse *LEED* hindamissüsteemiga. Sertifitseerimissüsteemi hindamistulemusi järgitakse ka peale hoone projekteerimist nii hoone ehitamisel kui ka hilisemal hoone kasutamisel. Sertifikaadi väljastamise oluline nõude osa on hoone igal elutsükli etapil järgitavad keskkonnasäästu ja säästva arengu põhimõtted. Büroohoone sertifitseerimisnõuetele vastamiseks kaasati sertifikaadisüsteemi spetsialistid juba hoone projekteerimise etapis. [30]

3.2 Päikeseelektrijaama andmed

Büroohoone lõunasuunalisele fassaadile on integreeritud päikesepaneelid. Päikesepaneelid on integreeritud hoone fassaadile vastavalt büroohoone ehitusprojektile, lõunapoolsele küljel 79° nurga all. Päikesepaneelid on kinnitatud hoone fassaadile ehitusprojekti ettenähtud spetsiaalsetel kandekonstruktsioonidel. Paneelid on kinnitatud kandekonstruktsioonile vertikaalasendis. Päikesepaneelid asuvad fassaadil alates 2. korrusest kuni 12. korruseni. Päikeseelektrijaama süsteemi ühendatud päikesepaneelid asuvad hoone fassaadil alates 7. korrusest kuni 12. korruseni, ehk hoone kuuel korrusel. Alumistele korrustele integreeritud päikesepaneelid ei ole ühendatud päikeseelektrijaama süsteemiga, vaid omavad hoonel arhitektuurset efekti.

Päikeseelektrijaama süsteemi on ühendatud ühel korrusel eraldi paigaldatud 25 polükristallilist päikesepaneeli, mis on ühendatud korruse tehnilises ruumis asuva KOSTAL Piko 7.0 inverteriga. Ühe korruse päikesepaneelide võimus on kokku 7,25 kW ning inverteri võimsus on 7 kW. Ühtsesse päikeseelektrijaama süsteemi on ühendatud 150 paneeli võimsusega kokku 43,50 kW ning kuus inverterit. Inverterite koguvõimsus kokku on 42 kW. Lõputöös esitatud päikeseelektrijaama süsteemi ja süsteemi seadmete tehnilised ning ehituslikud andmed põhinevad päikeseelektrijaama süsteemi paigaldanud ettevõtte poolt lõputöö autorile edastatud andmetele.

Büroohoone fassaadile on installeeritud Eestis tegutseva päikesepaneelide tootja poolt toodetud erilahendusega polükristallilised fassaadipaneelid. Fassaadile paigaldatud päikesepaneeli ehituslikud andmed on toodud tabelis (Tabel 1).

Tabel 1. Fassaadipaneeli ehituslikud andmed

NAPS fassaadipaneel, mudel	Naps C1502 290 SP3 MBB
Mõõdud, mm	995 x 1950 x 35
Kaal, kg	21,5
Elemendi tüüp	72tk, polükristall
Elemendi mõõdud, mm	156 x 156
Ahela ehitus, jada x paralleel	72 x 1
Elementide asetus, horisontaalne x vertikaalne	6 x 12
Klaasi paksus, mm	3,2
Tagakülg	must, mitmekihiline PET

Päikesepaneelide spetsifikatsioonil esitatakse päikesepaneelide tehnilised andmed. Esitatud andmed saadakse päikesepaneelide testimisel standardtingimustel (*STC*). Päikesepaneeli testimine standardtingimustel tähendab, et parameetreid mõõdetakse kui päikesepaneelile langeb päikese kiirgust 1000 W/m^2 kohta, valgusspekter vastab sellele kui ta läbiks 1,5 Maa atmosfääri ja päikesepaneeli elemendi temperatuur on $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$. [22], [11]

Päikesepaneeli parameetrid esitatakse vastavalt päikeseelektrijaama süsteemi paigaldanud ettevõtte andmetele. Päikesepaneeli parameetrid *STC* katsetingimustel on esitatud tabelis 2 (Tabel 2).

Tabel 2. Fassaadipaneeli parameetrid *STC* tingimustel

Parameetrid <i>STC</i>	
Optimaalne tööpinge, V_{mp} , V	35,1
Optimaalne töövool, I_{mp} , A	8,28
Lühisvool, I_{sc} , A	8,8
Avatud ahela pinge, V	45,02
Maksimum süsteemi pinge, V	1000
Nominaalvõimsus <i>STC</i> , P_m , W	290

Büroohoone fassaadile installeeritud polükristallilised päikesepaneelid on ühendatud hoone igal korrusel oleva kolmefaasilise KOSTAL Piko 7.0 inverteriga. Inverteri nimivõimsus on 7 kW, maksimaalne voolutugevus 10,2 A, maksimaalne sisendpinge 950 V ning maksimaalne efektiivsus 97% [31]. Päikeseelektrijaama süsteemi on ühendatud kuus inverterit koguvõimsusega 42 kW.

4 PÄIKESEELEKTRIJAAMA TOOTLIKKUSE ANALÜÜS

Lõputöö eesmärgiks on teostada võrdlevanalüüs päikeseelektrijaama prognoositud ja tegeliku tootlikkuse paikapidavuse kohta, võrrelda päikeseelektrijaama süsteemi jõudlussuhet aastast 2016 aastani 2020 ning välja selgitada toodetud elektrienergia osakaal hoone elektritarbimises. Käesolevas peatükis võrreldakse Bernhard Schmidti büroohoonele paigaldatud päikeseelektrijaama prognoositud ja tegelikku tootlikkust, süsteemi jõudlussuhet ning leitakse päikeseelektrijaama toodetud elektrienergia osakaal büroohoone elektritarbimises. Võrdlevanalüüsid kasutati büroohoone haldaja poolt saadud andmeid büroohoone elektritarbimise kohta ning päikeseelektrijaama tegeliku tootlikkuse andmeid, mis põhinevad päikeseelektrijaama süsteemi paigaldatud energia juhtimis- ja monitooringusüsteemi Solar-Log andmebaasi salvestatud andmetele. Päikeseelektrijaama süsteemi jõudlussuhte võrdluses käsitletud andmed põhinevad Solar-Log andmebaasi salvestatud reaalsele infole. Energia juhtimis- ja monitooringusüsteem Solar-Log salvestab elektrienergia tegeliku tootlikkuse andmed andmebaasi nii päevade, kuude kui ka aastate lõikes [32]. Võrdluses kasutatud prognoositud tootlikkuse andmed põhinevad PVGIS päikeseenergiakalkulaatori ning päikeseelektrijaama paigaldanud ettevõttele spetsiaalselt loodud prognoositud tootlikkuse arvutusele. Paigaldusettevõtte prognoositud tootlikkuse andmed on sisestatud energia juhtimis- ja monitooringusüsteem Solar-Log andmebaasi. Mõlemad prognoositud tootlikkuse arvutused võtavad arvesse hoone asukohta, päikesepaneelide paigaldusviisi, paneelide kaldenurka ning ilmakaare suunda. [33]

4.1 Päikeseelektrijaama jõudlussuhe

Päikeseelektrijaama süsteemi toimivust on võimalik kirjeldada läbi rahvusvaheliselt kasutatava jõudlussuhte (*Performance Ratio*) näitaja. Päikeseelektrijaama süsteemi jõudlussuhte näitaja on üks olulisemaid päikeseelektrijaama süsteemi toimivuse kvaliteedi näitajaid. [34], [35]

Jõudlussuhe näitab päikeseelektrijaama teoreetiliselt võimaliku toodetud elektrienergia ja tegelikult toodetud elektrienergia väljundi suhet peale süsteemis esinevate kõikide kadude mahaarvamist. Päikeseelektrijaama süsteemi toimimisel esinevad erinevad kaod nii seadmete kvaliteedi, rikete kui ka päikesekiirguse ebaefektiivse kasutamise tõttu. [34], [35]

Päikeseelektrijaama jõudlussuhet esitatakse protsentides, kus maksimaalne jõudlussuhe on 100%. Tegelikuses ei ole maksimaalne väärtus 100% saavutatav süsteemis esinevate paratamatute kadude

tõttu. Samas, mida lähemale päikeseelektrijaama süsteemi jõudlussuhte väärtus on 100%, seda tehniliselt kvaliteetsem on paigaldatud päikeseelektrijaama süsteem. Kvaliteetsed päikeseelektrijaama süsteemid saavutavad jõudlussuhte väärtuse kuni 80%. [35]

Päikeseelektrijaama süsteemi jõudlussuhet mõjutavad nii süsteemis kasutatavate seadmete tehniline kvaliteet ja efektiivsus kui ka keskkonnategurid. [35]

Päikeseelektrijaama süsteemi jõudlussuhet mõjutavad keskkonnategurid [35]:

- päikesepaneelide temperatuur;
- päikesekiirguse hulk ja hajumine;
- päikesekiirguse anduri asukoht;
- päikesekiirguse anduri määrdumine;
- päikesepaneelide paigaldusviis, nt varjus;
- päikesepaneelide määrdumine.

Päikeseelektrijaama süsteemi jõudlussuhet mõjutavad süsteemi sisemised tegurid [35]:

- päikesepaneelide efektiivsus;
- päikesepaneelide võimsuse vähenemine;
- inverteri efektiivsus;
- erinevad süsteemi võimsuskaod, näiteks kaod kaablites;
- päikesekiirguse andurisse sisestatud päikesepaneeli andmed ei ühti tegelikult kasutatud paneelide tehniliste andmetega;
- päikesekiirguse anduri suund ja paigaldusviis;
- andmete salvestusperiood.

Lõputöös analüüsitava büroohoone päikeseelektrijaama süsteemi on paigaldatud päikesekiirguse andur. Päikesekiirguse mõõtmisandur on ühendatud päikeseelektrijaama Solar-Log energia juhtimis- ja monitooringusüsteemiga. Süsteemi ühendatud päikesekiirguse andur mõõdab lisaks päikesekiirgusele ka päikesepaneelide temperatuuri. Päikesekiirguse anduri lisamine ja päikesepaneelide temperatuuri mõõtmine võimaldab juhtimis- ja monitooringusüsteemil analüüsida paigaldatud päikeseelektrijaama süsteemi jõudlussuhet. Anduri päikesekiirguse mõõtmine toimub vahemikul $0...1400 \text{ W/m}^2$, päikesepaneeli temperatuuri mõõtmine vahemikus $-25...+75 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ja välisõhu temperatuuri ja õhuniiskuse mõõtmine vastavalt vahemikel $-25...+85 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ning $20...95 \text{ \%}$. [36]

Päikeseelektrijaama süsteemi jõudlussuhte väärtused aastatel 2016 kuni 2020 on toodud tabelis 3 (Tabel 3). Esitatud andmed põhinevad päikeseelektrijaama energia juhtimis- ja monitooringusüsteem Solar-Log andmebaasi salvestatud andmetele.

Tabel 3. Päikeseelektrijaama süsteemi jõudlussuhte erinevused aastatel 2016–2020, %

Aastad	Toodetud elektrienergia, MWh	Teoreetiliselt toodetav elektrienergia, MWh	Jõudlussuhe, %
2016	35,23	37,63	94
2017	35,43	37,82	94
2018	39,23	42,56	92
2019	36,56	39,33	93
2020	37,50	41,59	90

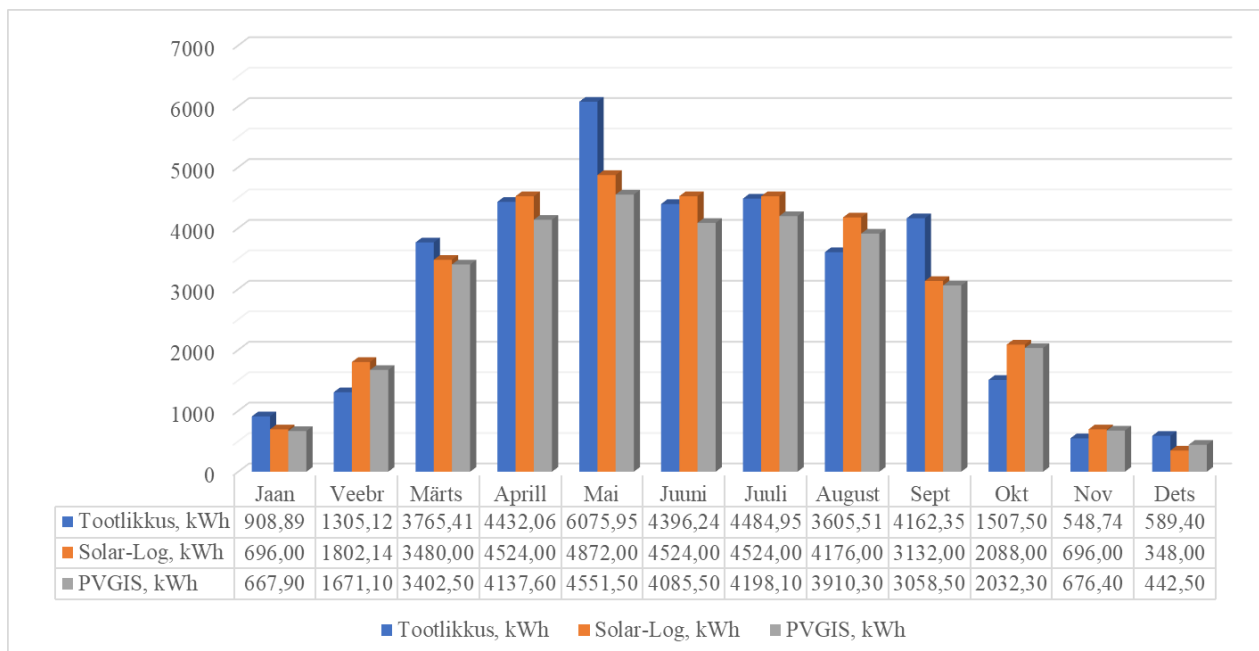
Tabelis toodud andmetest järeldub, et 2016.–2020. aastal oli päikeseelektrijaama süsteemi jõudlussuhted esitatud aastatel kõrged, 90% või kõrgem. Samas, päikeseelektrijaama süsteemi jõudlussuhte näitajad analüüsitud aastate kuude lõikes, olid kohati ka vahemikus 70...90%. Tabelid täiendavate andmetega on esitatud lõputöö lisades (Lisa 1, Lisa 2, Lisa 3, Lisa 4, Lisa 5).

4.2 Päikeseelektrijaama prognoositud tootlikkuse ja tegeliku tootlikkuse võrdlevanalüüs

Päikeseelektrijaama tegeliku ja kahe erineva arvutusmeetodi PVGIS ja Solar-Log andmebaasi prognoositud tootlikkuse andmeid võrreldi kuude lõikes aastatel vahemikus 2016–2020. Prognoositud tootlikkuse arvutusmeetodid võtavad arvesse hoone asukohta, päikesepaneelide kaldenurka ning ilmakaare suunda. Büroohoone asub laiuskraadil 59.42 N ja pikkuskraadil 24.80 E, päikesepaneelid on paigaldatud hoone lõunapoolsele küljele 79° nurga all. [33]

Võrdlevanalüüsis esitatakse päikeseelektrijaama tegeliku tootlikkuse ja kahe arvutusmeetodi Solar-Log ja PVGIS prognoositud tootlikkuste andmeid nii absoluutarvudes kui ka protsentides. Protsentides esitatud positiivsed väärtused näitavad, et tegelik tootlikkus oli prognoositud tootlikkusest suurem. Protsentide negatiivsed väärtused näitavad vastupidist suhet. Lõputöö lisades (Lisa 6, Lisa 7, Lisa 8, Lisa 9, Lisa 10) on esitatud 2016.–2020. aasta tegelikud ja prognoositud tootlikkuste tulemused kuude lõikes.

Päikeseelektrijaama 2016. aasta andmed on esitatud joonisel (Joonis 9). 2016. aasta päikeseelektrijaama tegelikud tootlikkused olid mõlema prognoositud tootlikkuse arvutusmeetodiga võrreldes suuremad jaanuaris, märtsis, mais, septembris ja detsembris. Madalamad tegelikud tootlikkused mõlema arvutusmeetodi suhtes olid veebruaris, augustis, oktoobris ja novembris.

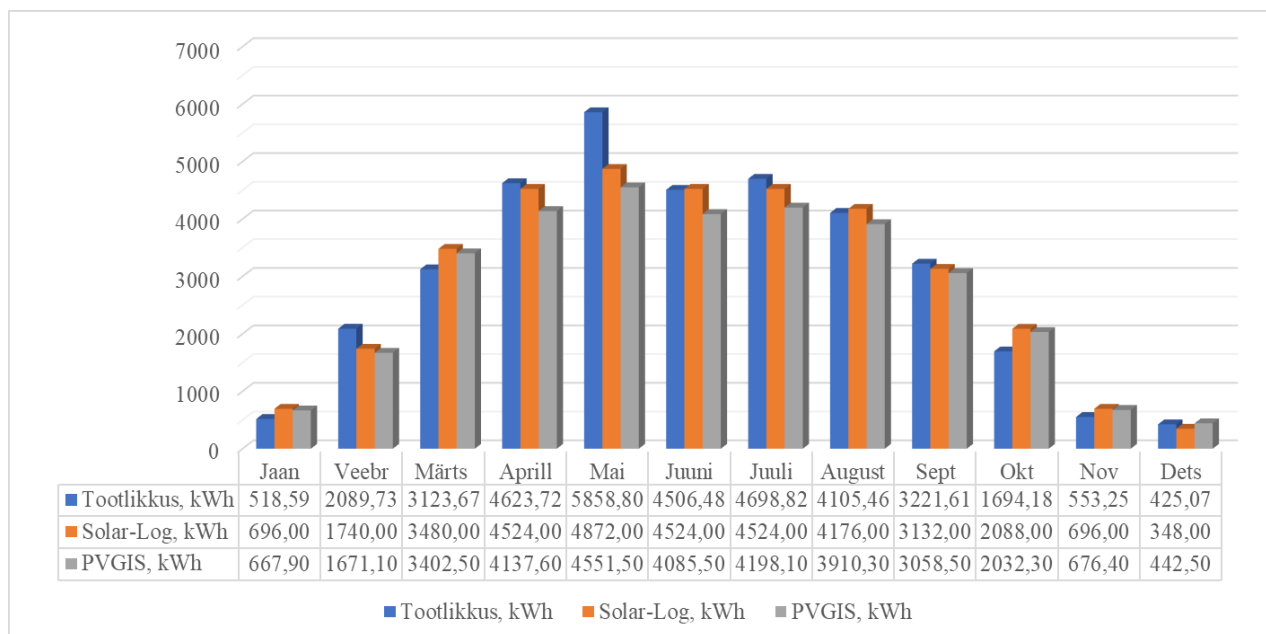


Joonis 9. Päikeseelektrijaama tegelik tootlikkus ja prognoositud tootlikkused 2016. aastal

Päikeseelektrijaama tegelik tootlikkus ületas kolmel kuul ehk jaanuaris, septembris ja detsembris mõlemat prognoositud tootlikkust üle 30%. Detsembris ületas tegelik tootlikkus Solar-Log prognoosi 69,37% ning PVGIS prognoositud tootlikkust 33,20%. 2016. aasta tegeliku ja prognoositud tootlikkuste erinevused on toodud lõputöö lisas (Lisa 6).

2016. aastal oli päikeseelektrijaama tegelik tootlikkus 35 782,12 kWh. PVGIS arvutusmeetodi prognoositud tootlikkus oli 32 834,20 kWh ning Solar-Log prognoositud tootlikkus 34 862,14 kWh. Päikeseelektrijaama tegelik tootlikkus ületas PVGIS aastast prognoositud tootlikkust 8,98% ning Solar-Log prognoositud tootlikkust 2,64%.

Päikeseelektrijaama 2017. aasta tegelik tootlikkus ületas prognoositud tootlikkusi veebruaris, aprillis, mais, juulis ja septembris (Joonis 10). Prognoosidest olid päikeseelektrijaama tegelikud tootlikkused madalamad jaanuaris, märtsis, oktoobris ja novembris. Detsembris oli tegelik tootlikkus suurem Solar-Log prognoositud tootlikkusest, kuid väiksem PVGIS prognoositud tootlikkusest.

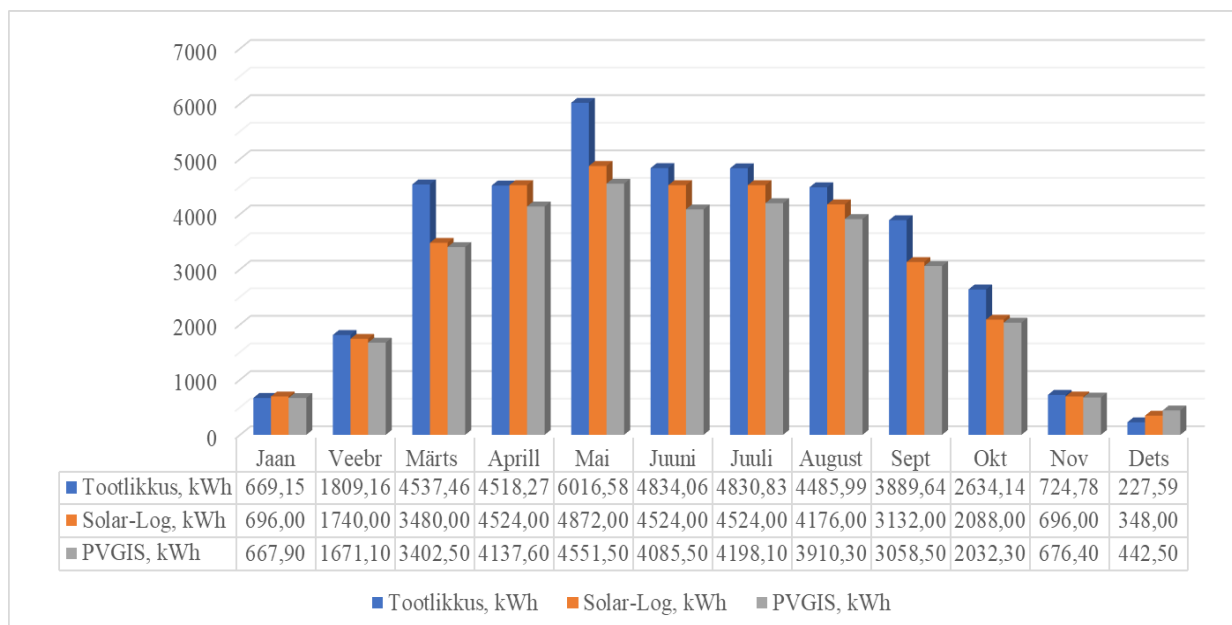


Joonis 10. Päikeseelektrijaama tegelik tootlikkus ja prognoositud tootlikkused 2017. aastal

2017. aasta kuude lõikes ei esine tegeliku tootlikkuse ja prognoositud tootlikkuste vahel selliseid erinevusi kui esines 2016. aasta tulemustes. Päikeseelektrijaama tegeliku tootlikkuse erinevused prognoositud tootlikkustest ei ole suuremad kui 29%. Suurim erinevus oli mais, kui päikeseelektrijaama tegelik tootlikkus ületas PVGIS prognoositud tootlikkust 28,72%. Kõige täpsem prognoositud tootlikkus oli juunis, millal Solar-Log prognoositud tootlikkus oli 0,39% väiksem kui tegelik tootlikkus (Lisa 7).

Päikeseelektrijaama 2017. aasta tegelik tootlikkus oli 35 419,38 kWh. PVGIS tootlikkuse prognoosist oli päikeseelektrijaama tegelik aastane tootlikkus 7,87% ning Solar-Log prognoosist 1,78% suurem.

Analüüsitava kolmandal, 2018. aastal esines aastast kuid, millal päikeseelektrijaama tegeliku ning prognoositud tootlikkuste vahed olid minimaalsed (Joonis 11). 2018. a jaanuaris, veebruaris ja novembris olid tegeliku tootlikkuse ning prognoositud tootlikkuse vahed 1,25 kWh, 26 kWh kuni 138,06 kWh.

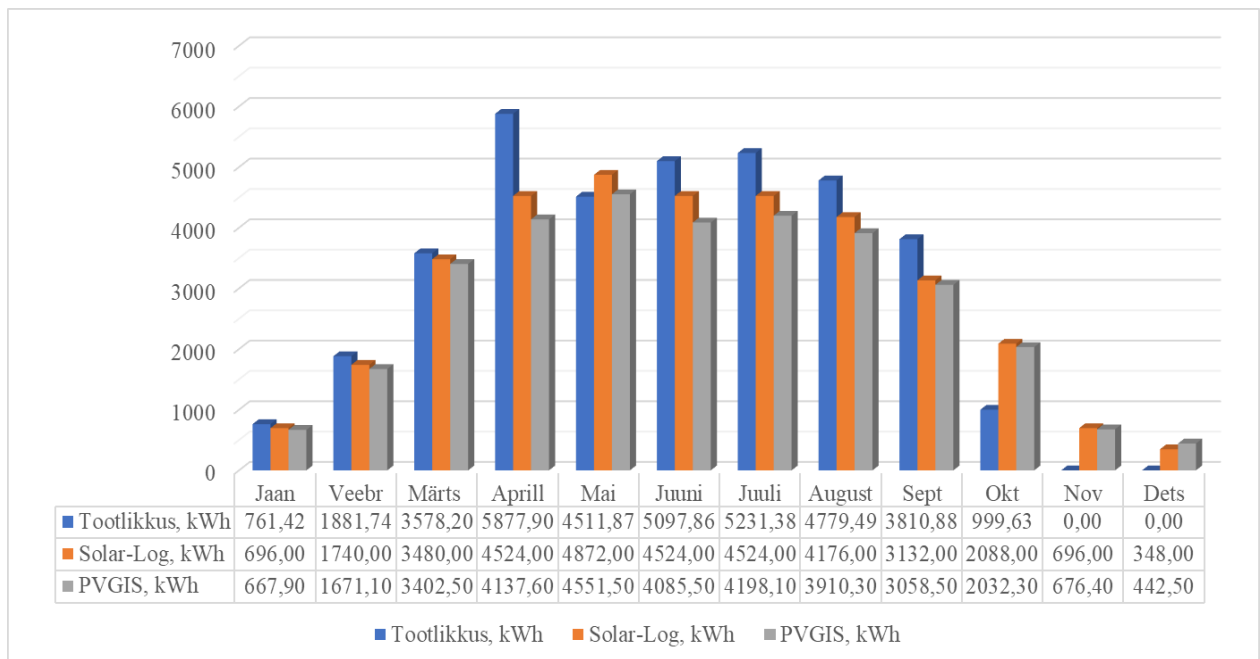


Joonis 11. Päikeseelektrijaama tegelik tootlikkus ja prognoositud tootlikkused 2018. aastal

Oluline muutus oli 2018. aastal päikeseelektrijaama aastases tegelikus tootlikkuses. 2018. aastal oli päikeseelektrijaama aastane tegelik tootlikkus 39 177,65 kWh. Sama näitaja oli 2016. aastal 35 782,12 kWh ning 2017. aastal 35 419,38 kWh. 2018. aasta oli päikeseelektrijaama aastane tegelik tootlikkus ligikaudu 3500 kWh suurem kui 2016. aasta kui ka 2017. aasta tegelikust tootlikkusest.

Prognoositud tootlikkustest oli tegelik tootlikkus 2018. aastal PVGIS prognoosist 19,32% ning Solar-Log prognoosist 12,58% suurem. 2018. aasta kuude lõikes esines tegeliku tootlikkuse ja prognooside vahel erinevusi, mis olid suuremad kui 20% ning detsembris oli PVGIS ja tegeliku tootlikkuse erinevus 48,57%. Samas, 2018. aasta kõige täpsem PVGIS prognoos oli jaanuaris, millal päikeseelektrijaama tegelik tootlikkus kattus PVGIS prognoositud tootlikkusega 99,81%. 2018. aasta tegeliku ja prognoositud tootlikkuste erinevused kuude lõikes on esitatud lõputöö lisas (Lisa 8).

2019. aasta päikeseelektrijaama tegelik tootlikkus ning Solar-Log ja PVGIS prognoositud tootlikkused on esitatud joonisel (Joonis 12).



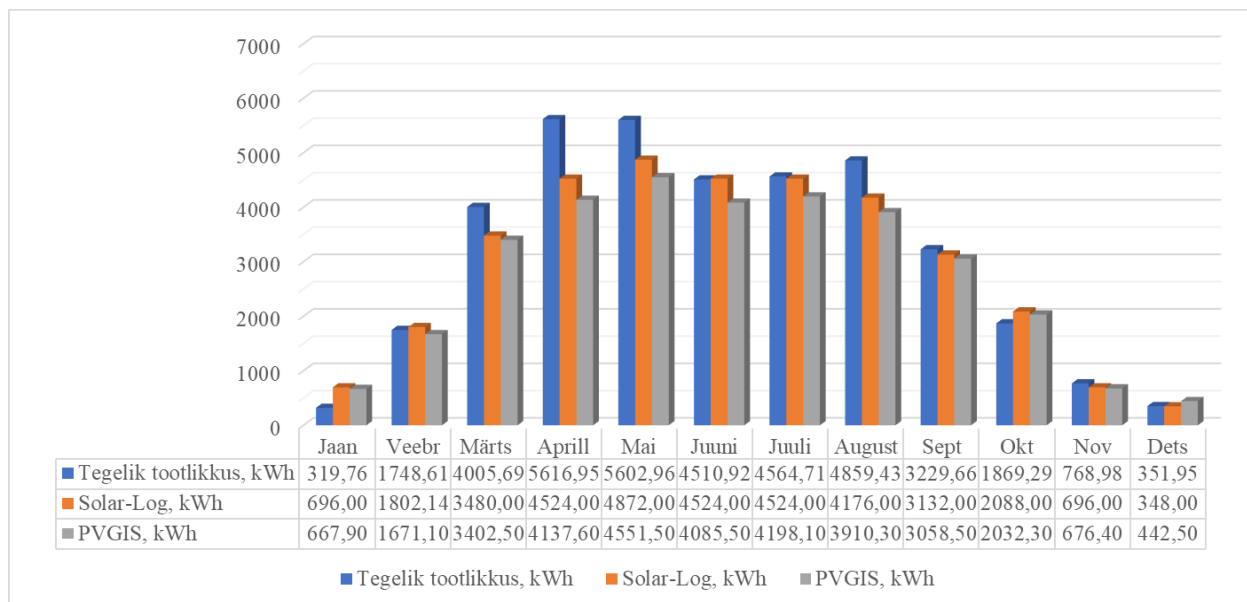
Joonis 12. Päikeseelektrijaama tegelik tootlikkus ja prognoositud tootlikkused 2019. aastal

2019. aasta päikeseelektrijaama tegelik tootlikkus oli mais madalam kui 2016.–18. aasta maikuu tegeliku tootlikkuse tulemused. Seejuures oli 2019. aastal mais päikeseelektrijaama tegelik tootlikkus madalam ka mõlemast prognoositud tootlikkusest, selliseid tulemusi ei ole eelneval analüüsitud perioodil esinenud. Kõrgeim tegelik tootlikkus 2019. aastal oli aprillis. Päikeseelektrijaama aprilli tegelik tootlikkus oli PVGIS prognoosist tootlikkusest 42,06% ning Solar-Log prognoosist 29,93% kõrgem (Lisa 9).

Joonisel (Joonis 12) esitatud tulemustest selgub, et novembris ja detsembris olid päikeseelektrijaama tegelikud tootlikkused 0 kWh. Päikeseelektrijaama süsteemi energia juhtimis- ja monitooringusüsteemi Solar-Log andmebaasi salvestatud andmete alusel esinesid inverteritel tehnilised rikked nii novembris, detsembris kui ka osaliselt oktoobris.

Võttes arvesse, et 2019. aasta novembris ja detsembris ei töötanud büroohoone päikeseelektrijaam, oli jaama tegelik tootlikkus sellegipoolest suurem kui 2016. aastal ja 2017. aastal. Päikeseelektrijaama aastane tegelik tootlikkus oli 36 530,37 kWh. 2019. aastal oli päikeseelektrijaama tegelik tootlikkus võrreldes PVGIS prognoositud tootlikkusest 11,26% kõrgem ning Solar-Log prognoositud tootlikkusest 4,97% kõrgem.

Büroohoone päikeseelektrijaama 2020. aasta tegelikud tootlikkused olid prognoositud tootlikkustest kõrgemad märtsis, aprillis, mais, juulis, augustis, septembris ja novembris. Madalamad tegelikud tootlikkused mõlema arvutusmeetodiga võrreldes olid jaanuaris ja oktoobris (Joonis 13).



Joonis 13. Päikeseelektrijaama tegelik tootlikkus ja prognoositud tootlikkused 2020. aastal

2020. aasta veebruaris, juunis, juulis, septembris ja detsembris olid Solar-Log prognoositud tootlikkuse ja päikeseelektrijaama tegeliku tootlikkuse erinevused minimaalsed. Erinevused olid vahemikus $-2,97\% \dots 3,12\%$. Kõige täpsem oli prognoositud tootlikkus juunis, millal oli päikeseelektrijaama tegelik tootlikkus vaid 0,29% väiksem kui Solar-Log prognoositud tootlikkus (Lisa 10).

Päikeseelektrijaama tegelik tootlikkus oli 2020. aastal 37 448,91 kWh, mis oli PVGIS ja Solar-Log prognoositud tootlikkustest vastavalt 14,05% ja 7,42% rohkem.

Päikeseelektrijaama tegeliku ja prognoositud tootlikkuste võrdlevanalüüsi tulemustest selgub, et 2016.–2020. aastal esinesid kuude lõikes tegeliku ja prognoositud tootlikkuste vahel alates 20% erinevused analüüsitud viiel aastal kolmel korral – 2018. a, 2019.a, 2020. a aprillis. Lisaks kahel korral 2019. a ja 2020. a augustis ning 2018. a ja 2019. a septembris.

Kokkuvõtvalt on järgnevas tabelis (Tabel 4) esitatud päikeseelektrijaama tegeliku tootlikkuse ning prognoositud tootlikkuste erinevused aastatel 2016–2020.

Tabel 4. Päikeseelektrijaama tegeliku ja prognoositud tootlikkuse erinevus, %

Aastad	Tootlikkus, MWh	Solar-Log, MWh	Tootlikkus, %	PVGIS, MWh	Tootlikkus, %
2016	35,78	34,86	32,83	2,64%	8,98%
2017	35,42	34,80	32,83	1,78%	7,87%
2018	39,18	34,80	32,83	12,58%	19,32%
2019	36,53	34,80	32,83	4,97%	11,26%
2020	37,45	34,86	32,83	7,42%	14,05%
Kokku	184,36	174,12	164,17	5,88%	12,30%

Tulenevalt tabelis (Tabel 4) toodud andmetele saab järeldada, et analüüsitud aastate lõikes ei olnud prognoositud tootlikkused paikapidavad ning päikeseelektrijaama tegelik tootlikkus oli prognoositud tootlikkustega võrreldes suurem. Prognoositud tootlikkuse arvutusmeetoditest oli kõige täpsem päikeseelektrijaama paigaldanud ettevõtte Solar-Log andmebaasi salvestatud andmed.

Sellegipoolest järeldab lõputöö autor, et mõlemad päikeseelektrijaama prognoositud tootlikkuse meetodid on paikapidavad ning piisavad, et päikeseelektrijaama tootlikkust prognoosida. Põhjusel, et PVGIS päikeseenergiakalkulaatori prognooside lähteandmeteks kasutatakse minevikus tehtud meteoroloogilisi mõõtmisi. Käesoleval hetkel kasutatakse PVGIS prognooside lähteandmeteks meteoroloogiliste vaatluste tulemusi, mis olid mõõdetud aastatel 1995–2015. Ilmastikuolud on aga suurimad päikeseelektrijaama süsteemi tootlikkuse mõjutajad, päikesepaneelide efektiivust mõjutab oluliselt atmosfääris leviv päikeseikiirgus. [5]

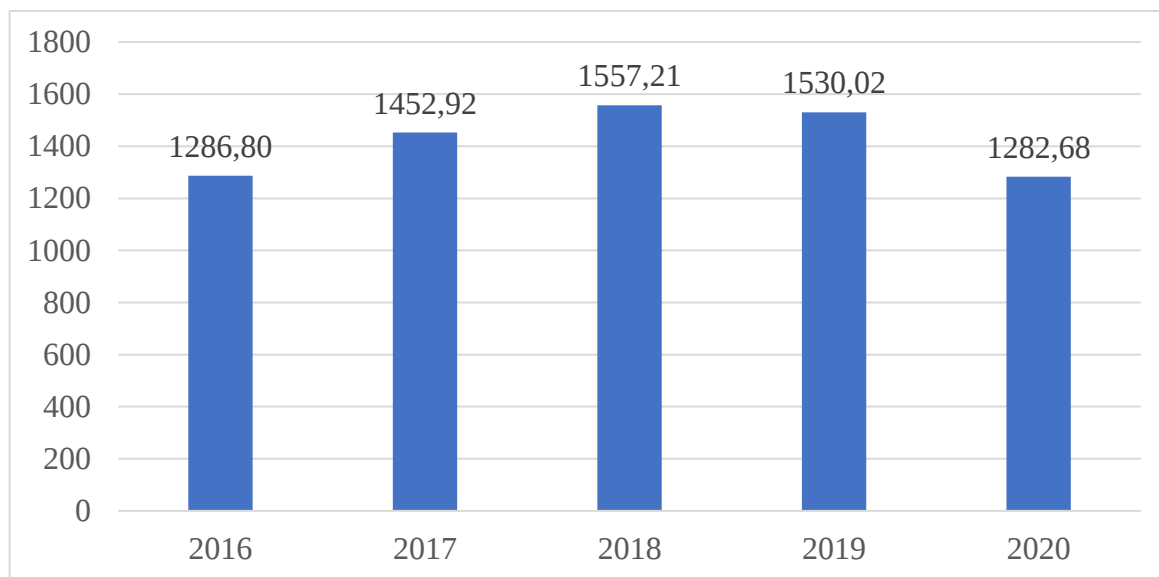
Lõputöö lisas (Lisa 11 [37]) on esitatud päikeseikiirguse mõjud päikeseelektrijaama süsteemile. Esitatud lisas (Lisa 11) kasutatud ilmastikuolude vaatlusandmed põhinevad Riigi Ilmateenistuse vaatlusandmetele [37]. Päikeseikiirguse anduri mõõtmistulemused nii päikeseikiirguse kui ka päikesepaneeli temperatuuri andmed on saadud päikeseelektrijaama süsteemi energia jälgimis- ja monitooringusüsteemi Solar-Log andmebaasist. Büroohoone päikeseelektrijaama süsteemi tootlikkuse ning jaama elektrienergia tootmise kellaajad põhinevad energia jälgimis- ja monitooringusüsteemi Solar-Log andmebaasi salvestatud andmetel.

4.3 Büroohoone elektritarbimine

Käesolevas peatükis autori poolt kasutatud lähteandmete aluseks on büroohoone haldusettevõtte poolt autorile esitatud andmed.

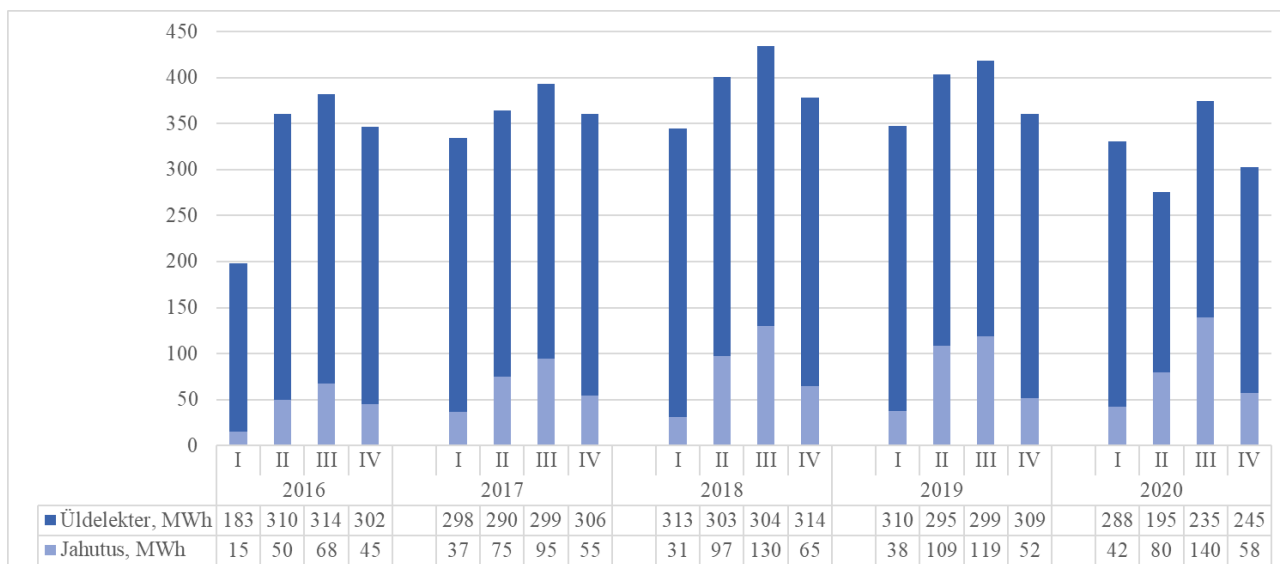
Büroohoone elektritarbimine jaotub vastavalt üldelekter ja üüripindade põhine elektritarbimine. Üldelektri tarbimise arvestusse arvestatakse ventilatsiooni- ja jahutussüsteemi, üldalade valgustuse, liftide, läbipääsu- ja tehnosüsteemide toiteks kuluv elekter.

Büroohoone elektri tarbimine viie aasta lõikes oli erinev, andmed esitatud joonisel (Joonis 14). Aastatel 2017, 2018 ning 2019 oli tarbimine vastavalt 1452,92 MWh, 1557,21 MWh ning 1530,02 MWh aastas. Autori hinnangul oli 2016. aasta madalam elektri tarbimine, 1286,80 MWh, tingitud sellest, et 2016. aasta esimeses kvartalis lõpetati büroohoone üüripindade ehitustöid. Kõik büroohoone üüripinnad ei olnud täies mahus üürnike kasutuses. Sarnaselt 2016. aastale oli 2020. aasta tarbimine madalam kui 2017–2019. aastatel. 2020. aastal tarbiti elektrit 1282,68 MWh.



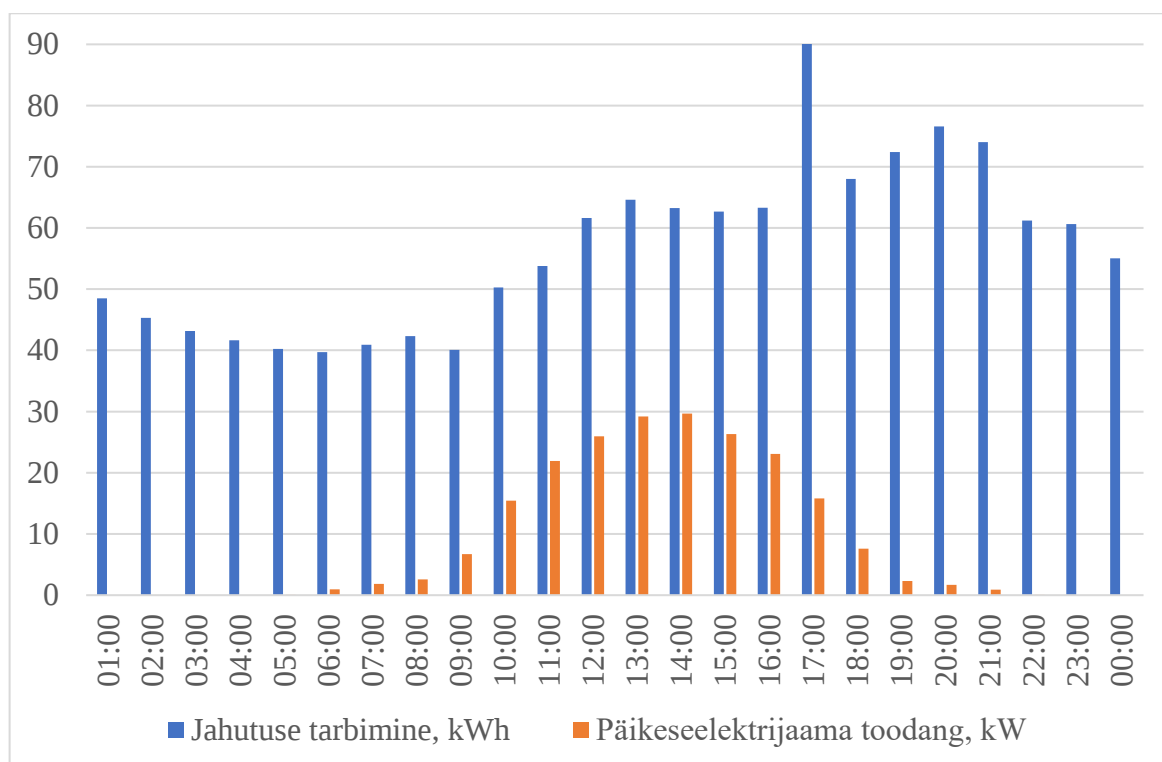
Joonis 14. Büroohoone elektritarbimine aastatel 2016–2020, MWh

Büroohoone kvartaalse elektritarbimise andmed on esitatud järgneval joonisel (Joonis 15). Esitatud andmetest saab järeldada, et 2020. aasta elektri tarbimise langus langeb kokku Eestis COVID-19 tõttu kehtestatud eriolukorra piirangute kehtimisega. Büroohoone teise ja kolmanda kvartali kõrge elektri tarbimine tuleneb hoone jahutussüsteemist.



Joonis 15. Büroohoone kvartaalne elektritarbimine aastatel 2016–2020, MWh

Büroohoone päikeseelektrijaama süsteemi poolt toodetud elektrienergia toodang kasutatakse 100% büroohoone omatarbeks. Päikeseelektrijaama toodetud elektrienergiat ei müüda elektrivõrku. Järgneval joonisel (Joonis 16) on esitatud 21.07.2019. a jahutussüsteemi tunnipõhine elektri tarbimine ning tarbimise tunnipõhine ajaline kattuvus päikeseelektrijaama elektrienergia toodanguga.

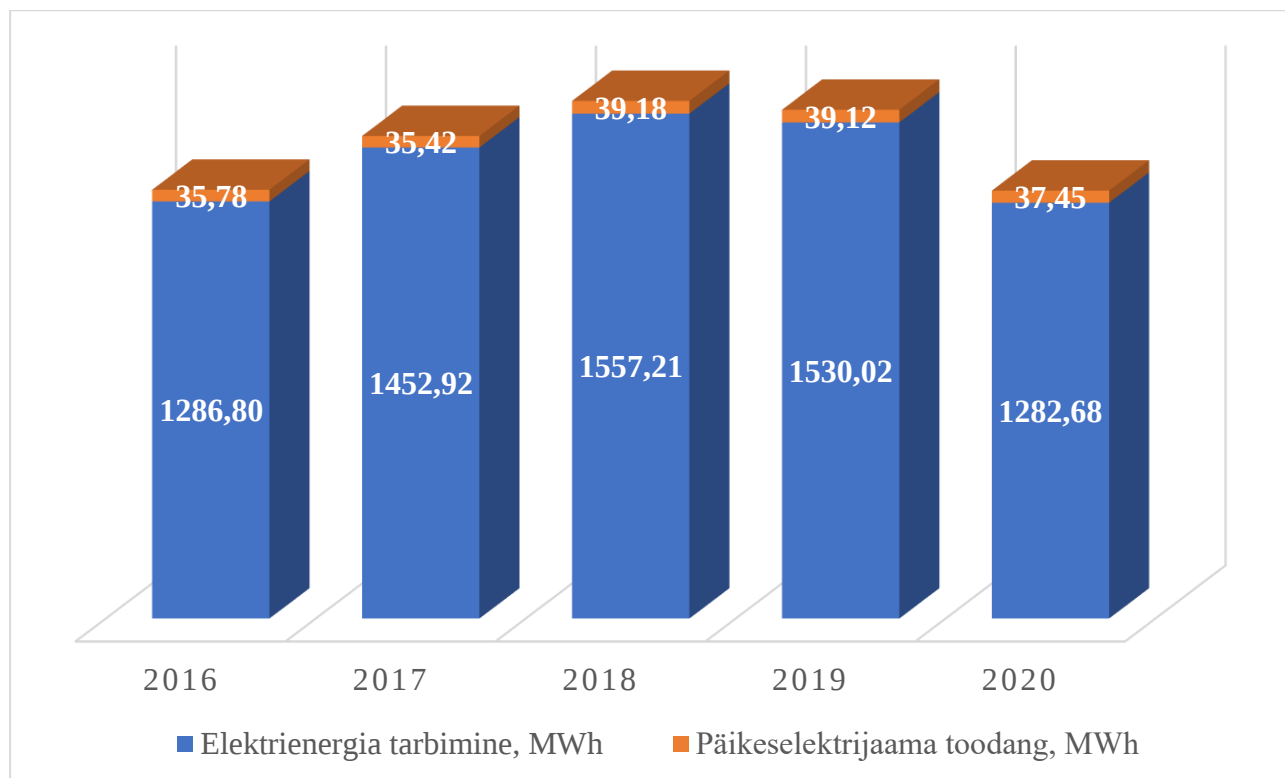


Joonis 16. Jahutussüsteemi tunnipõhine elektri tarbimine 21.07.2019. a

4.4 Päikeseelektrijaama toodangu osakaal büroohoone elektritarbimises

Analüüsi lähteandmetena kasutab lõputöö autor büroohoone haldusettevõtte poolt esitatud andmeid.

Büroohoone 2016.–2020. aastal tarbitud aastane elektrikulu, sealhulgas büroohoone päikeseelektrijaama poolt toodetud elektrienergia on esitatud joonisel (Joonis 17).



Joonis 17. Büroohoone elektritarbimine, sh päikeseelektrijaama toodetud elektrienergia, MWh

Büroohoonele väljastati rahvusvaheline *LEED GOLD* taseme sertifikaat. Büroohoone projekteerimise etapis läbi viidud *LEED* hindamissüsteemi tulemustest tulenevalt projekteeriti büroohoonele päikeseelektrijaama süsteem. Päikeseelektrijaama süsteemi projekteerimise eesmärk oli, et päikeseelektrijaama poolt toodetud aastane elektrienergia toodang kataks büroohoone poolt tarbitavast aastasest elektrikulust 3%.

Analüüsi käigus tehtud arvutuste tulemusel leiti päikeseelektrijaama aastase elektrienergia toodangu osakaal büroohoone aastases elektritarbimises. Tulemused saadi 2016.–2020. aastate kohta ning on esitatud järgnevas tabelis (Tabel 5).

Tabel 5. Päikeseelektrijaama toodangu osakaal büroohoone elektritarbimises 2016.–2020. a

Aastad	Elektri tarbimine, MWh	Toodetud elekter, MWh	Osakaal, %
2016	1286,80	35,78	2,78
2017	1452,92	35,42	2,44
2018	1557,21	39,18	2,52
2019	1530,02	39,12	2,56
2020	1282,68	37,45	2,92

Eeldusel, et büroohoone päikeseelektrijaama projekteerimise etapis seati jaama elektrienergia aastase toodangu osakaalu väärtuseks täpselt 3% võib arvutuste tulemustest järeldada, et büroohoonele projekteeritud päikeseelektrijaama süsteem 2016.–2020. aastal projekteerimise eesmärki ei saavutanud. Eesmärgile kõige lähedasem päikeseelektrijaama toodangu osakaal 2,92% büroohoone elektritarbimises saavutati 2020. aastal. Juhul kui päikeseelektrijaama projekteerimise etapis võeti aluseks ligilähedane osakaalu väärtus, saavutati päikeseelektrijaama elektrienergia 3% osakaal 2016. aastal ning 2018.–2020. aastal. 2017. aasta osakaalu väärtus jääks sellisel juhul ikkagi 2%.

5 JÄRELDUSED

Büroohoone päikeseelektrijaama süsteemi kvaliteedi hindamiseks teostati päikeseelektrijaama jõudlussuhete võrdlevanalüüs. Jõudlussuhte näitaja on üks olulisemaid päikeseelektrijaama süsteemi toimivuse kvaliteedi näitajaid. Jõudlussuhe näitab päikeseelektrijaama teoreetiliselt võimaliku toodetud elektrienergia ja tegelikult toodetud elektrienergia väljundi suhet peale süsteemis esinevate kõikide kadude mahaarvamist. Päikeseelektrijaama süsteemi toimimisel esinevad erinevad kaod nii seadmete kvaliteedi, rikete, kui ka päikeseekiirguse ebaefektiivse kasutamise tõttu. [34], [35]

Analüüsi teostamisel vaadeldi erinevaid uurimustöid päikeseelektrijaama süsteemi jõudlussuhte kohta. Saksamaal viidi läbi uurimustöö, milles analüüsiti ja võrreldi 100 erineva päikeseelektrijaama jõudlussuhte. Uurimustöös järeldati, et päikeseelektrijaamade jõudlussuhte väärtused olid enamasti 70%...90% vahel, heaks jõudlussuhte näitajaks hinnati 84%. Toodi välja, et madalamad jõudlussuhte väärtused kui 75% olid peamiselt seotud päikesepaneelidel esinevate varjudega või inverteri madala efektiivsusega. Jõudlussuhte näitajaga 90% saavutasid päikeseelektrijaama süsteemid, kuhu oli ühendatud kvaliteetsed seadmed ning päikeseelektrijaama süsteemi paigaldus oli teostatud nõuetekohaselt. [34]

Analüüsitud büroohoone päikeseelektrijaama süsteemi aastased jõudlussuhte väärtused perioodil 2016–2020 olid kõrged, 90% või kõrgemad. Kõrged jõudlussuhte protsendid kinnitavad, et päikeseelektrijaama süsteem toimib kvaliteetselt. Päikeseelektrijaama süsteem oli projekteeritud parimal võimalikul viisil, süsteemi oli ühendatud kvaliteetsed seadmed ning paigaldus teostatud nõuetekohaselt. Kuigi aastased päikeseelektrijaama jõudlussuhte näitajad olid kõrged, esines analüüsitud kuude lõikes päikeseelektrijaama jõudlussuhte väärtusi, mis olid vahemikus 70...90%. Autor soovib planeerida päikeseelektrijaama süsteemile hooldus ning teostada ka süsteemile visuaalne kontroll, et leida süsteemis võimalikud probleemkohad näiteks kaabelduses ning hooldada invertereid.

Büroohoone fassaadile installeeritud päikesepaneelidega päikeseelektrijaama prognoositud tootlikkuse ja tegeliku tootlikkuse võrdlevanalüüs teostati, et hinnata päikeseelektrijaamale kahe erineva arvutusmeetodi põhjal koostatud prognoositud tootlikkuse kvaliteeti ja paikapidavust.

2016.–2020. aasta andmete võrdlevanalüüsist selgus, et päikeseelektrijaama tegelik tootlikkus oli kõigil viiel aastal suurem, kui prognoositud tootlikkuse meetodid olid prognoosinud. Kõige suurem

erinevus oli päikeseelektrijaama aastase tegeliku tootlikkuse ja PVGIS prognoosi vahel 2018. aastal, millal päikeseelektrijaama tegelik tootlikkus ületas prognoositud tootlikkust 19,32%. Samal, 2018. aastal ületas aastane päikeseelektrijaama tegelik tootlikkus ka Solar-Log prognoositud tootlikkust 12,58% võrra. Kogu analüüsitud viie aasta perioodil, aastatel 2016–2020 oli päikeseelektrijaama tegelik tootlikkus PVGIS prognoosist 12,30 % suurem ning Solar-Log prognoosist 5,88% suurem. Prognoositud tootlikkuse arvutusmeetoditest oli kõige täpsem päikeseelektrijaama paigaldanud ettevõtte Solar-Log andmebaasi salvestatud andmed.

Arvutusmeetodite prognoositud tootlikkuse lähteandmeteks kasutatakse minevikus tehtud meteoroloogiliste mõõtmiste andmeid [5]. Ilmastikuolud aga avaldavad suurimat mõju päikeseelektrijaama süsteemi tootlikkusele, kus päikese kiirgus mõjutab oluliselt päikesepaneelide efektiivsust [5]. Eelnevast järeldub, et mõlemad päikeseelektrijaama prognoositud tootlikkuse meetodid on paikapidavad ning piisavad, et päikeseelektrijaama tootlikkust prognoosida.

Analüüsist selgus, et päikeseelektrijaama tegeliku tootlikkust mõjutasid ka päikeseelektrijaama süsteemis esinenud tehnilised rikked. 2019. aastal esinenud inverterite tehniliste rikete tagajärjel ei tootnud päikeseelektrijaam elektrienergiat novembris ja detsembris ning osaliselt ka oktoobris. Autor soovib teostada päikeseelektrijaama süsteemi tehniline kontroll ning süsteemselt kontrollida päikeseelektrijaama energia juhtimis- ja monitooringusüsteemi andmebaasi.

Büroohoone hoone projekteerimise etapis planeeritud päikeseelektrijaama eesmärk oli vähendada hoone sihtotstarbelisel kasutamisel elektrivõrgust ostetava elektri mahtu 3% võrra. Päikeseelektrijaama süsteem võimsusega 43,50 kW tootis aastatel 2016–2020 päikeseenergiast elektrienergiat büroohoone omatarbeks 100%. Päikeseelektrijaama toodetud elektrienergia osakaal büroohoone tarbitavast elektrist oli olenevalt aastast vahemikus 2,44% kuni 2,92%. Viie aasta arvestuse keskmine oli 2,64%. Tuginedes analüüsi tulemustele järeldas autor, et projekteeritud päikeseelektrijaama süsteem ei ole piisava võimsusega, et saavutada projekteerimisel seatud eesmärki. Antud näitaja on otseses suhtes hoone elektritarbimise kogumahuga. Näiteks, kui aastal 2020 oli elektritarbimine madalaim, oli päikesepaneelidega toodetud elektri osakaal kõrgeim ehk 2,92%. Eesmärgi saavutamiseks tuleks päikeseelektrijaama süsteemi ühendada seni veel süsteemi ühendamata päikesepaneelid.

Kokkuvõtvalt saab järeldada, et kui (1) päikeseelektrijaama jõudlussuhe oli rahvusvahelise praktika võrdluses väga kõrge (90% ja kõrgem); (2) päikeseelektrijaama tegelik tootlikkus oli prognoositud

tootlikkustega võrreldes suurem; (3) päikeseelektrijaama kogutoodangu osakaal büroohoone elektritarbimises jäi napilt alla taotlusliku 3%, siis viimane on otseses suhtes kogu maja elektritarbimisega. Seega Bernhard Schmidti majale paigaldatud päikeseelektrijaam on efektiivne, täidab oma funktsiooni aga elektri kogutarbimisest 3% kohapeal toodetud elektrienergiast on võimalik saavutada suhtes hoone elektri kogutarbimisega ja suurema päikesepaneelide hulgaga.

KOKKUVÕTE

Uurimustöö probleemina tõstatati päikeseelektrijaama tootlikkuse analüüs ja toodetud elektri osakaal hoone elektritarbimises Ülemiste City linnakus asuva Bernhard Schmidti büroohoone näitel. Küsimus on oluline kinnisvara omavatele ja haldavatele ettevõtetele, samuti hoone üürnikele üürikulude kalkuleerimisel. Samuti teenuse pakkujale ning teistele ettevõtte klientidele tagasisideks, kas 2016. aastal esitatud väärtuspakkumine on olnud õigustatud.

Bernhard Schmidti maja näidet on hea kasutada päikeseelektrijaama tootlikkuse analüüsiks, kuna antud hoone fassaadil polükristalliliste paneelidega päikeseelektrijaam on toiminud järelduste tegemisteks piisavad viis aastat vahemikus 2016 kuni 2020.

Antud uurimustöös kasutati kvantitatiivse analüüsi meetodit. Võrdlusanalüüsis esitatud tootlikkuse andmed põhinesid PVGIS päikeseenergiakalkulaatori ning päikeseelektrijaama paigaldanud ettevõtte arvutusmeetodil, mis olid kantud Solar-Log energia- ja monitooringusüsteemi.

Lõputöö teoreetilises taustas anti ülevaade päikeseenergia kasutamisest Euroopa Liidus ja Eestis, kust järeldub päikeseenergia üha suurem osakaal kogu taastuvenergia kasutamises ning päikeseenergia võimsuse hüppeline kasv Eestis alates 2018. aastast. Kuna antud trend on prognoositavas tulevikus jätkuvalt positiivne, on oluline hinnata tehnoloogiate efektiivsust tuleviku investeeringute ning tehnoloogiate arendusotsuste tegemisel.

Päikeseelektrijaamade kasutatud lahendustest eristuvad võrguühendusega ja võrguühenduseta päikeseelektrijaamad. Päikesepaneelide erinevatest peamistest tehnoloogiatest oli esile toodud monokristallised, polükristallilised ja õhukesekilelised päikesepaneelid ning nende efektiivsust mõjutavad olulisemad tegurid.

Bernhard Schmidti maja juures oli olulisena välja toodud asjakohased büroohoone andmed ning paigaldatud päikeseelektrijaama tehniline lahendus koos olulisemate tehniliste andmetega.

Töö keskne osa oli päikeseelektrijaama prognoositud tootlikkuse ja tegeliku tootlikkuse võrdlus. Antud analüüsis vaadeldi Bernhard Schmidti büroohoone päikeseelektrijaama kvaliteedi hindamiseks süsteemi jõudlussuhet aastast 2016 aastani 2020, päikeseelektrijaama toodangu osakaalu büroohoone elektritarbimises ning võrreldi neid esialgselt prognoositud tootlikkusega.

Kõrgete jõudlussuhete protsentide alusel oli uurimustöö esimene järeldus, et päikeseelektrijaama süsteem toimib kvaliteetselt. Päikeseelektrijaama süsteem oli projekteeritud parimal võimalikul viisil, süsteemi oli ühendatud kvaliteetsed seadmed ning paigaldus teostatud nõuetekohaselt.

Teiseks, büroohoone lõunasuunalisele fassaadile installeeritud polükristalliliste päikesepaneelidega päikeseelektrijaama süsteemi tegelik tootlikkus oli suurem kui prognoositud tootlikkused, mis saadi PVGIS päikeseenergiakalkulaatori ning päikeseelektrijaam paigaldanud ettevõtte arvutusmeetodil. Analüüsitud viie aasta perioodil, aastatel 2016 kuni 2020 oli päikeseelektrijaama tegelik elektrienergia tootlikkus PVGIS prognoosist 12,30 % suurem ning päikeseelektrijaam paigaldanud ettevõtte prognoosist 5,88% suurem.

Kolmandaks, päikeseelektrijaama toodetud elektrienergia osakaal büroohoone tarbitavast elektrist oli olenevalt aastast vahemikus 2,44% kuni 2,92%. Viie aasta arvestuse keskmine oli 2,64%. Tuginedes analüüsi tulemustele järeldus, et projekteeritud päikeseelektrijaama süsteem ei ole piisava võimsusega, et saavutada projekteerimisel seatud eesmärki. Antud näitaja on otseses suhtes hoone reaalse elektritarbimise kogumahuga.

Kokkuvõttev järeldus oli, et Bernhard Schmidti majale paigaldatud päikeseelektrijaam on efektiivne, täidab oma funktsiooni aga elektri kogutarbimisest 3% kohapeal toodetud elektrienergiast on võimalik saavutada suhtes hoone elektri kogutarbimisega ja suurema päikesepaneelide hulgaga.

Antud uurimustöö täitis oma eesmärgi vastates peamistele püstitatud küsimustele. Samuti tekkis uus teadmine tulevikus sarnaste päikeseelektrijaamade tootlikkuse planeerimiseks, tootlikkuse prognoosimiseks ning päikeseelektrijaama elutsükli haldamiseks.

SUMMARY

Productivity Analysis of Solar Power Plant and Produced Electricity Share in the Building's Electricity Consumption on the Example of the Bernhard Schmidt's Office Building

The aim of the graduation thesis was to carry out the analysis of the productivity of the solar power plant and the share of the produced electricity in the electricity consumption of the building on the example of the Bernhard Schmidt's office building in the “Ülemiste City” business campus. The issue is important for the companies that own or administrate the real estate, as well for the tenants of a building when calculating rental cost. It is also important for the feedback to the service provider to understand whether the value offer submitted has been justified.

The data for this study were obtained from the solar power plant with polycrystalline panels on the facade of the Bernhard Schmidt building which has been operating for five years between 2016 and 2020.

The productivity data, presented in the benchmark, were based on the calculation method of the PVGIS (*Photovoltaic Geographical Information System*) and the calculation method of the company that installed the solar power plant, which were entered in the Solar-Log's energy and monitoring system.

The key issue of the thesis was the comparison of the projected productivity of the solar power plant with the actual productivity. To assess the quality of the solar power plant of the Bernhard Schmidt office building, the performance ratio of the system from 2016 to 2020 and the share of solar power plant output in the office building's total electricity consumption were analysed and compared with the initially estimated productivity.

Based on the high performance ratios, the first conclusion was that the solar power plant system works efficiently.

The actual productivity of the solar power plant system with polycrystalline solar panels installed on the south facade of the high-rise office building was higher than the estimated productivity obtained by the PVGIS and installation company's own calculation method. During the analysed five-year period, from 2016 to 2020, the actual electricity productivity of the solar power plant was 12.30%

higher than the prognosis of PVGIS and 5.88% higher than the prognosis of the company that installed the solar power plant.

The five-year average share of electricity produced by the solar power plant in the building's total electricity consumption was 2.64%. Based on the results of the analysis, it was concluded that the designed solar power plant system does not have sufficient capacity to achieve the design goal. This indicator is directly related to the actual electricity consumption of the building.

In conclusion, the solar power plant installed to the Bernhard Schmidt's office building is efficient, meets its function, but 3% from the total electricity consumption of local power production can be achieved with correlation to the building's total electricity consumption and a larger number of solar panels.

The current graduation thesis provides new knowledge for planning the productivity of similar types of solar power plants in the future, forecasting productivity and managing the life cycle of a solar power plant.

VIIDATUD ALLIKAD

- [1] „Euroopa Liidu kliimaeesmärgid | Keskkonnaministeerium“, *Keskkonnaministeerium*. <https://www.envir.ee/et/EL-eesmargid> (vaadatud märts 23, 2021).
- [2] „EUR-Lex - 52016PC0767R(01) - EN - EUR-Lex“, *EUR-Lex*. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/?uri=CELEX:52016PC0767R\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/?uri=CELEX:52016PC0767R(01)) (vaadatud märts 23, 2021).
- [3] Majandus- ja kommunikatsiooniministeerium, „Energiamajanduse arengukava aastani 2030“, *Eesti riiklik energia- ja kliimakava aastani 2030*. https://www.mkm.ee/sites/default/files/enmak_2030.pdf
- [4] „Taastuvelekter kattis möödunud aastal neljandiku tarbimisest | Elering“. <https://elering.ee/taastuvelekter-kattis-moodunud-aastal-neljandiku-tarbimisest> (vaadatud märts 23, 2021).
- [5] I. PINEDO, „Data sources and calculation methods“, *EU Science Hub - European Commission*, juuli 03, 2019. <https://ec.europa.eu/jrc/en/PVGIS/docs/methods> (vaadatud mai 01, 2021).
- [6] Z. Usman, J. Tah, H. Abanda, ja C. Nche, „A Critical Appraisal of PV-Systems' Performance“, *Buildings*, kd 10, nr 11, lk 192, okt 2020, doi: 10.3390/buildings10110192.
- [7] J. Christiansen, „EU Market Outlook for Solar Power“, lk 60, 2020.
- [8] „Statistics | Eurostat“. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_d_hhq/default/table?lang=en (vaadatud apr 04, 2021).
- [9] „ETEK_aastaraamat_A4_2019_veeb.pdf“.
- [10] M. H. Shubbak, „Advances in solar photovoltaics: Technology review and patent trends“, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, kd 115, lk 109383, nov 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.109383.
- [11] E. Poll, *Elekter päikesest ja tuulest*. Tallinn: MTÜ Kolm Kobrast, 2012.
- [12] „Grid-Tied, Off-Grid, and Hybrid Solar Systems“, *Solar Reviews*. <https://www.solarreviews.com/blog/grid-tied-off-grid-and-hybrid-solar-systems> (vaadatud märts 25, 2021).
- [13] N. M. Kumar, M. S. P. Subathra, ja J. E. Moses, „On-Grid Solar Photovoltaic System: Components, Design Considerations, and Case Study“, *2018 4th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES)*, Chennai, veebr 2018, lk 616–619. doi: 10.1109/ICEES.2018.8442403.

- [14] „Kumar et al. - 2018 - On-Grid Solar Photovoltaic System Components, Des.pdf“.
- [15] „Solar Electricity Basics, Powering Your Home or Office with Solar Energy 2nd Edition by Dan Chiras.pdf“.
- [16] J. Särg, „VÕRGUVABA (OFF-GRID) LAHENDUSED VÄIKEMAJAPIDAMISTELE“, lk 32.
- [17] „Autonoomsed lahendused“, *Naps Solar Estonia*. <https://napssolar.ee/tooted-teenused/autonoomsed-lahendused/> (vaadatud märts 25, 2021).
- [18] „The photovoltaic effect | PVEducation“. Vaadatud: apr 07, 2021. [Online]. Available at: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/the-photovoltaic-effect>
- [19] A. Walker, *Solar Energy: Technologies and Project Delivery for Buildings*. Somerset, UNITED STATES: R. S. Means Company, Incorporated, 2013. Vaadatud: märts 25, 2021. [Online]. Available at: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/nlibee-ebooks/detail.action?docID=1359780>
- [20] „How PV Panels Work | Photovoltaic Lighting | Lighting Answers | NLPIP“. <https://www.lrc.rpi.edu/programs/nlpiplightinganswers/photovoltaic/04-photovoltaic-panels-work.asp> (vaadatud apr 09, 2021).
- [21] „How PV Panels Work | Photovoltaic Lighting | Lighting Answers | NLPIP“. <https://www.lrc.rpi.edu/programs/nlpiplightinganswers/photovoltaic/04-photovoltaic-panels-work.asp> (vaadatud apr 09, 2021).
- [22] R. Perälä, *Päikeseelekter*. Tallinn: EHITAME kirjastus, 2018.
- [23] „Kalogirou - 2014 - Solar energy engineering processes and systems.pdf“. Vaadatud: märts 25, 2021. [Online]. Available at: <http://1.droppdf.com/files/AvIdq/solar-energy-engineering-processes-and-systems-2nd-ed-2014-.pdf>
- [24] D. G. Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie (DGS) ja U. Hartmann, *Planning and Installing Photovoltaic Systems: A Guide for Installers, Architects and Engineers*. London, UNITED KINGDOM: Taylor & Francis Group, 2013. Vaadatud: märts 25, 2021. [Online]. Available at: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/nlibee-ebooks/detail.action?docID=1323379>
- [25] „Types of Solar Panels (2021)“. <https://www.greenmatch.co.uk/blog/2015/09/types-of-solar-panels> (vaadatud apr 09, 2021).
- [26] T. Dierauf, A. Growitz, ja S. Corporation, „Weather-Corrected Performance Ratio“, *Renew. Energy*, lk 22, 2013.
- [27] „Ehitisregister“. <https://ehr.ee/app/w/page?5> (vaadatud märts 22, 2021).
- [28] „Ehitisregister“. <https://ehr.ee/app/w/page?25> (vaadatud märts 22, 2021).

- [29] „Ehitisregister“. <https://ehr.ee/app/w/page?7> (vaadatud märts 22, 2021).
- [30] „LEED sertifikaat | Energiatõhusus | Forus“, *Forus Security AS*. <https://forus.ee/leedsertifikaat> (vaadatud apr 09, 2021).
- [31] „KOSTAL Downloads – Information & brochures“. <https://www.kostal-solar-electric.com/en-gb/download/download> (vaadatud apr 27, 2021).
- [32] „Solar-Log WEB Enerest™ - Solare Datensysteme“. <https://naps.solarlog-web.eu/> (vaadatud märts 26, 2021).
- [33] „JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission“. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#PVTR (vaadatud märts 27, 2021).
- [34] N. Reich, B. Müller, A. Armbruster, W. van Sark, K. Kiefer, ja C. Reise, „Performance ratio revisited: is PR > 90% realistic?“, *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, kd 20, lk 717–726, sept 2012, doi: 10.1002/pip.1219.
- [35] „Performance ratio - Quality factor for the PV plant“, lk 9.
- [36] „SolarLog_Datasheet_Sensor_Basic_international.pdf“.
- [37] „Vaatlusandmed |“, *Riigi Ilmateenistus*. <https://www.ilmateenistus.ee/ilm/ilmavaatlused/vaatlusandmed/> (vaadatud apr 29, 2021).

LISAD

Lisa 1. Päikeseelektrijaama jõudlussuhte erinevused 2016. aasta kuude lõikes, %

Lisa 2. Päikeseelektrijaama jõudlussuhte erinevused 2017. aasta kuude lõikes, %

Lisa 3. Päikeseelektrijaama jõudlussuhte erinevused 2018. aasta kuude lõikes, %

Lisa 4. Päikeseelektrijaama jõudlussuhte erinevused 2019. aasta kuude lõikes, %

Lisa 5. Päikeseelektrijaama jõudlussuhte erinevused 2020. aasta kuude lõikes, %

Lisa 6. Tegelik ja prognoositud tootlikkuste erinevused 2016. aastal

Lisa 7. Tegelik ja prognoositud tootlikkuste erinevused 2017. aastal

Lisa 8. Tegelik ja prognoositud tootlikkuse erinevused 2018. aastal

Lisa 9. Tegelik ja prognoositud tootlikkuse erinevused 2019. aastal

Lisa 10. Tegelik ja prognoositud tootlikkuse erinevused 2020. aastal

Lisa 11. Päikesekiirguse mõjud päikeseelektrijaama süsteemile

Lisa 1. Päikeseelektrijaama jõudlussuhte erinevused 2016. aasta kuude lõikes, %

2016. aasta	Toodetud elektrienergia, MWh	Teoreetiliselt toodetav elektrienergia, MWh	Jõudlussuhe, %
Jaanuar	0,91	0,95	96
Veebruar	1,31	1,46	90
Märts	3,53	3,80	93
Aprill	4,44	4,68	95
Mai	6,09	6,48	94
Juuni	4,40	4,71	93
Juuli	4,49	4,77	94
August	3,61	3,85	94
September	4,17	4,46	93
Oktoober	1,14	1,23	93
November	0,55	0,62	88
Detsember	0,59	0,62	96
Kokku	35,23	37,63	94

Lisa 2. Päikeseelektrijaama jõudlussuhte erinevused 2017. aasta kuude lõikes, %

2017. aasta	Toodetud elektrienergia, MWh	Teoreetiliselt toodetav elektrienergia, MWh	Jõudlussuhe, %
Jaanuar	0,52	0,59	89
Veebruar	2,10	2,24	94
Märts	3,07	3,25	94
Aprill	4,63	4,86	95
Mai	5,87	6,22	94
Juuni	4,51	4,79	94
Juuli	4,71	5,02	94
August	4,11	4,40	93
September	3,23	3,46	93
Oktoober	1,70	1,85	92
November	0,55	0,64	87
Detsember	0,43	0,51	84
Kokku	35,43	37,82	94

Lisa 3. Päikeseelektrijaama jõudlussuhte erinevused 2018. aasta kuude lõikes, %

2018. aasta	Toodetud elektrienergia, MWh	Teoreetiliselt toodetav elektrienergia, MWh	Jõudlussuhe, %
Jaanuar	0,67	0,78	86
Veebruar	1,81	2,00	91
Märts	4,54	4,83	94
Aprill	4,53	4,85	93
Mai	6,03	6,50	93
Juuni	4,84	5,24	92
Juuli	4,84	5,28	92
August	4,49	4,86	92
September	3,89	4,21	92
Oktoober	2,64	2,90	91
November	0,73	0,83	87
Detsember	0,23	0,28	81
Kokku	39,23	42,56	92

Lisa 4. Päikeseelektrijaama jõudlussuhte erinevused 2019. aasta kuude lõikes, %

2019. aasta	Toodetud elektrienergia, MWh	Teoreetiliselt toodetav elektrienergia, MWh	Jõudlussuhe, %
Jaanuar	0,76	0,88	87
Veebruar	1,88	2,06	91
Märts	3,58	3,85	93
Aprill	5,89	6,30	93
Mai	4,52	4,84	93
Juuni	5,10	5,45	94
Juuli	5,24	5,62	93
August	4,79	5,15	93
September	3,79	4,09	93
Oktoober	1,01	1,09	93
November	0,00	0,00	0
Detsember	0,00	0,00	0
Kokku	36,56	39,33	93

Lisa 5. Päikeseelektrijaama jõudlussuhte erinevused 2020. aasta kuude lõikes, %

2020. aasta	Toodetud elektrienergia, MWh	Teoreetiliselt toodetav elektrienergia, MWh	Jõudlussuhe, %
Jaanuar	0,32	0,37	87
Veebruar	1,75	1,94	90
Märts	4,01	4,25	94
Aprill	5,63	5,93	95
Mai	5,61	5,95	94
Juuni	4,52	5,26	86
Juuli	4,57	4,90	93
August	4,87	5,24	93
September	3,23	3,80	85
Oktoober	1,87	2,41	78
November	0,77	1,05	73
Detsember	0,35	0,49	72
Kokku	37,50	41,59	90

Lisa 6. Tegelik ja prognoositud tootlikkuste erinevused 2016. aastal

Kuud	Tootlikkus, kWh	Solar-Log, kWh	Tootlikkus, %	PVGIS, kWh	Tootlikkus, %
Jaauar	908,89	696,00	30,59%	667,90	36,08%
Veebruar	1305,12	1802,14	-27,58%	1671,10	-21,90%
Märts	3765,41	3480,00	8,20%	3402,50	10,67%
Aprill	4432,06	4524,00	-2,03%	4137,60	7,12%
Mai	6075,95	4872,00	24,71%	4551,50	33,49%
Juuni	4396,24	4524,00	-2,82%	4085,50	7,61%
Juuli	4484,95	4524,00	-0,86%	4198,10	6,83%
August	3605,51	4176,00	-13,66%	3910,30	-7,79%
September	4162,35	3132,00	32,90%	3058,50	36,09%
Oktoober	1507,50	2088,00	-27,80%	2032,30	-25,82%
November	548,74	696,00	-21,16%	676,40	-18,87%
Detsember	589,40	348,00	69,37%	442,50	33,20%
Kokku	35 782,12	34 862,14	2,64%	32 834,20	8,98%

Lisa 7. Tegelik ja prognoositud tootlikkuste erinevused 2017. aastal

Kuud	Tootlikkus, kWh	Solar-Log, kWh	Tootlikkus, %	PVGIS, kWh	Tootlikkus, %
Jaauar	518,59	696,00	-25,49%	667,90	-22,36%
Veebruar	2089,73	1740,00	20,10%	1671,10	25,05%
Märts	3123,67	3480,00	-10,24%	3402,50	-8,19%
Aprill	4623,72	4524,00	2,20%	4137,60	11,75%
Mai	5858,80	4872,00	20,25%	4551,50	28,72%
Juuni	4506,48	4524,00	-0,39%	4085,50	10,30%
Juuli	4698,82	4524,00	3,86%	4198,10	11,93%
August	4105,46	4176,00	-1,69%	3910,30	4,99%
September	3221,61	3132,00	2,86%	3058,50	5,33%
Oktoober	1694,18	2088,00	-18,86%	2032,30	-16,64%
November	553,25	696,00	-20,51%	676,40	-18,21%
Detsember	425,07	348,00	22,15%	442,50	-3,94%
Kokku	35 419,38	34 800,00	1,78%	32 834,20	7,87%

Lisa 8. Tegelik ja prognoositud tootlikkuse erinevused 2018. aastal

Kuud	Tootlikkus, kWh	Solar-Log, kWh	Tootlikkus, %	PVGIS, kWh	Tootlikkus, %
Jaauar	669,15	696,00	-3,86%	667,90	0,19%
Veebruar	1809,16	1740,00	3,97%	1671,10	8,26%
Märts	4537,46	3480,00	30,39%	3402,50	33,36%
Aprill	4518,27	4524,00	-0,13%	4137,60	9,20%
Mai	6016,58	4872,00	23,49%	4551,50	32,19%
Juuni	4834,06	4524,00	6,85%	4085,50	18,32%
Juuli	4830,83	4524,00	6,78%	4198,10	15,07%
August	4485,99	4176,00	7,42%	3910,30	14,72%
September	3889,64	3132,00	24,19%	3058,50	27,17%
Oktoober	2634,14	2088,00	26,16%	2032,30	29,61%
November	724,78	696,00	4,14%	676,40	7,15%
Detsember	227,59	348,00	-34,60%	442,50	-48,57%
Kokku	39 177,65	34 800,00	12,58%	32 834,20	19,32%

Lisa 9. Tegelik ja prognoositud tootlikkuse erinevused 2019. aastal

Kuud	Tootlikkus, kWh	Solar-Log, kWh	Tootlikkus, %	PVGIS, kWh	Tootlikkus, %
Jaanuar	761,42	696,00	9,40%	667,90	14,00%
Veebruar	1881,74	1740,00	8,15%	1671,10	12,60%
Märts	3578,20	3480,00	2,82%	3402,50	5,16%
Aprill	5877,90	4524,00	29,93%	4137,60	42,06%
Mai	4511,87	4872,00	-7,39%	4551,50	-0,87%
Juuni	5097,86	4524,00	12,68%	4085,50	24,78%
Juuli	5231,38	4524,00	15,64%	4198,10	24,61%
August	4779,49	4176,00	14,45%	3910,30	22,23%
September	3810,88	3132,00	21,68%	3058,50	24,60%
Oktoober	999,63	2088,00	-52,13%	2032,30	-50,81%
November	0,00	696,00	-100,00%	676,40	-100,00%
Detsember	0,00	348,00	-100,00%	442,50	-100,00%
Kokku	36 530,37	34 800,00	4,97%	32 834,20	11,26%

Lisa 10. Tegeliku ja prognoositud tootlikkuse erinevused 2020. aastal

Kuud	Tootlikkus, kWh	Solar-Log, kWh	Tootlikkus, %	PVGIS, kWh	Tootlikkus, %
Jaauar	319,76	696,00	-54,06%	667,90	-52,12%
Veebruar	1748,61	1802,14	-2,97%	1671,10	4,64%
Märts	4005,69	3480,00	15,11%	3402,50	17,73%
Aprill	5616,95	4524,00	24,16%	4137,60	35,75%
Mai	5602,96	4872,00	15,00%	4551,50	23,10%
Juuni	4510,92	4524,00	-0,29%	4085,50	10,41%
Juuli	4564,71	4524,00	0,90%	4198,10	8,73%
August	4859,43	4176,00	16,37%	3910,30	24,27%
September	3229,66	3132,00	3,12%	3058,50	5,60%
Oktoober	1869,29	2088,00	-10,47%	2032,30	-8,02%
November	768,98	696,00	10,49%	676,40	13,69%
Detsember	351,95	348,00	1,14%	442,50	-20,46%
Kokku	37 448,91	34 862,14	7,42%	32 834,20	14,05%

Lisa 11. Päikese kiirguse mõjud päikeseelektrijaama süsteemile

Riigi Ilmateenistuse vaatlusandmed			Päikese kiirguse anduri mõõtmised		Solar-Log andmebaas	Päikeseelektrijaam	
Kuupäev	Nähtus	Õhutemperatuur, °C	Päikese kiirgus, W/m ²	Paneeli temperatuur, °C	Elektrienergia toodang, kWh	Algus	Lõpp
21.07.2016	Pilves	16,9	161	23	46,77	05:00	21:55
21.07.2017	Selge	16,4	814	40	219,35	04:40	22:20
21.07.2018	Pilves	20,6	845	48	147,74	04:50	22:15
21.07.2019	Selge	22,8	811	49	210,11	04:40	22:10
21.07.2020	Pilves	19,4	874	43	156,01	04:45	22:20
21.12.2016	Pilves	2,6	61	5	1,83	09:55	14:55
21.12.2017	Nõrk hoogvihm	3,6	28	5	1,12	10:05	15:10
21.12.2018	Nõrk hooglumi	-9,4	12	-6	0,8	09:40	15:05
21.12.2019	Pilves	2,1	-	-	-	-	-
21.12.2020	Pilves	1,9	6	4	0,04	10:35	14:35