



EESTI MAAÜLIKOOL
Tehnikainstituut

Urmas Raudsepp

**TAASTUVENERGIAALLIKATE OSAKAAL JA MÕJU
ELEKTRIENERGIA KVALITEEDILE**

PROPORTION AND QUALITY ISSUES OF RENEWABLE
ELECTRICAL ENERGY

Magistritöö
Energiakasutuse õppekava

Juhendaja: nooremteadur Erkki Jõgi, *MSc*

Tartu 2020

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51006		Magistritöö lühikokkuvõte	
Autor: Urmas Raudsepp		Õppekava: Energiakasutus	
Pealkiri: Taastuenergiaallikate osakaal ja mõju elektrienergia kvaliteedile			
Lehekülgi: 61	Jooniseid: 38	Tabeleid: 8	Lisaid: 3
<p>Osakond / Õppetool: Tehnikainstituudi energiakasutuse õppetool</p> <p>ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: Loodusteadused ja tehnika; 4.17;Tehnikateadused T140 Energeetika</p> <p>Juhendaja(d):Erkki Jõgi, MSc</p> <p>Kaitsmiskoht ja -aasta: Eesti Maaülikool, 2020</p>			
<p>Magistritöös käsitletakse taastuenergiaallikate osakaalu Eesti elektrienergia bilansis ning selle osakaalu mõjutegureid. Päikeseparkides läbiviidud katsemõõtmiste eesmärgiks on uurida päikeseparkide mõju elektrienergia kvaliteedile. Töös antakse ülevaade mõõtmiste tulemustest ning esitatakse sellekohane analüüs.</p> <p>Magistritöö eesmärgiks on uurida taastuenergia osakaalu ning mõju elektrienergia kvaliteedile päikeseelektrijaamade näitel.</p> <p>Magistritöös kasutatakse erinevate andmebaaside statistilisi andmeid, tuginetakse erinevatele teadusartiklitele ning viiakse läbi tehnilised mõõtmised.</p> <p>2019 aastaks oli taastuenergia allikatest elektrivõrku genereeritud elektrienergia kogus võrreldes 2010 aastaga tõusnud 224%, samas on fossiilkütustest toodetud elektrienergia kogus vähenenud sama ajaperioodi jooksul 57% võrra.</p> <p>Magistritöö olulisus seisneb selles, et Eestis on vähe tehtud uurimustöid, mis analüüsiksid päikese- ja tuuleparkide mõju elektrienergia kvaliteedile</p>			
Märksõnad: taastuenergia, päikesepark, elektrivõrk, pingekvaliteet			

Estonian University of Life Sciences		Abstract of Master's	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51006			
Author: Urmas Raudsepp		Curriculum: Engineering	
Title: Proportion and quality issues of renewable electrical energy			
Pages: 61	Figures: 38	Tables: 8	Appendixes: 3
<p>Department / Chair: Chair of Energy Application Engineering</p> <p>Field of research and (CERC S) code: Natural Science and Engineering, 4.17; Technological Sciences T140 Energy research</p> <p>Supervisors: Erkki Jõgi, MSc</p> <p>Place and date: Estonian University of Life Science, 2020</p>			
<p>This master's thesis deals with the share of renewable energy sources in the Estonian electricity balance and the factors influencing it. The purpose of the experimental measurements performed in solar parks is to study their effect on the electric power quality. The thesis presents the results of the measurements, their analysis, as well as offers relevant conclusions.</p> <p>The aim of the master's thesis is to study the share of renewable energy and its impact on the power quality based on the example of solar power plants.</p> <p>This thesis uses statistical data from different databases, relies on various research articles and performs technical measurements.</p> <p>By 2019, the amount of electricity generated from renewable energy sources in the electricity grid had increased by 224% compared to 2010, while the amount of electricity produced from fossil fuels had decreased by 57% during the same period.</p> <p>The relevance of this master's thesis lies in the fact that little research has been conducted in Estonia to analyse the impact of solar and wind farms on the quality of electric power.</p>			
Keywords: renewable energy, solar park, electricity network, voltage quality			

SISUKORD

SISSEJUHATUS	6
1. TAASTUVENERGIA VALDKONNA ÜLEVAADE.....	8
1.1. Primaarenergia ja taastuvenergia võrdlus ja osakaal.....	8
1.2. Tuuleenergia	11
1.2.1. Tuuleenergia areng ja mõjutused.....	11
1.2.2 Tuuleenergiast elektrienergia tootmine	12
1.3. Päikeseenergia	14
1.4. Hüdroenergia	16
1.4.1. Hüdroenergia ressurs.....	16
1.4.2 Hüdroenergia elektrienergia allikana.....	17
1.5. Biokütused.....	19
1.5.1. Biomass	19
1.5.2. Biogaasi keskkonnamõju, biogaasi tootjad	20
1.6. Taastuvenergia toetused ja liitumised	22
1.6.1 Taastuvenergia tasud	22
1.6.2 Taastuvenergia toetused	23
1.6.3 Taastuvenergia tootjate arv.....	24
2. ELEKTRIVÕRK	26
2.1 Pingekvaliteedi tähendus	26
2.2. Pingekvaliteedi monitooring	27
2.3. Elektrivõrku püsivalt elektrienergiat genereerivad jaamad e. baasjaamad.....	27
2.4 Elektrienergia kvaliteet ja varustuskindlus.....	28
2.5 Muutliku tootmisega energiaallikad.....	29
2.6 Kasutatavad inverterid.....	30
2.7. Päikeseпаркide probleemide näited	31
3. KATSEMÕÕTMISED JA TULEMUSED	34
3.1. Katse eesmärk ja metoodika	34
3.2 Päikeseпаркide tehniline kirjeldus	35
3.2.1 Palamuse päikeseпарк.....	35
3.2.2. Esvika päikeseпарк	37
3.2.3. Porimetsa päikeseпарк	37
3.3 Pinge mõõtmise tulemused.....	39
3.4 Harmooniliste mõõtmise tulemused	43
3.5. Mõõtetulemuste analüüs	50

KOKKUVÕTE	52
KASUTATUD KIRJANDUS	54
LISAD	57
Lisa 1. Palamuse päikesepargi pinge- ja vooluharmoniliste histogramm.	58
Lisa 2. Esvika päikesepargi pinge- ja vooluharmoniliste histogramm.....	59
Lisa 3. Porimetsa päikesepargi pinge- ja vooluharmoniliste histogramm.....	60
Lihtlitsents	61

SISSEJUHATUS

Taastuenergia on valdkond, mida on viimastel aastatel on väga palju käsitletud. Selle teema laiahaardelisus, tähtsus ning olulisus puudutab meid kõiki. Üha suurenev elanike arv, tööstustoodangu toomismahtude suurenemine, suurenenud vajadus energiaressursside järele ning halvenenud elukeskkond on üks põhjuseid, miks tänasel päeval üha sagedamini räägitakse taastuenergia tähtsusest ning selle osakaalust üldises energiatarbimises.

Kui analüüsida viimase 10 aasta taastuenergeetika arengusuundi, siis võib tõdeda, et väga paljudes riikides on tõsiselt hakatud arendama ja toetama taastuenergiast genereeritava elektrienergia tootmist. Taastuenergia kasvu mõjutavad just suurriikide, nagu Hiina, USA, Jaapan, India ja Saksamaa otsused vähendada primaarenergia osakaalu üldises energiatarbimises ning energiasõltuvust. Siinkohal tuleb mainida ka riikidevahelisi kokkuleppeid keskkonna säästmisel, CO₂ heitkoguste vähendamisel.

Olemasolevaid keskkonna probleeme tuleb lahendada üheskoos innovatsiooni, kaasaegse tehnika ja teaduse rakendamisega.

Piiramaks primaarenergia allikatest e. fossiilkütustest toodetava energia hulka, vähendamaks energiaallikate importi ning ulatuslikumat taastuvatest energiaallikate kasutamist, võttis Euroopa Parlament ja Euroopa Liidu Nõukogu 23. aprillil 2009 vastu direktiivi 2009/28/EÜ, taastuvatest energiaallikatest toodetud energia kasutamise edendamise kohta [1].

Selle direktiivi järgi seati eesmärgiks edendada taastuenergiaallikate kasutamist ning vastavate tehnoloogiate kasutuselevõttu.

Põhilised seatud eesmärgid olid järgnevad [2]:

- 1) aastaks 2020 peab kõigis EL liikmesmaades tarbitav energia olema 20 % ulatuses toodetud taastuvatest allikatest;
- 2) aastaks 2020 peab kõigis liikmesriikides transpordis kasutatavast kütusest 10 % pärinema taastuvatest allikatest;
- 3) sätestati biokütuse säästlikkuskriteeriumid;
- 4) Energiasääst 20% aastaks 2020;
- 5) Kasvuhoonegaaside heitkoguste vähendamine vähemalt 20%.

Eestis on Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium koostanud taastuvenergeetikat puudutava arengukava „Eesti taastuvenergia tegevuskava aastani 2020“ ning tänaseks on lisandunud 20.10.2017 Vabariigi Valitsuse poolt heaks kiidetud „Energiamajanduse arengukava aastani 2030“. 2030. aasta eelpool nimetatud arengukava sätestab, et [3]:

- 1) toimib vaba ja avatud kütuse- ja elektriturk;
- 2) Eesti elektrisüsteem on sünkroniseeritud Euroopa Liidus juhitava sünkroonalaga;
- 3) taastuvatest energiaallikatest elektri tootmine moodustab 50% sisemisest elektri lõpptarbimisest ning uute taastuvelektri tootmiseseadmete rajamine toimub avatud elektrituru tingimustel ilma täiendavate siseriiklike toetusteta;
- 4) jaotusvõrgus katkestuste keskmine kogukestus minutites tarbimiskoha kohta aastas ei ületa 90 minutit, mis saavutatakse ilma täiendava koormuseta tarbijatariifile;
- 5) uued hooned vastavad ligi-nullenergiahoone energiatõhususarvu väärtusele;
- 6) 37% keskvalitsuse kasutuses olevate hoonete summaarsest netopindalast asub hoonetes, mis vastavad vähemalt 2013. aastal jõustunud energiatõhususe miinimumnõuetele.

Kõigi nende eesmärkide saavutamiseks tuleb kaasata erinevaid ühiskondlikke grupe, muuta lihtsamaks ja arusaadavamaks seadusandlust, pakkuda tuge taastuvenergiaprojektide arendamisel.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on uurida taastuvenergiaallikate osakaalu ning mõju elektrienergia kvaliteedile päikeseelektrijaamade näitel. Nende mõjude hindamisel pingekvaliteedile võetakse aluseks standard „Avalike elektrivõrkude pingetunnussuurused“ EVS-EN 50160:2010+ A1:2015.

Magistritöös antakse ülevaade toimunud muutustest taastuvenergiaallikate kasutamisel ning nende osatähtsusest üldises energiabilansis. Samuti, kasutades statistilisi andmeid, esitatakse graafiliselt saadud tulemused. Eraldi jaotises analüüsitakse päikese- ja tuuleparkide võimalikke mõjusid elektrivõrgule ning teistele tarbijatele nii Eesti kui teiste riikide näidete põhjal.

Kolmandas osas esitatakse ja analüüsitakse kolmes päikesepargis läbiviidud mõõtmiste tulemusi ning esitatakse järeldused saadud mõõtetulemuste kohta.

1. TAASTUVENERGIA VALDKONNA ÜLEVAADE

1.1. Primaarenergia ja taastuvenergia võrdlus ja osakaal

Primaarenergia osakaal ületas 2018 aastal Eesti energiatootmises taastuvenergiaallikatest võrku genereeritud elektrienergiat üle viie korra, olles suurima osatähtsusega. See oli seletatav ajalooliselt kujunenud energiasüsteemi toimimisega.

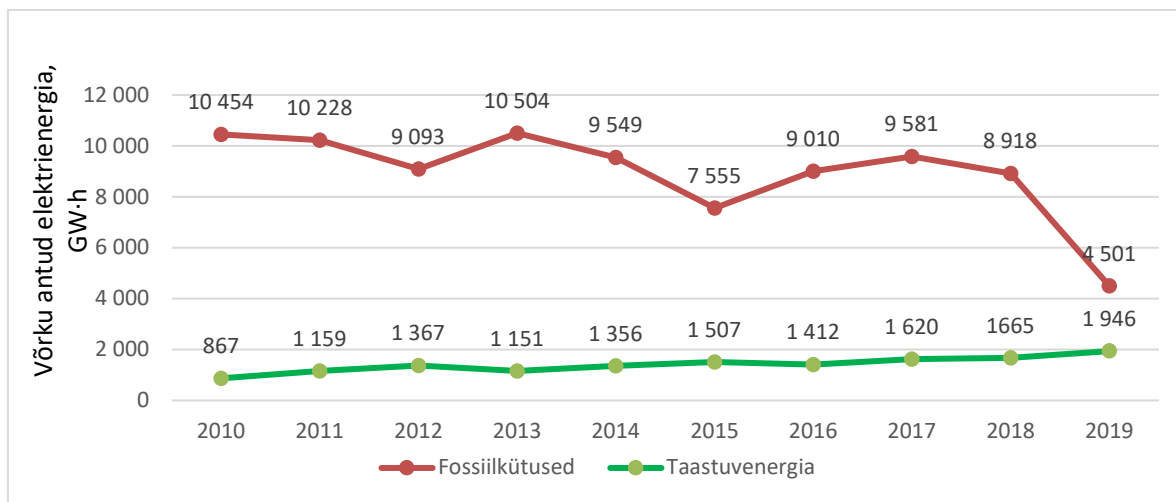
Tootjateelt saadud andmete põhjal seisuga märts 2019, on elektrijaamade summaarne installeeritud netootmisvõimsus 2886 MW, millest tipuajal kasutatav tootmisvõimsus on 2214 MW. Eesti elektrisüsteemiga ühendatud tootmisseadmetest seisuga 2019 märts on toodud tabelis 1.1[4].

Tabel 1.1. Elektrienergia tootmisvõimsused Eestis 2019, MW [4]

Elektrijaama nimetus	Käitaja	Paigaldatud netovõimsus	Tootmisvõimsus
Eesti SEJ	Narva Elektrijaamad (EE)	1355	1021
Balti SEJ	Narva Elektrijaamad (EE)	322	224
Tuuleelektrijaamad	–	312	–
Kiisa avariireservelektrijaam	Elering	250	250
Iru	EE	111	111
Tööstuse- ja väikekoostootmisjaamad	–	83	60
Põhja SEJ	VKG	78	78
Tallinna elektrijaam	Utilitas	39	39
Päikeselektrijaamad	–	37,9	–
Auvere	EE	27	252
Tartu elektrijaam	Fortum	22,1	22
Pärnu elektrijaam	–	20,5	20,5
Sillamäe SEJ	VKG	16	8
Enefit	Elering (EE)	10	9
Mikrotootjad	–	7,6	–
Hüdroelektrijaamad	–	7,6	4
Lõuna SEJ	VKG	7	–

Tabelis 1.1 toodud elektrijaamade võimalike tootmisvõimsuste puhul on välja jäetud tuule- ja päikeseparkide võimsused, sest nende tootlikkust on raske ette prognoosida.

Joonisel 1.1 on toodud elektrivõrku antud elektrienergia võrdlus fossiilkütustest ja taastuvatest energiaallikatest toodetud elektrienergia kogusest aastast 2010 kuni aastani 2018 [5].



Joonis 1.1. Elektrivõrku antud elektrienergia jaotus [5]

Jooniselt 1.1 on näha, et 2010 aastal oli fossiilkütustest toodetud elektrienergia osakaal üle 12 korra suurem kui taastuvenergia osakaal. Samas on näha, et aastaks 2019 oli fossiilkütustest toodetud elektrienergia osakaal oluliselt vähenenud ning taastuvenergiaallikatest saadud elektrienergia osakaal tõusnud, vähendades fossiilkütuste osakaalu 2,3-kordseks.

Kui 2010. aastal toodeti fossiilkütustest 10454 GW·h ning taastuvenergiaallikatest 867 GW·h elektrienergiat, siis 2019 aastal toodeti fossiilkütuste baasil 4501 GW·h elektrienergiat ning taastuvenergiaallikatest saadud elektrienergia oli 1946 GW·h.

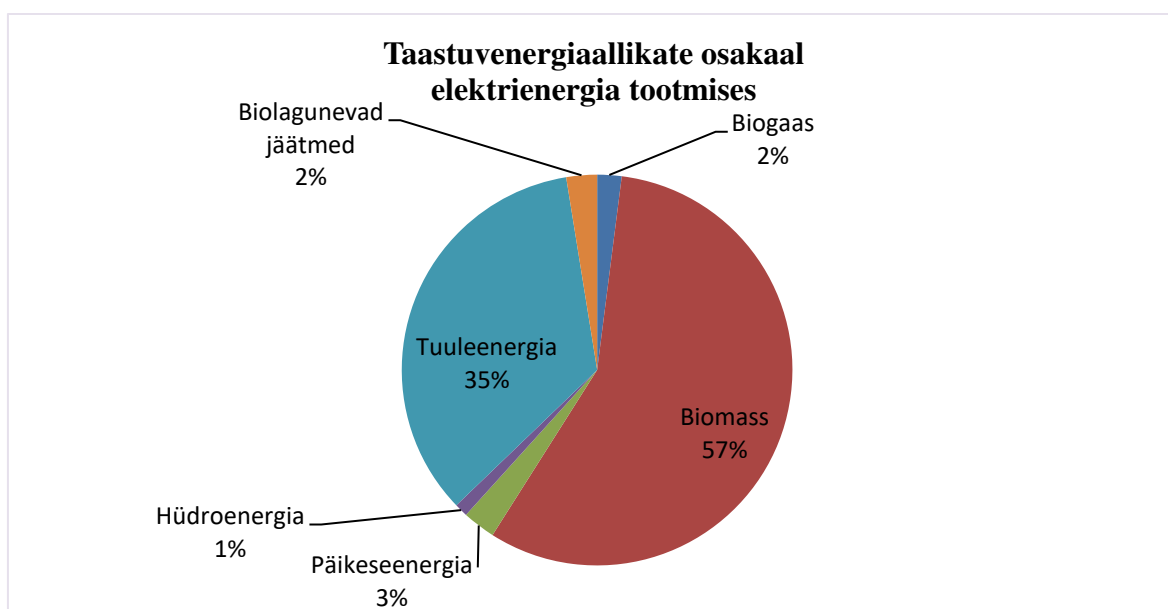
Võrreldes 2010 aastaga oli Eestis primaarenergia poolt võrku elektrienergia tootmine 2019 aasta lõpuks vähenenud 56,9%. Selle olulisemaks põhjuseks on Narva elektrijaamades vanade energiablokkide sulgemine.

Joonis 1.1 näitab, et taastuvenergia tähtsus elektrienergia tootmises kasvab ning fossiilkütuse kasutuse osakaal langeb.

Vastavalt Elektriturseadusele on taastuvad energiaallikad tuul, ves, päike, biogaas ja biomass, maasoojus, prügilagaas, heitvee puhastamisel eralduv gaas, [6].

Käesolevas magistritöös käsitletakse olulisemaid Eestis kasutatavaid taastuvenergia allikaid: tuuleenergiat, päikeseenergiat, hüdroenergiat, biogaasi ning biomassi.

Taastuvenergiaallikates saadud elektrienergia osakaal on tõusvas trendis. Samas koosneb kogu taastuvenergeetika eelpool mainitud erinevatest allikatest. Joonisel 1.2 on toodud erinevate taastuvenergiaallikate osakaal elektrienergia tootmises 2019 aastal.



Joonis 1.2. Taastuvenergiaallikate osatähtsus taastuvenergiast [7]

Esitatud jooniselt on näha, et suurimat osakaalu taastuvenergiast omab biomassist toodetud elektrienergia ja tuuleenergia ning väikseima osakaaluga on hüdroenergia.

Biomassi suurt osakaalu seletab asjaolu, et biomassi alla käib ka puit ning puidujäätmed, mida kasutatakse koostootmisjaamades kütusena.

1.2. Tuuleenergia

1.2.1. Tuuleenergia areng ja mõjutused

Tuuleenergia on taastuvatest energiaallikatest suure osakaaluga energiaallikas.

Tuuleparkide asukoht valitakse ennekõike vastavalt geograafilisele asukohale ning tuuleenergia suurusele antud piirkonnas.

Vastavalt Võrgueeskirja määrusele, loetakse elektrituulikuks tuule kineetilist energiat elektrienergiaks muundavaks tootmisseadet [8].

Tuuleparkide rajamist ja tuulikute püstitamist reguleerivad sealhulgas alljärgnevad õigusaktid:

- Ehitusseadus;
- Elektrituruseadus;
- Veeseadus;
- Keskkonnamõju hindamise ja keskkonnajuhtimissüsteemi seadus.

Lisaks võib vajalik olla muude kooskõlastuste ja lubade olemasolu.

Tuuleparkide rajamist mõjutavad mitmed tegurid:

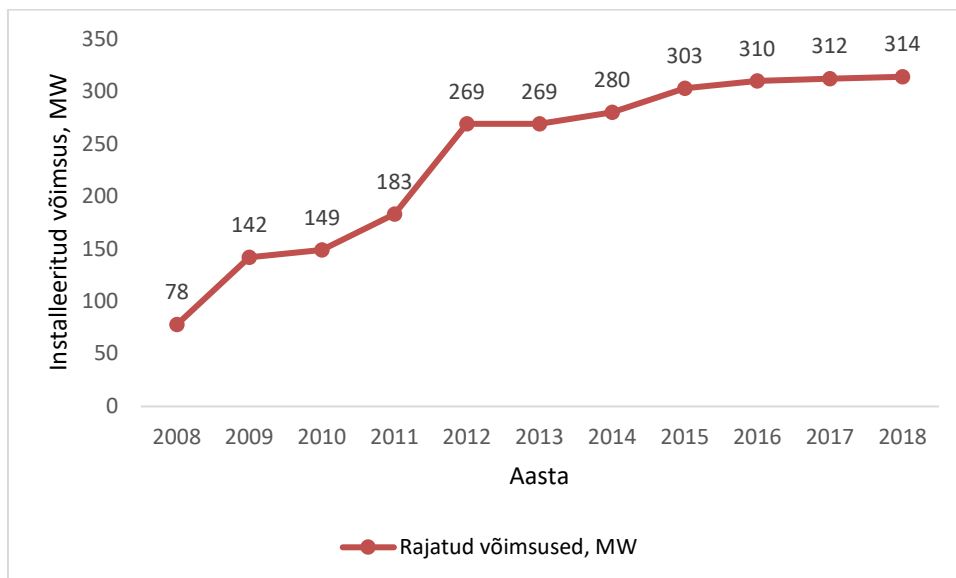
- 1) Keskkonna analüüs;
- 2) tuule keskmine kiirus;
- 3) vajaliku tehnilise taristu olemasolu või selle ehituse võimalus;
- 4) müra, madalsageduslik heli;
- 5) oht lindudele;
- 6) elektromagnetilised häired;
- 7) visuaalne reostus.

Meretuuleparkide rajamisel on vajalik ka Valitsuse poolt kinnitatud hoonestusluba [9].

Enamus tuuleparke paikneb rannikualade läheduses, kus on optimaalsemad tingimused tuuleparkide tööks.

Võrguettevõtte Eleringi poolt tellitud ja Taani firma Ea Energy Analyses poolt läbi viidud analüüsis selgus, et seoses muutustega Eesti elektritootmise struktuurides lähiaastatel (fossiilkütuste kasutamise piiramisega elektritootmises), on võimalik Eesti elektrisüsteemi ühendada tuuleelektrijaamu võimsusega kuni 900 MW [10].

Samas pole tootmisvõimsused viimastel aastatel suurenenud, mida näitab joonis 1.3



Joonis 1.3. Tuuleparkide rajatud võimsused [11]

Tuuleparkide edasine arendamine on viimastel aastatel seiskunud, seda ennekõike piiratud toetusmahtude kui ka erinevate juriidiliste vaidluste tõttu.

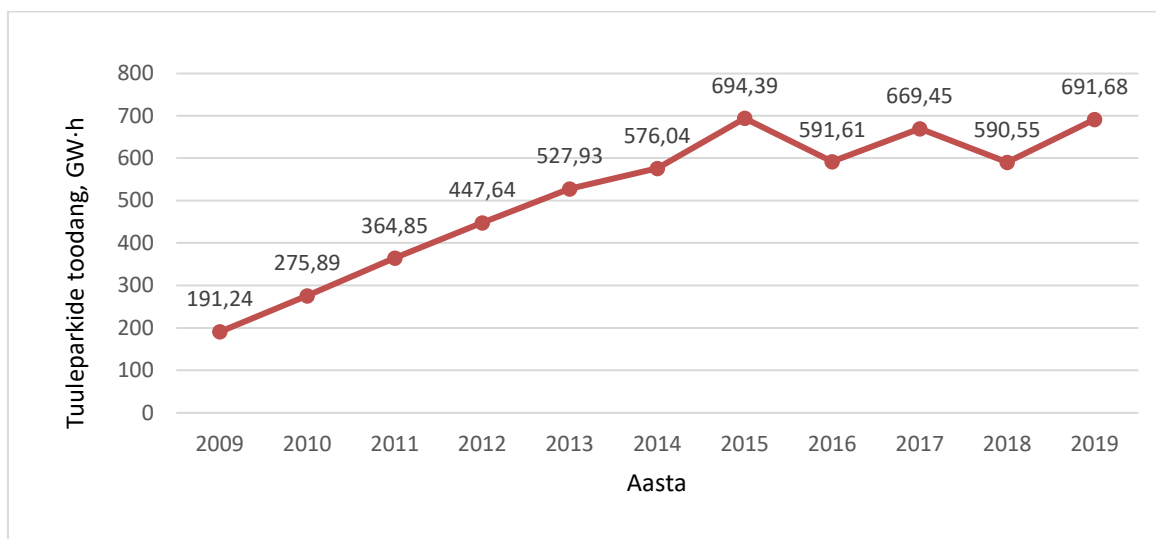
1.2.2 Tuuleenergiast elektrienergia tootmine

Suuremaid tuuleparkide valdajaid Eestis on Enefit Green (kuulub Eesti Energia kontserni), mille tuuleparkide kogutoodang 2019 aasta veebruaris 124 GWh elektrienergiat, mis on mahult kümme korda suurem kui aasta tagasi. Sellise tootmismahu järsk tõus on seletatav soodsad ilmastikuolud ning 2018 aastal toimunud tehing, mille käigus Eesti Energia omandas Nelja Energia [12].

Lisaks maismaal asuvatele tuuleparkidele, on hakatud rajama ka suurte võimsustega meretuuleparke. Suurimad neist on Enefit Green'ile kuuluv Aulepa tuulepark, koguvõimsusega 48 MW [13].

Eesti Taastuvenergia Koja (ETEK) andmetel oli 2018 aasta lõpu andmetel Eestis elektrivõrku ühendatud 140 elektrituulikut koguvõimsusega 314 MW [14].

Tuuleparkides toodetud elektrienergia hulk on aastatega pidevalt kasvanud. Sellekohased statistilised andmed on toodud joonisel 1.4.



Joonis 1.4. Tuuleenergiast toodetud elektrienergia, GW·h [7].

Võrreldes aastaga 2009, mil tuuleparkides toodeti 191,24 GW·h elektrienergiat, siis aastal 2019 genereeriti elektrivõrku juba 6916,68 GW·h elektrienergiat, mis tähendab 3,6-kordset kasvu kümne aasta jooksul.

Samas on viimastel aastatel pidurdunud tuuleparkide arendamine, mille põhjustena on:

- 1) piiratud tootmismahuga toetused (toetusi makstakse toodetud 600 GW·h elektrienergia eest);
- 2) erinevad keskkonna- ja riigikaitsealased piirangud.

1.3. Päikeseenergia

Päikeseenergia kasutamine elektrienergiaks muundamisel on kogu maailmas arenev energeetikaharu. Suurimad päikeseпаркide arendajad on Hiina, USA, Jaapan, India, Saksamaa [15].

Päikeseenergeetika suur kasutuse osakaal on tingitud:

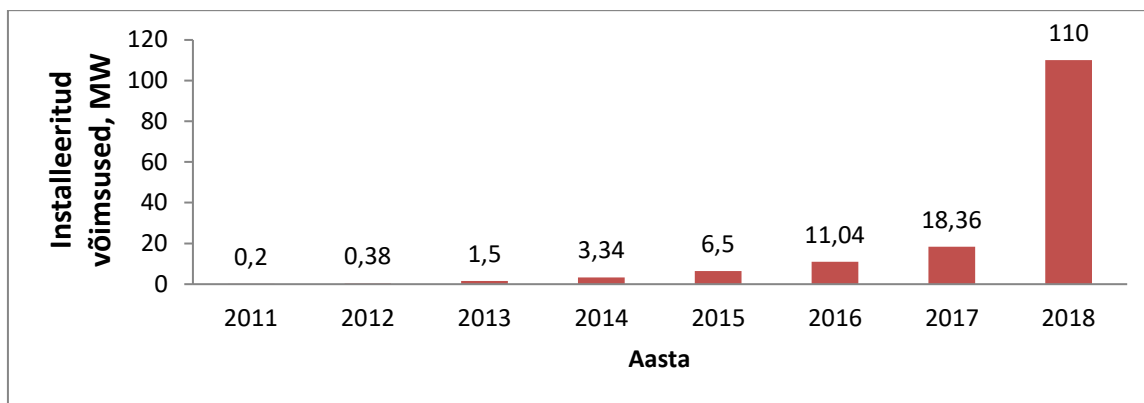
- 1) fossiilsete kütustest loobumisest;
- 2) keskkonnatasude tõusust;
- 3) PV-tehnoloogia efektiivsemaks muutumisest;
- 4) PV-tehnoloogia hinna alanemisest;
- 5) toetusmeetmete rakendamisest;
- 6) keskkonnasäästliku tarbimise levimisest.

Võrgueeskiri sätestab, et päikeseelektrijaam on elektrijaam, mis muundab valguskiirgust elektrienergiaks [8].

Eestis on aastane päikesepaneelide tootlikkus võrreldav Kesk-Saksamaa piirkonnaga, mis on seletatav sellega, et suvekuudel on Eestis päevad pikemad ning siis on kiirgust ka rohkem. Samuti mõjutab päikeseпаркide tootlikust madalam temperatuur, mis tõstab päikesepargi kasutegurit.

Võrreldes Saksamaaga, kus päikeseenergiast elektrienergia tootmine on väga laialt levinud, on alles viimase viie aastaga Eestis hakatud aktiivselt tegelema päikeseпаркide arendamisega nii suurtootjate kui ka mikrotootjate poolt.

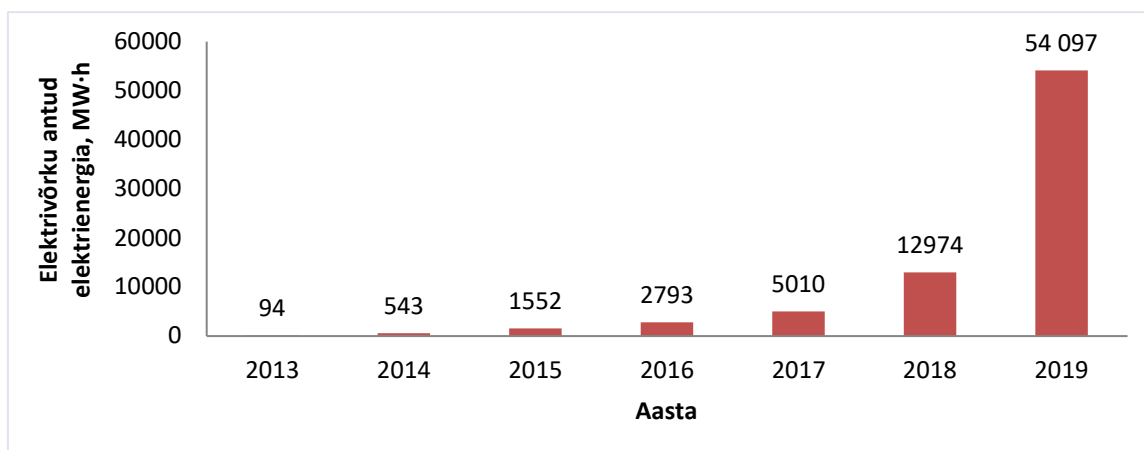
Nagu mujal, nii ka Eestis, omab päikeseenergeetika väga laialdast kõnepinda-päikesepaneelide kasutavad nii mikrotootjad kui ka suured päikesepargid, mida on viimastel aastatel olulisel määral lisandunud. Päikeseпаркide installeeritud koguvõimsused aastate lõikes on toodud joonisel 1.5[14].



Joonins 1.5. Päikeseparkide installeeritud koguvõimsus [14].

Jooniselt 1.5 on näha, et eriti suur muutus päikeseparkide ehituses toimus 2018 aastal.

Kui aastal 2013 toodeti Elering AS-i andmetel päikeseenergiast 94 MW·h elektrienergiat, siis 2019. aastal oli võrku toodetud elektrienergia kogus juba 54,1 GW·h. Joonisel 1.6 on toodud aastatel 2013 kuni 2019 päikeseenergiast elektrivõrku genereeritud elektrienergia kogus.



Joonis 1.6. Päikeseparkide poolt võrku genereeritud elektrienergia, MW·h [14]

Jooniselt 1.6 selgub, et päikeseenergiast toodetud elektrienergia kogus aastast 2013 kuni 2019 aastani on suurenenud 575,5 korda. Sellise tõusu põhjusteks on:

- 1) kuni 2018 aasta lõpuni suurtootjatele kehtinud toetussüsteem;
- 2) kehtivad toetutingimused kuni 2020 aasta lõpuks töösse antavate ≤ 50 kW päikeseparkidele;
- 3) tootmissisendite odavnemine;
- 4) PV-süsteemide energiatõhususe tõus.

Samas on alust karta, et alates 2021. aastast päikeseparkide ehituses hoog raugneb, sest 31.12.2020 lõppeb vana toetusskeem kuni 50 kW päikeseparkidele võrku ühendatud

päikeseparkidele. Sellest hilisemad liitujad saavad osaleda taastuenergia alampakkumisega müügioksjonitel.

Jaotusvõrgu ettevõtteid omavad ülevaadet tema elektrivõrku ühendatud päikeseparkide ja päikesejaamade kohta. Joonisel 1.7 on toodud Elektrilevi paigaldisega ühendatud päikeseparkide asukohad.



Joonis 1.7. Elektrileviga liitunud päikesepargid.

Joonisel 1.7 on toodud Elektrilevi võrguhaldus- ja juhtimistarkvara DMS ekraanikuva, millel on näha Elektrileviga liitunud päikesepargid.

1.4. Hüdroenergia

1.4.1. Hüdroenergia ressurs

Hüdroenergeetikat võib pidada soodsaimaks ja stabiilsemaks taastuenergia allikaks. Siiski, seoses jõgede väikese geoloogilise tasapinna potentsiaalide vahega, on Eestis hüdroenergia potentsiaal väike, mistõttu hetkel pole kasutuses suuri hüdroelektrijaamu, kui mitte arvestada Narva HEJ, mis on Venemaa valduses, kuid mille valgla asub 1/3 Eesti territooriumil. Seda hüdroressurssi peaks teoreetiliselt Venemaa ka Eestiga jagama.

Eestis on hüdroelektrijaamade installeeritud võimsuseks 8 MW [15]. Eestis asuvad hüdroelektrijaamad on toodud joonisel 1.8.



Joonis 1.8. Hüdroelektrijaamad Eestis [16]

Hüdroelektrijaamade eelisteks on:

1. Täielikult taastuva hüdroenergia kasutamine;
2. Kasutatava tehnoloogia lihtsus;
3. Väikesed hoolduskulud.

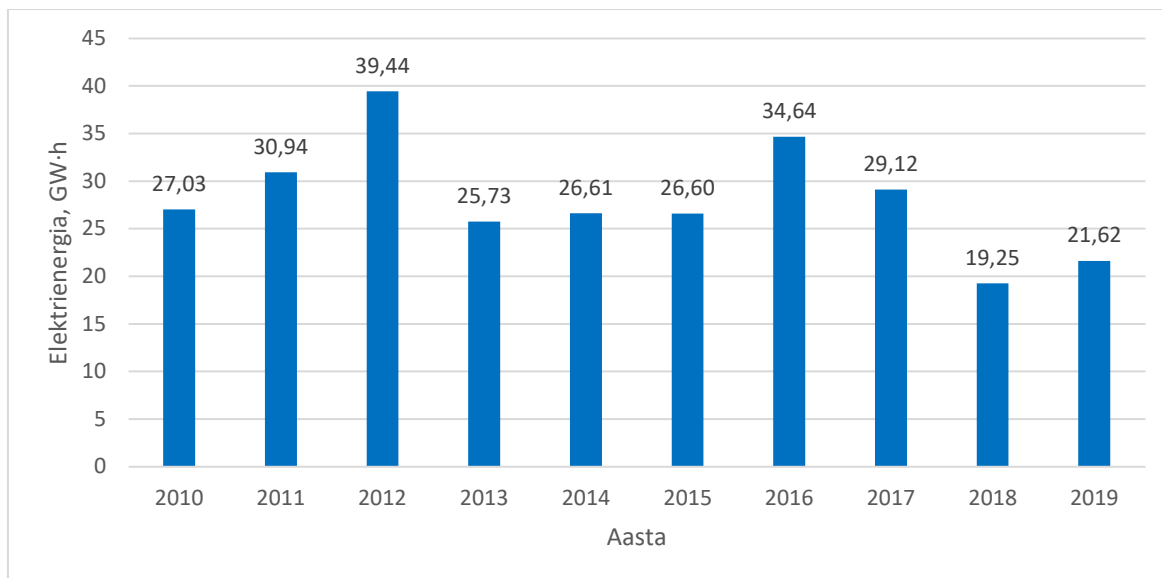
Need eelised soodustavad hüdroenergeetika kasutamist ja arendamist ning antud energiaallikat püütakse võimalikult palju kasutusele võtta. Samas on ka nimetatud energiaressursi kasutamist piiravad asjaolud:

1. hüdroressursside sõltuvus ilmastikust (sademed);
2. raskused kasutuselevõtuga seonduvalt geoloogilistest eripäradest;
3. muutuvad keskkonnanõuded ja seadusandlus;
4. hüdrojaamade mõju kalaliikidele ja keskkonnale [17].

1.4.2 Hüdroenergia elektrienergia allikana

Hüdroenergiast toodetud elektrienergia maht on jäänud viimastel aastatel samaks. Selle põhjuseks on asjaolu, et tootmisvõimsusi pole juurde lisanud ning toodang sõltub suuresti aastakesksest ilmast. Lisaks mõjutab hüdroenergeetikat erinevate huvigruppide (nt. keskkonnakaitse) omapoolsed soovid ning ettekirjutused, mis võivad lõppeda kuni hüdroelektrijaama sulgemisega (Linnamäe HEJ).

Jooniselt 1.9 on esitatud Eleringi andmed, mille kohaselt aastal 2019 genereeriti elektrivõrku 21,62 GW·h elektrienergiat. Elektrienergia tootlikkuse muutlikkus on tingitud hüdroressursside suurusest aastate lõikes.



Joonis 1.9. Hüdroenergiast toodetud elektrienergia [7]

Samas võib öelda, et üldises taastuenergia osakaalus on aastased hüdroenergiast toodetud elektrienergia kogused marginaalsed ning üldist taastuenergia kogutootmise mahtu ei mõjuta.

Suurimateks hüdroelektrijaamadeks on:

- 1) Linnamäe HEJ, võimsusega 1,1 MW;
- 2) Keila HEJ, võimsusega 0,32 MW;
- 3) Leevaku HEJ, võimsusega 0,105 MW.

Eestis paiknevaid hüdroelektrijaamasid iseloomustab väike arvulisus, suhteliselt väikesed genereerimisvõimsused, tootismahtude sõltuvus ilmastikust.

Tänapäeval on aktuaalseks teemaks ka pumphüdroelektrijaamad (PHEJ). Pumphüdroelektrijaamade käitlemine taastuenergiaallikatega üheskoos annab elektrivõrgule võimaluse ilmastikuoludest tingitud tootmisvõimsuste puuduste katmist olemasolevate PHEJ-ga, seda eriti peale Eesti elektrivõrgu desünkroniseerimist Venemaa elektrivõrgust. Elektrienergia puudujääki suurendab omakorda Eestis Narva elektrijaamade energiablokkide sulgemine, mida tuleb kompenseerida kas täiendavate tootmisvõimsuste

ehitamisega või elektrienergia impordiga. PHEJ annavad võimaluse luua energiasalvestuse, mida energiapuudusel rakendada. Kui tuulikute tööks tuult napib, saab seda energiapuudujääki kompenseerida PHEJ-ga.

Hetkel Eestis ühtegi PHEJ ehitatud veel ei ole, kuid vastavate projektidega on tööd alustanud Eesti Energia ja Energiasalv OÜ. Kui Eesti Energial on kavas ehitada Estonia kaevanduse kõrvale 50 MW jaam, siis Energiasalve poolt on projekteeritud 500 MW PHEJ. Antud projektide elluviimine aitaks kaasa elektritarbimise koormustippude ning tuuleenergia muutlikust tootlikkusest tingitud energiabilansi tasakaalustamiseks.

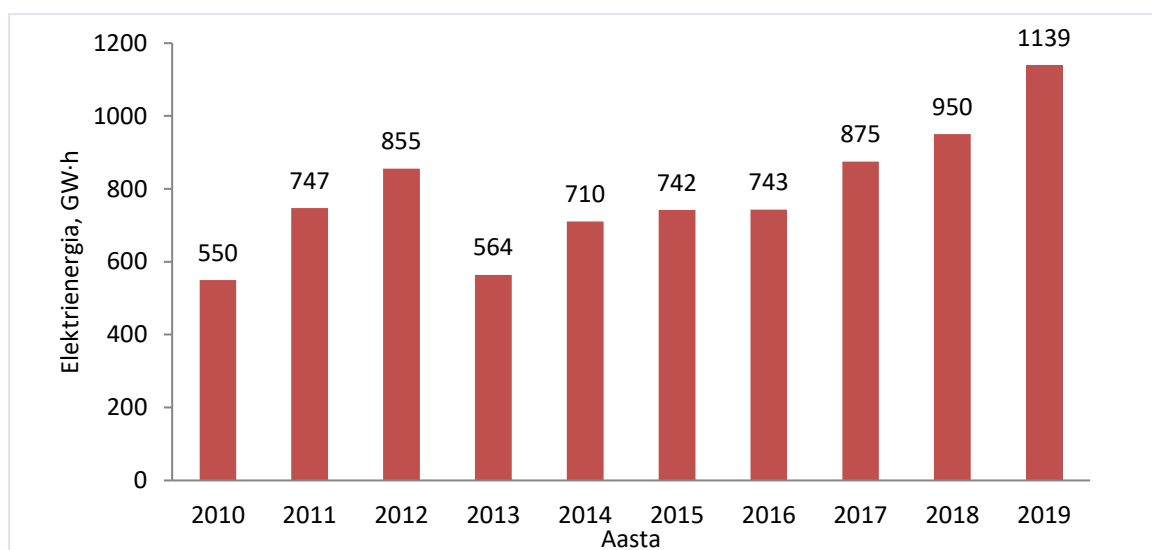
1.5. Biokütused

1.5.1. Biomass

Vastavalt Elektriturseadusele [6], on biomass põllumajanduse ja metsanduse ning nendega seonduva tööstuse toodete, jäätmete ja jääkide bioloogiliselt lagunev osa ning tööstus- ja olmejäätmete bioloogiliselt lagunevad komponendid.

Biokütuseid kasutatakse tõhusa koostootmisena koostootmisjaamades nii soojus- kui elektrienergia tootmiseks. Põhiliseks küttekomponendiks on neis jaamades puit, hakkepuut, olemprügi.

Biomassist toodetakse enim taastuvenergiat, moodustades kogu taastuvenergia mahust ligi 57% [7]. Joonisel 1.10 on toodud biomassist elektrivõrku toodetud elektrienergia kogus.



Joonis 1.10. Biomassist toodetud elektrienergia, GW·h [7;14]

Jooniselt 1.10 selgub, et biomassist elektrivõrku genereeritud elektrienergia kogused on jätkuvalt tõusvas trendis. Biomassi kasutatakse kütusena koostootmisjaamades, kus tõhusa koostootmise tingimuseks peab aastane kasuteguri väärtus olema suurem kui 70%.

Eesti suurimad koostootmisjaamad on [20]:

- Balti Soojuselektrijaam;
- Iru Elektrijaam;
- VKG Põhja- ja Lõuna koostootmisjaamad;
- Tallinna elektrijaam;
- Tartu elektrijaam;
- Pärnu elektrijaam

Koostootmisjaamu on majanduslikult tasuv rajada piisava soojuskoormusega asulate ning tööstusettevõtete juurde.

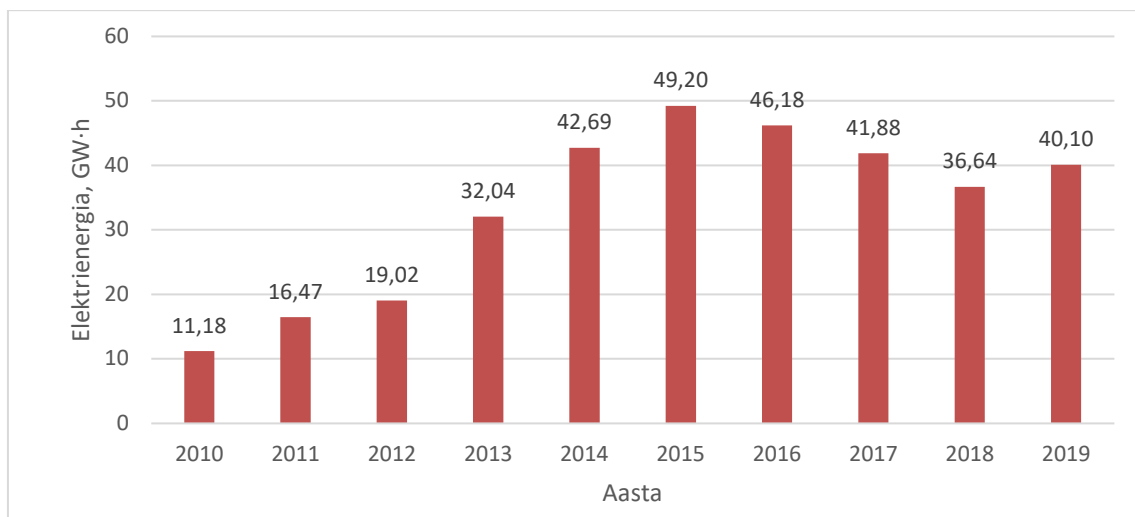
1.5.2. Biogaasi keskkonnamõju, biogaasi tootjad

Biogaas on anaeroobse kääritamise teel saadud gaasiline kütus, mis 50...70% ulatuses koosneb metaanist. Biometaan on puhastatud biogaas, mis sisaldab 96...99% metaani ning on ligilähedase kütteväärtusega maagaasiga [21].

Biogaasi kasutatakse nii elektrienergia genereerimisel, sõidukite kütusena, kui ka tööstustes. Biometaanist saadud taastuvenergia osakaal üldisest taastuvenergia mahust on hetkel ligi 2%.

Aastal 2019 saadi biogaasist 40,1 GW·h elektrienergiat, mis on 9,4% rohkem kui eelneval 2018. aastal [7;21].

Biogaasist genereeritud elektrienergia kogused on toodud joonisel 1.11.



Joonis 1.11. Biogaasist toodetud elektrienergia [7;12]

Biogaasi kasutuselevõttu mõjutab vajaliku toorme kättesaadavus. Üheks tootjaks on Green Enefit, kellel on biogaasijaamad Oisus (OÜ Oisu Biogaas) ja Vinnis (OÜ Vinni Biogaas), mille elektrienergia tootmisvõimsused on vastavalt 1,2 ja 1,35 MWh [22].

Biogaasist elektrienergia 2017 aasta tootmismahude kokkuvõtte on toodud tabelis 1.1[23].

Tabel 1.2. Biogaasi tootjad 2017 aastal [23]

Tootmisüksus	Elektrivõrku antud elektrienergia, MW·h
Vinni BGJ	9262
Aravete BGJ	8801
Oisu BGJ	7748
Ilmatsalu BGJ	7573
Jõelähtme prügila	5793
Aardlapalu prügila	1159
Uikala prügila	607
Paikre prügila	605
Kuressare Veevärk	129

Tabelist 1.2 selgub, et biogaasi töötlemiskohtadeks on põhiliselt olemasolevad prügilad ning kohalikud veevärgi ettevõtted, kus toorme kättesaamine on kõige lihtsam.

Üha suuremat osatähtsust on viimastel aastatel omanud biometaanist autokütuste müük, mis on eriti teretulnud Eesti energeetilise sõltuvuse ning transpordis kasutatava imporditava kütuse vähendamiseks.

1.6. Taastuvenergia toetused ja liitumised

1.6.1 Taastuvenergia tasud

Toetusi taastuvenergiale makstakse vastavalt Elektriturseadusele [6], mille kohaselt taastuvateks energiaallikateks on Elektriturseaduse mõistes muuhulgas:

- 1) vesi;
- 2) tuul;
- 3) päike;
- 4) biogaas

Lisaks taastuvenergiale makstakse toetust ka tõhusa koostootmise eest. Tõhusa koostootmise režiimil toodetud elektrienergia koguse arvutamisel lähtutakse Euroopa Parlamendi ja nõukogu direktiivi 2004/8/EÜ lisas 2 esitatud metoodikast [6].

Toetusi arvestab ja maksab põhivõrguettevõtte Elering AS, sõltumata sellest, millise jaotusvõrguettevõtte piirkonnas (Elektrilevi OÜ, AS Loo Elekter, Imatra Elekter AS) arvutatav taastuvenergia toodeti.

Taastuvenergia toetuste tingimusi on aja jooksul täiendatud ning muudetud. Taastuvenergia tasu tarbijatele arvutatakse taastuvenergiatootjate eeldatava tootmismahu ning tarbijate järgmise aasta prognoositava tarbimise järgi. Hinnatakse ka eelmise 12 kuu toetustele kulunud või üle laekunu summasid ning toetuste haldamiseks tehtavaid kulutusi [24].

Taastuvenergia tasud tarbijatele aastate lõikes on toodud tabelis 1.2.

Tabel 1.3. Taastuvenergia tasu suurused

Aasta	Tasu määr senti/kWh, KM-ga
2012	1,16
2013	1,04
2014	0,92
2015	1,07
2016	1,15
2017	1,25
2018	1,07
2019	1,25
2020	1,36

Taastuenergia tasu tuuakse tarbija arvel eraldi välja. Nagu tabelist 1.3 selgub, on taastuenergia tasud tarbijatele tõusnud.

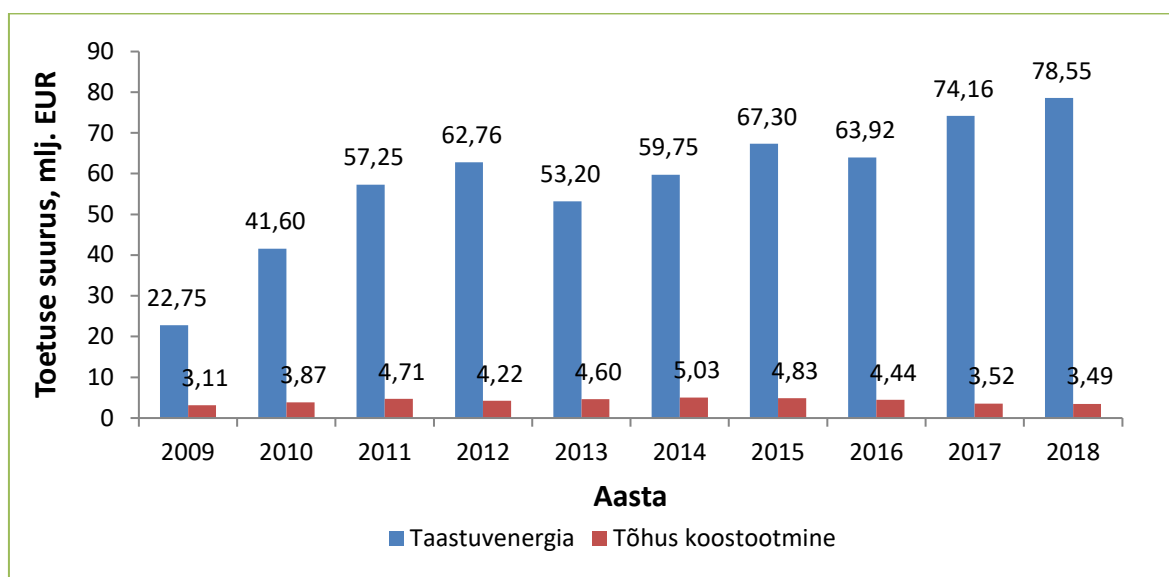
1.6.2 Taastuenergia toetused

Kui elektrienergia tasu üks komponente on taastuenergia tasu ning selle tasumise kohustus oli kõigil tarbijatel, siis toetuse maksmise reeglid on taastuenergia tootjatele mõnevõrra erinevad. Siinjuures jagunevad toetuste saajad mikro-, väike- ja suurtootjateks, tõhusa koostootmise tootjateks ning eraldi grupi moodustavad tuuleenergiast elektrienergiat tootjad.

Toetuste maksmist reguleerib Elektriturseadus [6], milles eraldi tuuakse välja toetuse tingimused ning toetuste määrad.

Hetkel kehtivate tingimuste kohaselt makstakse kuni 50 kW tootmiseadmetega toodetud elektrienergia eest otsetoetust 5,37 senti/kW·h. Sealjuures peab asjakohane tootmiseadme tootma elektrienergiat hiljemalt 31.12.2020. Suurema võimsusega taastuenergiatootjatele kehtib sama otsetoetuse määr juhul, kui tootmiseadme oli võrguga liitunud hiljemalt 31.12.2018. Tõhusa koostootmise toetusmäär on 3,2 senti/kWh eest.

Makstud toetuste suurused aastate lõikes on toodud joonisel 1.12.



Joonis 1.12. Taastuenergia toetused 2009 kuni 2018 aasta

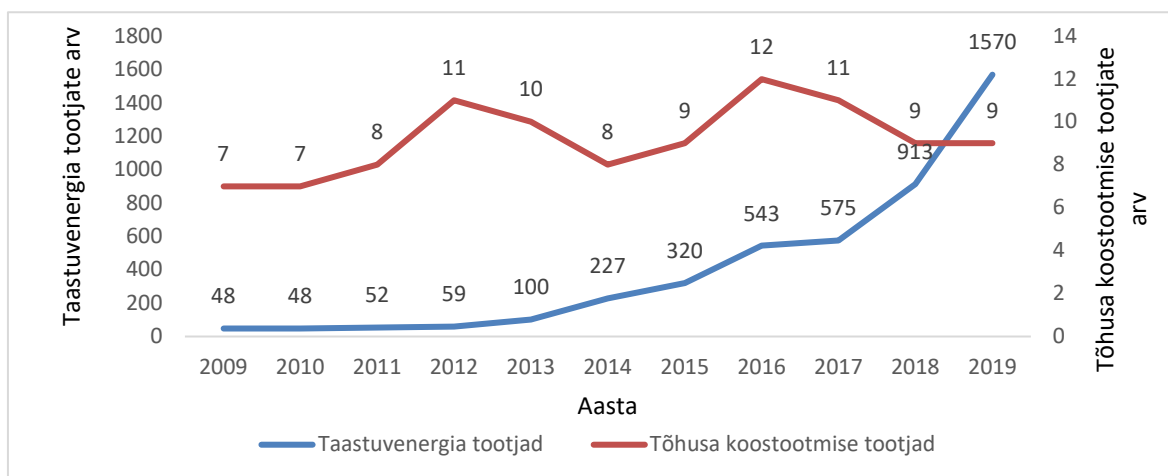
Tootmiseadmetele võimsusega 50 kW kuni 1 MW makstakse otsetoetust tingimusel, et tootmiseseade toodab elektrienergiat hiljemalt 31.12.2018.

Seejuures peab tootmiseseade olema tunnistatud vastavaks nõuetega ning elektrivõrguga liitunud. Nendel tingimustel makstakse toetust 12 aastat. Kui taastuvenergia tootmiseseadmed on võrku ühendatud hilisemal perioodil, tuleb juhendada Vabariigi Valitsuse määrusest „Taastuvast energiaallikast ja tõhusa koostootmise režiimil energia tootmiseks korraldatava vähempakkumise tingimused ja kord“ [25]. Selle määruse alusel viiakse perioodiliselt läbi taastuvenergiaallikatest toodetud elektrienergia vähempakkumisi.

Tuuleenergiast toodetud elektrienergiale makstakse toetust kuni 600 GW·h elektrienergia eest.

1.6.3 Taastuvenergia tootjate arv

Toetusi saavate taastuvenergia tootjate andmebaasi käitleb Elering AS. Aastatega on tootjate arv jõudsalt kasvanud, mida iseloomustab ka joonis 1.13. Samas tuleb mainida, et antud joonis kajastab vaid Elering AS-i poolt toetusi saavaid tootjaid. Kui on tegemist vaid enda tarbeks toodetava ning võrguühenduseta taastuvenergia tootmisega, siis toetusi ei maksta ning sel juhul ei kajastu ka need tootjad allpool toodud statistikas.



Joonis 1.13. Taastuvenergia tootjate arv [26]

Jooniselt 1.13 on näha, et tõhusa koostootmise teel elektrienergia tootjate arv on suhteliselt väike, piirdudes aastal 2019 üheksa tootjaga. Seevastu on viimastel aastatel suure hüppe teinud päikese- ja tuuleenergiast elektrienergiat tootjad. 2019 aastal oli Elering AS-i andmetel selliseid tootjaid 1570.

Seega võib tõdeda, et taastuvenergia tootjate arv on jätkuvas tõusutrendis.

2. ELEKTRIVÕRK

2.1 Pingekvaliteedi tähendus

Elektrivõrgu ettevõtjate üheks olulisemaks tõstatatud ülesandeks on tarbijatele pingekvaliteedi tagamine. Eestis käsitleb pingekvaliteeti ning seab elektrienergia võrguettevõtetele nõudeid standard EVS-EN 50160:2010 + A1:2015.

Vastavalt standardile EVS-EN 50160:2010+ A1:2015, antakse järgmised definitsioonid:

1. **Nimipinge** (*nominal voltage*) U_n – pinge, millega tähistatakse või tuvastatakse elektrivarustusvõrku ning millega seostatakse teatud talitluse tunnussuurus;
2. **Lepinguline toitepinge** ehk **elektrivõrgu nimipinge** (*declared supply voltage*) U_c – elektrivõrgu käitaja ja elektrivõrgu kasutaja poolt kokku lepitud toitepinge. Tavaliselt on lepinguline toitepinge U_c elektrivõrgu nimipinge U_n ;
3. **Toitepinge sagedus**: (*frequency of the supply voltage*) – etteantud ajavahemiku kestel mõõdetud toitepinge põhilaine kordumissagedus;
4. **Värelustugevus** (*flicker severity*) – väreluse häiria toime intensiivsus ehk nägemisaistingu ebastabiilsuse mulje intensiivsus, mille kutsub esile elektervalgustuse heleduse või spektraaljaotuse ajaline kõikumine. Värelust hinnatakse lühiajalise värelustugevusega (P_{st}), mida mõõdetakse 10-minutilise intervalliga, ning pikaajalise värelustugevusega (P_{lt}), mida mõõdetakse 2 tunni jooksul.
5. **Transient- ehk siirdeliigpinge** (*transient overvoltage*) – kiiresti sumbuv lühiajaline liigpinge kestusega tavaliselt kuni mõni millisekund;
6. **Pingelohk** (*voltage dip*) – pinge efektiivväärtuse ajutine vähenemine allapoole nimipinge alumist piiri. Tavaliselt loetakse pingelohuks pinge langemist alla 90% nimipingest.

Olulisemad tarbijate pingekvaliteedi käsitletavat parameetrid on:

- 1) pinge ja sagedus;
- 2) pingelohud;
- 3) harmooniliste osakaal;
- 4) värelus e. *flicker*;
- 5) transientliigpinged;
- 6) toitevõrgus toimuvad katkestused.

2.2. Pingekvaliteedi monitooring

Pingekvaliteedi hindamisel lähtutakse standardi EVS-EN 50160:2010 + A1:2015 nõuetest ning analüüsitakse pingeparameetrite vastavust nõuetele. Pinget mõõdetakse kas tarbija liitumiskilbis, asjakohases jaotuskilbis või mõne konkreetse seadme juures.

Toitepinge kvaliteedi uurimise eesmärgiks on uurida, kas antud elektripaigaldises pinge vastab standardi nõuetele.

Pingekvaliteeti mõjutavad järgmised tegurid:

- 1) toiteliinide pikkused tarbijateni;
- 2) jaotusvõrgu tehnilistest näitajatest;
- 3) elektrivõrku lülitatud tarbijate seadmete poolt tekitatud häiringud;
- 4) teiste tarbijate koormused.

2.3. Elektrivõrku püsivalt elektrienergiat genereerivad jaamad e. baasjaamad

Elektrivõrgu ülesehitus peab olema selline, et oleks tagatud piisav energiavarustus mistahes ajahetkel. Selleks peab süsteemihaldur, kelleks tänasel päeval on Eestis Elering AS, tagama vajamineva energiahulga kättesaadavuse. Elektrivõrku toodavad elektrienergiat erinevad tüüpi generaatorid, muundurid jt. seadmed. Üldiselt tagatakse piisav koormuse reserv elektrivõrgus baaskoormusjaamadega.

Baaskoormusjaamadeks loetakse elektrijaamu, mis tagavad baaskoormuse katmise. Need jaamad töötavad pideval töörežiimil ning peavad tagama antud piirkonna elektrienergia varustuse [27].

Baaskoormusjaamadeks saavad olla järgnevad elektrijaamad:

- kivisõejaamad;
- põlevkivijaamad;
- tuumajaamad;
- gaasielektrijaamad.

Sellele lisaks võib baasjaamade hulka lugeda ka hüdroelektrijaamasid. Baasjaam peab töötama stabiilselt, sõltumata aastaajalistest, ilmastikulistest või muudest nähtustest.

Seepärast ei saa baasjaamade hulka lugeda tuuleparke ega päikeseparke, sest nende tootlikkus ei ole pidev ning on ajaliselt muutuv.

2.4 Elektrienergia kvaliteet ja varustuskindlus

Elektrienergia varustuskindluse tagamine on iga riigi majandusliku ning julgeoleku aspektist vaadatuna üks olulisemaid riigi toimimise aluseid. Seega tuleb tagada elektrivõrgu tehniliste parameetrite ja väärtuste vastavus kehtivatele nõuetele. Sellist meetmete kogumit nimetatakse süsteemiteenuseks.

Eestis pakub süsteemiteenust põhivõrguettevõtte Elering. Süsteemiteenuseks on:

- elektrisüsteemi varustuskindluse tagamine,
- võimsusreservi tagamine;
- sageduse hoidmine;
- aktiiv- ja reaktiivenergia saldo hoidmine;
- pingete reguleerimine jms [15].

Seoses keskkonnadirektiividega, võetud kohustustega vähendada fossiilkütuste osakaalu energeetikasektoris ning energiaplokkide tööea lõppemisega, on tekkimas olukord, kus Eesti peab hakkama sulgema Narva elektrijaamade vanemaid energiaplokke. Nii väheneb aastaks 2020 Narva elektrijaama energiaplokkide sulgemise tõttu tootmisvõimsus 489 MW võrra. Sellele lisandub täiendavalt järgmise 130 MW-se energiaploki sulgemine.

Hiljemalt aastaks 2030 plaanib Eesti Energia seoses energiaplokkide tööea ammendumisega sulgeda veel 670 MW ulatuses energiaplokke. Kokkuvõtvalt väheneb selle tulemusena Narva elektrijaamade võimsus 660 MW-ni.

Baasvõimsuse olemasolu tähtsust iseloomustab ilmekalt 2018 aasta talv, kui maksimaalne tarbimisvõimsus oli 1544 MW·h ning kohalik tootmisvõimsus 1860 MW, millest suurem osa elektrienergiast toodeti just Narva elektrijaamades. Mittevajav osa elektrienergiast eksporditi Balti energiaturule. Sealjuures koostootmisjaamad ja tuulepargid edastasid elektrivõrku sel perioodil keskmiselt 100 MW·h.

Seega on tekkinud olukord, kus Eleringil on raskusi tagada vajalike baasvõimsuste olemasolu.

2.5 Muutliku tootmisega energiaallikad.

Iga taastuvenergia allikat saab vaadelda kui eraldiseisvat elektrigeneraatorit, mis toodab elektrienergiat kas oma sisevõrgu jaoks või genereerib ta elektrienergiat välisvõrku.

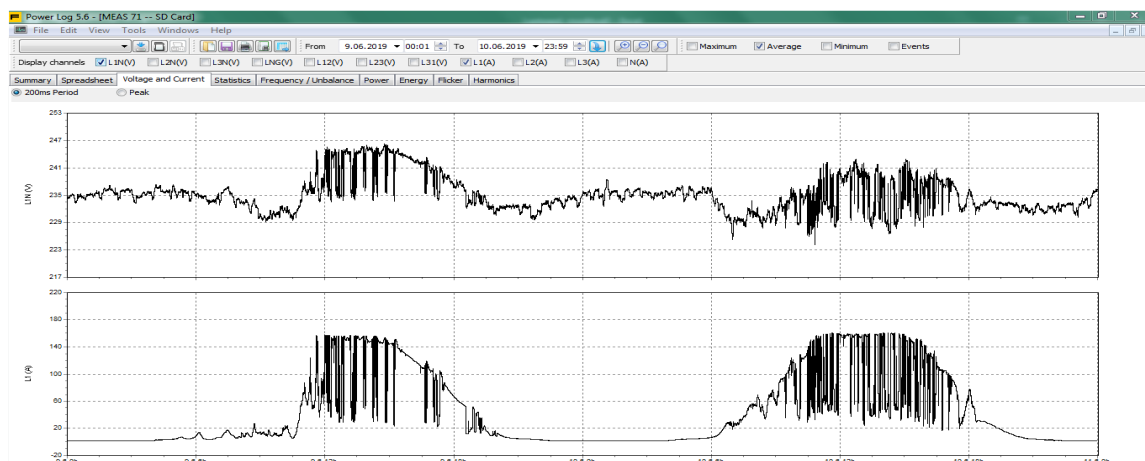
Kahjuks ei genereeri päikese- ja tuulejaamad elektrienergiat pidevalt, vaid on mõjutatavad ilmastikuoludest ja aastaaegadest.

Kui päikesepargi toodangut saab mingil moel ette ennustada, siis tuuleparkide tootlikkus on väga muutlik ja ettearvamatu. Negatiivse mõjuna elektrivõrgule tuleb mainida, et osa tuuleparke on suure võimsusega (üle 1MW), mistõttu mõjutused on seda suurema osakaaluga.

Juhuslikud tootmisvood raskendavad võrgu töö stabiilsena hoidmist ning nõuavad suuremaid töös olevaid baasvõimsusi, et kompenseerida võimalikke elektrienergia puudujääke süsteemis.

Sõltuvalt ilmastikuoludest, on muutuv ka päikesepargi poolt genereeritava elektrienergia suurus. Lisaks mõjutavad energiavoogude väärtusi ka pilved, mille tõttu on võrku genereeritav elektrienergia pideva muutuva nivooga.

Selgema ülevaate saamiseks pingeniivo sõltuvusest päikesepargi tootlikkusest, on toodud andmelogi 2-päevane mõõtetulemuste väljavõte, mis on esitatud joonisel 2.1.



Joonis 2.1. Pingeväertuste muutuse sõltuvus päikesepargi tootlikkusest

Andmed on võetud perioodil 09.06.2019 kella 00.01-st kuni 10.06.2019 kella 23.59-ni. Graafikul on toodud faasipinge (L1-N) ning faasivoolu (L1) väärtuste, ehk siis võimsuse muutused ajas. Toodud graafik näitab, et päikesepargi poolt võrku genereeritud elektrienergia hulk on maksimaalne kella 11.00-st kuni 17.00-ni. Ajatelje üks ühik võrdub kuue tunniga. Ülemisel vertikaalteljel on toodud faasipinge L1-N väärtused, all on esitatud voolu L1 väärtused.

Vaadeldud perioodil on pinge kasv sõltuvuses päikesepargi poolt võrku antavast elektrienergiast. Seega mõjutavad ilmastikuolude muutused päikesepargi tootlikkusest ning koos sellega inverterite väljundpinge muutust.

Genereeritava võimsuse sõltuvus ilmastikust on omane ka tuuleparkidele. Tuule prognoose on keeruline teha, mistõttu on just suure võimsusega tuuleparkide tööprotsessid etteennustamatud ja tootlikkus juhtimatu [27].

2.6 Kasutatavad inverterid

Päikeseenergia muundamiseks elektrienergiaks kasutatakse invertereid e. muundureid. Invertereid võib jagada küll tootja võimsuse järgi eri klassidesse kuid samas jaotatakse neid ka vastavalt paikesepargi süsteemi järgi:

- 1) võrguühendusega e. *On-grid* inverterid;
- 2) saarerežiimil töötavad e. *Off-grid* inverterid;
- 3) hübriidseadmed e. *Hybrid-* inverterid.

Võrguühendusega invertereid kasutatakse päikeseparkides, kus põhiliseks eesmärgiks on elektrienergia võrku müümine või see ise ära tarbida. Selles süsteemis puuduvad võimalused akupankade või generaatori ühendamiseks.

Saarerežiimi invertereid kasutatakse kohtades, kus elektrienergia püsiühendus puudub. See eeldab lisaks päikesepaneelide ja inverterite olemasolule veel akupanga ning generaatori kasutamist. Antud süsteeme kasutatakse harva, vaid juhtudel, mil võrguettevõtjaga liitumine on raskendatud või selle rajamine liiga kapitalimahukas. Ennekõike kasutatakse sellist süsteemi väikese võimsusega tarbijate puhul.

Hübriidinverterid kujutavad endast kooslust võrguühendusega ja saarerežiimi inverteritest. Hübriidinverteerid kasutatakse päikeseparkides üha enam, sest neil on väga laiad kasutusvõimalused. Sellisesse süsteemi on integreeritud nii päikesepaneelid, akupank, vajadusel generaator ning inverter ise. Inverteri üldine algoritm on selline, et hommikul ajal, mil päike tõuseb, laetakse kõigepealt täis akud. Seejärel antakse toodetud võimsus elektripaigaldise elektritarvitite toiteks. Kui paigaldise koormus on väiksem kui päikesepaneelide poolt toodetud võimsus, siis ülejääv elektrienergia suunatakse välisvõrku ehk müüakse võrguettevõtjale. Öhtusel ajal, kui päikesepaneelide toodang ei kata enam tarvitavat võimsust, võetakse puudujääv elektrienergia akupangalt. Akupangale on seatud minimaalselt lubatav laetuse tase (ligikaudu 1/3 nimimahtuvusest), millest allapoole lülitatakse akupank elektrivõrgust välja ning elektritoidet hakatakse võtma võrguettevõtja võrguust. Hommikul algab loetletud protsess uuesti. Selline skeem võimaldab maksimaalselt kasutada päikeseenergiast saadud elektrienergiat.

2.7. Päikeseparkide probleemide näited

Tuule- ja päikeseparkide elektrisüsteemide sidumine olemasoleva elektrivõrguga on üks olulisemaid küsimusi taastuveneergetika arendamisel ja integreerimisel.

Käesoleva magistritöö koostamisel jõudis autor tõdemusele, et Eestis pole palju uuringuid tuule- ja päikeseparkide mõjust olemasolevale elektrivõrgule. Avaldatud on küll TTÜ ja Jaotusvõrk OÜ poolt teostatud uurimustöid võrguparameetrite (pinge, sagedus, harmoonilised, väreus jms.) vastavusest ning nende mõjutustest erinevate võrgurežiimide puhul ning vaadeldud nende vastavust standardile EVS-EN 50160:2010, kuid põhjalikumaid uurimustöid taastuveneergetiaallikate, eriti tuule- ja päikeseparkide mõjust elektrienergia kvaliteedile, ning võrguprobleemidele, pole autor leida suutnud. Seepärast on esialgseks võrdluseks võetud mõned teadusartiklid Saksamaal asuvate päikeseparkide tööga seotud probleemidest ning võimalikest lahendustest.

Saksamaa on üks suuremaid riike päikeseparkide kasutuselevõtmises ning taastuveneergetia arendamisel. Lisaks sellele on Saksamaa kliimatilised tingimustest tingitud päikeseenergiast toodetud aastane elektrienergia toodang ligilähedane Eestile.

Saksamaal oli 2017 aasta lõpuks paigaldatud päikeseparkide võimsus üle 48 GW [32], millest 22 GW võimusest olid ühendatud madalpingevõrku.

Saksamaal läbi viidud uuringu raames küsitleti kümnet suuremat Saksamaal tegutsevat võrguettevõtet, millest tehti asjakohane kokkuvõte [28].

Uuringus osalenud Saksamaa jaotusettevõtete liinivõrkude kogupikkus moodustab 38% kogu Saksamaa liinivõrkude kogusummast. Päikeseparkide arendused on olnud eeskätt väiksemavõimsuseliste tootmisjaamade näol ning ennekõike maapiirkonnas.

Jaotusvõrgu ettevõtjad pidid taastuenergia jaamade lisandumisel välja vahetama jaotusvõrgu trafosid. See probleem esines ennekõike Lõuna-Saksamaal, kus parkide installeeritud võimsus on suurem. Põhja-Saksamaa võrguettevõtjad tõid esile asjaolu, et nende piirkonnas on eluasemestruktuur hõredam, mille tõttu esinevad pingeprobleemid pikemate madalpingeliinide tõttu. Samuti võib taastuenergiasüsteemide suur arv keskpingevõrgus põhjustada pingeprobleeme madalpingevõrgus [28].

PV-süsteemide integreerimisel on oht, et sõltuvalt jaotusvõrgu tehnilistest näitajatest (liini pikkused ja liini ristlõiked, trafo pingesätted), võivad pinged väärtused tõusta lubatust suuremaks. Tavaliselt lahendatakse see probleem jaotusvõrgu trafo pingeastmete seadistusega. Igapäevaselt on see lahendus rakendatav, sest Eestis kasutatakse 15/10/0,4 kV trafode pingeastmete ümberlülitusel tuleb trafo pingeastmete vahetuseks välja lülitada. Küll on võimalus Jaotusvõrgul ning Eleringil kesk- ja kõrgepingevõrgus selliseid lülitusi vajadusel teostada.

Saksamaal on kasutusele võetud sellised trafod, kus pinget saab reguleerida induktiivpooliga. Need trafod on aga oma hinnalt kallimad, küll aga võimaldavad need võrguettevõttel tarbijate pinget reguleerida vastavalt vajadusele.

Teiseks suuremaks kitsaskohaks päikeseparkide liitumisel võib tekkida vajadus ka jaotusvõrgu jõutrafode, mõõtetrafode, releekaitse väljavahetuseks, mis tõstab ka tootja liitumise hinda. Sellisel juhul tuleb päikesepargi arendajal tasuda kõik kulutused, mis on seotud võrgu ümberehitamisega. Nii mitmedki päikeseparkide arendajad on toonud välja just selle asjaolu, et mingisse piirkonda on päikesepark rajamata jäänud. Seega mõjutab elektrivõrgu olukord ka taastuenergia arendajate otsuseid.

Iga elektripaigaldise ehitusel tuleb järgida asjakohaseid nõudeid, standardeid ning tootjapoolseid paigaldusjuhiseid. See nõue kehtib ka päikeseparkide kohta, mis omavad spetsiifilisi tehnilisi parameetreid, millega nii projekteerijad, elektritööde ettevõtjad kui edasine hoolduspersonal arvestama peab. Nii tuleb arvestada, et suurema võimsusega päikeseparkide korral on pinged ning voolud paigaldises kohati väga suured.

Üheks võimalikuks probleemiks, mis on näiteks ka Saksamaa päikeseparkide omanikke puudutanud, on alalispinge kaablite isolatsioonitakistuse halvenemisest tingitud läbilöögid. Keeruliseks teeb selliste rikete puhul rikke asukoha tuvastamine, sest tihti toimuvad läbilöögid vihmasel või kõrge niiskusega ajal, kuid mõõtmised teostatakse kuival ajal. Selliste rikete kõrvaldamine võib kujuneda pikaajaliseks ja keeruliseks [29, 30].

Saksamaal on suurem osa päikeseparkides toimuvatest rikestest ning tulekahjudest päikeseparkides seotud alalispinge poolega. Osalt võib seda seletada ka vanemate elektrimaterjalide kasutamisega, sest ennekõike on see üle seitsme ja enam aastat käigus olnud päikeseparkide probleem. Samas peab ka päikesepargi ehitajal olema kompetentne ja koolitatud personal, et tööde kvaliteet tagaks kaablite isolatsiooni terviklikkuse ning pika kasutuse. Siiski on uuematel inverteritel isolatsiooni testimise funktsioon, mis tagab IT-süsteemis olevate alalispinge kaablite isolatsioonitakistuse kontrolli.

Suurte päikeseparkidega kaasnevad ka suured võimsused, mida elektrivõrku genereeritakse. Selle tagajärjel tekivad vahelduvpinge osa kaablites märgatavad voolud, mis põhjustavad soojuskadusid kaablites ning kaitseaparatuuris. Tagajärjeks võib olla sisepaigaldiste jaotuskilpide komponentide ülekuumenemine ning sellest põhjustatud põlengud.

3. KATSEMÕÕTMISED JA TULEMUSED

3.1. Katse eesmärk ja metoodika

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on analüüsida päikesepargi poolt tekitatud pingekvaliteedi vastavust standardile EVS-EN 50160:2010+ A1:2015 ning võimalike harmooniliste osakaalu antud tarbija elektrivõrgus. Hüpoteesiks seati, et päikesepargi tootlikkus mõjutab elektripaigaldise mõõdetava punkti pingeparameetreid. Uurimistöö käigus analüüsiti pinge- ja vooluharmooniliste väärtuseid ning võrreldi nende vastavust standardile EVS-EN 50160:2010+ A1:2015.

Mõõtmised viidi läbi erinevates päikeseparkides, eesmärgiga võrrelda mõõtmisperioodi jooksul erinevate päikeseparkide inverterite tööd ning päikesepargi tootlikkuse muutuste mõju pingekvaliteedile.

Uurimaks, millised on võimalikud erinevused sõltuvalt päikesepargi koguvõimsusest, teostati mõõtmised kolmel erineval objektil:

1. Päikesepark inverterite koguvõimsusega 135 kW. Tegemist on lasteaia katusele paigaldatud päikesepargiga.
2. Päikesepark inverteri nimivõimsusega 10 kW. Päikesepaneelid olid paigaldatud ärihoone katusele.
3. Maapinnale (põllule) paigaldatud päikesepark, mille koguvõimsuseks on 480 kW.

Päikeseparkide iseloomustavad andmed on toodud tabelis 3.1.

Tabel 3.1. Päikeseparkide andmed

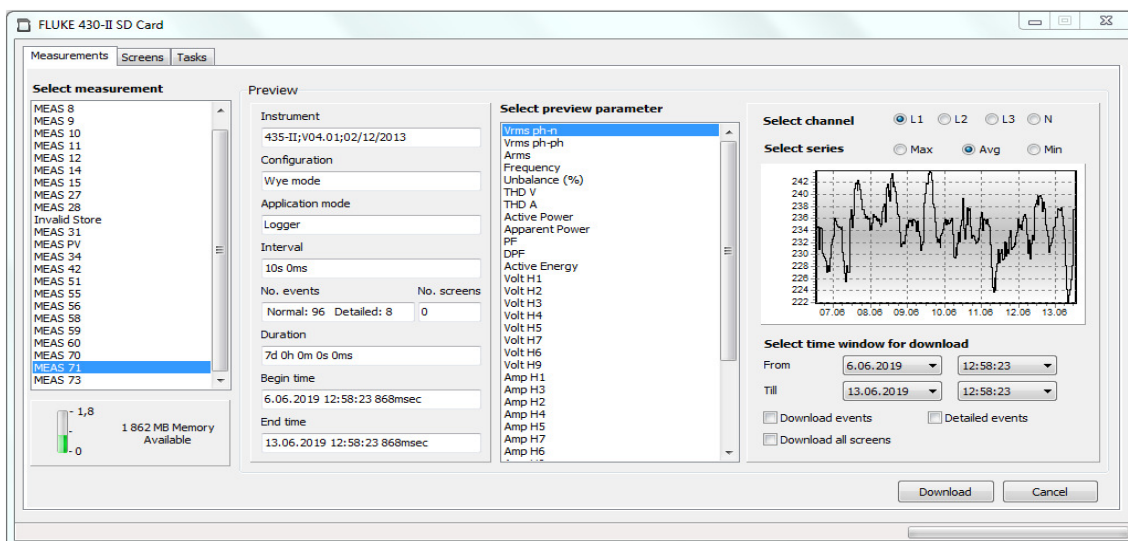
Päikesepark	Võrguühenduse viis	Inverteri tootja	Päikesepargi nimivõimsus, kW
1	Ühendatud tarbija sisepaigaldisega	Fronius	135
2	Ühendatud tarbija sisepaigaldisega	Centrosolar AG	10
3	Ühendatud eraldi elektrivõrku, 15kV	HUAWEI	480

Mõõtmismetoodikal lähtuti standardist EVS-EN 61000-4-30:2015, mis käsitleb katsetus- ja mõõtetehnikat, eraldiseisvalt elektrikvaliteedi mõõtmise meetoteid. Lisaks võeti aluseks

standard EVS-EN 50160:2010+A1:2015, mis käsitleb avalike elektrivõrkude pingete tunnussuurseid.

Mõõtmisi teostati 7-päevase intervallina ning mõõtmiste läbiviimiseks kasutati võrguanalüsaatorit FLUKE 435.

Mõõteperioodi vältel salvestati mõõdetavad parameetrid SD-kaardile. Salvestatud andmete lugemiseks kasutati Fluke Power 430 tarkvara.



Joonis 3.1. Pilt Fluke Power 430 rakendusest.

Tarkvara võimaldab selekteerida ja töödelda saadud andmemassiive. Salvestatud andmete käitlemiseks tuleb valida soovitud mõõteseanss, misjärel salvestatud andmed dekodeeritakse tekstifaili. Loodud tekstifail avatakse asjakohase tekstiredaktoriga (nt. Notepad) ning edasise andmetöötluse jaoks kasutatakse *MS Excel*'i keskkonda. Edasi saab juba vastavalt vajadusele teostada andmete analüüsi ning koostada graafikuid.

3.2 Päikeseparkide tehniline kirjeldus

3.2.1 Palamuse päikesepark

Esimeseks uuritavaks päikesepargiks oli Palamuse laseaiaga liidetud päikesepark, mis valmis 2018 aastal. Tegemist on tehniliselt kaasaegse ehitisega, kus on kokku seotud keskkond ning tehnoloogiad. Eraldi võib esile tuua, et hoones asuvad talveaed ning basseini, mis muudavad selle lasteaia eriti uudseks ning kasutuskeskkonna asjakohaseks.

Vajaliku energiatõhususe saavutamiseks on hoone katusele paigaldatud 135 kW võimsusega päikesepark, mis on esitatud joonisel 3.2.



Joonis 3.2. Palamuse päikesepark

Päikesepaneelid on paigaldatud lamekatusele, vastav kaldenurk on saavutatud aluskarkassi abil. Päikesepargi inverteritena oli kasutusel firma Fronius invertereid võimsusega 12,5 ja 25 kW, mis paiknesid hoone teisel korrusel asuvas tehnoruumis.



Joonis 3.3. Fronius inverterid

Võrguparameetrite mõõtmised teostati tehnoruumis olevas jaotuskilbis JK-PV. Mõõtmised toimusid ajavahemikul 06.06.2019 kuni 13.06.2019. Mõõteseade Fluke 435 ühendati tehnoruumis asuva JK-PV sisendklemmidega.

3.2.2. Esvika päikesepark

Teiseks uuritavaks päikesepargiks oli Tartus asuv Esvika Elekter AS-i esindus, aadressiga Vitamiini 2. Päikesepargi inverteri nimivõimsus on 10 kW. Kasutusel oli firma Centrosolar AG 10 kW inverter. Mõõtmisi teostati ajavahemikul 21.06.2019 kuni 28.06.2019. Võrguanalüsaator oli ühendatud elektripaigaldise PJK-s asuva inverteri grupi liinikaitselüliti väljundklemmidele.

3.2.3. Porimetsa päikesepark

Kolmas mõõteobjekt oli Peipsiääre vallas asuv Porimetsa päikesepark. Antud päikesepark koosneb kahest 480 kW-st eraldiseisvast päikesepargist, mis valmisid 2018 aasta lõpus, seega saab park 12 aasta jooksul täiendavat toetust 5,37 senti/kW·h toodetud taastuvenergia eest. Kolmanda päikesepargi mõõtmised teostati ajavahemikul 12.05.2020 kuni 19.05.2020. Tegemist on päikesepargiga, mis on rajatud puhtalt päikeseenergiast saadud elektrienergia elektrivõrku müümisega. Päikesepark on otse läbi jaotusvõrgu jõutrafo ühendatud keskpinge elektrivõrguga. Mõõtmisi teostati konkreetselt ühes neist päikesepargist. Joonisel 3.4 on toodud kõnealune päikesepark.



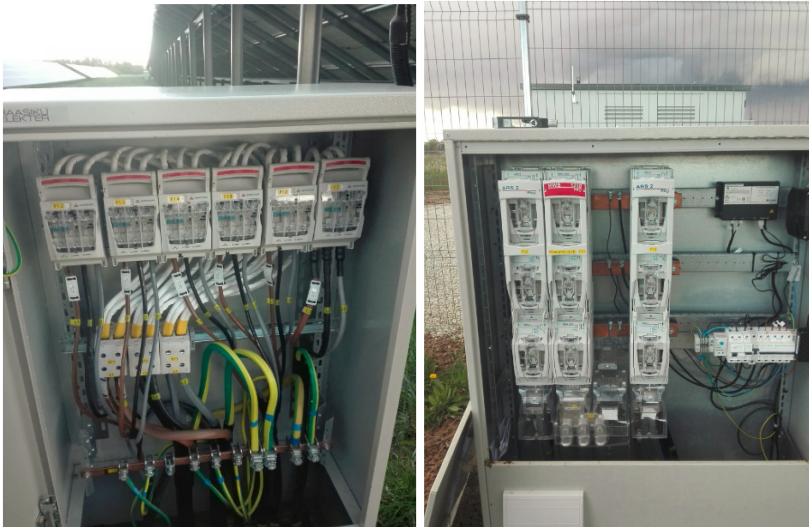
Joonis 3.4. Porimetsa päikesepark

Iga paneelide rea kohta on üks inverteri kilp, kuhu on ühendatud nii päikesepaneelidelt tulevad alalispinge kaablid kui ka jaotuskeskusesse väljuvad vahelduvpinge kaablid. Inverteri kilp on toodud joonisel 3.5.



Joonis 3.5. Päikesepargi inverteri kilp.

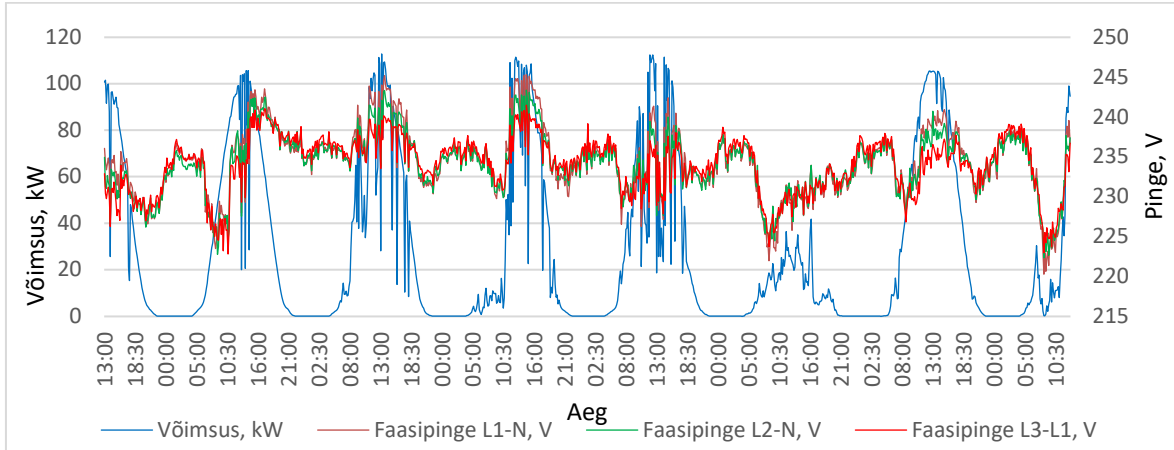
Jaotuskesusest väljuvad kaablid peajaotuskeskusesse, kus mõõtmised ka teostati. Käsitletavas päikesepargis on kasutusel firma HUAWEI inverterid.



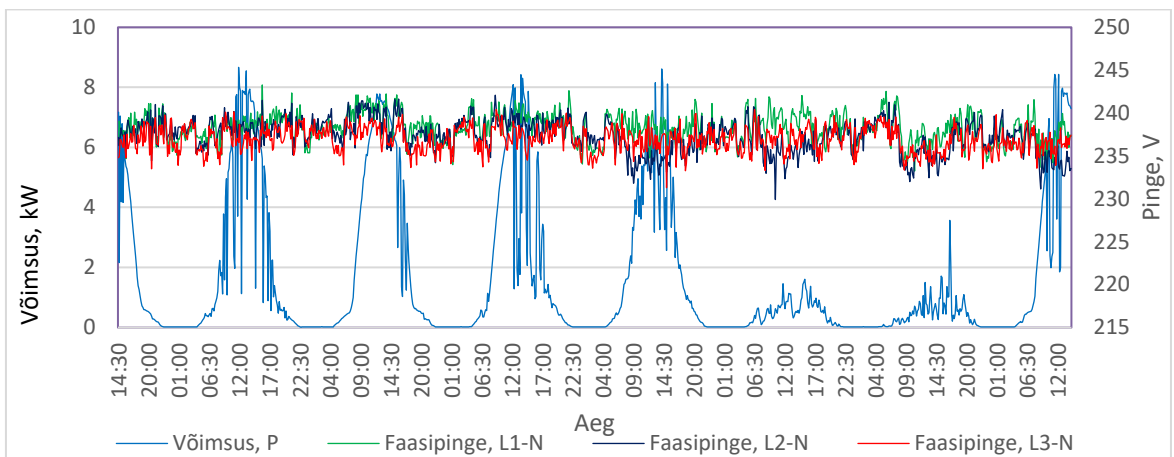
Joonis 3.6. Jaotuskilp ning mõõtepunktiks olev PJK (vasakul pool).

3.3 Pinge mõõtmise tulemused

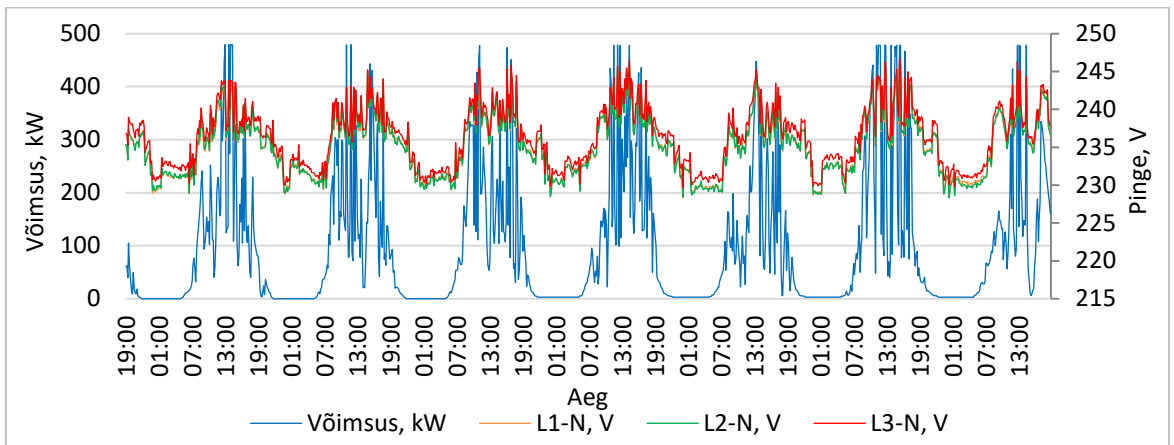
Selgitamaks pingeniivo sõltuvust päikesepargi tootlikkusest, mõõdeti pinge väärtuseid ning päikesepargi tootlikkust samal ajal. Alljärgnevatel joonistel on toodud kolme päikesepargi võimsuse-pinge graafikud.



Joonis.3.7. Palamuse päikesepargi võimsuse-pinge diagramm.



Joonis 3.8. Esvika päikesepargi võimsuse-pinge diagramm.



Joonis 3.9. Porimetsa päikesepargi võimsuse-pinge diagramm.

Palamuse päikesepargi võimsuse-pinge graafik on toodud joonisel 3.7. Päikesepargi mõõtetulemustest selgub, et hommikul ajal on näha pingete alanemist. Pinge väärtused mõõtmise ajal hommikul on 213..220 V vahel. Samas on diagrammilt näha, et päeval ajal pinge tõuseb ning on vahemikus 237...242 V. Peale 15.00 pinge mõnevõrra alaneb ning jääb samadesse piiridesse kuni hommikutundideni. Varahommikul on näha, et faasipinge langeb kuid peale 10.00 tõuseb pinge jälle päevase maksimumini

Analüüsidest sellist pingekõikumist võib järeldada, et hommikused pingeväärtuse langemised on tingitud tarbijate koormusvoolude tõusust madalpinge võrgus. Pinge tõus on põhjustatud päikeseseaama tootlikkusest ning selle poolt võrku genereeritava pinge tõusust.

Pärastlõunal, mil päikesepargi energiatootlikkus hakkab vähenema, langeb ka pinge elektrivõrgus. See pingelangus kestab kuni hommikuni, mil päikesepargi poolt elektrienergiat enam ei toodeta.

Samas on öisel ajal täheldatav mõningane pinge tõus. See on seletatav madalpinge elektrivõrgu tarbijate koormuse vähenemisega ning sellest on tingitud ka üldine pingeniivo tõus. Pingete väärtused sõltuvad jaotusvõrgu jõutrafo seadistatud pingeastmetest, pinge väärtusi jälgib ja seadistab kohalik elektrivõrgu valdaja.

Esvika päikesepargi pingeväärtuste muutused nädalase mõõteperioodi jooksul olid väiksema amplituudiga ning päikesepargi tootlikkus ei põhjustanud pingete suuri muutusi. Selle põhjuseks saab olla päikesepargi väike võimsus ja tootlikkus, ning kogu päikesepargi poolt genereeritud elektrienergia tarbimine hoone enda sisepaigaldises.

Porimetsa päikesepargi pinge väärtuste sõltuvuse määramiseks päikesepargi tootlikkusest teostatud mõõtmiste tulemused on toodud joonisel 3.9. Graafikult on näha, et päeval ajal kui päikesepark elektrienergiat võrku genereerib, tõuseb ka pinge mõõtepunktis oluliselt kõrgeks. Antud objekti puhul on selgelt näha, mismoodi päikesepargi kasvav võimsus mõjutab pingete väärtust. Joonisel.. esitatud graafik toob selgelt esile pinge väärtuste sõltuvuse päikesepargi tootlikkusest. Siinjuures tasub märkida, et antud mõõtmiste tulemusi ei mõjutanud kõrvalised tarbijapaigaldised, kui mitte arvestada võimalikke keskpinge võrgu moonutusi. Analüüsidest päikeseparkide pingeparameetrite muutust nädalase mõõtmisperioodi jooksul, saadi pinge kesk-, miinimum- ja maksimumväärtused. Saadud tulemused on toodud allpool tabelites.

Tabel 3.2. Palamuse päikesepargi pingeväärtused

	Pinge, V					
	L1-N	L2-N	L3-N	L1-L2	L2-L3	L1-L3
U_{kesk}	234,27	233,97	233,98	404,81	405,19	406,22
U_{max}	246,31	244,04	241,79	423,23	420,89	423,57
U_{min}	218,45	220,57	221,00	379,62	382,49	382,19

Tabel 3.3. Esvika päikesepargi pingeväärtused

	Pinge, V					
	L1-N	L2-N	L3-N	L1-L2	L2-L3	L1-L3
U_{kesk}	238,24	237,35	236,94	412,25	409,90	411,94
U_{max}	244,49	243,57	241,82	421,40	418,88	421,13
U_{min}	231,05	228,52	230,82	403,41	401,82	403,73

Tabel 3.4. Porimetsa päikesepargi pingeväärtused

	Pinge, V					
	L1-N	L2-N	L3-N	L1-L2	L2-L3	L1-L3
U_{kesk}	235,35	235,32	236,44	406,84	408,91	408,98
U_{max}	246,01	246,17	246,74	425,30	427,30	427,24
U_{min}	228,32	228,35	229,66	394,83	397,14	396,94

Tabelist 3.2 jäeldub, et pinge väärtuste kõikumine mõõtmisperioodi kestel oli faasipingetel vahemikus 20,79...27,86 V ning liinipingetel 38,40...43,61 V.

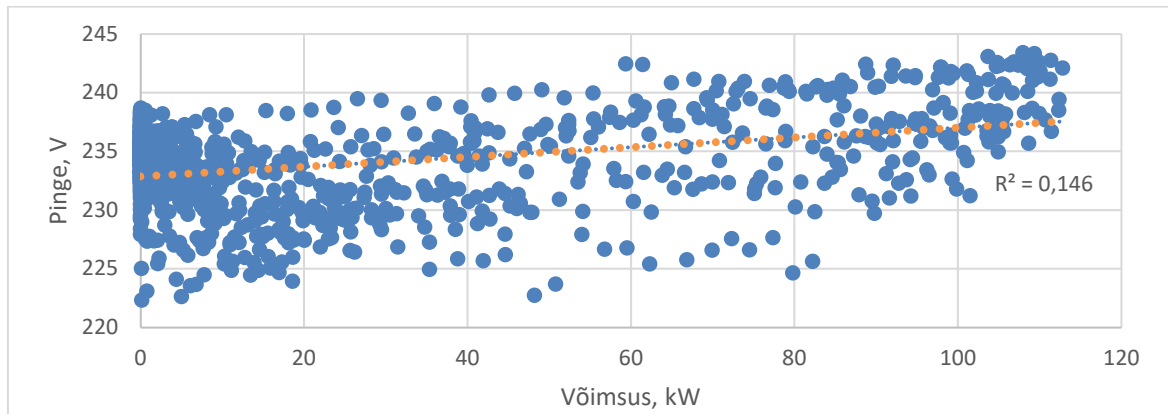
Vastavalt standardile, on avalike madalpingevõrkude standardnimipinge $U_n = 230\text{V}$ ning normaaltingimustes ei tohi aeglased pingemuutused ületada $\pm 10\%$ nimipinget U_n .

Seega peab faasipinge U_f jääma vahemikku 207...253V, ning liinipinge U_l vahemikku 360...440V.

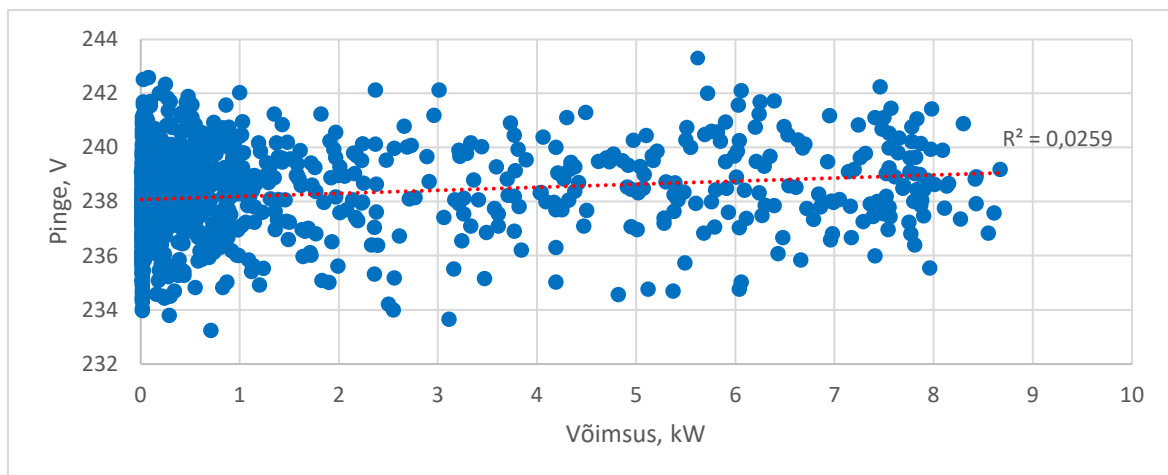
Tabelist 3.3 selgub, et pingeniivo kõikumine mõõtmisperioodi kestel oli faasipingetel vahemikus 11,0...15,05 V ning liinipingetel 17,06...17,99 V.

Tabelist 3.4 selgub, et faasipinge suurim pingevahemik ΔU_f oli mõõteperioodi jooksul 18,39 V ning liinipingel ΔU_l oli 30,47 V.

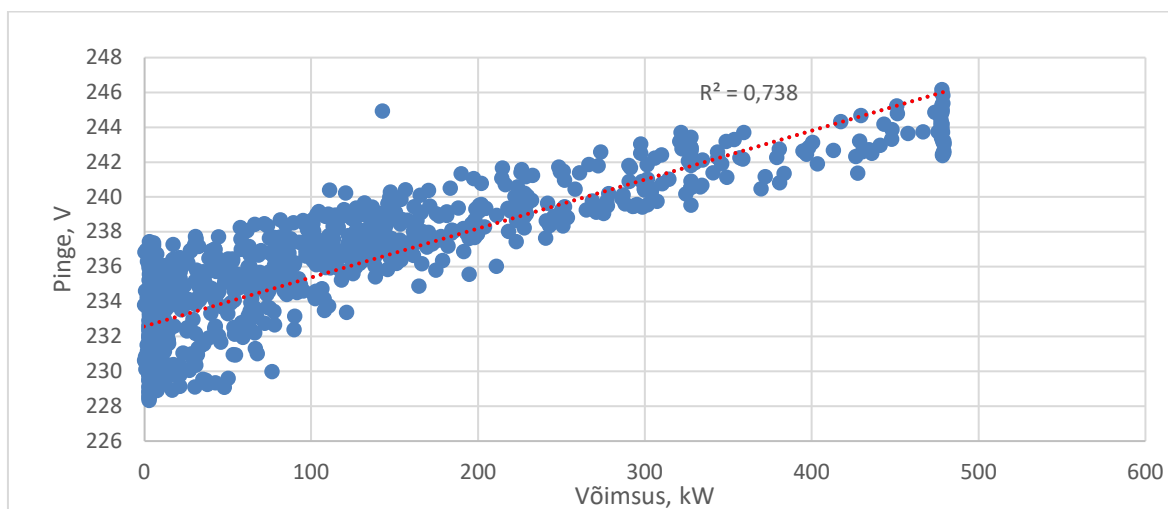
Statistilise andmetöötluse alusel koostati korrelatsioonivõrrandid, mis näitavad, kui palju päikesepargi tootlikkuse muutumine mõjutab pingeväärtuste muutust. Need graafikud on toodud allpool joonistel.



Joonis 3.10. Palamuse päikesepargi pinge-võimsuse korrelatsiooni graafik.



Joonis 3.11. Esvika päikesepargi pinge-võimsuse korrelatsiooni graafik.



Joonis 3.12. Porimetsa päikesepargi pinge-võimsuse korrelatsiooni graafik.

Jooniselt 3.10 selgub, et korrelatsiooni väärtus on 0,146. Seega võimsuse muutus ei mõjuta pinget muutust. Arvestades päikesepargi küllalt suurt tootlikkust, ei ole selle mõju pinget muutumisele suur.

Joonis 3.11 näitab, et korrelatsiooni väärtus on 0,0259. Selline madal väärtus näitab, et Esvika päikesepargis tootlikkuse muutus pingeniivoole praktiliselt puudub. Võrreldes esimese mõõteobjektiga saadud tulemustega, oli antud elektripaigaldises pingekõikumiste tase märgatavamalt ühtlasem ning nii faasi- kui liinipingete väärtused standardnimipingele U_n kõige lähedasemad. Seda võib põhjustada:

1. Päikesepargi suhteliselt väike nimivõimsus;
2. Hoone siseelektripaigaldis tarbib kogu toodetud elektrienergia ise ära;
3. Väliselektrivõrk on küllalt suur, mis ei lase päikesepargi nimipingel ennast mõjutada.

Joonisel 3.12 toodud Porimetsa päikesepargi korrelatsioonigraafiku väärtus 0,738 näitab, et päikesepargi tootlikkuse muutus mõjutab olulisel määral pinget elektrivõrgus.

Selliste väärtuste puhul tuleks arvestada, et elektripaigaldise pingeniivod on kevad-suve perioodil standardpingest kõrgemad, mistõttu võib tekkida olukordi, kus elektrivõrgu nimipinget ei vasta elektriseadmete nimipingetele.

3.4 Harmooniliste mõõtmise tulemused

Lisaks pingeparameetritele, mõõdeti ka pingeharmooniliste (THD_U) ja vooluharmooniliste (THD_I) osakaalu. Pinget ja voolu kõrgemate harmooniliste komponentide sisaldust iseloomustatakse moonutusteguriga THD (*total harmonic distortion*), mida väljendatakse protsendina nimiväärtusest [31].

Pinget- (THD_U) ja vooluharmooniliste (THD_I) suuruste selgitamiseks selle päikesepargi elektripaigaldises, teostati mõõtmised vastavalt standardile EVS EN 50160:2010+A1:2015.

Harmooniku pingeks loetakse siinuspinget, mille sagedus on täiskordne toitepinge põhikomponendi sagedus. Harmoonikute pinget võib hinnata kas üksikult, harmooniku pinget suhtelise amplituudiga U_h põhikomponendi pinget U_1 suhtes, kus h on harmoonika järk.

Teise võimalusena võib harmoonikate pingeid hinnata ühiselt, harmoonmoonutusteguriga *THD* [22].

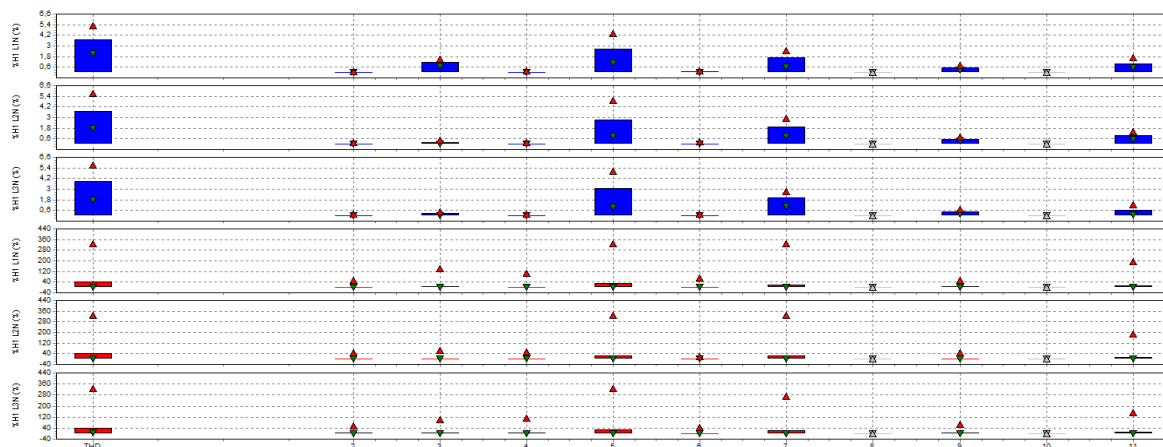
Standardis EVS EN 50160:2010+A1:2015 lubatud pingeharmoniliste väärtused on toodud tabelis 3.5.

Tabel 3.5. Pingeharmoniliste lubatavad piirväärtused

Paaritud harmoonilised				Paarisharmonilised	
3-ga jagamatud		3-ga jaguvad		Järk <i>h</i>	Suhteline pinge, <i>u</i> %
Järk <i>h</i>	Suhteline pinge, <i>u</i> %	Järk <i>h</i>	Suhteline pinge, <i>u</i> %		
5	6,0	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,5	6...24	0,5
13	3,0	21	0,5		
17	2,0				
19	1,5				
23	1,5				
25					

Pingeharmoniliste määr THD_U ei tohi olla suurem kui 5%, sest harmoonilised mõjutavad elektriseadmete tööparameetreid ning vähendavad kasutegurit [27].

Harmoniliste eri-järkude suurust iseloomustavad allpool esitatud analüsaatori histogrammide.

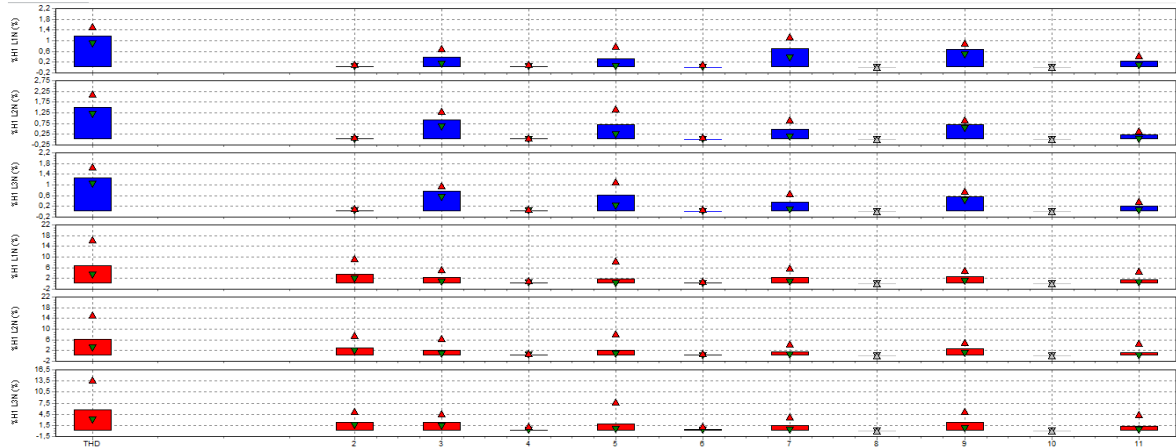


Joonis 3.13 Palamuse päikesepark.

Palamuse päikesepargi pinge koguharmoniliste THD_U väärtus on erinevate faasidel ligikaudu 4%. Jooniselt on näha, et kolmanda, viienda, seitsmenda ning üheteistkümnenda järgu pingeharmonilised omavad suuremat mõju. Paarisarvuliste pingeharmoniliste mõju

pole määrav. Voolu koguharmonooniliste THD_I väärtused on ligilähedasetl 40%. Suurimat mõju omavad viienda ning seitsmenda ning järgu vooluharmonoonilised.

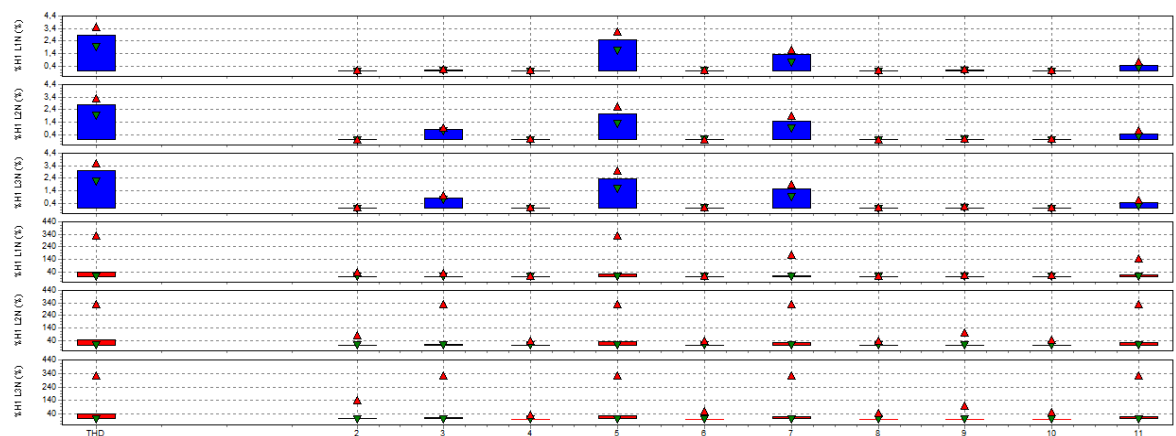
Esvika päikeseparki harmooniliste mõju on toodud joonisel 3.14.



Joonis 3.14 Esvika päikesepark.

Esvika päikeseparki pinge koguharmonooniliste THD_U väärtus on erinevate faasidel 1,5%. Mõju omavad kolmanda, viienda, seitsmenda ning üheksanda järgu harmoonilised. Vooluharmonooniliste THD_I järkudes omavad suuremat mõju teist, kolmandat, viiendat, seitsmendat ning üheksandat järku harmoonilised.

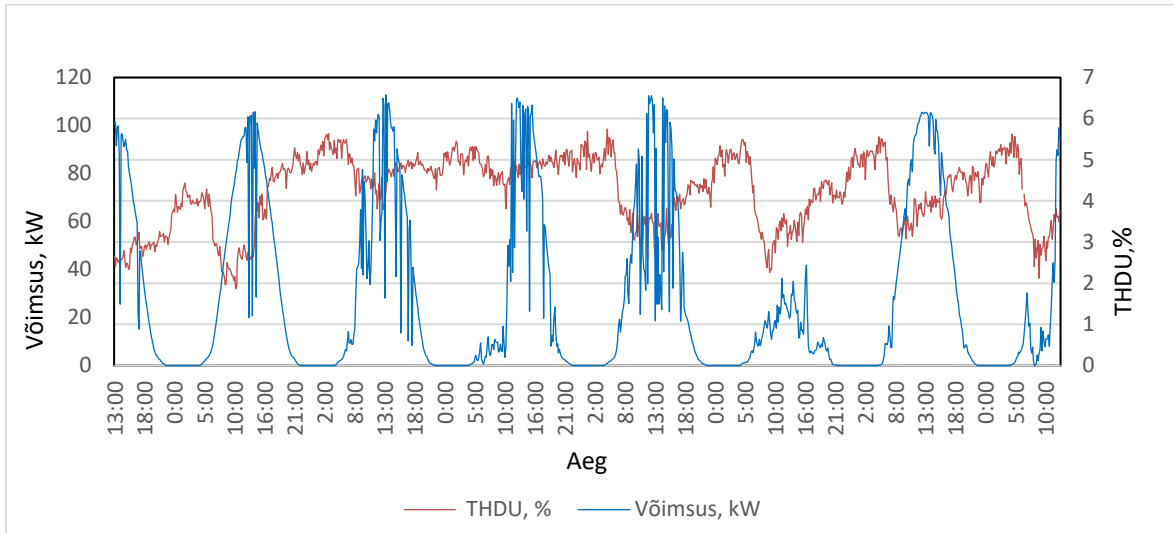
Porimetsa päikeseparki pingeharmonooniliste järkudes omavad suuremat mõju kolmandat, viiendat ning seitsmendat järku harmoonilised. Vooluharmonooniliste THD_I puhul võib täheldada viienda järgu harmooniliste suuremat osakaalu.



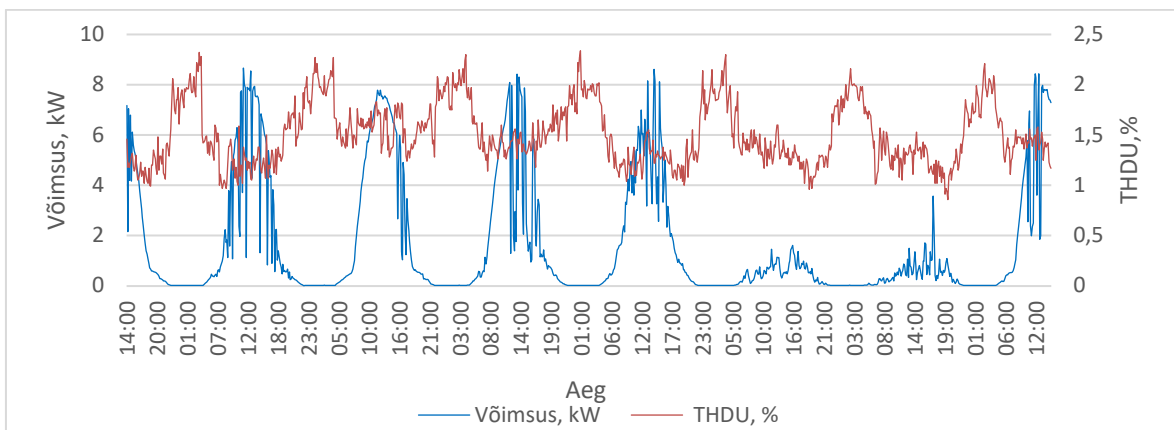
Joonis 3.15 Porimetsa päikesepark

Harmooniliste eri-järkude joonised on toodud lisades 1, 2 ja 3.

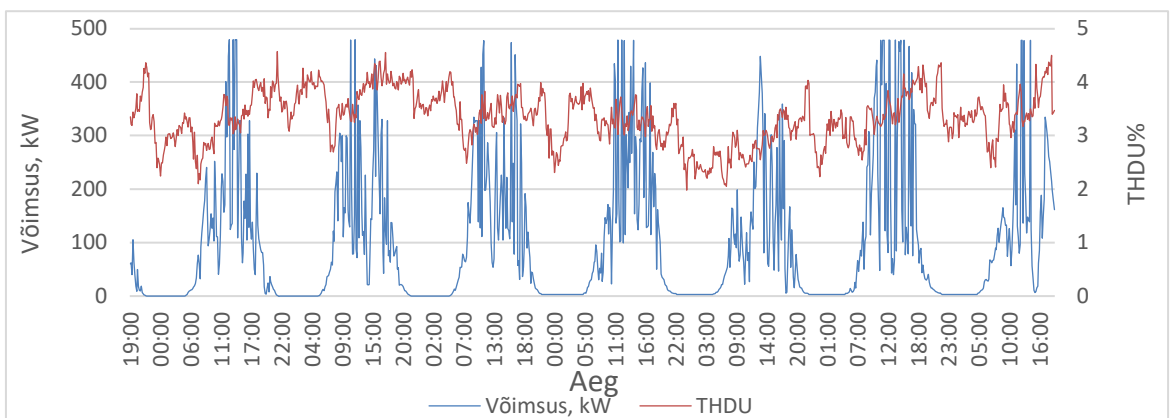
Võrguanalüsaatoriga teostatud mõõtmiste tulemusi saab vaadelda ka koguharmoniliste THD muutust ajas koos päikesepargi tootlikkuse muutusega. Nädalase mõõteperioodil saadud pingeharmoniliste väärtuste graafik on toodud allpool joonistel.



Joonis 3.16. Palamuse päikesepargi pingeharmonilised.



Joonis 3.17. Esvika päikesepargi pingeharmonilised.



Joonis 3.18. Porimetsa päikesepargi pingeharmonilised.

Joonisel 3.16 esitatud graafikult on näha, et pingeharmoniliste THD_U väärtused on madalamad päikesepargi tootlikkuse ajal ning harmooniliste tase muutub kõrgemaks just inverterite tühijooksu-režiimil, mil päikesepargi tootlikkus on madal.

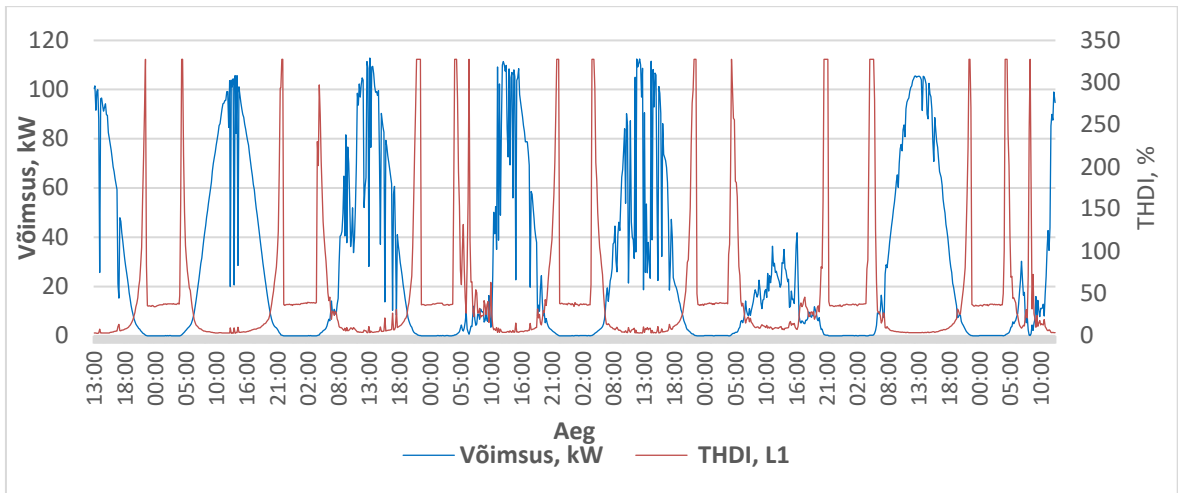
Siiski jäävad THD_U väärtused standardiga EVS EN 50160:2010+A1:2015 lubatud piiridesse.

Esvika päikesepargi THD_U väärtuste graafilised mõõtmistulemused on esitatud joonisel 3.17. Kuigi standard lubab suhteliselt mõningaid hälbeid standardväärtuste suhtes, on jooniselt näha, et pingeharmoniliste (THD_U) protsent kogunivoost on vahemikus 1...2,28%, mis on kõigi katsemõõtmiste parim tulem. Seda võib seletada asjaoluga, et antud PV-pargis oli kasutusel vaid üks inverter.

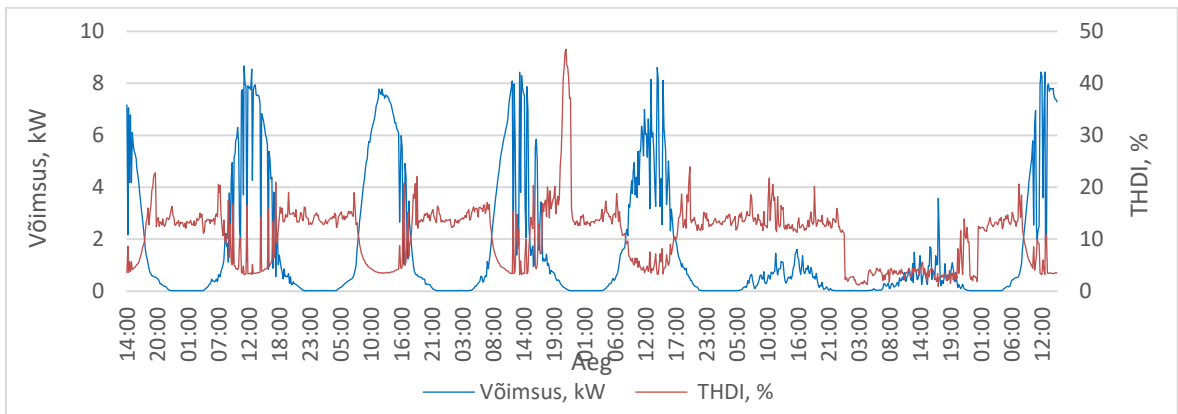
Porimetsa päikesepargi THD_U väärtused jäid üldjuhul 3%...4% vahele. Tasub märkimist, et siin ei täheldatud THD_U väärtuste muutuse sõltuvust päikesepargi tootlikkusest.

Vooluharmoniliste THD_I väärtuste sõltuvus päikesepargi tootlikkusest on esitatud graafiliselt allpool toodud joonistel.

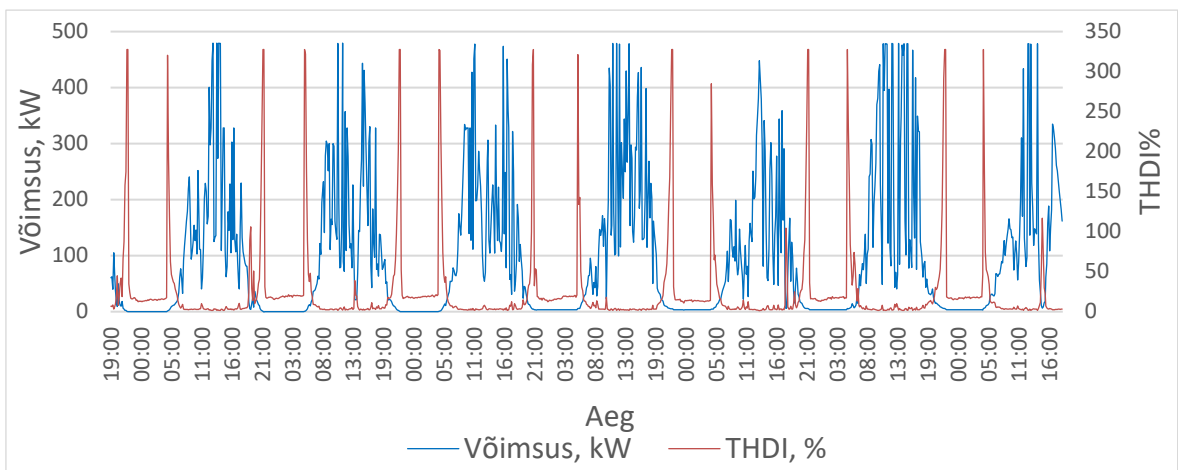
Jooniselt 3.19 võib näha Palamuse päikesepargi THD_I muutust sõltuvalt päikesepargi tootlikkusest. väärtused esitatakse protsentuaalse väärtusena põhiharmonilise väärtusest. Päeval ajal kui päikeseпарк genereerib elektrienergiat, on THD_I komponent stabiilselt madal. Kui võimsus langeb, s.t. päikeseпарк ei genereeri öisel ajal elektrienergiat, siis inverterid lülituvad n.ö. *stand-by* režiimi. Selle üleminekuprotsessi vältel tekitab inverter oma siirdeprotsessidega nähtavad kõrged piigid. Pinge- ja vooluharmoniliste väärtuste muutuse statistiline sõltuvust võimsusest on toodud allpool joonistel.



Joonis 3.19. Palamuse päikesepargi vooluharmonilised.



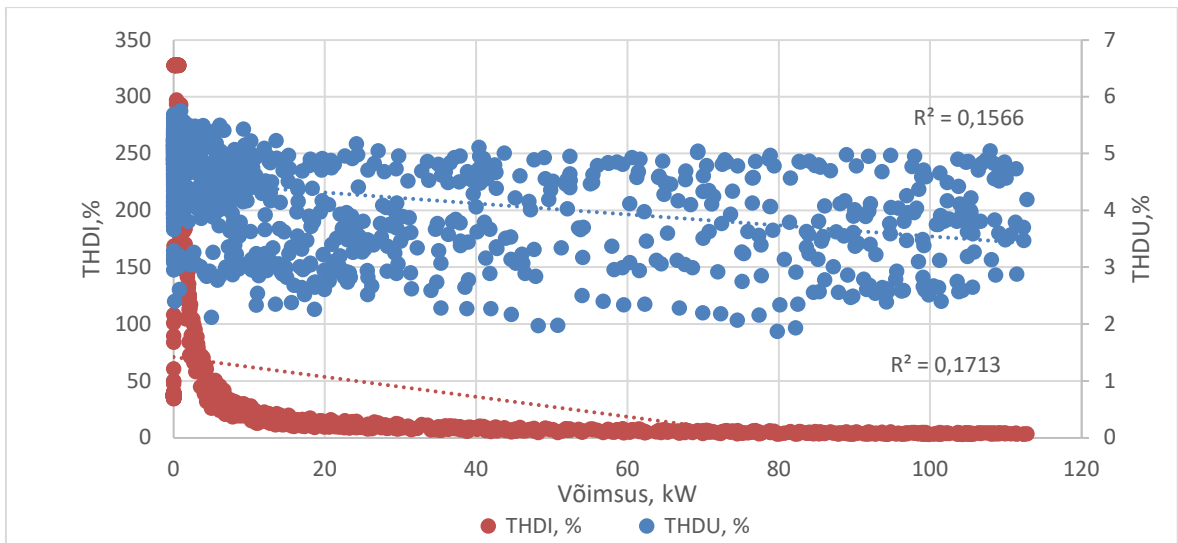
Joonis 3.20 Esvika päikesepargi vooluharmonilised.



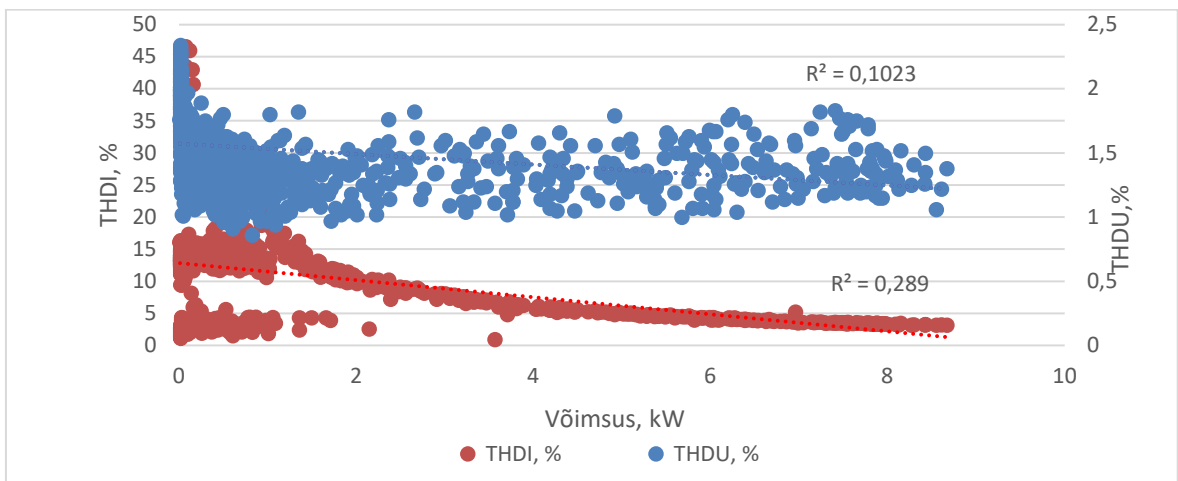
Joonis 3.21. Porimetsa päikesepargi vooluharmonilised.

Joonisel 3.20 kujutatud THD_I graafikul on erinevus võrreldes kahe teise päikesepargiga. Nimelt ei toimu inverteri töörežiimi üleminekut *stand-by* režiimi, mis tähendab seda, et inverter töötab öhtusel ja öisel ajal töörežiimil.

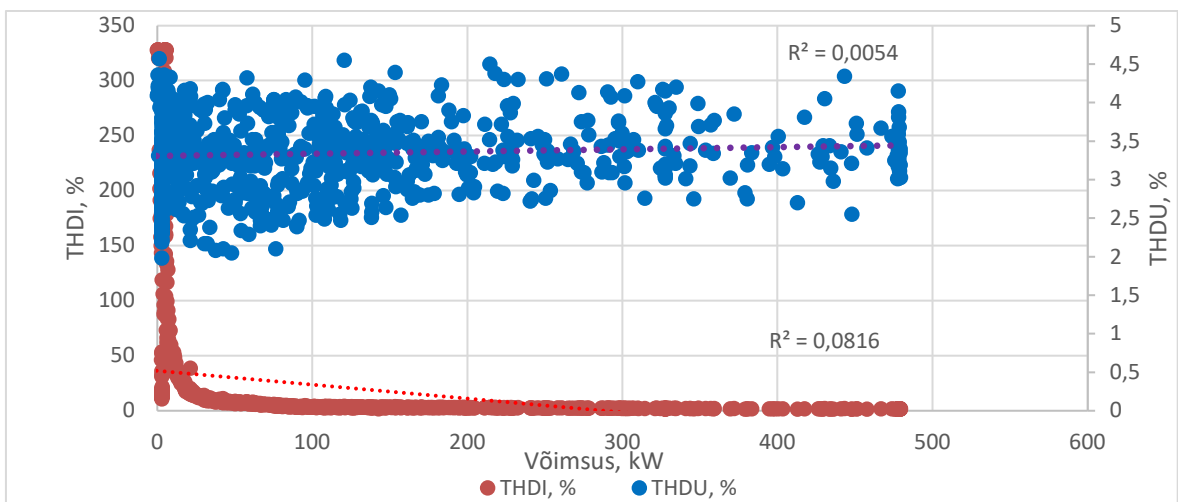
Statistilise analüüsi graafilised tulemused on esitatud allpool joonistel.



Joonis 3.22. Palamuse päikesepargi $THDU$ ja $THDI$ funktsioonigraafik



Joonis 3.23. Esvika päikesepargi $THDU$ ja $THDI$ funktsioonigraafik



Joonis 3.24. Porimetsa päikesepargi $THDU$ ja $THDI$ funktsioonigraafik

Joonisel 3.21 esitatud Palamuse päikesepargi pingeharmonikute THD_U ja vooluharmonikute THD_I korrelatsioon võimsusest ei ole oluliselt suur, olles THD_U korral 0,1566 ning THD_I puhul 0,1713. Seega ei mõjuta päikesepargi tootlikkuse kasv THD_U ja THD_I osakaalu.

Erinevalt Palamuse päikesepargist, oli Esvika päikesepargi inverterite THD_I suhtelised väärtused stabiilsemad ning siirdeprotsessidel ei kajastu niivõrd järske THD_I muutuseid. Siin saadi korrelatsiooniteguri väärtusteks THD_U korral 0,1023 ning THD_I puhul 0,293.

Porimetsa päikesepargi mõõteandmete statistikast järeldub, et THD_U ja THD_I väärtuste sõltuvus võimsusest oli korrelatsiooniteguri väärtus THD_U korral 0,0054 ning THD_I korral 0,0816. Sellest järeldub, et Porimetsa päikesepargi tootlikkuse muutused ei mõjuta pinge- ja vooluharmoniliste taseme muutust ning kõigi päikeseparkide mõõtetulemuste võrdluses oli antud päikesepargi korrelatsiooni tegur kõige väiksem.

3.5. Mõõtetulemuste analüüs

Kõigis kolmes päikesepargis läbiviidud mõõtetulemuste analüüsi tegemisel tuleb arvesse võtta järgnevaid asjaolusid:

- 1) kõik kolm päikeseparki olid erinevate tehniliste näitajatega;
- 2) mõõtmised toimusid erinevatel aegadel ja erinevates kohtades;
- 3) mõõtmiste ajal olid ilmaolustikud erinevad;
- 4) mõõtmisi viidi läbi uutes päikeseparkides.

Arvestades eeltoodud asjaolusid, saab siiski teha järeldused, mis toetuvad mõõtetulemustele ning võtavad arvesse ka päikeseparkide omapära.

Magistritöö eesmärgiks oli uurida päikeseparkide mõju elektrienergia kvaliteedile. Katsemõõtmiste järel saab öelda, et päikeseparkide mõju pingeväärtuste nivoole on tuvastatav. Eriti kerkib see esile suuremate päikeseparkide puhul. Oluliseks komponendiks on ka kohaliku elektrivõrgu tehnilised näitajad ning samas alajamapiirkonnas olevate

tarbijate tehnilised näitajad. Samuti mõjutab pingeniivo tõusu jaotusvõrgu toitekaablid ja trafo pingesätted.

Kui vaadata suurimaid pingeväärtuste vahesid, siis esile peab tõstma Palamuse päikesepargi, mis oli piisavalt võimas, et mõjutada kohalikku pingeniivo taset. Kuna mõõtmisi teostati suvisel ajal, mil päikesepark tootmis maksimaalselt elektrienergiat, siis ei kasutatud kogu päikesepargi toodetud elektrienergiat siseelektripaigaldise jaoks. Palamuse päikesepargi puhul oligi pingekõikumiste niivo kõige suurem.

Samuti tuleb mainida pingeniivoode suurt mõjutatust Porimetsa päikesepargis, kus faasipinge maksimaalne väärtus oli 246,74V ning liinipinge väärtus oli 427,30V. Pikaajalised kõrgema pinge väärtused tekitavad elektriseadmetes täiendavaid kadusid.

Kõige stabiilsema pingeniivooga oli Esvika päikesepargi elektripaigaldis, kus faasipinged jäid vahemikku 228,52V kuni 244,49V. Selle põhjenduseks on päikesepargi väike võimsus ning küllalt suur siseelektrivõrk.

Pinge- ja vooluharmoniliste mõõtetulemuste kokkuvõttena võib öelda, et päikeseparkide koormuse muutumised ei mõjutanud harmooniliste osakaalu suurust. Kõigis mõõdetavates päikeseparkides jäid mõõdetud tulemused standardiga määratud piiridesse. Porimetsa päikesepargi inverterite harmooniliste mõjutuste osakaal oli kõige madalam.

Päikesepargi suurus, tehnilised parameetrid ning ühendusviis kohaliku elektrivõrguga osutusid määravateks teguriteks andmeanalüüsi käigus.

KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on analüüsida taastuvenergia osakaalu Eesti energiabilansis, selle muutuseid ja mõjutusi aastate lõikes ning taastuvenergia elektrijaamade mõju elektrienergia kvaliteedile. Magistritöös kasutatakse andmebaaside statistilisi andmeid, tuginetakse erinevatele teadusartiklitele ning viiakse läbi tehnilised mõõtmised.

Taastuvenergia osakaalu kasvu mõjutavad nii poliitilised kui majanduslikud tegurid. Eestis on viimastel aastatel jõudsal sammul arenenud taastuvenergia osakaal elektrienergia tootmises. Taastuvenergia suurimad energiaallikad on biomass, tuule- ning päikeseenergia. 2019. aastal oli biomassi osatähtsus kogu taastuvenergia arvestuses 57%, tuuleenergia osakaal 35% ning päikeseenergia osakaal 3%.

Võrreldes 2010 aastaga oli fossiilsete kütuste osakaal aastaks 2019 vähenenud 56,9%. Seda suhtarvu on mõjutanud ka Narva energiablokkide sulgemine seoses tööressursi ammendumisega.

Taastuvenergiaallikatest on jätkuvas tõusutrendis päikeseпаркide arendused. Seda on toetanud ennekõike veel osaliselt kehtiv toetusüsteem, mis aga alates 2021 aastal elektrivõrguga liitujatele enam ei kehti. Samuti on pidurdud tuuleparkide arendused, mida võib seletada nii mõnede seadusandlike erisuste piirangutega kui ka toetusmäärade sõltuvusest aastasest toodangust.

Vaatamata eeldatavale taastuvenergia arenduste vähenemisele järgnevate aastate jooksul, võib arvata, et seadusandluses tehakse mõningased korrektiivid taastuvenergeetika osakaalu suurendamiseks. Üheks teguriks on baasvõimsuste planeeritud vähenemine 2030. aastaks, mis on üheks oluliseks teguriks elektrienergia kvaliteedi ja varustuskindluse tagamisel. Tuule- ja päikeseпаркide tootlikkus on tugevalt seotud ilmastikust ning aastaajast. Seega on tegemist muutliku tootmisega energiaallikatega, mis vajavad oma tootmispuudujääkide katmiseks baasvõimusega elektrijaamu.

Päikeseparkide integreerimisel olemasoleva elektrivõrguga tuleb arvestada elektrivõrgu tehnilisi tingimusi ning vajadusel võimalike ümberehituste vajadusel tootja liitumisel oluliste rahaliste väljaminekutega. Tihti on just esmane vajaminev investeering sundinud päikesepargi arendajad oma plaanidest loobuma.

Magistritöös analüüsiti kolmes päikesepargis läbi viidud mõõtmistulemusi. Mõõtmistulemuste alusel hinnati päikeseparkide poolt elektrivõrku genereeritud elektrienergia pingekvaliteedi vastavust standardile EVS-EN 50160:2010. Pingeväärtuste sõltuvus päikesepargi tootlikkusest leidis kinnitust. Samas olid mõjutused sõltuvuses päikesepargi suurusel ning kohaliku elektrivõrgu tehnilistest parameetritest.

Katsemõõtmiste käigus hinnati ka pinge- ja vooluharmoniliste osakaalu sõltuvust päikesepargi tootlikkusest. Harmooniliste väärtused jäid standardi EVS-EN 50160:2010 piiridesse. Samas tuleb märkida, et mõõtmised teostati uutes päikeseparkides, kus inverterid olid uued ning väikese töötundide arvuga. Millised on mõõtetulemused 2030. aastal, huvitab töö autorit ennastki.

Taastuenergeetika on üha suuremat osakaalu omav energeetika osa, mis omab ka suurt keskkonna aspekti. Taastuenergia suurenev osakaal nõuab samas ka põhjalikke uuringuid ning tehnilisi teadmisi nende sidumisel avalike elektrivõrkudega.

KASUTATUD KIRJANDUS

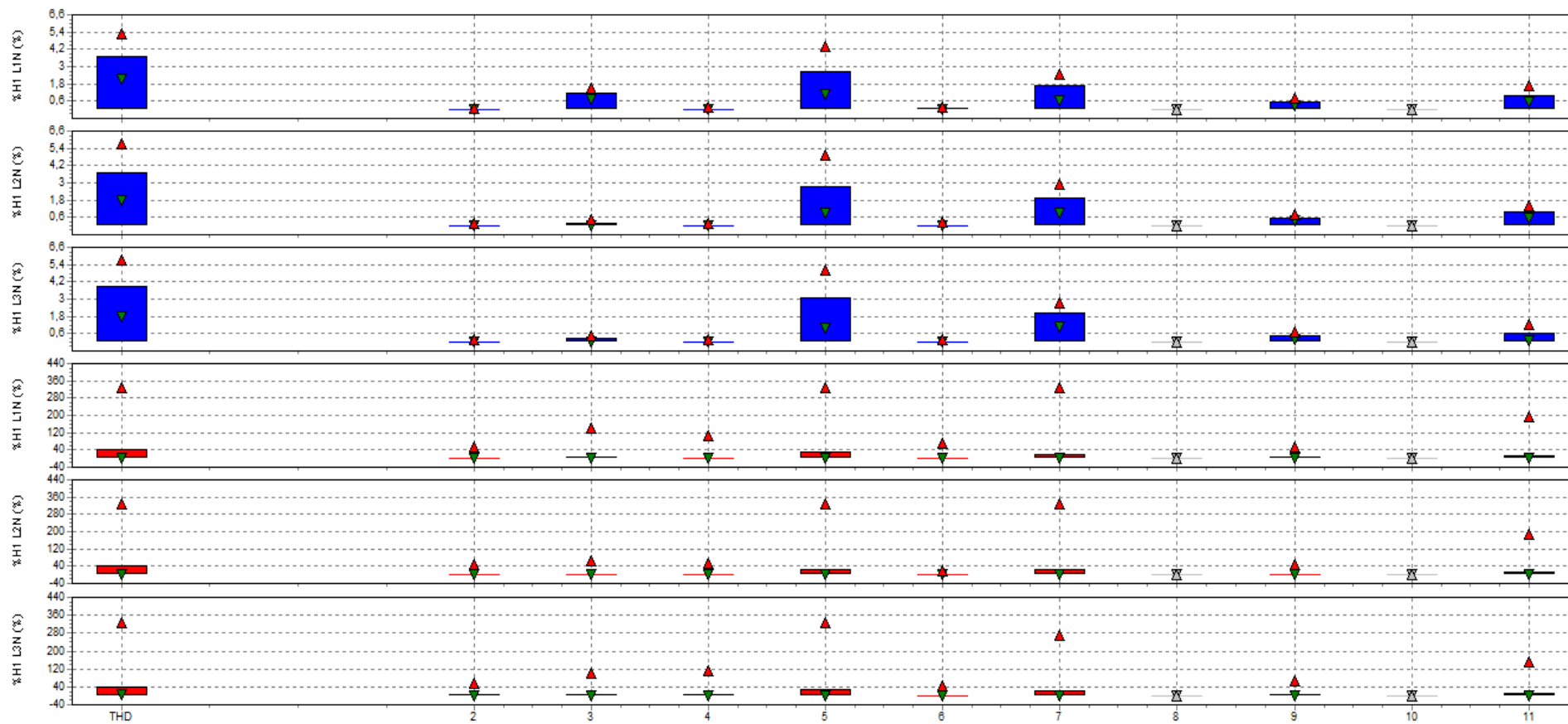
1. Euroopa Parlamendi ja Nõukogu direktiiv 2009/28/EÜ. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0028&from=EN> (11.03.2019).
2. Teabelehed Euroopa Liidu kohta. Taastuvenergia. <http://www.europarl.europa.eu/factsheets/et/sheet/70/taastuvenergia> (14.03.2019)
3. Energiamaajanduse arengukava aastani 2030. [veebileht] https://www.mkm.ee/sites/default/files/enmak_2030.pdf (18.03.2019).
4. Elering. Eesti elektrisüsteemi varustuskindluse aruanne 2019. [veebileht] https://elering.ee/sites/default/files/public/Infokeskus/elering_vka_2019_web_final2.pdf (17.05.2019).
5. Tarbimine ja tootmine. Elering. [veebileht] <https://dashboard.elering.ee/et/system/production-and-consumption> (18.05.2020).
6. Elektriturseadus. (vastu võetud 11..02.2003, jõustunud 01.10.2019). – *Riigi Teataja* <https://www.riigiteataja.ee/akt/113032019045?leiaKehtiv> (15.05.2019).
7. Elering. Toodang ja prognoos. [veebileht]. <https://elering.ee/toodang-ja-prognoos> (19.05.2020).
8. Võrgueeskiri. (vastu võetud 26.06.2003, jõustunud 27.04.2019). – *Riigi Teataja* <https://www.riigiteataja.ee/akt/12831412?leiaKehtiv> (14.05.2019).
9. Tuulikud ja tuulepargid Eestis. Senine planeerimine. Probleemid. Ettepanekud lahendusteks. 2010. https://energiatalgud.ee/img_auth.php/b/bd/Vaab%2C_T._jt_Tuulikud_ja_tuulepargid_Eestis.pdf (14.05.2019).
10. Elering. Wind Power in Estonia. An analys of the possibilities and limitations for wind power capacity in Estonia within the next 10 years. 2010. [veebileht] https://elering.ee/sites/default/files/attachments/Tuuleenergia_Eestis.pdf (24.06.2019).
11. Tuuleenergia Assotsatsioon. Olemasolev tuuleenergia. [veebileht] <http://www.tuuleenergia.ee/about/statistika/olemasolev/> (17.06.2019).
12. Enefit Green. [veebileht]. <https://www.enefitgreen.ee/et/uudised/avaleht/-/newsv2/2019/03/12/-enefit-greeni-tuulepargid-tootsid-veebruaris-rekordkoguse-elektrit> (12.06.2020).
13. Enefit Green. Taastuvenergia. [veebileht] <https://www.enefitgreen.ee/energia-tootmine> (17.08.2019).
14. Taastuvenergia aastaraamat 2018. Eesti Taastuvenergia Koda. [on-line]

- <http://www.taastuvenergeetika.ee/wp-content/uploads/2019/06/ETEK-Taastuenergia-aastaraamat-2018.pdf> (16.03.2020)
15. Elering. Elektrituru käsiraamat. Tallinn 2016. [on-line]
[.https://elering.ee/sites/default/files/attachments/elering_elektrituru_kasiraamat_2016_w eb_1.pdf](https://elering.ee/sites/default/files/attachments/elering_elektrituru_kasiraamat_2016_w eb_1.pdf) (17.05.2020).
16. Energiatalgud. Hüdroenergia ressurs. [on-line]
https://energiatalgud.ee/index.php/H%C3%BCdroenergia_ressurss?menu-49#cite_note-5 (14.05.2019)
17. Eesti Loodus. [veebileht] <http://www.eestiloodus.ee/index.php?artikkel=1993> (07.06.2019).
19. Elektriturseadus. (vastu võetud 11.02.2003, viimati jõustunud 01.10.2019). - *Riigi Teataja* <https://www.riigiteataja.ee/akt/113032019045?leiaKehtiv> (12.04.2020).
20. Energiatalgud. Elektri tootmine. [on-line]
https://energiatalgud.ee/index.php/Elektri_tootmine?menu-81 (24.05.2019).
21. Eesti Biogaas. Uudiskiri. [e-ajakiri] http://eestiabiogaas.ee/wp-content/uploads/2015/06/EBA-3_uudiskiri-jaanuar_m%C3%A4rts_2019.pdf (04.06.2019).
22. Enefit Green. [veebileht] <https://www.4energia.ee/tootmisuksused> (25.06.2019).
23. Eesti Biogaas. Uudiskiri. [e-ajakiri] http://eestiabiogaas.ee/wp-content/uploads/2018/04/EBA-2_uudiskiri-jaanuar-aprill_final_2018.pdf (05.06.2019).
24. Elering. Taastuenergia tasu. [veebileht] <https://elering.ee/taastuenergia-tasu> (02.05.2020).
25. Taastuvast energiaallikast ja tõhusa koostootmise režiimil energia tootmiseks korraldatava vähempakkumise tingimused ja kord. (vastu võetud 07.11.2019, jõustunud 11.11.2019). - *Riigi Teataja* <https://www.riigiteataja.ee/akt/108112019004> (18.03.2020).
26. Elering. Taastuenergia toetus. [veebileht] <https://elering.ee/taastuenergia-toetus> (12.04.2020).
27. **T. Lehtla, T. Vinnal.** Elektrivarustuse tulevikuvisionid. Tallinn (2016). TTÜ Kirjastus. 292 lk.
28. **Benjamin Bayer, Patrick Matschoss, Heiko Thomas, Adela Marian.** Renewable Energy. The German experience with integrating photovoltaic systems into the low-voltage grids. [e-ajakiri]

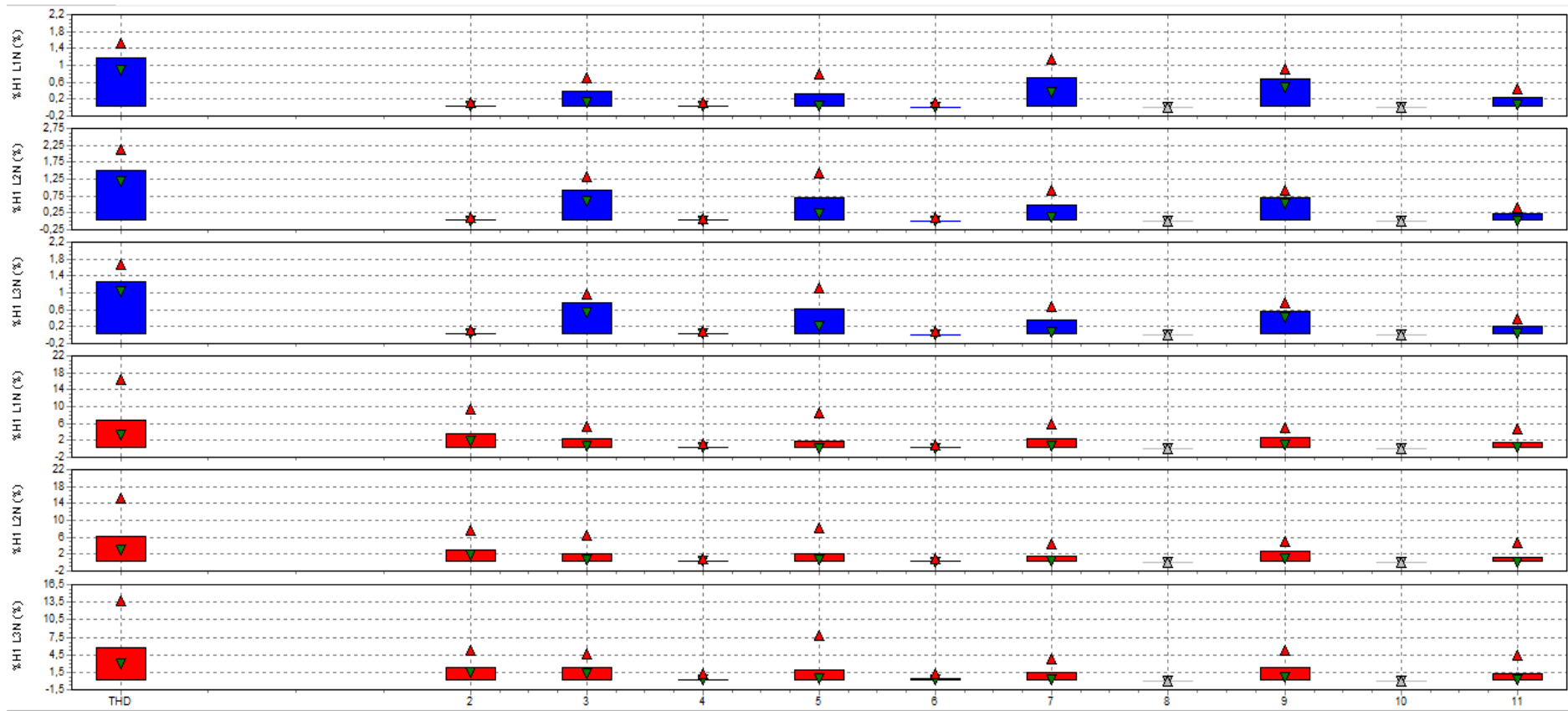
- <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0960148117311461?token=454E80127D3BE528F0CDE93AC70A5FE2412BF48817395814DD733E514D10EA2CC01CFA1BB5FEA01779308F2464ABE896> (08.04.2020)
29. **Mirco Sieg (2017)** Zertifizieren Solarkabel reichen oft nicht. <https://www.pv-magazine.de/2017/05/31/zertifizierte-solarkabel-reichen-oft-nicht/> (28.04.2020)
30. **Klaus Prume, Jochen Viehweg (2015)**. Bewertung des Brandrisikos in Photovoltaik-Anlagen und Erstellung von Sicherheitskonzepten zur Risikominimierung. http://www.pvbrandsicherheit.de/fileadmin/downloads_fe/Leitfaden_Brandrisiko_in_PV-Anlagen_V01.pdf#page=10&zoom=100,90,466 (15.05.2020)
31. Avalike võrkude pingeline tunnustused. Eesti standard EVS-EN 50160:2010 + A1:2015 [veebileht] <https://www.evs.ee/et/evs-en-50160-2010-a1-2015> (18.03.2020)
32. **Nye Longman**. Top 10 solar-producing countries. [e-ajakiri] <https://www.energydigital.com/renewable-energy/top-10-solar-producing-countries> (21.04.2020).

LISAD

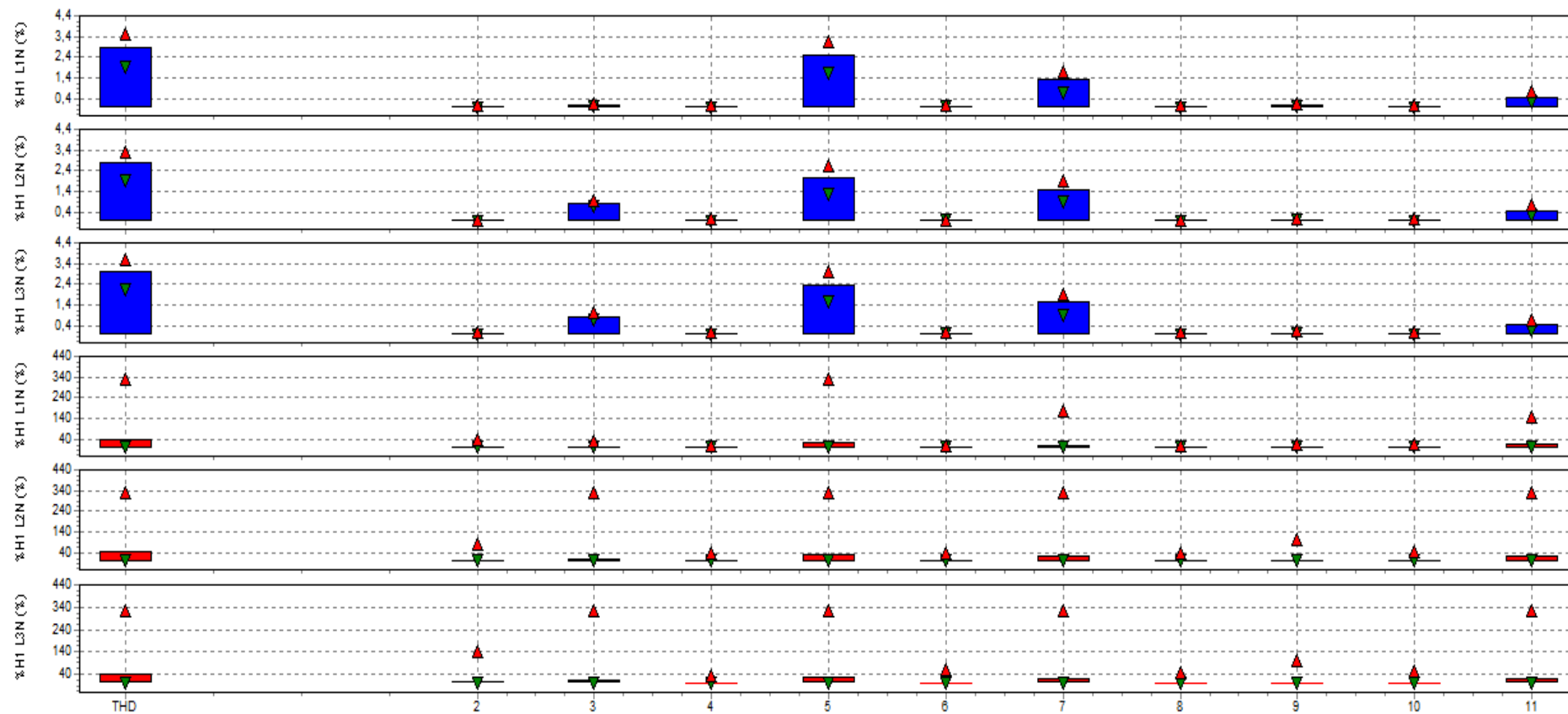
Lisa 1. Palamuse päikesepargi pinge- ja vooluharmoniliste histogramm.



Lisa 2. Esvika päikesepargi pinge- ja vooluharmoniliste histogramm.



Lisa 3. Porimetsa päikesepargi pinge- ja vooluharmonooniliste histogramm.



Lihtlitsents

Mina, Urmas Raudsepp,

sünniaeg 16.12.1973,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö Taastuvenergiaallikate osakaal ja mõju elektrienergia kvaliteedile, mille juhendaja on Erkki Jõgi,
 - 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
 - 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
 - 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor Urmas Raudsepp /Allkirjastatud digitaalselt/
(allkiri)

Tartu, 03.06.2020

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

Erkki Jõgi /Allkirjastatud digitaalselt/
(juhendaja nimi ja allkiri)

03.06.2020
(kuupäev)