



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**EESTI ELEKTRI TARBIMISE
TAASTUVENERGIAGA KATMISE TUNNIPÕHINE
ANALÜÜS ENERGYPRO TARKVARA ABIL**

**ANALYSIS OF COVERING ESTONIAN NATIONAL
ELECTRICITY DEMAND WITH RENEWABLES IN HOURLY
BASIS USING ENERGYPRO SOFTWARE**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Silver Vahstein

Üliõpilaskood 206257EAAB

Juhendaja: Reeli Kuhi-Thalfeldt, vanemlektor

Tallinn 2024

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

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

"....." 20.....

Autor: Silver Vahstein

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 20.....

Juhendaja: Reeli Kuhi-Thalfeldt

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

".....".....20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Silver Vahstein

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Eesti sisemaise elektri tarbimise taastuenergiaga katmise tunnipõhine analüüs, energyPRO tarkvara abil“,

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on Reeli Kuhi-Thalfeldt,

(juhendaja nimi)

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

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

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

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

_____ (kuupäev)

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

Elektroenergeetika ja mehhatroonika

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Silver Vahstein, 206257EAAB

Õppekava, peeriala: EAAB16, Elektroenergeetika ja mehhatroonika

Juhendaja(d): vanemlektor, Reeli Kuhi-Thalfeldt, 5186241

Lõputöö teema:

(eesti keeles) „Eesti elektri tarbimise taastuvenergiaga katmise tunnipõhine analüüs, energyPRO tarkvara abil“

(inglise keeles) „Analysis of covering Estonian national electricity demand with renewables in hourly basis using energyPRO software“

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Selgitada välja, mil määral on võimalik tunnipõhiselt katta Eesti sisemaist elektri tarbimist tuule- ja päikeseenergiast toodetud elektriga (10 aasta mõõteandmeteid kasutades)
2. Mil määral on võimalik kõrgema elektri tarbimisega päevadel nende tootmisüksuste toodanguga arvestada?
3. Milline oleks juhitavate tootmisvõimsuste vajadus?
4. Mil määral oleks täiendavalt abi salvestite kasutamisest

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Modelleerimise teostamine	01.03.2024
2.	Uuringu tulemuste kirjeldamine	22.03.2024
3.	Kokkuvõtte koostamine	07.04.2024

Töö keel: Eesti

Lõputöö esitamise tähtaeg: "13" mai 2024a

Üliõpilane: Silver Vahstein ".....".....20.....a
/allkiri/

Juhendaja: Reeli Kuhi-Thalfeldt ".....".....20.....a
/allkiri/

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

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA	6
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	7
SISSEJUHATUS	8
1. MODELLEERIMINE ENERGYPRO TARKVARAGA	10
1.1 Päikesepargi modelleerimine	11
1.2 Maismaa tuuleparkide modelleerimine	13
1.3 Meretuuleparkide modelleerimine	15
1.4 Salvesti modelleerimine	16
1.5 Eesti ühendused naaberriikidega	17
2. 2014-2023 aasta andmetega modelleerimise tulemused	18
2.1 Toodang ja võimsustegurid	18
2.2 Taastuvenergia toodangu roll tarbimise katmises	20
2.3 Elektrienergia impordi vajadus	21
2.4 Elektrienergia eksport	28
3. Tootmise analüüs kõrgeima tarbimisega päevadel	29
3.1 Toodangu analüüs	29
3.2 Elektrienergia impordi vajadus	32
3.3 Elektrienergia eksport suurima tarbimisega päevadel	34
4. Salvesti kasutamise ja tulemuste analüüs	36
4.1 Juhitavate tootmisvõimsuste vajalikkus	41
KOKKUVÕTE	42
SUMMARY	44
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	46
LISAD/APPENDICES	47

EESSÕNA

Antud töö on Tallinna Tehnikaülikooli õppejõu väljapakutud teema põhjal ja koostatud elektroenergeetika ja mehhatroonika bakalaureuse tudengi poolt. Töö initsiatiiviks oli teada saada, kas ja kui palju saab aastaks 2030 planeeritavate taastuvenergia allikate peale loota, eriti talvekuudel, kui tarbimine on suur ja päikeseenergia panus on väike. Töö aluseks sai võetud modelleerimine energyPRO tarkvaraga, kust saadi ka ilmastiku andmed ja mis andis välja lõpuks aastased tulemused.

Kuna tuule- ja päikesepargid on ilmastikust sõltuvad ja inimkond ilmastikku kontrollida ei saa, siis on vajalik teada, mil määral oleks võimalik katta elektri tarbimist ainult tuule- ja päikeseelektrijaamadega ning kui palju on vaja siis täiendavalt energiat sisse importida. Kuna planeeritavad võimsused on pea kahe kordselt suuremad kui maksimaalne tarbimine, siis tekib eelduslikult ka üleliigset energiat, mida oleks hea salvestada, et siis hiljem tarbimise katmise eesmärgil kasutada.

Märksõnad: tuule- ja päikeseenergeetika, salvesti, taastuvenergia, energyPRO, bakalaaurusetöö.

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

ERA	ECMWF Reanalysis
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
NOCT	Nominaalne töötemperatuur
jms	ja muu selline
GWh	gigawatt-tund
MW	megawatt-tund
km	kilomeeter

SISSEJUHATUS

Euroopa liit on üheselt võtnud eesmärgiks vähendada aastaks 2023 kasvuhuonegaaside netoheidet -55% võrreldes 1990. aastaga. Põhiliselt on heitkoguste vähendamine ette võetud sellistes sektorites nagu: energia, transport, hoonestus, tööstus ja põllumajandus. Kõige suurem potentsiaal süsinikuheite vähendamisel on energiasektoril ja selleks nähakse ette taastuvate energiaallikate nagu tuule-, päikese- ja hüdroenergia ning biomassi kasutusele võttu. Transpordis plaanitakse muuta bensiini- ja diiselmootoreid ökonoomsemateks ja pikemas perspektiivis asendada need hübriid ja elektriautodega. See tähendab ühtlasi elektri tarbimise kasvu.[1]

Eesti on Euroopa Liidu liikmesriigina tulnud selle eesmärgiga kaasa ja seadnud endale selge teekonna kasvuhuonegaaside heite vähendamiseks 80% võrra aastaks 2050. Juba aastaks 2030 plaanitakse „Eesti riikliku energia- ja kliimakava aastani 2030“ kohaselt, et taastuvenergia osakaal summaarses energia lõpptarbimises on 65% ja taastuvelektri osakaal elektrienergia tootmises on 100%.

Tootmismahdade kasvu rakendatakse meretuule- ja maismaatuuleparkide, päikeseenergeetika ning energiasalvestuste valdkondades. See tähendab, et 2030. aastaks on Eestis ette nähtud 1310 MW maismaatuuleenergiat, 1000 MW meretuuleenergiat ja 1200 MW päikesetuuleenergiat [2]. Lisaks nendele peaks koos hüdroenergia ja biomassiga olema taastuvenergia aastane toodang 9400 GWh.

Kuigi planeeritud kogutoodang on suurem kui Eesti summaarne elektritarbimine, mis on ~8 TWh (2020. aasta andmed), siis taastuvenergia tootmisvõimsused ei ole planeeritavad ja juhitavad [3]. Kuna Eesti energiatootmine põhineb suurelt tuule- ja päikeseenergeetikal, siis võib juhtuda, et ideaalsetes oludes võib taastuvenergia toodang ületada pea kahe kordselt tarbimise, kuid seevastu tundidel, kui tuult ei ole ja päike ei paista, on Eesti energiasüsteem suures energiadefitsiidis. Energia- ja kliimakava on küll ette näinud ~366 MW väärtuses biomassil põhinevaid juhitavaid soojuselektrijaamu, millest siiski hetkedel kui energiatarbimine on maksimaalne ehk ~1500 MW, jääb ligikaudu 1200 MW puudu. Seetõttu on täiendavat salvestus- ja tootmisvõimsuste rajamise vajaduse välja selgitamiseks vajalik modelleerida ja analüüsida 2030. aastaks planeeritud tootmisvõimsuste juures Eesti elektri tootmist ja tarbimist tunnipõhiselt. Töö eesmärgiks on hinnata, kui suurel määral on võimalik tunnipõhiselt tuule- ja päikeseenergiast elektri tootes katta sisemaist elektri tarbimist ning mil määral on võimalik kõrgema elektri tarbimisega päevadel nende tootmisüksustega arvestada kasutades selleks modelleerimist energyPRO tarkvara abil. Kuna tuleviku ilmastiku ja tarbimise andmeid ei ole võimalik kasutada, siis kasutatakse statistikaliste äärmuste vähendamiseks viimase 10 aasta andmeid. Analüüsis kajastub,

kas nende võimsustega saab katta energia- ja kliimakava etteseadud tootmismahтусid ning kui palju on endiselt vaja n.ö juhitavaid võimsusi.

Töö sisaldab kolme osa:

1. viimase 10 aasta mõõteandmetega modelleerimise tulemuste analüüs
2. iga aasta viie kõige kõrgeima tarbimisega päevade tootmise analüüsi
3. salvesti kasutamise vajaduse ja kasulikkuse analüüsi.

See uurimistöö on oluline, et hinnata taastuvate energiaallikatega seotud tootmisvõimsuse olulisust mitte ainult aastaringelt, vaid ka kõrgeima tarbimisega päevadel. Oluline on analüüsida tunnipõhiselt taastuveni energiaga arvestamise võimalusi. Kuna planeeritud tootmisvõimsused võivad optimaalsetes tingimustes ületada tarbimise peaaegu kahekordselt, on vajalik hinnata ka energiasalvestussüsteemi vajadust ja kasulikkust.

1. MODELLEERIMINE ENERGYPRO TARKVARAGA

Antud peatüki eesmärgiks on tutvustada modelleerimise meetodit ja vajaminevate parameetrite valikut. Selles töös kasutatakse energyPRO tarkvara, mis võimaldab modelleerida ja analüüsida erinevate taastuvenergiaallikate, nagu päikesepaneelid, elektrituulikud ja salvestussüsteemide, mõju elektritarbimisele.

EnergyPRO on tarkvara, mis on loodud energiasüsteemide modelleerimiseks ja analüüsimiseks. Selle abil saab modelleerida erinevate energiaallikate tootmist ja nende integreerimist elektrivõrku. Kogu modelleerimise osa on tehtud energyPRO tarkvaraga ja sealt saadud tulemusi on vastavalt soovile töödeldud Excelis.

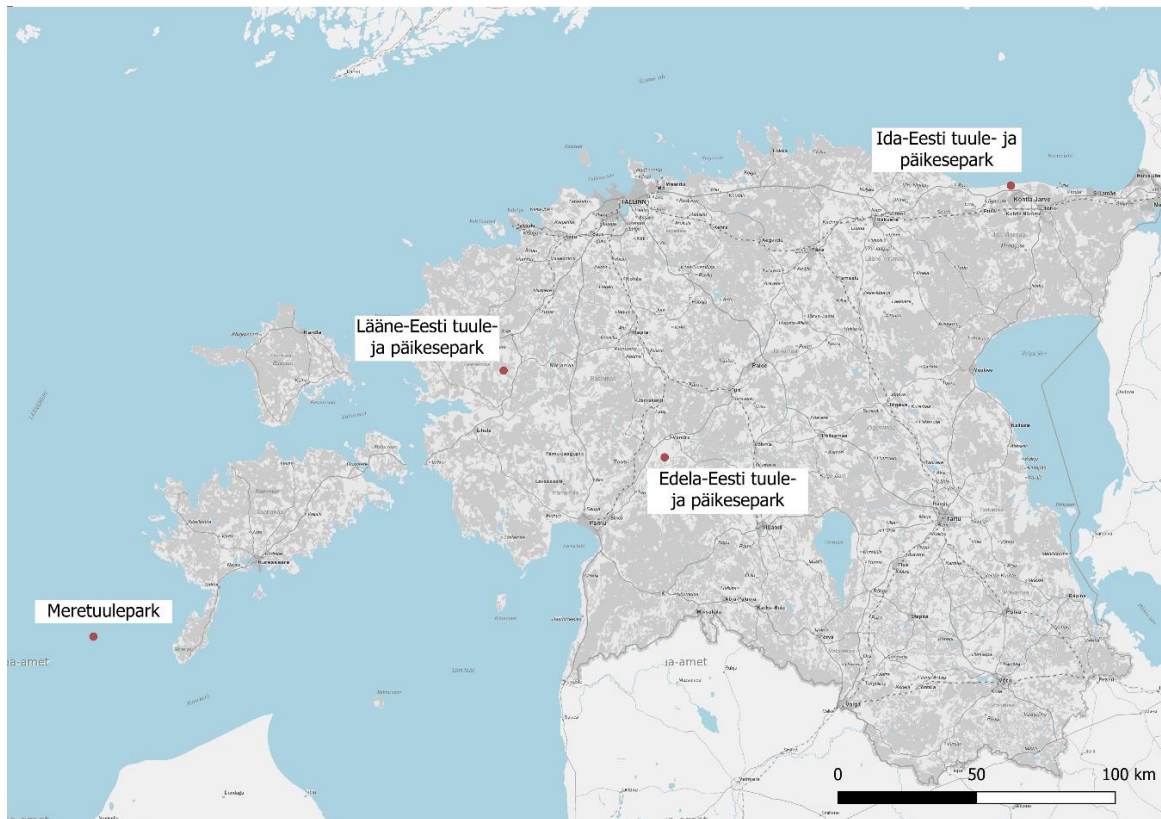
EnergyPRO arvutab tunnipõhiselt vastavalt ilmastikuandmetele elektrijaamade toodangud. Lisaks leiab ta vastavalt tarbimise aegreale ka energiabilansi, mille kaudu leitakse, kui palju energiat läheb ekspordiks, või on vaja hoopis juurde importida. EnergyPRO sisendandmeteks on päikesekiirguse, välistemperatuuri, tuulekiiruse ja elektri tarbimise tunnipõhised mõõteandmed ning päikesepaneelide, elektrituulikute ja salvestite töö modelleerimiseks vajalikud tehnilised andmed. Modelleerimiseks vajaliku päikesekiirguse, välistemperatuuri ja tuulekiiruse mõõteandmeid on võetud energyPRO andmebaasist. Elektri tarbimise tunnipõhised andmed on saadaval Eleringi kodulehelt. Elektrituulikute tehnilised andmed on võetud tuulikute statistikalehelt ning salvesti mudeldamise aluseks on võetud Paldiski energiasalve alusandmed.

Peatükis on kirjeldatud ka taastuvenergiaparkide asukohti ja nimivõimsusi. Lisaks on toodud välja, millised on konkreetse koha ilmastiku andmed ning milliseid tehnilisi elektrijaama parameetreid on modelleerimisel kasutatud.

Kuna Eesti on ühendatud elektriliselt naaberriikidega, siis on selles peatükis vaadatud ka juba olemasolevad ühendusi naaberriikidega ning hinnatud nende läbilaskevõimet ja potentsiaali seoses taastuvenergeetika võimsuste lisandumisega.

Tabel 1.1. Kasutatud võimsuste ja seatud toodangueesmärkide suurused

Tootmisüksus	Võimsus, MW	Aastane toodang, GWh
Maismaatuulepargid	1310	3124
Meretuulepargid	1000	3715
Päikeseelektrijaamad	1200	1000
Kokku	3510	7839



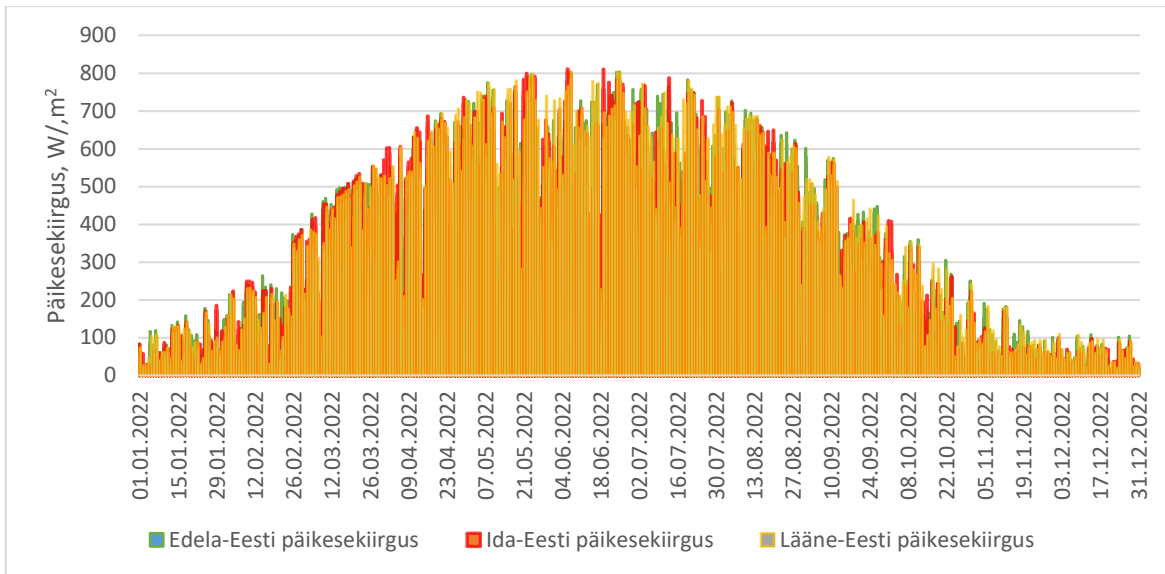
Joonis 1.1. Modelleerimisel kasutatavate elektrijaamade asukohad

1.1 Päikesepargi modelleerimine

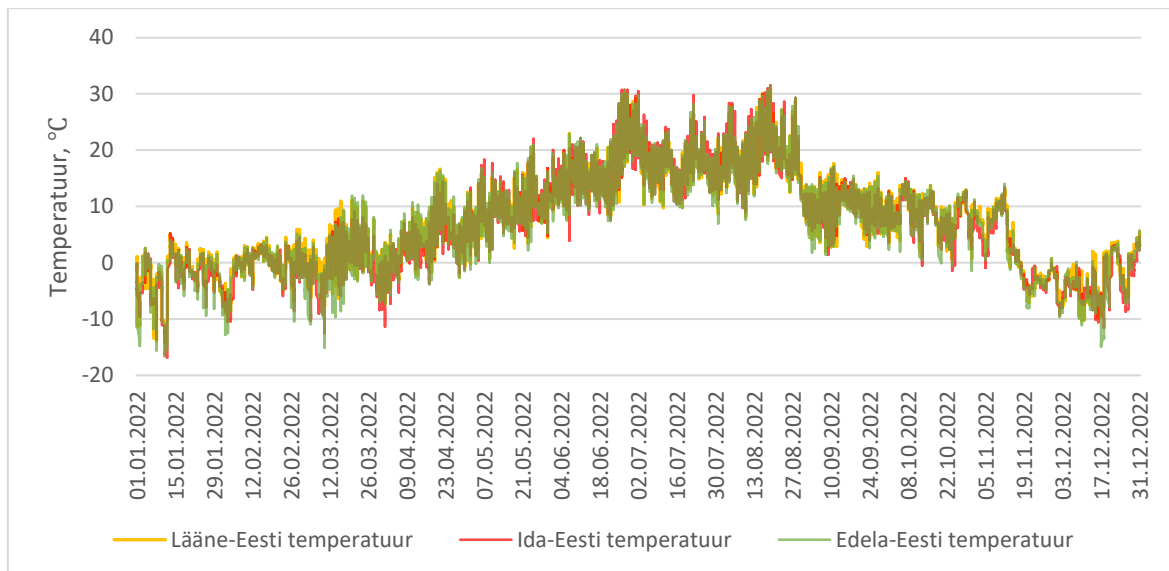
Eesti eesmärk aastaks 2030 on kasvatada päikeseelektri jaamade tootmisvõimsus 1200 MW-ni. 1200 MW on seega võetud ka modelleerimise aluseks. Selleks, et jaotada päikeseparke üle Eesti on mudelisse sisestatud 3 erinevat päikeseelektri jaama asukohta, kus igaühe elektriline võimsus on 400 MW.

Tabel 1.2 Taastuvenergiaparkide asukohad ja andmed

Elektri jaama nimi	Jaama asukoht	Kasutatav ilmamõõtepunkt	Mõõtepunkti koordinaadid
Lääne-Eesti tuule- ja päikesepark	Kullamaa	ERA5	58.88N 24.00E
Ida-Eesti tuule- ja päikesepark	Kohtla-Järve	ERA5	59.44N 27.20E
Edela-Eesti tuule- ja päikesepark	Vändra	ERA5	58.59N 25.00E



Joonis 1.2 2022. aasta päikesekiirguse graafik kolmest erinevast asukohast



Joonis 1.3 2022. aasta temperatuuri graafik kolmest erinevast asukohast

Modelleerimisel kasutatakse tinglike elektrijaamade nimedena Lääne-Eesti päikesepark, Ida-Eesti päikesepark ja Edela-Eesti päikesepark (vaata tabel 1.2), mille asukohtadeks on vastavalt Kullamaa, Kohtla-Järve ja Vändra. Jaotamise eesmärgiks on lisada mudelisse varieeruvus, kus mõni päev on ühel pool Eestit rohkem päikesekiirgust kui teises, mis tuleneb pilvede olemasolust, kihtide paksusest ja liikumistest ning seetõttu on elektri toodang erinevates kohtades erinev. Päikeseparkide asukohti saab näha joonisel 1.1. Kasutati ilmajaama ERA5, mis on viienda põlvkonna ECMWF-i globaalse kliima ja ilmastiku reanalüüs. Reanalüüs ühendab mudeliandmed ja vaatlused kogu maailmast ülemaailmselt terviklikuks ja järjepidevaks andmekoguks, kasutades füüsikaseadusi, pakkudes seeläbi tunnipõhiselt ilmastiku andmeid [4].

Joonistelt 1.2 ja 1.3 on näha 2022. aasta päikesekiirguse ja temperatuuri andmeid kolmest erinevast asukohast. Nagu joonistelt näha, siis Eesti eri piirkondades päikesekiirgus ja temperatuur erinevad vaid vähesel määral. Eestis on suhteliselt väike ala ja ühtlane kliima, mis tähendab, et päikesekiirguse ja temperatuuri erinevused piirkondade vahel on minimaalsed. Täpsemate tulemuste nimel on siiski võetud analüüsi kolme erineva asukohaga ilmajaamade andmed.

Tabel 1.3 Päikeseпаркide modelleerimistingimused

Parameeter	Väärtus
Paneeli võimsus	400 W
Temperatuuri koefitsient	-0,37%/°C
Nominaalne töötemperatuur (NOCT)	45°C
Kaldenurk maapinna suhtes	35°
Asimuut lõuna ilmakaare suhtes	0°
Inverteri kaod	10%

Päikesepargi modelleerimiseks on võetud aluseks tüüpiline maapaigaldusega päikeseпаркide lahendus Eestis. Kuna modelleerimiseks on kogu Eesti päikeelektrijaamade võimsused jagatud justkui kolme väga suure võimsusega päikesepargi vahel, siis ühe paneeli võimsus, suurus ja mudeli täpne karakteristik ei mängi rolli. Kõiki päikeseпаркide projekteerimise tingimusi saab näha tabelis 1.3 EnergyPRO arvutab tunni täpsusega iga elektrijaama väljastatava võimsuse ja selleks on tal päikesepargi puhul vaja päikesekiirguse ja temperatuuri andmed, mis on olemas energyPRO enda andmebaasis.

Päikeseelektrijaamad on ühendatud tarbimise ja võrguga, miskaudu saab arvutada ekspordi ja impordi tulemusi.

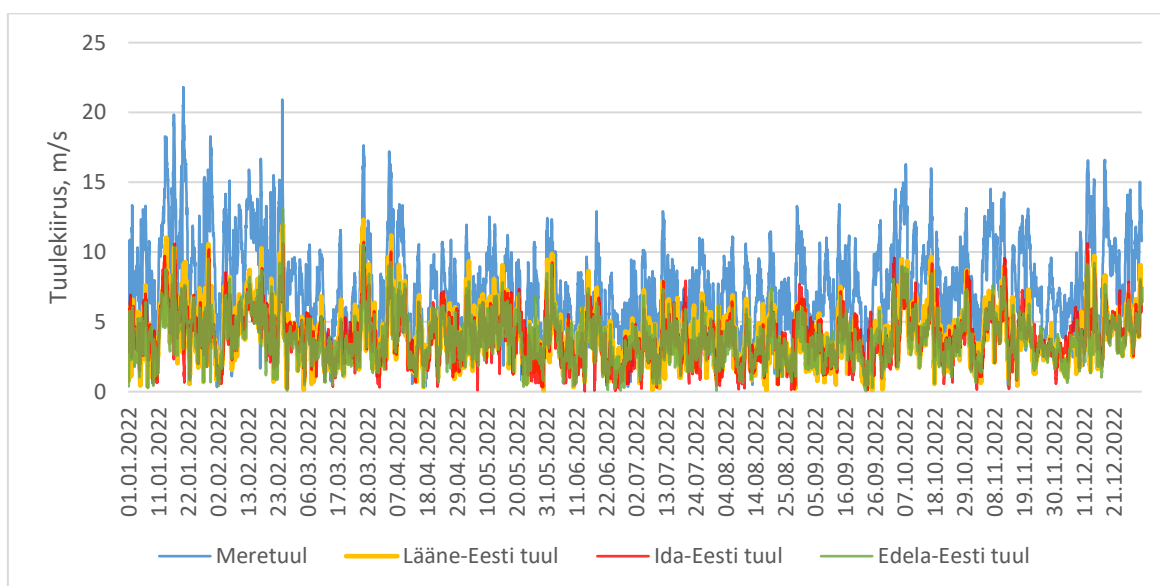
1.2 Maismaa tuuleпаркide modelleerimine

Maismaa tuuleпаркide planeeritav võimsus on kõige suurem ja ulatub lausa 1300 MW-ni. Sarnaselt päikeseelektrijaamadele on ka tuuleпаркide koguvõimsus jaotatud üle Eestiliselt ja jagatud kolme tuulepargi vahel ära. Modelleerimisel kasutatakse parke nimetustega Lääne-Eesti tuulepark, Edela-Eesti tuulepark ja Ida-Eesti tuulepark ning iga tuulepark saab võimsuseks 433 MW (vaata tabel 1.2). Maismaatuuleпаркide asukohad on samad, mis päikeseпаркidel.

Tabel 1.4 Maismaaelektrituuliku sisendandmed

Parameeter	Väärtus
Hellmanni eksponent	0,2
Tuule mõõtmise kõrgus	10 m
Rootori kõrgus	150 m

EnergyPRO tarkvaras, ei saa määrata iga elektrituuliku paigutust tuulepargis ning seetõttu seda selles töös ei kajastata. Küll on aga oluline modelleerimise sisend, elektrituulikute võimsuskõver, mis näitab tuuliku väljundvõimsuse sõltuvust tuuletugevusest. Maismaa elektrituulikute võimsuskõverat on näha Joonisel 1.5. Arvutuste tegemiseks vajalikud sisendandmed on näha tabelis 1.4. Elektrituulikute kõrguseks on valitud 150 meetri kõrguse rootoriga tuulikud. Maismaal on tuulemõõtmise kõrguseks valitud 10 meetrit. Hellmanni eksponent võeti 0,2. Nende andmetega tehti esimesed katsetused ja kuna elektrituulikute võimsuskõverad olid rahuldavad, siis kasutati neid ka modelleerimisel.

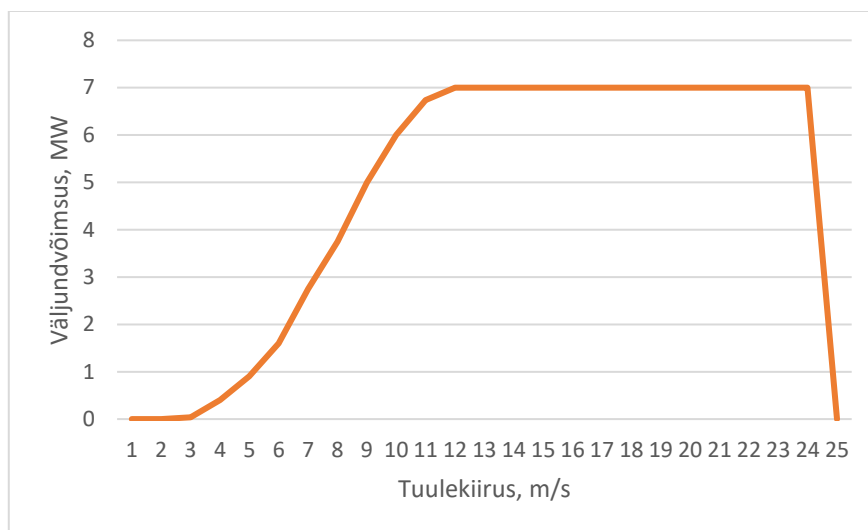


Joonis 1.4 2022. aasta tuulekiiruse graafik neljast erinevast mõõtepunktist

Elektrituulikute toodetud energia arvutamiseks vajaminevaid tuulekiiruse andmeid saab energyPRO enda andmebaasist. Tabelist 1.2 on näha, et tuulekiiruse andmete saamiseks kasutatakse sama andmebaasi, mis päikeseparkide puhul. Joonisel 1.4 on näha 2022. aasta tuulekiiruse andmed neljast erinevast asukohast. Kolmest maismaal asuvast mõõtepunktist ja ühest merel asuvast mõõtepunktist.

Nagu jooniselt näha, on tuulekiiruse andmed asukohati märksa muutlikumad kui temperatuuri ja päikesekiirguse andmed. Seega on soovituslik kasutada erinevaid mõõtepunkte tuuleparkide toodangu modelleerimiseks.

Nagu päikeseelektrijaamad on ka tuulepargid ühendatud võrguga. Tuuleparkide asukohta saab samuti näha Jooniselt 1.1.



Joonis 1.5 Maismaatuuliku võimsuskõver

1.3 Meretuuleparkide modelleerimine

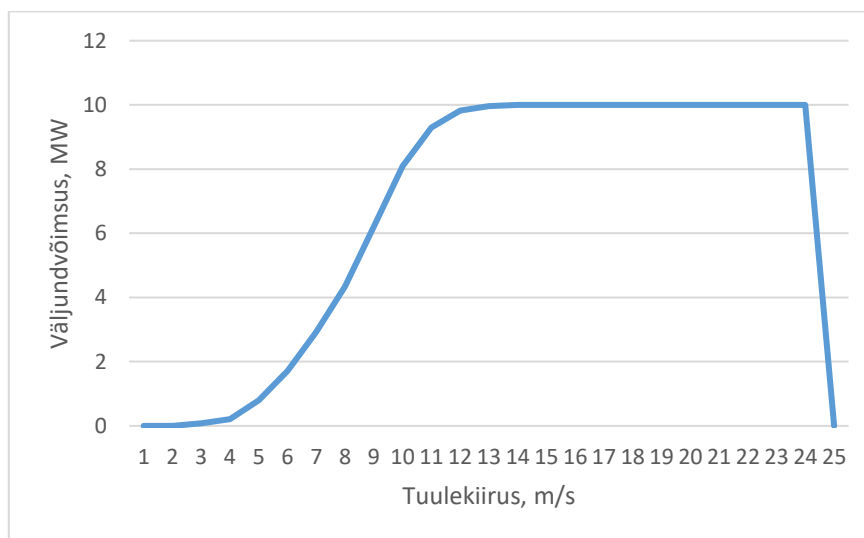
Erinevalt eelnevatest parkidest pole Eestis veel töö koostamise ajaks ühtegi meretuuleparki ehitatud, seetõttu on nende modelleerimine tehtud ainult teoreetilisel baasil. Meretuulepargi võimsuseks on seatud 1000 MW ja see on mudelis käsitletud ühe suure tuulepargina, kuna merel on tuuletingimused stabiilsemad. Meretuulepargi asukohta on näha jooniselt 1.1. Asukohaks on valitud Saaremaa läänerannikult Sõrve poolsaarest umbes 30 km kaugusel olev ERA 5 mõõtepunkt. See mõõtepunkt asub „Eesti merealplaneering seisuga 2021“ määratud meretuulepargi eelisarendusalas [5]. Tuulekiiruse andmed selle konkreetse asukoha kohta on samuti saadud energyPRO andmebaasist ning neid on näha joonisel 1.4. Nagu jooniselt näha, on avamere tuulekiirus kogu aasta vältel märkimisväärselt suurem, kui maismaal asuvatel aladel. Seetõttu on ka aastane keskmine tuulekiirus märgatavalt kõrgem. Sellest tulenevalt võib eeldada, et avamere tuuleparkidel on suurem aastane toodang, võrreldes maismaal asuvate tuuleparkidega

Tabel 1.5 Meretuuleparkide sisendandmed

Parameeter	Väärtus
Hellmanni eksponent	0,11
Tuulemõõtmise kõrgus	75 m
Rootori kõrgus	150 m

Meretuulepargi tuulikutel on vaja sisendandmetena võimsuskõverat ja see erineb maismaa tuuliku omast peamiselt madalama tuulekiiruse poolest, mida on vaja, et elektrituulik tööle hakkaks ning maksimum võimsuse saavutab ta suurema tuulekiiruse juures kui maismaa tuulik. Meretuuleparkides kasutatava elektrituuliku võimsuskõver on kujutatud Joonisel 1.6.

Lisaks võimsuskõverale on meretuuleparkide modelleerimisel vajalikud Hellmanni eksponent, rootori kõrgus ja tuulemõõtmise kõrgus. Neid suurusid on meretuuleparkide kohta näha tabelist 1.5. Sisendandmed kontrolliti samamoodi nagu maismaatuuleparkide puhul ning kuna tulemused osutusid sobivaks kasutati tabelis 1.5 toodud suurusid modelleerimisel.



Joonis 1.6 Meretuulepargi tuuliku võimsuskõver

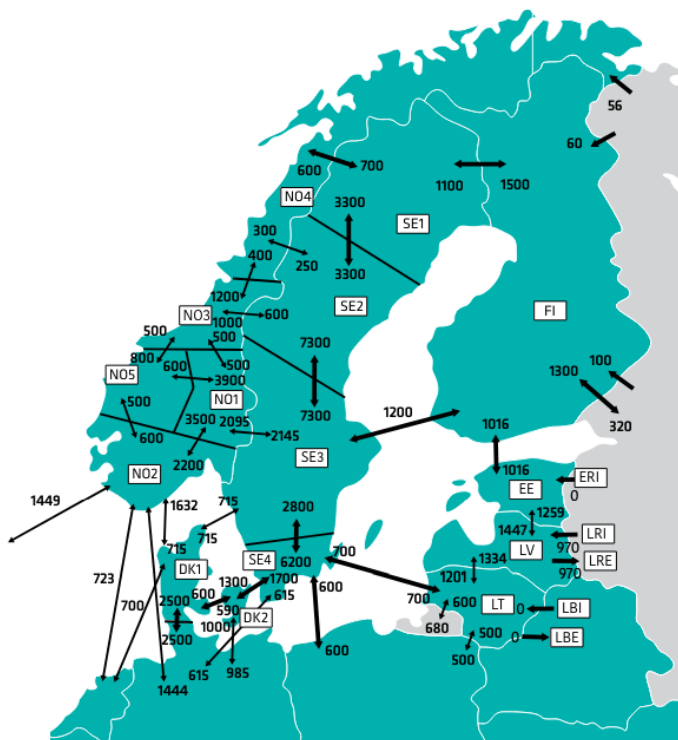
1.4 Salvesti modelleerimine

Sarnaselt meretuulepargile pole Eestis ka veel tööstusliku suurusega energiasalvestit. Töö koostamise ajaks on realiseerumisele kõige lähemal Paldiski energiasalve projekt ja see on võetud modelleerimise aluseks. Sisendandmeteks on võetud, et salvesti võimsus on 500 MW, maht on 6000 MWh ja kasutegur on 80%, mis tähendab, et täidetud reservuaari täiesti kuivaks pumpamiseks kulub 7500 MWh [6]. Modelleerimisel on salvesti on määratud töötama nii, et energiat salvestatakse, kui seda jääb tarbimisest üle ja energia antakse võrku, kui taastuvatest energiaallikatest ei saa piisavalt energiat, et katta ära tarbimist. Salvesti on ainuke seade mudelis, mis lähtub ka elektri hinnast. Erandjuhul annab salvesti võrku ka juhul, kui tootmine on suurem kui tarbimine ja elektri hind seda soosib. Kuna energyPRO tarkvaral on teada terve aasta ilmastiku andmed, tarbimine ja elektri hind, siis annab salvesti tulu teenimise eesmärgil vahest energiat võrku ka siis, kui taastuvenergia toodang ületab tunnipõhiselt tarbimist. Salvesti teeb seda juhul, kui teab, et enne järgmist energiadefitsiidi momenti suudab

ta end uuesti täis laadida. Elektri hinnad on saadud Eleringi kodulehelt [7]. Salvesti analüüsist on lähemalt peatükis 4.

1.5 Eesti ühendused naaberriikidega

Elektrienergia varustuskindluse ja elektrikaubanduse tagamiseks on loodud riikidevahelised ühendused kaablite või liinide näol. Eesti ja Baltikum on elektriliselt naaberriikidega hästi ühendatud. Ühendusi on vajalik selleks, et elektrienergia ülejäägi korral saaks seda eksportida naaberriikidesse või vastupidisel juhul importida välisriikidest, et tagada piisav elektrivarustus. Modelleerimistulemuste analüüs on oluline selgitada välja, millised on maksimaalsed impordi ja ekspordi võimsused ja hinnata, kas nende võimsuste ülekandmiseks oleks vaja täiendavaid võrgu tugevdusi teha. Eleringi andmetel on Eestil maksimaalseid ühendusi naaberriikidega ~2500 MW väärtuses (vaata joonis 1.7). Sellest 1016 MW on ühendused Soomega Estlink 1 ja Estlink 2 näol. Lisaks on üle 1400 MW võimsuses ühendusi Lätiga (vaata joonis 1.7) [5]. See tähendab, et teoreetiliselt on Eestil võimalik kuni 2500 MW võimsusega edastada või sisse importida elektrienergiat. Pidades silmas impordi, saab sellise võimsuse sisse importimiseks määravaks hoopis energiahulk, mida naaberriikidel on meile pakkuda ja ekspordi puhul tarbija vajadus sellises koguses energiat tarbida. Kui nii suuri võimsusi vaja ei ole tuleb hoopis riigi siseselt hakata energia tootmist reguleerima.



Joonis 1.7 Läänemere regiooni maksimaalsed ülekandevõimsused (MW)[5]

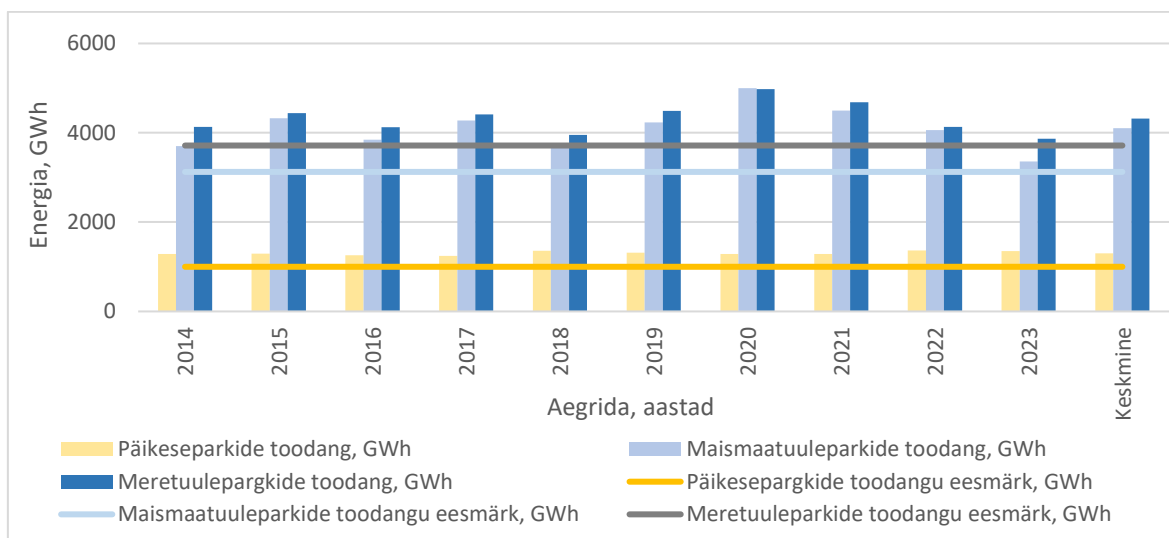
2. 2014-2023 aasta andmetega modelleerimise tulemused

Selles peatükis antakse põhjalik ülevaade 2014-2023 aasta andmetega modelleerimise tulemustest. Tulemustes kirjeldatakse taastuvenergiaüksuste toodangu tulemusi, puudujääke energiatarbimises ja võrreldakse ekspordi ja impordi suhet.

Esimeses alapeatükis kirjeldatakse toodangu numbreid ja võrreldakse võimsustegureid kirjanduses leitud numbritega. Teises alapeatükis vaadatakse toodangu osakaalu tarbimise katmises, mis on antud töö oluline osa. Kolmandas alapeatükis vaadatakse kui palju on tunnipõhiselt ja summaarselt vaja elektrienergiat importida ning viimases ehk neljandas alapeatükis vaadatakse elektrienergia ekspordi koguseid ja suhet võrreldes impordiga.

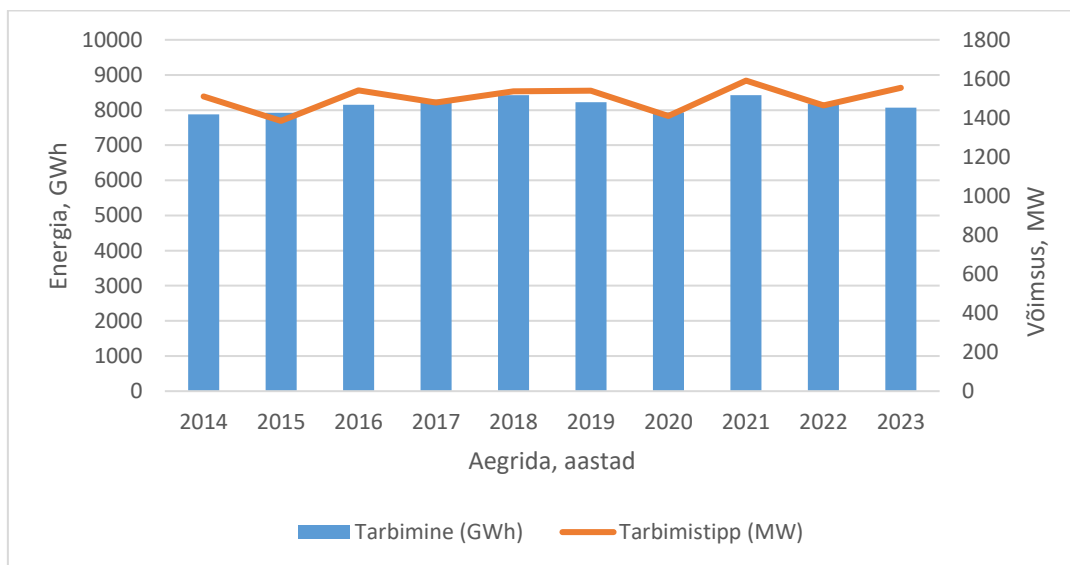
2.1 Toodang ja võimsustegurid

Selleks, et näha, kui palju on taastuvenergia üksuste toodang terve aasta peale, tehti energyPRO-ga kõigi analüüsitud aastatega tunnipõhine modelleerimine. EnergyPRO leitud toodangu andmete põhjal leiti Excelis võimsustegurid, summaarsed toodangud jms. Kõik tootmisandmed on välja toodud tabelis Lisa 1.



Joonis 2.1 Perioodi 2014-2023 modelleeritud toodangu graafik

Nagu ülesande püstitusest eeldati, on tuule ja päikese olud eri aastatel erinevad ja see muudab väga taastuenergia parkide toodangut. Siiski ületavad kõik tootmisüksused, kõigil aastatel energia ja kliimakava etteantud aastaseid toodangu numbreid, kus päikseenergia peab olema 1000 GWh, maismaatuuleenergia 3124 GWh ja meretuuleenergia 3715 GWh. Analüüsi keskmised tulemused on vastavalt 1300 GWh, 4102 GWh ja 4321 GWh. Seega on kliimakava energiakoguste eesmärk täidetud (vaata joonis 2.1).



Joonis 2.2 Tarbimise graafik läbi aastate 2014-2023

Tarbimine on läbi aastate üsna stabiilne (vaata joonis 2.2). Aastane kogutarbimine jääb vahemikku 7880 kuni 8428 GWh ehk kõikumine on ~6%. Kuigi 10-aastase perioodi jooksul ei ole täheldatud kogutarbimise kasvu, siis tarbimise tipp näitab läbi aastate kasvavat trendi, kuna viimase 3 aasta jooksul on uuritava perioodi vältel registreeritud kaks suurimat tarbimise tippu.

Elektrijaamade toodangu hindamiseks kasutatakse tihti võimsustegurit, mis näitab kui palju elektrijaam ühe kindla ajaperioodi jooksul oma teoreetilisest maksimaalsest energiatoodangust tegelikult toodab. Erinevat tüüpi elektrijaamadel on ka väga erinevad võimsustegurid. Näiteks Statista andmetel on Ameerika Ühendriikides keskmiseks võimsusteguriks tuumajaamadel ligikaudu 93% ja biomassil 60%. Taastuenergia allikatest, nagu tuuleenergia, on see number umbes 36%, samas kui päikeseparkidel on see 25% [9]. Eestis on, tulenevalt asukoha laiuskraadist, päikesepaneelide keskmine võimsustegur siiski 11% [10]. Lisaks on maismaatuuleparkide ja meretuuleparkide võimsustegurid erinevad, kuna avamerel on tuuleressurss parem ja elektrituulikute võimsustegurid on kõrgemad. Näiteks on

elektrituulikute tootja Vestas enda parimate avameretuulikute võimsusteguriks nimetanud lausa 60% [11].

Tabel 2.1 Võimsustegurite võrdlus

	Päikesepark, %	Maismaatuulepark, %	Meretuulepark, %
Kirjandusest leitud andmed	11	36	60
Analüüsisist selgunud võimsustegurid	12	36	49

Analüüsisist selgub, et elektrituulikute võimsustegurid vastavad üsnagi hästi viidatud näidete allikatega. Maismaatuuleparkide 10 aasta keskmine võimsustegur on 36%, mis on sarnane Statista andmetega [9]. Meretuuleparkide 10 aasta keskmine on 49%, mis jääb küll ~10% alla Vestase ideaalsest võimsustegurist, kui on siiski tublisti üle Statista keskmisest näitajast.

Päikeseparkide 10 aasta keskmine võimsustegur on 12%, mis on 1% suurem, kui teadusartiklis välja toodud Eesti päikeseparkide keskmine võimsustegur [10].

Arvestades, et enamus tootmisüksusi on alles arendamisel, siis võib eeldada, et uuema tehnoloogia elektrituulikute kasutegurid on natuke kõrgemad kui senised keskmised, ning päikeseparkide keskmine võimsustegur on ligilähedane võrreldavaga, siis võib analüüsi võimsusteguritega rahule jääda.

2.2 Taastuenergia toodangu roll tarbimise katmises

Eelnevalt sai tõestatud, et analüüsis kasutatud taastuenergia üksused suudavad aasta lõikes toota energia- ja kliimakava ettenähtud energiakoguseid. Samuti on kõikide tootmisüksuste võimsustegurid head võrreldes kirjanduses välja toodud teguritega.

Siiski ei näita need numbrid veel, et mil määral saab taastuenergiaga arvestada sisemaise elektrienergia tarbimise katmiseks.

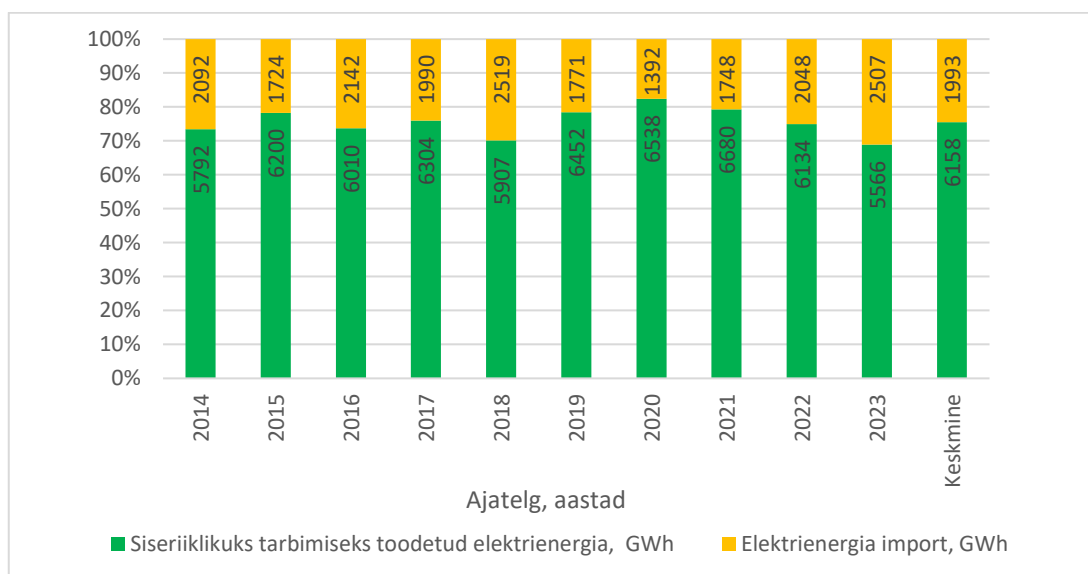
Oluline on analüüsida, kui palju katab ära taastuenergia tarbimise aasta lõikes kuid ka tunnipõhiselt. Tarbimise katmine on oluline näitaja, sest kui investeeritakse suuri summasid taastuenergia arendamiseks on oluline leida, kui palju on nendest tootmisüksustest on kasu tarbimise katmiseks. Eestil on võimalik ka elektrienergiat importida naaberriikidest, kuid juhul kui naabritel elektrienergiat eksportimiseks ei ole võib tekkida olukord, kus Eesti sõltub oma elektrienergia varustusest omaenda tootmisüksustest ning seega on oluline tagada piisav kodumaine elektritootmisvõimekus, et rahuldada riigi elektrivajadusi igal ajahetkel.

Sellest lähtuvalt, on oluline analüüsida taastuenergia tootmist tunnipõhiselt. Esiteks võimaldab tunnipõhine analüüs paremini mõista taastuenergia tootmise kõikumisi ja ebastabiilsust. Taastuenergia tootmise kõikuvus tuleneb looduslikest teguritest, nagu päikese ja tuule muutlikkus, mis võivad varieeruda tunni või päeva lõikes. Näiteks

päikesepaneelide tootmine sõltub päikesekiirguse intensiivsusest, samamoodi põhjustab tuulekiiruse varieeruvus tuulegeneraatorite tootmise kõikumist. Seetõttu on oluline uurida taastuvenergia tootmist tunnipõhiselt, et mõista nende kõikumiste ulatust ja tagajärgi energiasüsteemile.

Selleks arvatati Excelis välja, kui palju on taastuvenergia osakaal protsentuaalselt tarbimise katmises.

Kokkuvõtte siseriiklikuks tarbimiseks toodetud elektrienergiast aastate lõikes on toodud joonisel 2.3.



Joonis 2.3 Toodangu ja tarbimise osakaal

Nagu jooniselt 2.3 on näha, et taastuvenergia allikad suudavad ära katta keskmiselt 75% sisemaise elektrienergia vajadusest. Kogu kümne aasta peale on selle näitaja kõikumine üsna väike. Kõige kehvem on 2023 aasta andmetega tulemus, kus taastuvenergia suudab ära katta 69% elektritunnipõhisest tarbimisest. Kõige parem on aga 2020 aasta tulemus, kus sama näitaja on 82%. Nagu näha siis kõikumine 10 aasta peale on 13%. Kuna see näitaja sõltub väga palju toodetud elektrienergia ja tarbitava elektrienergia suhtest, mis omakorda sõltuvad väga palju erinevatest faktoritest nagu ilm ja suurtarbijate elektrivajadus, siis võib arvestada, et 75,5% vajaminevast elektrienergiast suudab taastuvenergia aasta jooksul ära katta.

2.3 Elektrienergia impordi vajadus

Teiseks käesoleva lõputöö oluliseks hinnatavaks parameetrik oli impordi vajadus. Kuna taastuvenergia toodang on muutlik, siis on oluline hinnata, kui palju tunde on vaja teatud võimsusega elektrienergiat sisse importida. Selle põhjal saab hiljem anda hinnangu juhitavate võimsuste vajadusele ja nende toodangule.

Tabel 2.2 Elektrienergia impordi võrdlustabel [12]

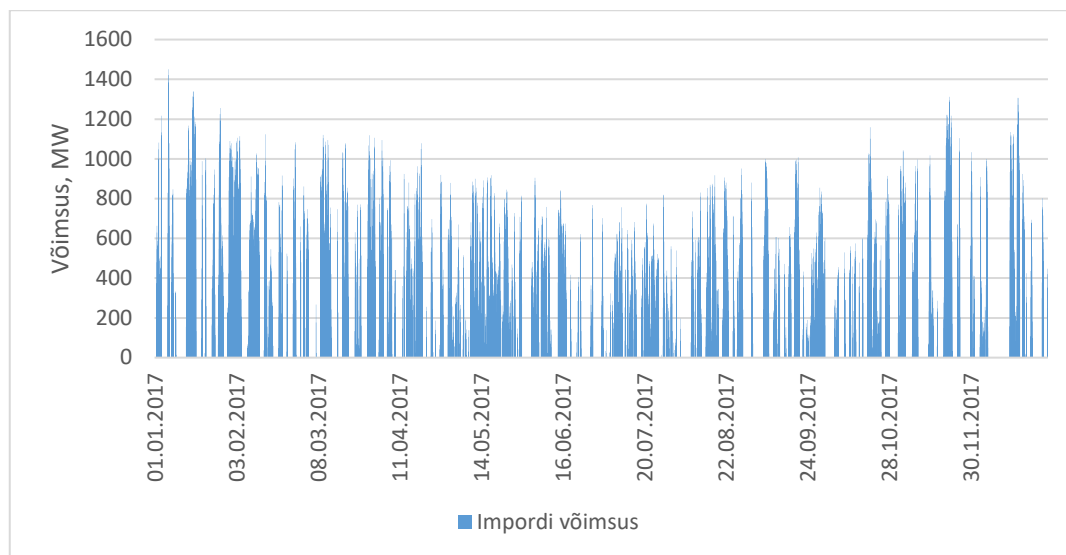
	2023 andmed	Modelleeritud 2023 tulemused	Modelleeritud keskmine
Maismaatuuleparkide võimsus, MW	355	1300	1300
Päikeseparkide võimsus, MW	526	1000	1000
Maismaatuuleparkide toodang, GWh	800	3359	4102
Päikeseparkide toodang, GWh	690	1353	1304
Aastane import, GWh	3310	2507	1993
Maismaatuuleparkide võimsustegur, %	26%	29%	36%
Päikeseparkide võimsustegur, %	15%	13%	12%
Impordi osa tarbimisest, %	41%	31%	24%

Analüüsidest aastate 2014 kuni 2023 andmeid, on võimalik välja tuua, et keskmine elektrienergia import on 1993 GWh aastas (vaata tabel 2.2). See summa moodustab 10-aastase perioodi jooksul keskmiselt umbes 24% elektrienergia tarbimisest. Võrdluseks, 2023 aastal tarbiti Eestis, lähtudes Energy-Charts andmetele, elektrienergiat kokku 8070 GWh. Sellest kogusest oli imporditud elektrienergia hulk 3310 GWh [12]. See tähendab, et elektrienergia import moodustas tarbimisest ligikaudu 41% (vaata tabel 2.2). Samast tabelist selgub, ka et juhul, kui meil oleks Eestis aastal 2023 analüüsis kasutatud elektriijaamad juba rajatud, siis oleks 2023. aastal elektrienergia import olnud 10% väiksem. Lisaks saab võrrelda ka päikese- ja maismaatuuleparkide toodangut ja võimsustegureid. Meretuuleparke pole sellel aastal Eestisse veel rajatud. Selgub, et tuuleparkide võimsustegur on analüüsis 3 % ja päikeseparkidel vastupidi oli analüüsi tulemus 2% väiksem. 2023. aasta mõõtmisandmete põhjal võimsustegurite leidmiseks kasutati Energy-Chartsis välja toodud aastas maksimaalset tuuleparkide ja päikeseparkide võimsust.

Kümne aastase ajaperioodi jooksul on mudelis kõige suurema impordi vajadusega aasta 2018, mil import oli 2519 GWh ja seevastu kõige vähem imporditi 2020. aastal, mil import oli 1392 GWh (vaata joonis 2.3). Kahe erineva aasta vahe on peaaegu 1200 GWh, mis on peaaegu 60% kümne aasta keskmisest imporditavast energiast. See näitab, et ilmastikuolud ja seetõttu ka taastuvenergia toodang on erinevatel aastatel väga varieeruvad ja mõnel aastal on vaja tunduvalt rohkem impordida või toota energiat juhitavatest võimsustest.

Analüüsis selgus, et taastuvenergiaga saab ära katta enamuse tarbimiseks vajamisest elektrienergiast, kuid siiski on ligi 2000 GWh elektrienergiat vaja impordida. Kuna teoreetiliselt võib juhtuda olukordi, kus päikeselektriijaamad ja tuulepargid ei tooda samal ajal peaaegu üldse elektrienergiat, siis oleks vaja teada, millised on need imporditavad elektrienergia võimsused nendel tundidel ja kui palju neid siis esineb. Tabelist Lisas 1 on näha, et kümne aasta peale on elektrienergia impordi

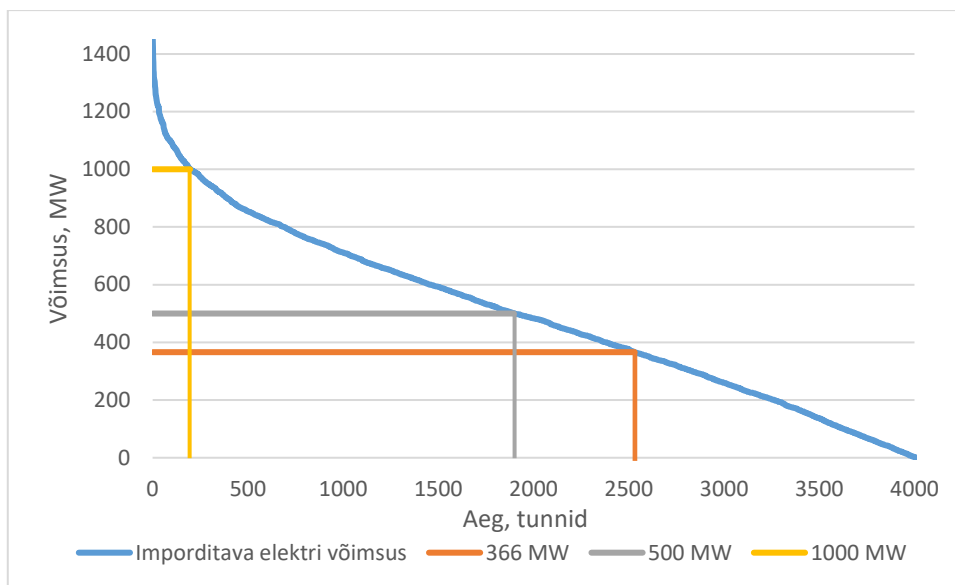
tundide arv aastast keskmiselt 46%, mis on ligikaudu 4029 tundi aastas, ning et keskmiselt on siis imporditava elektrienergia hulk 500 MW tunnis. Kuna need on keskmised numbrid, mis on väga üldised, siis oleks vaja parema hinnangu andmiseks vaja vaadata täpsemalt imporditavaid võimsuste esinemist.



Joonis 2.4 2017 aasta tunnipõhised imporditava elektrienergia võimsused

Analüüsiti aastat 2017, kuna selle aasta imporditava elektrienergia näitajad olid kõige lähemal kümne aasta keskmisele näitajale. Jooniselt 2.4 on näha 2017 aasta tunnipõhiseid elektrienergia impordi võimsusi. Nagu sellelt jooniselt on näha, siis on aasta keskel, ehk suvekuudel, selgelt väiksemad impordi võimsused, kui aasta alguses ja lõpus. Suvekuudel on maksimaalne import ~800 MW samas kui ajaperioodil september kuni aprill, on impordi võimsused tihti üle 1000 MW tunnis. Seetõttu ei ole imporditavad elektrienergia võimsused läbi aasta sama suured, vaid suuresti olenevalt tarbimisest on suvekuudel palju väiksemad kui talvekuudel.

Selleks, et hinnata kui suures mahus teatud imporditava elektrienergia võimsusi esineb, leiti ajahulk, mil on vaja teatud võimsusega elektrienergiat importida. Võimsusteks, mida analüüsiti valiti 366 MW, 500 MW ja 1000 MW. 366 MW on võimsus, mis on energia ja kliimakava poolt ette nähtud biomassil põhinevatel juhitavate võimsuste hulk [2]. Sellega saab näha, et kui palju on lisaks nendele võimustele vaja veel elektrienergiat sisse importida. 500 MW on analüüsist selgunud keskmine imporditav elektrienergia võimsus 10 aasta peale. 1000 MW on selline võimsus, millest rohkem on vaja elektrienergiat importida ainult perioodil oktoober kuni aprill, ehk sealt on näha, kui palju on realselt selliseid tunde, kus taastuvenergia suudab katta keskmisest tarbimistipust vähem, kui 30%.

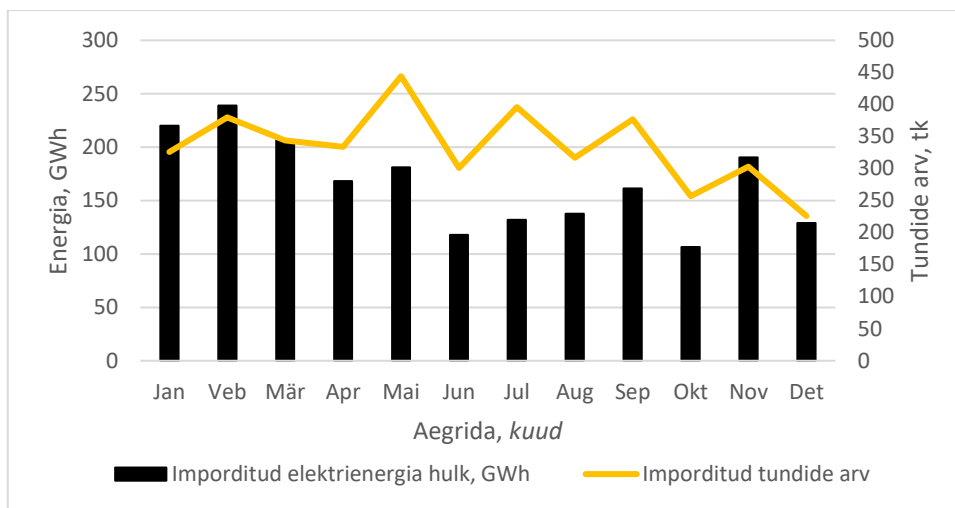


Joonis 2.5 Elektrienergia impordi kestvuskõver 2017.a modelleerimistulemuste järgi

Jooniselt 2.5 on näha, et 2017. aasta modelleerimistulemuste järgi esineb elektrienergia impordi 4006 tundi, mis moodustab 46% aasta tundidest. Elektrienergia impordi võimsus ületab 366 MW umbes 2500 tunni jooksul aastas, ehk 28,5% aastast. Kogu aasta impordi tundidest moodustab see 62,5%. Lisaks ületab import 500 MW 1891 tunni vältel, mis on 21,5% aastast ja moodustab 47,2% kõigist aastasest impordi tundidest. Kolmandaks, import ületab 1000 MW 191 tunni vältel, ehk 2% aastast, moodustades 4% kogu aastasest impordist.

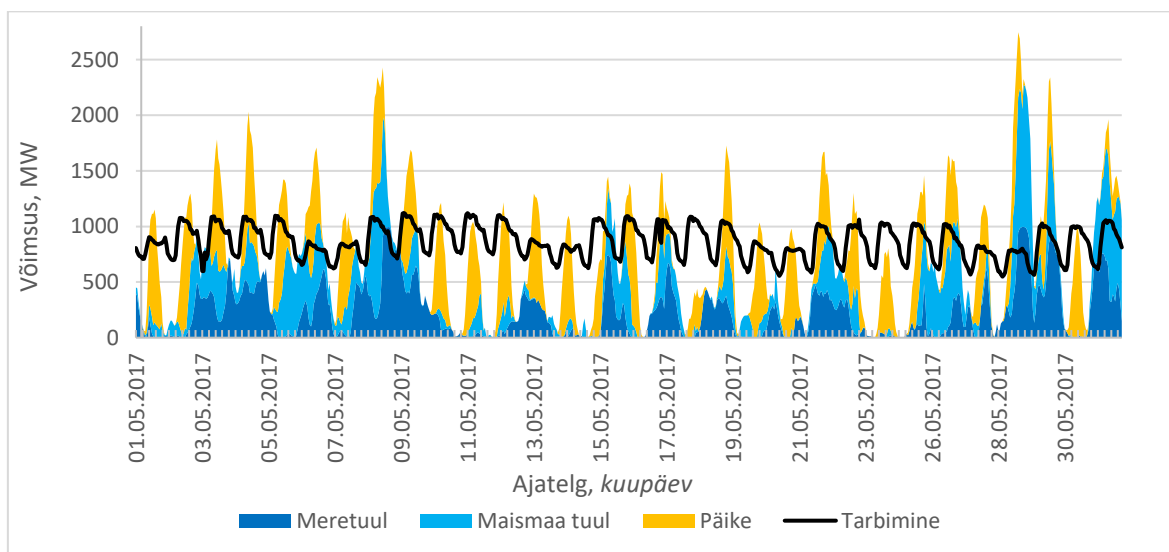
Seetõttu on võimalik tunnipõhiselt ligikaudu 70% aastasest elektritarbimisest katta taastuvenergiaga, eeldusel, et seda toetavad ka biomassil põhinevad soojuselektrijaamad. Lisaks on ~80% aastast selliseid tunde, kus koos soojuselektrijaamaga on elektrienergia import ~200 MW, mis tähendab, et enamus aastast on tarbimine kaetud taastuvenergiaga. Viimaseks tundide arv, kus elektrienergia import on väga suur ehk vähemalt 1000 MW, on suhteliselt väike, kuid siiski on vaja seda elektrienergia vajadust täita, kas importides elektrit või toota ise juhitavate elektrijaamadega. Siinkohal saab valikut tehes määravaks juba tootmisüksuse toodangu hind, mida käesolevas töös ei käsitleta.

Nagu jooniselt 2.4 oli näha, siis on imporditava elektrienergia võimsused läbi aasta väga erinevad. Täiendavalt analüüsiti ka elektrienergia impordi vajadust erinevatel kuudel aastast.



Joonis 2.6 2017. aasta imporditud energia hulk

Nagu jooniselt 2.6 selgub, on kolm kõige suurema elektrienergia impordi tundidega kuud suveperioodil, ehk mai, juuli ja september. Samas kõige rohkem energiat imporditakse hoopis talvekuudel, nagu jaanuar, veebruar ja märts. Joonisel 2.7 on toodud modelleeritud 2017. aasta suurima impordiga kuu - maikuu tootmise ja tarbimise tunnipõhine graafik.

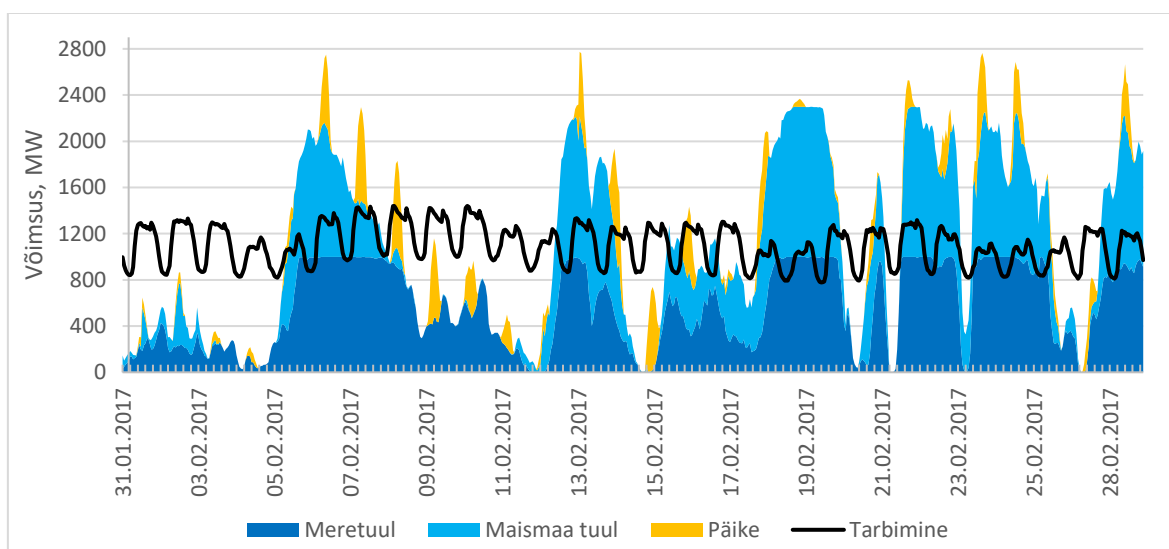


Joonis 2.7 Modelleeritud 2017. aasta maikuu tootmis- ja tarbimisgraafik

Jooniselt 2.7 on näha, et päikeseelektrijaamad suudavad ära katta päevase tiputarbimise. Kuna sel kuul on tuuleparkide panus üldjuhul kasin, siis selle tulemusena on öösel palju tunde, kus tuule- ja päikesepargid elektrit ei tooda ja seda tuleb juurde importida. Kuna suvekuudel on tarbimine väiksem, kui talvel ning öösel on tarbimine väiksem kui päeval, siis on imporditava elektrienergia kogused väiksemad. Nagu näha, siis tarbimine jääb maikuu maksimaalselt 1000 MW joone juurde ja see on ka põhjus, miks olukorras, kus mai kuus on imporditava elektrienergia tunde kõige rohkem pole

elektrienergia import suurim. Kuigi tuuleenergia panus tootmisesse on sel kuul pigem väike ja vaid loetud päevadel katab tuuleelektrijaamade toodang tarbimise ära on näha kolme päeva, kus on tänu headele oludele väga suur üle tootmine. Üheks näiteks on 28 mai, kui eksporditavat elektrit on vähemalt 1800 MW eest. Suure ekspordi võimsuse tekitab ka asjaolu, et vaadates tarbimise kõverat, on tegemist nädalavahetusega, mil elektritarbimine on väiksem, kui nädala sees.

Graafikult on ka näha kuidas valged lüngad tootmise ja tarbimise vahel on lühiajalised, aga väga tihedalt korduvad. See tähendab, et nende katmiseks juhitavate võimsustega oleks vaja kiiresti reguleerivaid tootmisüksusi nagu gaasijaamad või soojuselektrijaamad. Nende tühimike täitmiseks võiks sobida ka pump-hüdroelektrijaam, mille kasu on analüüsitud peatükis 4.



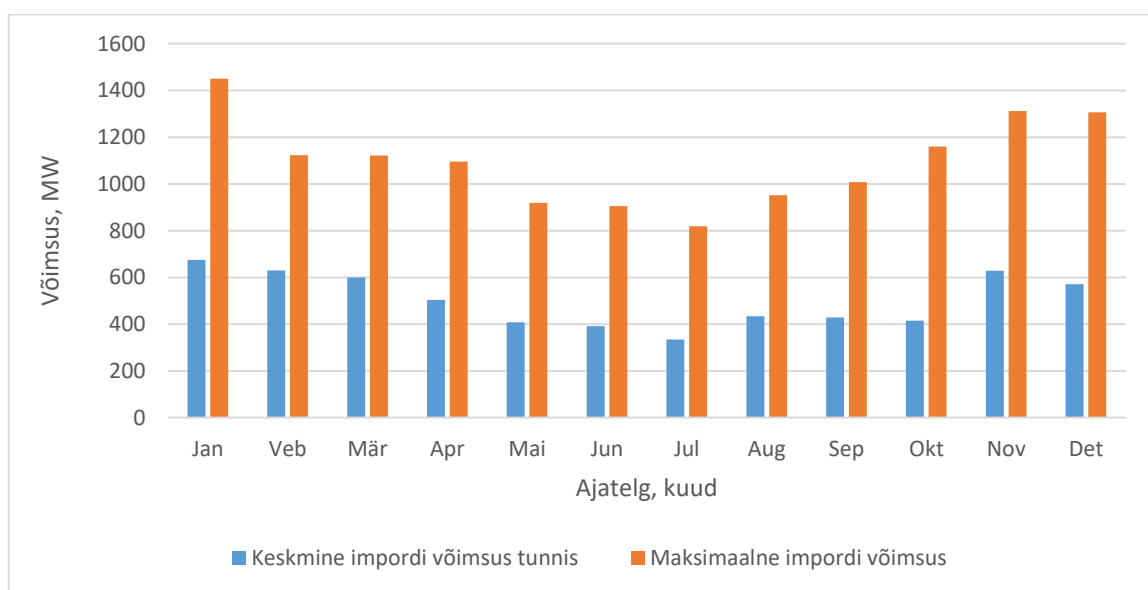
Joonis 2.8 Modelleeritud 2017. aasta veebruarikuu elektri tootmis- ja tarbimisegraafik

Kui vaadelda joonisel 2.8 2017. aasta kõige suurema elektri impordi kogusega kuu, veebruari, elektri tarbimist ja modelleeritud tootmist, siis on näha, et selles kuus on tuuleelektrijaamadel palju suurem roll ja päikeseelektrijaamade toodang on väike. Graafikult on näha, et tekivad sisse pikemad perioodid, kus tootmist pole peaaegu üldse, või siis ületab märkimisväärselt tarbimist. Terve kuu jooksul on 9 päeva sellised, kus tootmisel jääb tarbimisest väga palju puudu ehk tootmine on vaid üksikutel tundidel ainult 500 MW ja see põhjustab väga suure elektrienergia impordi vajaduse. Seda, miks sel kuul on impordi vajadus kõige suurem lisab asjaolu, et tarbimine on keskmiselt alati üle 1000 MW ja tipud on enamasti 1200 MW juures ja ulatuvad peaaegu 1500 MW-ni välja.

Kuna veebruari kuus on tarbimine oluliselt suurem kui mais, siis elektrienergia eksport veebruaris on väiksem, hoolimata sellest, et veebruaris võib elektrienergia tootmine ulatuda koguni 2800 MW-ni, samal ajal kui mais on see 2500 MW. Seetõttu on suurimad

eksporti võimsused veebruari kuus ligikaudu 1500 MW, samas kui need olid mai kuus 1800 MW.

Erinevalt maikuu graafikust on veebruari omal energiadefitsiidi lüngad märksa pikemad. Graafikul on näha, et sisse satuvad ligi 4-päevased perioodid, kus tootmine ei kata ära tarbimist. Antud juhul oleks vaja keskmiselt 700 MW võimsusega elektritootmisüksust, mis on juhitav. Kui tarbimist jääb puudu pikemaajaliselt, nagu veebruaris, oleks võimalusi kasutada ka veidi aeglasema reguleerimisega tootmisüksusi, sest vähemalt 4 päevast prognoosi tuule kohta on võimalik ette ennustada ja saab juba soojuselektrijaama toodangu vajadust ette ennustada. Juhitavate tootmisüksuste valiku kohta on pikemalt peatükis 4.



Joonis 2.9 Modelleeritud 2017.a kuu keskmine impordi võimsus tunnis

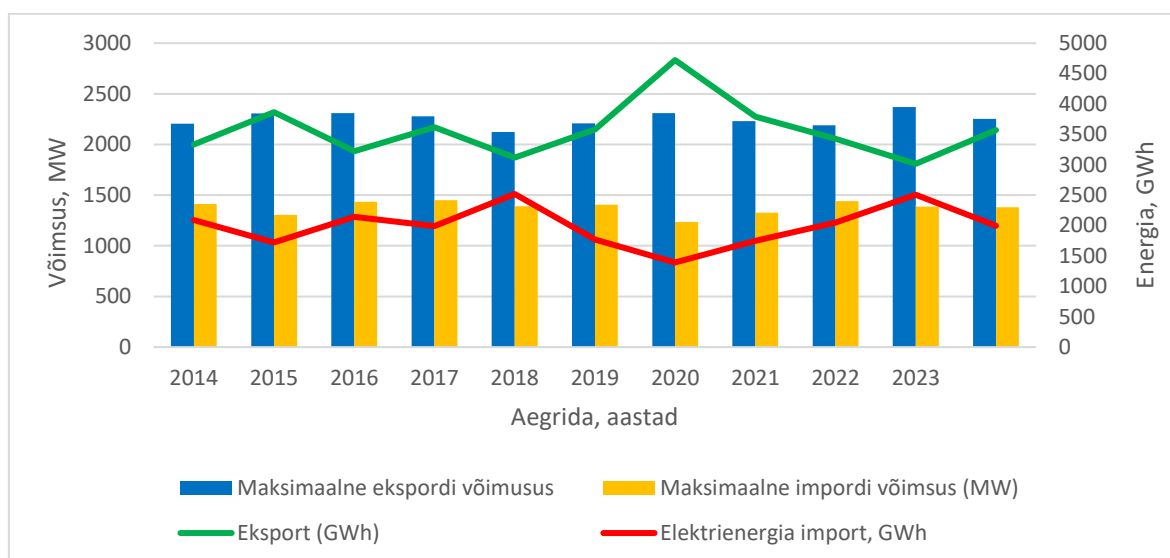
Joonisel 2.9 on näha keskmine ja maksimaalne import kuus. Suvekuudel on imporditava elektrienergia vajadus väiksem kui talvistel kuudel, mis tuleneb madalamast elektritarbimisest ja päikeseelektrijaamade heast tootmisest suurema tarbimisega tundidel. Kui keskmine näitaja võib erineda olenevalt kuust 200 MW võrra siis maksimaalne lausa ~600 MW võrra. Seetõttu on läbi aasta elektrienergia import väga erinev. Kevad ja suvekuudel on impordi võimsused väiksemad, järjestikuseid tunde on vähem, kuid impordi vajadust esineb tihedamalt. Samas on sügisel ja talvel elektrienergia impordi võimsused suuremad ja tihtipeale on järjestikuseid tunde rohkem.

Lisaks selgus analüüsist, et keskmiselt on 10 aasta keskmine järjestikuste tundide arv, mil on vaja importida elektrienergiat 18 tundi. Arvestades, et keskmiselt oli imporditava elektrienergia hulk 490 MW, siis võiks energiadefitsiidi leevendamiseks kasutada 9 GWh mahutavusega salvestit, mis on rohkem kui analüüsis kasutatav 6 GWh mahutavusega

Paldiski energiasalv. Lõpuks eeldab see ka seda, et enne tuule- ja päikeseressursside puudumist saadakse taastuvenergiast piisaval hulgal elektrienergiat, et täita salvesti.

2.4 Elektrienergia eksport

Elektrienergia eksportimine annab eksportivale riigile võimaluse tagada vahendeid, et hiljem tasuta imporditava elektrienergia eest. Kuna antud analüüsis on kasutusel ideaaltingimustes 3510 MW tootmisvõimsusi ning statistika järgi on töö koostamise ajaks loetud Eesti maksimaalseks tarbimisvõimsuseks 1599 MW, siis on selge, et heade olude juures võib olla tootmine vähemalt kaks korda suurem, kui tarbitav energia. Seetõttu tekib ideaalsetes oludes pea sama palju eksporditavat energiat, kui on teoreetiline maksimaalne tarbimine.



Joonis 2.10 Elektrienergia ekspordi ja impordi võimsused ja energia

Modelleerimistulemustest selgus, et 10 aastases perioodis eksporditakse keskmiselt 3569 GWh elektrienergiat aastas (vaata joonis 2.10). Kuna analüüsitud ajaperioodil on aastas keskmiselt vaja elektrit impordida 1993 GWh, siis on eksport ligi 1,8 korda suurem kui import. Maksimaalne eksport on igal aastal üle 2000 MW. Punktis 1.5 sai välja toodud, et Eesti maksimaalne ekspordi võimsus tulenevalt ülekandeliinidest on ~2500 MW. Kõige suurem elektrienergia ekspordi võimsus on 2369 MW, mis esineb aastal 2023 ning seetõttu tootmist, elektrivõrgu läbilaskevõimsusi silmas pidades, piirama ei pea. Siiski ei saa selle põhjal öelda, et elektrienergia import oleks seega kaetud, sest taastuvatest allikatest üle jäävat energiat võidakse samal ajal toota ka naaberriikides ja sel juhul ei anna tarbimisest üle tootmine eelist, kuna pole kedagi kes sooviks energiat tarbida ning siis oleks vaja siiski tootmist piirata. Et sellist olukorda vältida, oleks võimalus vähendada eksporditava elektrienergia hulka seda salvestades. Salvestiga süsteemi analüüsi on näha punktis 2.3.

3. Tootmise analüüs kõrgeima tarbimisega päevadel

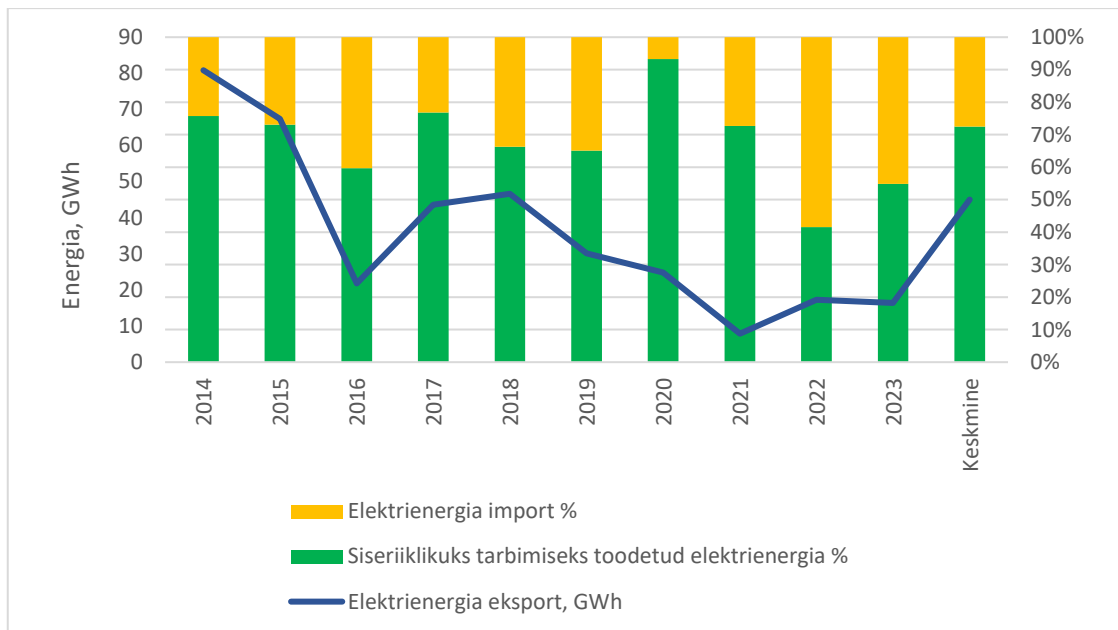
Selles peatükis vaadatakse mil määral saab taastuenergiaga ära katta tarbimist, kõige suurema tarbimisega päevadel. Taastuenergiale toetuvate energiasüsteemide kõige nõrgemad kohad on ajad, kui tuul ei puhu ja päikesekiirgust on vähe, kas siis talvel kui päike on „madalal“ ja pilvkate on väga tihe. Tihti satub see olukord ka ajale, kui ilm on külm ja hooneid on vaja kütta, mis nõuab lisa elektrienergiat. See tähendab, et tarbimine on väga suur ja taastuenergia tootmisüksustest ei pruugi sel ajal abi olla. Kuna Eestis ja ka naaberriikides võetakse siis kasutusele fossiilkütustel põhinevad soojuselektrijaamad, tõstab see elektri hinna kõrgeks. Soojuselektrijaamade toodetav elektrienergia on kallis, kuna nad peavad toodetava energia hulga pealt tasuma ka CO₂-heitme maksu. See tähendab, et mida rohkem on vaja toota energiat soojuselektrijaamadega, seda kallim on elektri börsihind. Tihti on, aga odavam importida naaberriikidest elektrienergiat, kui seda ise fossiilkütustest toota. Kui naabritel pole võimalust elektrit eksportida, tuleb see siiski toota kohapeal, kasutades kallimaid tootmisüksusi.

Selles peatükis vaadataksegi modelleerimise tulemusi viie kõige kõrgeima tarbimisega päevade kohta. Kokku kolmes alapeatükis vaadatakse toodangu, impordi ja ekspordi tulemusi pakkudes ülevaadet elektrisüsteemi toimimisest nendel kriitilistel päevadel.

3.1 Toodangu analüüs

Selleks, et näha kui palju saab suurema tarbimisega tundidel loota taastuenergeetikale, on analüüsitud iga aasta viite kõige suurema tarbimisega päeva. Analüüsi käigus võeti arvesse 10 modelleeritud aasta tulemused. Selleks valiti viis päeva, mil esines kõige suurem elektrienergia tarbimine. On oluline märkida, et valitud päevad ei olnud järjestikused ning seetõttu ei ole ka tootmise andmed joonistel sujuva üleminekuga. Seda on graafikutelt näha, kui ühel tunnil on tootmine nullis ja järgmisel juba katab tarbimise ära (vaata joonis 3.4).

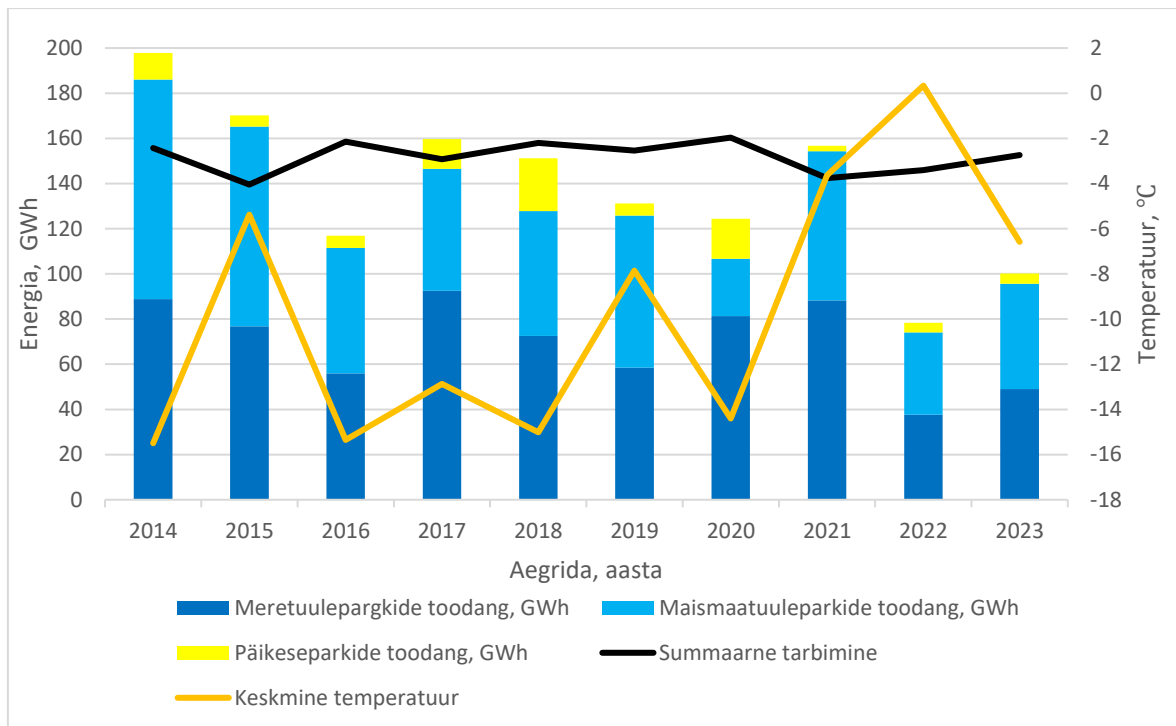
Selleks, et näha kui palju suudab taastuenergia katta ära tarbimise suurima tarbimisega perioodil, tehti energyPRO-ga kõigi analüüsitud aastatega tunnipõhine modelleerimine ja võeti kindlatelt päevadelt toodangu numbrid, energia ekspordi ja impordi tulemused. Et näha, kui palju läks toodangust sisemaise tarbimise katmiseks lahutati kogu toodangust eksporditava energia hulk. Jooniselt 3.1 on näha kõigi analüüsitud aastate impordi ja siseriiklikuks tarbimiseks kulunud elektrienergia osakaalu tarbimisest. Lisaks on näha iga aasta kohta eksporditud elektrienergia kogust GWh-des. Kõik analüüsis leitud tulemused on kirjeldatud tabelis Lisa 2.



Joonis 3.1. Suurima tarbimisega päevade modelleeritud toodangu ja impordi osakaal

Analüüsist selgub, et kõigi aastate peale keskmiselt suudavad taastuvenergia allikatel põhinevad tootmisüksused suurima tarbimisega päevadest ära katta 55% tarbimisest. Kehvematel juhtudel on see ~40% ja parematel aastatel lausa 95%. Elektrienergia eksport võib ka olenevalt aastast olla väga erinev. Näiteks eksporditakse aastal 2014 viiel külmemal päeval lausa 80 GWh energiat, kuid 2021. aastal, ainult 10 GWh. Keskmine number 10 aasta peale jääb 43 GWh juurde. Väga suurel hulgal elektrienergiat eksporditakse aastal 2014 ja selle ajaperioodi graafikut näeb joonisel Lisas 3.

Kuna kõik suurima tarbimisega päevad satuvad talvekuudele nagu detsember, jaanuar või veebruar, siis päikeseenergiaga sel ajal väga arvestada ei saa. Seetõttu sõltub talvekuudel tarbimise nõudluse täitmine suuresti tuuleenergiast. Seda tõestab joonis 3.2, kus on näha erinevate tootmisüksuste panust viie suurima tarbimisega päeva toodangusse.



Joonis 3.2 Viie suurima tarbimisega päeva toodangu, tarbimise ja temperatuuri graafik

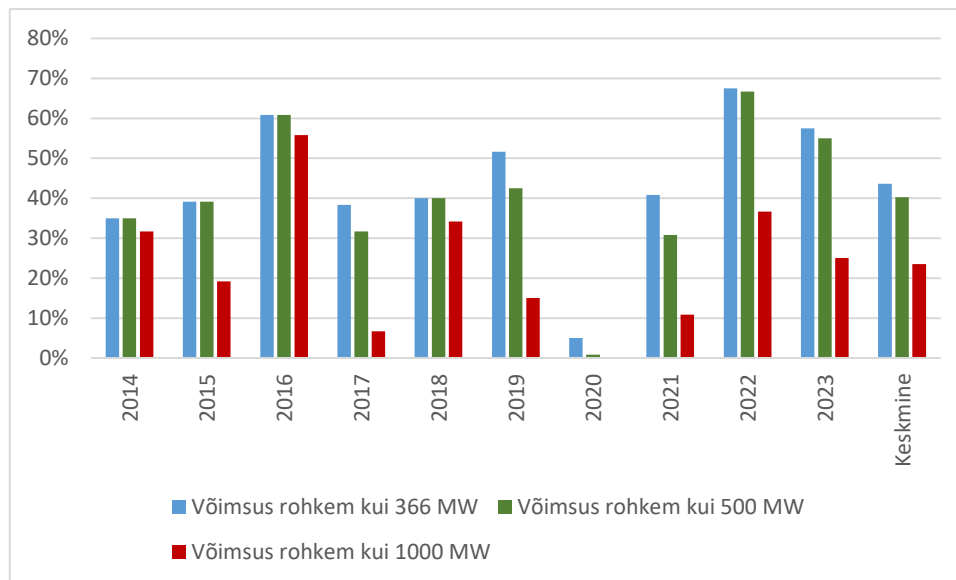
Nagu näha Jooniselt 3.2, siis päikeseparkide panus kogu toodangusse on väike. Parimal aastal on viie päeva summaarne toodang 23 GWh, samas kui meretuulepark toodab näiteks sama ajaga kõige vähem 38 ja kõige rohkem 92 GWh.

Jooniselt 3.2 selgub, et temperatuuril ja toodangu vahel ei saa seoseid luua, sest näiteks aastatel 2014 ja 2016 suutsid taastuenergia üksused toota rohkem elektrienergiat, kui oli sel perioodil summaarne tarbimine ning keskmine temperatuur nendel päevadel oli vähem kui $\sim -15^{\circ}\text{C}$. Samuti suutis taastuenergia toota rohkem elektrienergiat, kui oli sel perioodil summaarne tarbimine oludes, kus keskmine temperatuur oli $\sim -5^{\circ}\text{C}$, näiteks aastad 2015 ja 2021. Selle põhjal ei saa siiski väita, et tarbimine oleks kogu ajaperioodil kaetud taastuenergia poolt, kuid see näitab et külmem temperatuur ei tähenda seda, et tuule või päikese ressurss oleks väiksem. Joonise põhjal on võimalik järeldada, et tarbimine ja temperatuur on omavahel seotud. Näiteks aastatel, mil ajavahemiku temperatuur on olnud külmem kui -10°C , on kogu viie päeva tarbimine ületanud 150 GWh. Samas on kõigil (v.a 2023) aastatel, mil temperatuur on olnud soojem kui -10°C , tarbimine olnud märgatavalt väiksem kui 150 GWh.

Viie suurima tarbimisega päeva analüüsi kokkuvõtteks saab öelda, et toodetava energia hulk taastuenergiast ei sõltu temperatuurist ja seetõttu on toodetava energia hulk olenevalt oludest väga erinev. Siiski saab suurima tarbimisega päevadel osaliselt loota taastuenergiat, kuna toodangu andmed ei ole lähtuvalt analüüsist protsentuaalselt tarbimisest kehvemad, kui kogu aasta peale (vaata tabelit Lisas 2). Näiteks oli suurima tarbimisega ajaperioodil analüüsitud 10 aasta keskmine meretuuleparkide

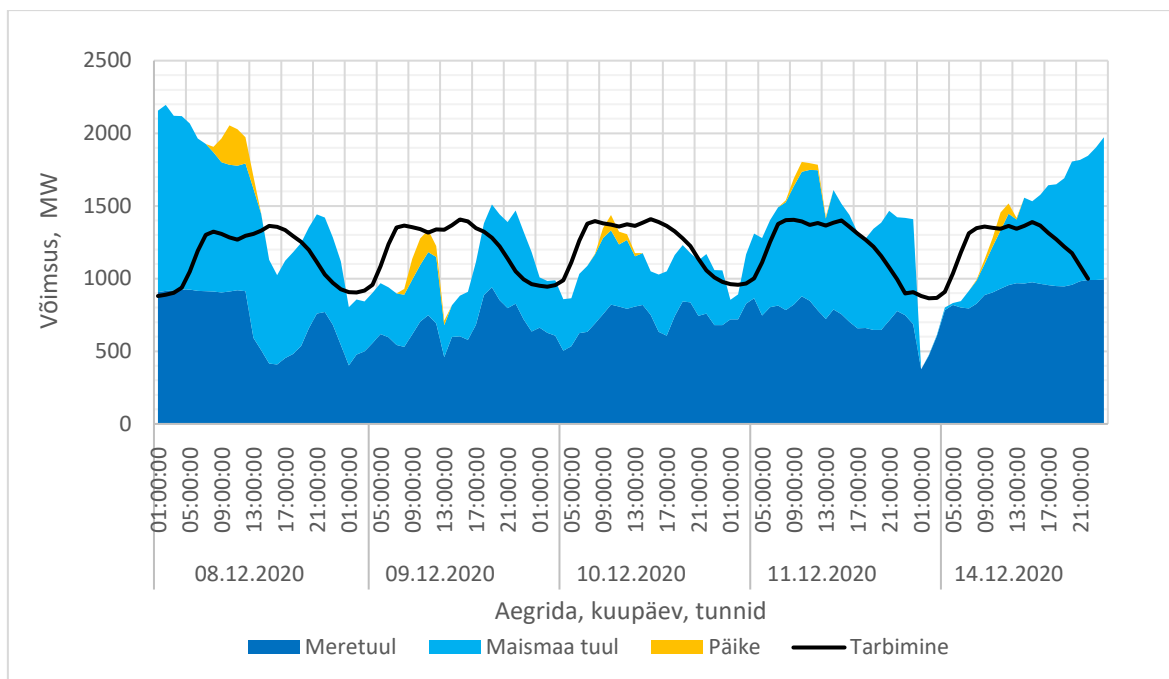
võimsustegur 63% ja maismaatuuleparkide võimsustegur 44%, mis on isegi kõrgemad kui aastased võimsustegurid, mis olid vastavalt 49 ja 36%.

3.2 Elektrienergia impordi vajadus



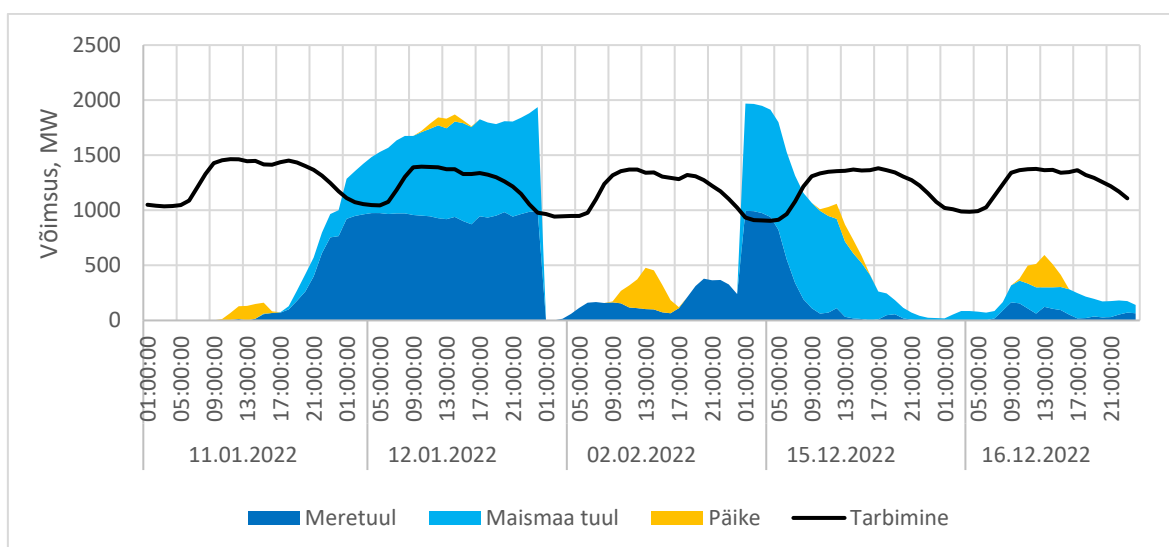
Joonis 3.3 Imporditava elektrienergia tundide arv

Peatükis 2.3 selgus, et terve aasta peale oli imporditav elektrivõimsus üle 366 MW 28,5%, üle 500 MW 21,5% ja üle 1000 MW 2% kogu aastast. Samu näitajaid on näha viie suurima tarbimisega päevade kohta jooniselt 3.3. Jooniselt selgub, et keskmiselt on imporditav elektrivõimsus üle 366 MW 44% ajast, üle 500 MW 40% ajast ja üle 1000 MW 24% ajast. Kõikide võimsuste osakaal on suurenenud võrreldes terve aastase osakaaluga ~20% võrra. Kui vaadata impordi vajadust aastate kaupa, siis kolmel aastal (2014, 2016, 2018) on enamus elektri võimsuse tunnid just üle 1000 MW, ehk sel perioodil on palju tunde, kus taastuenergia panus toodangusse on väga väike ja tarbimise katmiseks peab enamus energiat sisse importima. Analüüsitud kümnest aastast seitsmel on vähemalt 23 tundi viie päevasest perioodist, kui elektrienergia import on suurem kui 1000 MW. Sellised juhused on kehvad, sest juhul kui elektrienergiat sisse importida ei saa, peab tarbimise katmiseks tootma energiat kõrgema hinnaga tootmisüksustega, mis tõstab palju elektri hinda.



Joonis 3.4 Viie kõrgeima tarbimisega päevade tootmis- ja tarbimisgraafik 2020. aasta andmetega

Modelleerimiseks kasutatud aastatest oli viiel suurima tarbimisega päeval kõige stabiilsema toodanguga 2020. aasta mudel (vt joonis 3.4). Nendel päevadel oli imporditava energia hulk ainult 9 GWh, kusjuures 10 aasta keskmine on 49 GWh (vaata Lisa 2). Sel aastal oli keskmine import ühes tunnis 174 MW, kui keskmine kõigi analüüsitud aastate peale oli 709 MW ja maksimaalne import oli 523 MW, kui keskmine aastate peale oli 1278 MW. Vaadates joonist 3.4, siis on 2020 aasta analüüsi tulemused erakordselt head ja selle põhjal ei saa järeldusi teha. Erinevalt aasta 2020-le, oli kõige kehvema toodangu ja suurima imporditava elektrienergia hulgaga aasta 2022 viis kõige suurema tarbimisega päeva.

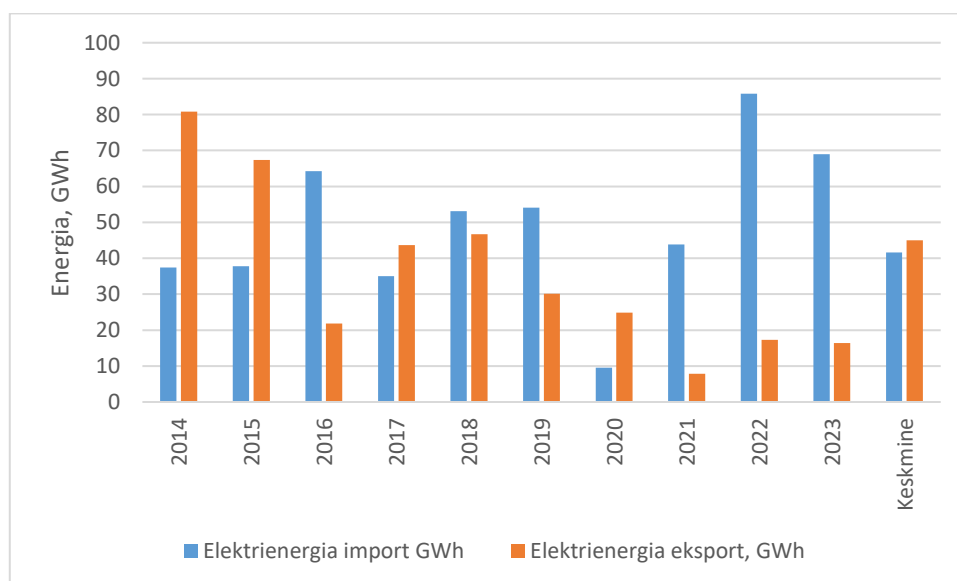


Joonis 3.5 Viie kõrgeima tarbimisega päevade tootmis- ja tarbimisgraafik 2022. aasta andmed

2022 andmetega analüüsis tuli 5 suurima tarbimisega päevadel importida lausa 85 GWh elektrienergiat, ehk ~58,7% kogu vajaminevast energiast. Keskmine import ühes tunnis oli 964 MW ja maksimaalne oli 1441. Kusjuures sel ajaperioodil oli maksimaalne energia tarbimine 1464 MW, mil 98% elektrienergiast tuleb sisse importida. Kuna sel aastal oli eksport 17 GWh, samas kui import oli 85 GWh (vaata Lisa 2), siis ei piisa elektrienergia salvestamisest sel perioodil. Elektrienergia impordi vähendamiseks on vaja sel juhul kasutada juhitavaid võimsusi, et tagada paremat varustuskindlust.

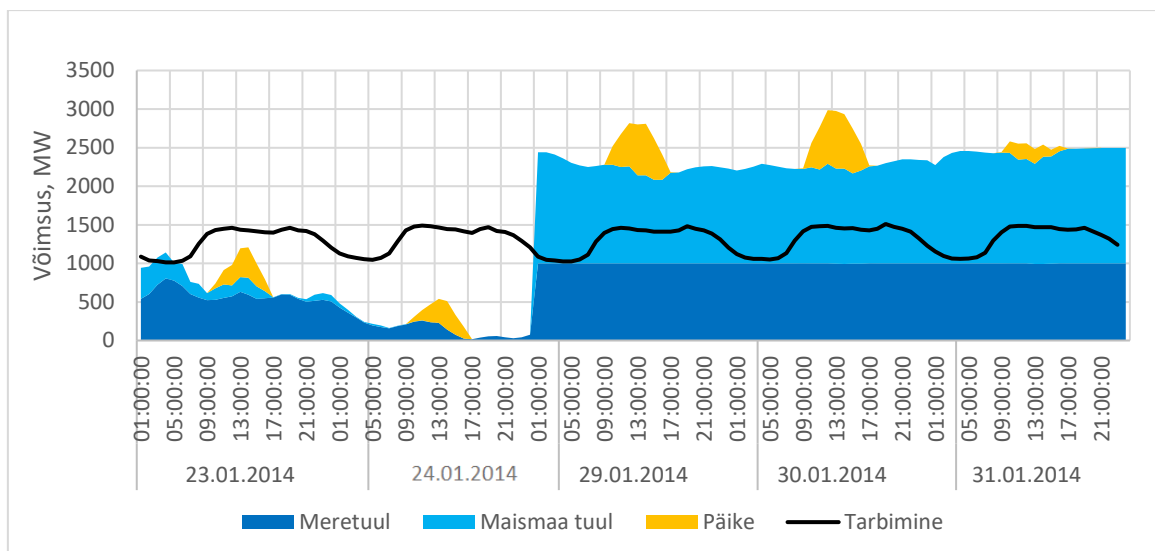
3.3 Elektrienergia eksport suurima tarbimisega päevadel

Nagu juba senisest analüüsist on välja tulnud jääb ka suurima tarbimisega perioodil elektrienergiat tarbimisest üle, mida saab eksportida. Terve aastasest analüüsis selgus, et elektrienergia eksport on suurem kui import, kuid suurima tarbimisega päevadel on need üsna võrdsed. Kuna selles analüüsis valitud päevad on sõltuvad ainult tarbimise suurusest siis on taastuvenergia tootmisüksuste energiatoodang eri päevadel väga erinev.



Joonis 3.6 Elektrienergia impordi ja eksport suurima tarbimisega päevadel

Kui 10 aasta suurima tarbimisega päevade keskmine eksport on ~45 GWh, siis import on ~42 GWh (vaata tabel Lisa 2). Tegelikult on see vaid keskmine näitaja ja olenevalt aastast kõigub ekspordi ja impordi suhe ühele või siis teisele poole. Jooniselt 3.6 on näha, et neljal aastal on olnud eksport suurem kui import, aga viiel aastal on import pea kaks korda suurem kui eksport. Ühel aastal on need energiahulgad enam-vähem võrdsed. See näitab, et sel perioodil ei saa arvestada võimalusega salvestada ekspordiks mõeldud elektrienergiat ning hiljem seda tarbimiseks kasutada. Seda seetõttu, et elektrienergia eksport on enamasti oluliselt väiksem, kui import.



Joonis 3.7 Viie suurima tarbimisega päevade tarbimise ja tootmise graafik

Kuna suurima tarbimisega perioodid satuvad talvekuudele, siis toetub elektritootmine põhiliselt tuuleenergiale. Nagu näha jooniselt 3.7, siis tekib eksporditavat elektrienergiat tihti hästi palju korraka. 2014 aasta näitel jääb rohkem kui kolm päeva järjest igal tunnil energiat tarbimisest üle ~700 MW. Selle ajaperioodi ekspordi kogus on ~80 GWh. Analüüsis kasutatava energiasalve mahtuvus on 6 GWh, ehk enamus elektrienergiast jääb sel juhul salvestamata ja hilisemas energiadefitsiidis pole salvestist kasu, sest pole piisava mahutavusega salvestit, millega kogu tarbimisest üle jäävat energiat salvestada, et seda siis hiljem tarbimise katmiseks kasutada.

4. Salvesti kasutamise ja tulemuste analüüs

Selles peatükis vaadatakse elektrienergia salvestamist pump-hüdroelektrijaamaga juba modelleeritud energiasüsteemis. Lisaks vaadatakse mil määral oleks lisaks salvestile ja taastuenergia üksutele vajadust juhitavate võimuste järele.

Tootmise analüüsis selgus, et isegi suurima tarbimisega ajaperioodil jääb toodetud elektrienergiat üle ekspordiks, seetõttu on salvesti kasutamise analüüs selles energiasüsteemis täiesti kohane. Kui tuule ja päikese ressursid on piisavad, saab salvestiga salvestada elektrienergiat, et seda siis hiljem, kui taastuvate allikate ressursid napivad, kasutada tarbimise katmiseks. Selle kasulikkus võib tulla eriti siis kasuks, kui ka naaberriikides on tänu taastuvate tootmisüksuste rohkusele piisavalt elektrienergiat ja Eestil ei ole seda võimalik hea hinnaga ära müüa. Lisaks tähendab taastuenergia poolt pakutava energia üle tootmine seda, et elektrihind on väga madal, või isegi negatiivne. Salvesti annab juurde sellistele tundidele ühe väga suure tarbija, mis aitaks hoida elektrihinta stabiilsena, kuna salvesti vähendab elektrienergia üle tootmist.

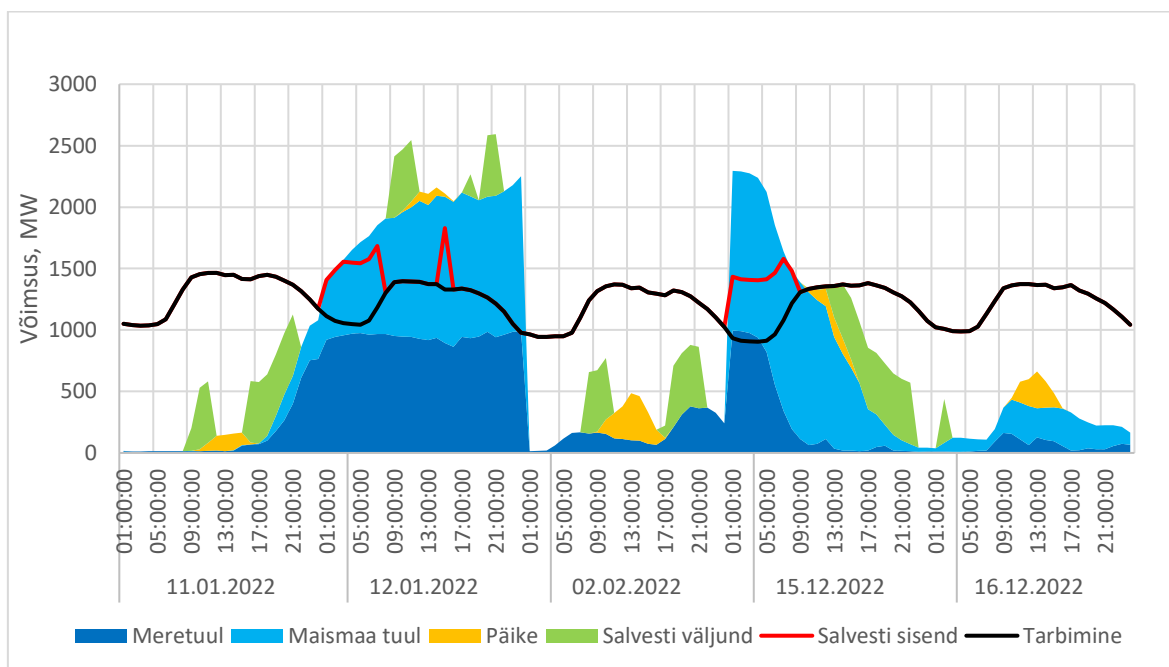
Senises analüüsis selgus, et taastuenergia toodang läbi aasta väga erinev. Talvel võib olla pikalt perioode, kus elektrienergiat on palju üle tarbimise kuid võib ka pikalt olla suur energiadefitsiit. Suvekuudel on tänu päikseenergiale päevane tiputarbimine enamasti kaetud kuid elektrienergiat jääb puudu öösel kui päike ei paista ja tuult ei puhu. Salvestist oleks sel juhul kasu juba siis, kui päeval on elektri üle tootmise ja sellest salvestatud energiat saab kasutada öisel perioodil elektri tarbimise katmiseks. Analüüsis hinnati, kui palju väheneb tänu salvesti kasutamisele imporditava elektrienergia hulk ja tundide arv mil on vaja energiat importida.

Salvesti kasutuse analüüsiks kasutati planeeritava Paldiski energiasalve andmeid. Lisaks vaadati, millist kasu annab kahe sarnase energiasalve kasutamine. Analüüsiks valiti võimalikult hiline aastanumber, kuna siis on installeeritud taastuenergia üksused suuremad kui varasemalt. Kuna 2022. aasta esialgsed toodangu modelleerimise tulemused on lähemal keskmisele kui 2023. aasta tulemused, siis valiti salvesti analüüsi tegemiseks aasta 2022. Kokkuvõtte salvestiga seotud tulemustest on esitatud Tabelis 4.1.

Tabel 4.1 Salvestiga ja salvestita süsteemide tulemuste võrdlus

Salvesti maht	Salvesti puudub	6 GWh	12 GWh
Salvesti kogutoodang	0	718	807
Salvesti võimsustegur	-	16%	18%
Elektrisüsteemi import, GWh	2048	1590	1359
Elektrisüsteemi eksport, GWh	3428	2702	2301
Elektrienergia impordi tunnid	4106	3203	2556
Suurim järjestikune impordi vajadusega tundide arv	210	198	198
Keskmine impordi vajadusega tundide arv	17	13	9

Analüüsist selgus, et 6 GWh mahuga energiasalvesti toodab aastas ~719 GWh elektrienergiat, mis teeb selle võimsusteguriks 16%. Salvesti vähendab imporditava elektrienergia hulka aastas 457 GWh võrra ehk 22%. Tundide arv, mil elektrienergiat ei pea importima väheneb samuti 21% võrra. See tähendab, et salvesti vähendab mingil määral imporditava elektrienergia hulka, kuid siiski vähesel määral arvestades seda, kui palju elektrienergiat läheb ekspordiks võrreldes impordiga.

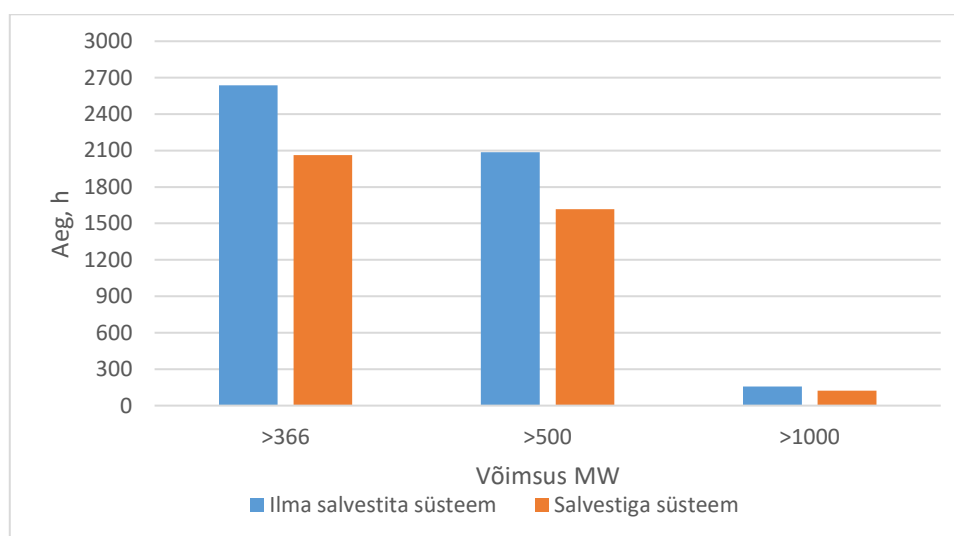


Joonis 4.1 2022 viie suurima tarbimisega päevade tarbimise ja tootmise graafik koos salvestiga

Tabel 4.2 2022. aasta viie suurima tarbimisega päevade analüüs salvestiga ja ilma salvestita

	Elektrienergia eksport, MWh	Elektrienergia import, MWh	Tarbimise katmine taastuenergiaga
Energiasüsteem ilma salvestita	17271	85774	50%
Energiasüsteem salvestiga	20993	68731	58%

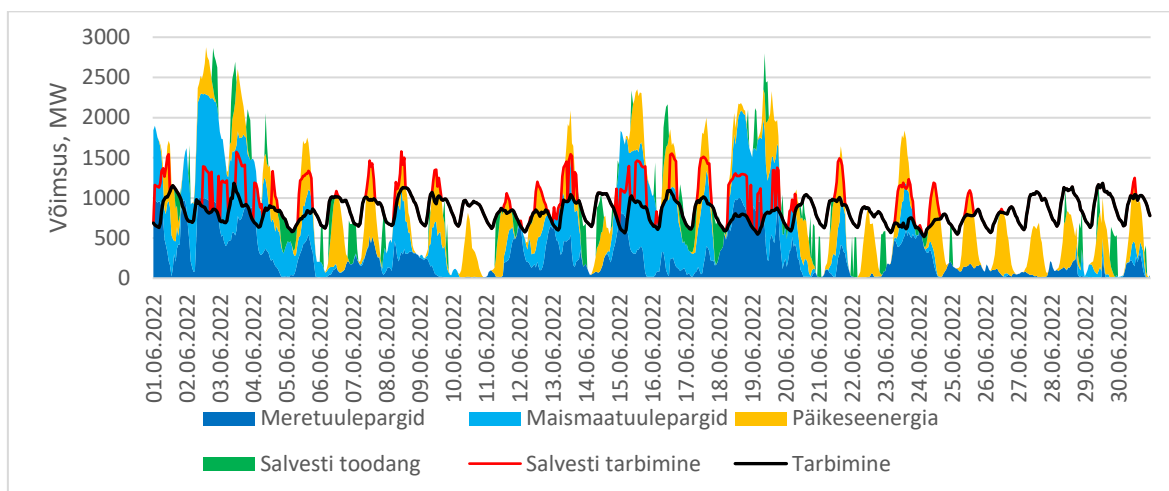
Vaadates viie suurima tarbimisega päeva analüüsi koos salvestiga, siis on näha jooniselt 4.1, et salvesti tarbib osa muidu eksporditavast energiast ära ja hiljem kasutab seda tarbimise katmiseks. Nagu punktis 1.4 oli mainitud, siis võib salvesti energiat toota ka momentidel kui taastuenergia toodang ületab tarbimise. Joonisel on sellist momenti näha näiteks 12. jaanuaril. Järgmine päev ehk 13. jaanuar ei ole joonisele sattunud, kuna seal päeval oli tarbimine juba tunduvalt madalam. Seetõttu ei näe me palju on järgnevalt salvesti energiat tarbinud ja kuidas seda siis tarbimise katmiseks kasutati. Jooniselt on näha, et tol aasta suurima tarbimisega päevadel ei ole kasutatud salvesti suurusest kasu, kuna selle ajaperioodi jooksul väheneb imporditava elektri hulk ~20%. Taastuenergia suudab koos salvestiga katta sel perioodil 58% vajaminevast energiast ära, mis on 8% rohkem, kui ilma salvestita süsteemis.



Joonis 4.2 Elektrienergia impordi tundide arv vastavalt võimsusele salvestiga ja ilma salvestita aastal 2022

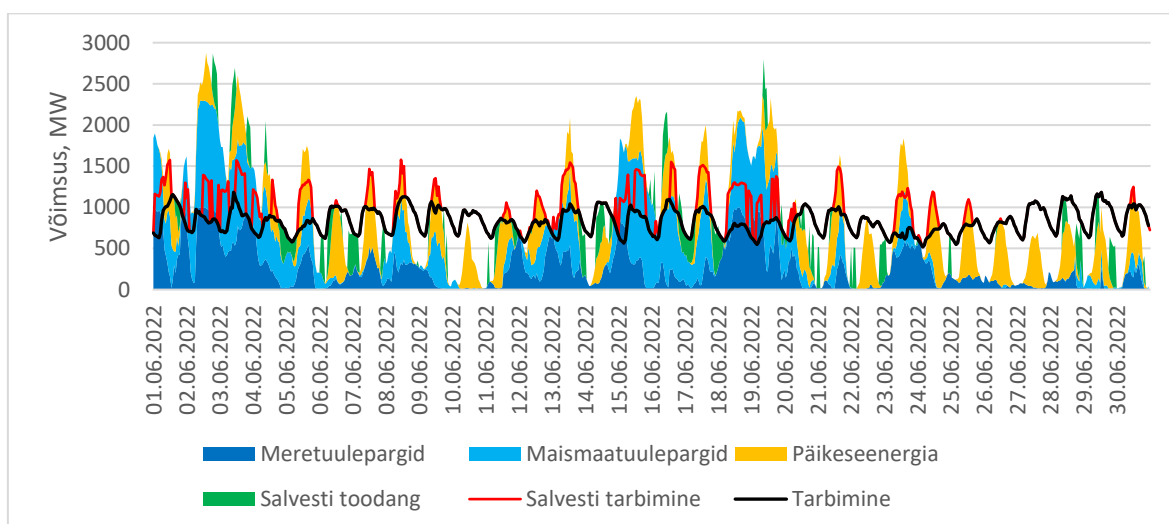
Elektrienergia impordi vajaduse vähenemise hindamiseks on otstarbekas uurida, kui palju väheneb elektrienergia import erinevate võimsuste juures tunnipõhiselt. Jooniselt 4.2 on näha, et salvesti lisamisega süsteemi väheneb eelkõige elektrienergia impordiga tundide arv, kus import on suurem kui 366 või 500 MW. Mõlema puhul on tundide vähenemine ~500 tunni juures, ehk 5,7 % aastast. Kuid sellest kehvem tulemus on, et suured impordi võimsused üle 1000 MW vähenevad napilt 158 tunni pealt 122 tunni peale. See tähendab, et olukorras, kus taastuenergia toodangu juures jääb endiselt

puudu >1000 MW elektrienergiat, ei suuda ka salvesti sellistel tundidel energiadefitsiiti oluliselt vähendada.



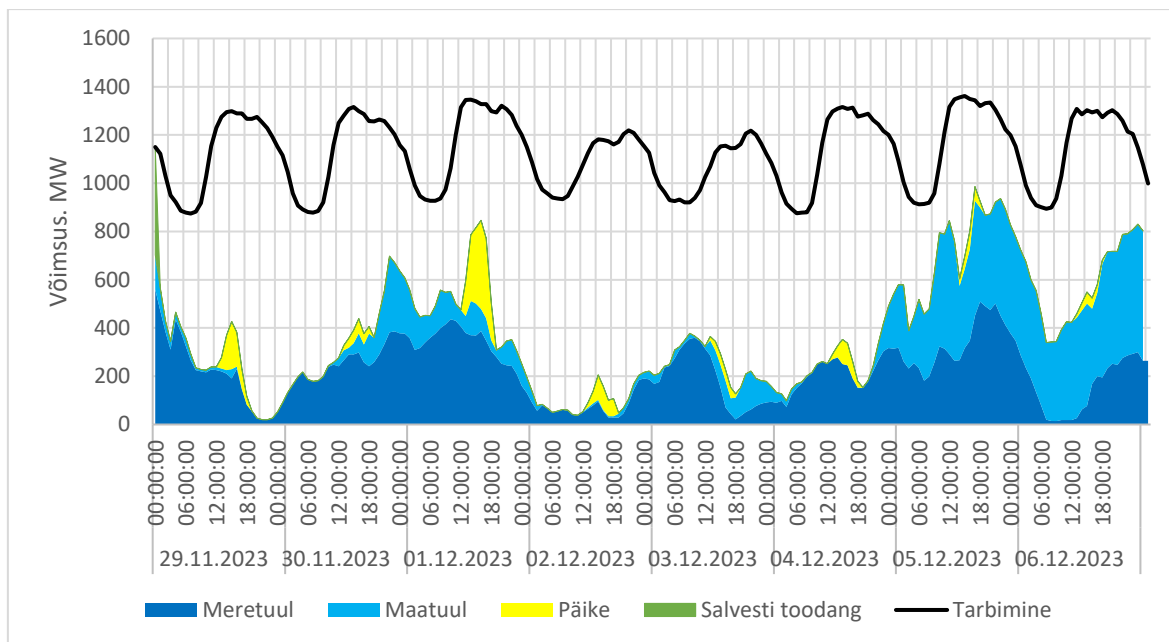
Joonis 4.3 Suvise tootmise ja tarbimise graafik koos 6 GWh salvestiga

Salvesti analüüsi püstituses sai pandud hüpotees, et suvekuudel võiks salvesti katta ära päeval tekkinud energia ülejäägist öise energia tarbimise. Jooniselt 4.3 on näha 2022. aasta juunikuu tootangu ja tarbimise kõverat koos salvesti tarbimise ja väljundiga. Jooniselt on näha, et salvesti suudab osad päikese- ja tuuleenergiast tekkivad puudujäägid ära katta. Samuti on hästi näha, kuidas salvesti vähendab tarbimise näol elektrienergia eksporti. Kahjuks on, aga kuu esimeses pooles ja lõpus selline periood, kus öötundidel salvestis ei ole piisavalt energiat, et elektrit toota. Ilma tuuleenergia panuseta jääb nende võimsuste juures päikeseenergiast väheks, et katta päeval tarbimist ja toota samal ajal piisavalt salvesti täitmiseks, et seda siis hiljem öötundidel tarbimise katmiseks kulutada. Seetõttu on selle salvesti mahutavuse juures vähe olukordi, kus suvekuudel on salvesti toodetud elektriga võimalik kogu puudujääk katta.



Joonis 4.4. Suvise tootmise ja tarbimise graafik koos kahekordse salvesti mahutavusega

Jooniselt 4.4 on näha 2022 aasta juunikuu tootmise ja tarbimise graafik, kus on kasutatud 12 GWh salvestit. Kui võrrelda seda joonisega 4.3, siis kaks korda suurema mahutavusega salvesti väga suurt muutust sisse ei too. Kõige suuremad erinevused on 14. ja 28. juunil, kui joonisel 4.4 toodab salvesti rohkem energiat tänu oma suuremale mahutavusele. Seetõttu ei anna ka kaks korda suurema mahutavusega salvesti olulist efekti. Suurema kasu saamiseks oleks ilmselt vaja suurema võimsuse ja mahutavusega salvestussüsteemi, siis saaks tuuleenergiast tekkivat suurt energia ülejääki kauem säilitada ja siis energiadefitsiidi ajal tarbimise katmiseks kasutada.



Joonis 4.5. Kõige suurema energiadefitsiidiga perioodi graafik

Salvesti analüüsis selgus, et 2022 on kõige kehvem taastuvenergia toodang detsembri kuus, kui suurim järjestikuste imporditavate tundide hulk koos salvestiga on 198 tundi, mis on võrreldes ilma salvestiga süsteemiga täpselt 12 tundi vähem. 12 tundi on ka täpselt see ajahulk, mil analüüsis käsitletud salvesti suudab elektrienergiat anda võrku maksimaalse võimsusega. See tähendab, et 198 tundi järjest, ehk ~8 päeva on vaja siiski elektrienergiat isegi nende tootmisvõimsuste juures importida võimsustega vahemikus 300-1300 MW (vt Joonis 4.5).

Lisaks tehti analüüs kahe salvestiga, mille summaarne mahutavus oli 12 GWh (vaata Tabel 4.1). Selgus, et sel juhul vähenes impordi vajadus 33%, kuid suurim järjestikune impordi vajadusega tundide arv jäi endiselt 198. Seda seetõttu, et joonisel ajaperioodile eelnes samuti väga pikk ajaperiood, kus tuule ja päikeseressurssi oli vähe. Seetõttu olid salvestid tühjad ja isegi kaks salvestit ei suutnud elektrienergia impordi tundide arvu vähendada.

4.1 Juhitavate tootmisvõimsuste vajalikkus

Selleks, et riigi energia varustuskindlus oleks parem ja riik ei sõltuks liiga palju naaberriikidest, oleks hea, kui enamus vajaminevast elektrienergiast toodetakse iseseisvalt. Analüüsist selgus, et 50%-l elektrienergia impordiga tundidest on vajamineva elektrienergia hulk 500 MW või rohkem. Tarbimise tipp ulatus kümne aasta peale vahemikku 1385 kuni 1591 MW ja suurim imporditav elektri võimsus oli vahemikus 1200 kuni 1450 MW. Seetõttu on igal aastal selline olukord, kus imporditav elektrienergia hulk on väga suur, mis on riskantne, juhul kui ka naaberriikides peaks olema energia puudujääk. 2017. aasta andmetel tehtud analüüs näitas, et analüüsis kasutatavate tootmisvõimsuste juures on 196 tundi aastas, mil elektrienergia import on suurem kui 1000 MW (vaata joonis 2.5). 2022. aasta andmetega tehtud analüüsis oli see number 158 ja koos salvestiga 122 tundi (vaata joonis 4.2). Siiski on neid tunde palju, kuna taastuvenergia toodang on ebaühtlane ja varustuskindluse parandamiseks oleks sel juhul vaja lisa juhtavaid võimsusi.

Eesti energia-ja kliimakava aastani 2030 näeb ette 366 MW biomassil põhinevaid võimsusi. Kuigi neid võimsusi pole modelleerimisel arvesse võetud, näitab joonis 2.5 ja Excelis tehtud arvutused, et 366 MW võimsusega soojuselektrijaamade kasutamisel oleks võimalik vähendada 2017. aasta andmete alusel elektrienergia impordi 1197 GWh võrra, mis moodustaks 60% kogu impordist. Selle eelduseks on, et elektrijaamad töötaksid 2500 tundi täisvõimsusel ja umbes 1500 tundi vähendatud võimsusel, et katta tuule- ja päikeseparkidest puuduva energia hulk tarbimise vajaduste rahuldamiseks. Kuna soojuselektrijaamade võimsuse reguleerimine pole nii paindlik ja kiire, kui näiteks gaasijaamadel, tekiks antud ligikaudse arvutuse juures kindlasti üleliigselt energiat, mida tuleks eksportida. 366 MW koguvõimsusega elektrijaamad saaksid sel juhul toota energiat vähemalt 2500 tundi, ehk ~28% kogu aastast. Seetõttu piisaks isegi ette nähtud tootmisvõimsustest, kuna need saaks piisavalt töötunde, et end ära tasuda. Kui kasutada veel suurema võimsusega tootmisüksusi, muutub nende võimsustegur veel väiksemaks, mis viib nende tootmishinna väga kõrgeks ja see poleks mõistlik. Selleks, kuidas katta suurt lühiajalist energiadefitsiiti, oleks vaja leida kompromiss tootmisseedme võimsuse ja tööaja vahel, mis vajaks eraldi analüüsi ja seda see töö ei käsitle.

KOKKUVÕTE

Eesti on võtnud ambitsioonika eesmärgi toota aastaks 2030 kogu elektrienergia taastuvatest loodusvaradest. Selleks on vaja püstitada kokku 3500 MW väärtuses päikese- ja tuuleparke. Antud töö eesmärgiks oli välja selgitada, kui palju saab selliste tootmisüksustega arvestada, Eesti sisemaise energia tarbimise katmisel.

Antud töös modelleeriti energyPRO tarkvaras viimase 10 aasta ilmastikuandmeid kasutades Eesti tuule- ja päikeseelektrijaamade tootmist. Saadud tulemusi töödeldi vajaduse Excelis, et saada statistika, millega luua võrdlusi.

Tulemustes selgus, et 10 aasta keskmiselt katab taastuenergia ära 75% sisemisest elektri tarbimisest. Kuna 25% elektrienergiast tuleb sisse importida, siis uuriti kuidas jagunevad tunnipõhiselt ära imporditava energia võimsused. Selgus, et energia impordi võimsused olid suuremad kui 366 MW 2500 tundi, ehk 28% aastast. Kriitiliselt suured impordi võimsused üle 1000 MW esinesid 198 tunnil ehk 2% aastast. Leiti, et sellised suured impordi võimsused esinevad enamasti talvekuudel, kuna siis on tarbimine suurem ja päikeseenergial on väiksem roll toodangule. Suvekuudel on probleemiks vähene tuuleressurss ja seetõttu tekib palju olukordi, kus tuult ei ole ja öösel päike ei paista ning sel juhul on öösiti suur energia defitsiit.

Analüüsiti eraldi ka iga aasta viite kõige suurema tarbimisega päeva, et näha kui palju saab siis loota taastuenergiale. Suurima tarbimisega päevadeks olid iga aastasel päevad, mil esines suurim tarbimine ning need sattusid enamjaolt jaanuari, veebruari ja detsembri peale. Selgus, et väga palju sõltub sellele hetkele sõltuvast ilmast. Kuigi temperatuuri ja tarbimise vahel leiti seos siis temperatuuri ja toodangu vahelist seost ei tõdetud. Leiti, et taastuenergia allikatel põhinevad tootmisüksused suutsid ära katta 70% kogu sisemaise elektri tarbimise. Kehvematel juhtudel on see ~40% ja parematel aastatel lausa 90%. See tähendab, sel perioodil on taastuenergiaga arvestamine keeruline ja elektrienergia toodang taastub väga palju juhusele. Tõdeti, et toodang toetub talve kuudel väga palju tuuleenergiale, ning seetõttu on tihti esinemas juhud, kus on kas suur üle tootmine ja palju energiat läheb ekspordiks, või on taastuenergia toodang nullilähedane.

Analüüsist selgus, et elektrienergia eksport oli analüüsitud 10 aasta peale keskmiselt 1,8 korda suurem, kui import. Ja eksporditavat elektrienergiat esines tublisti isegi suurima tarbimisega päevade analüüsis. Seetõttu oli vajalik uurida energiasalvesti mõju antud süsteemile. Energia salvestamine on vajalik, sest suure taastuenergia tootmisüksuste kasvuga ka Eesti lähiriikides, võib tekkida olukord, kus on kõigis riikides toodang väga hea ja üleliigset elektrienergiat pole kuhugi ekspordida. See põhjustab ka madala elektrihinna. Tarbimise ja elektrihinna ühtlustamiseks oleks mõistlik lisada süsteemi salvesti.

Salvesti analüüsis võeti aluseks planeeritav Paldiski energiasalv, mille näitajad sisestati energyPRO-se. Tulemustest selgus, et salvesti vähendab ligi 20% elektrienergia impordi tunde aastas, kuid ei vähenda seda ajal, kui on pikemad taastuenergia allikate põuad. Lisaks leiti, et salvesti ei lahenda suvel tekkivat öist energiadefitsiidi probleemi, kuna päikeseenergia ei suuda päevaga piisavalt salvestit täita. Talvel on probleemiks pikad tuuleenergiata perioodid ja seal jääb salvesti mahtuvusest väheks.

Antud töös tõdeti, et energia-ja kliimakava planeeritud 366 MW biomassil põhinevatest soojuselektrijaamadest võib piisata arvestades tundide hulka, mida nad täisvõimsusel töötada saavad. Kuna võimsamad elektrijaamad saavad vähem töötunde siis on nende energia tootmishind väga kõrge, mis tõstab ka elektri hindu.

Kokkuvõtteks saab öelda, et taastuenergiaga saab arvestada, sest 75% vajaminevast elektrienergiast suudetakse ära katta. Täiendav salvesti lisamine aitab ühtlustada impordi ja ekspordi suhet ja lisa juhitavad võimsused oleks abiks varustuskindluse parandamisel.

SUMMARY

Estonia has set an ambitious goal to produce all electricity from renewable sources by 2030. To achieve this, a total of 3500 MW worth of solar and wind parks need to be established. The aim of this study was to determine the extent to which such production units can be relied upon to meet domestic energy consumption.

Using the energyPRO software and weather data from the past 10 years, the production of Estonian wind and solar power plants was modeled. The results were processed in Excel to generate statistics for comparisons.

The results revealed that renewable energy covers an average of 75% of domestic electricity consumption over the past 10 years. As 25% of electricity needs to be imported, the distribution of imported energy capacities on an hourly basis was examined. It was found that energy import capacities exceeded 366 MW for 2500 hours, or 28% of the year. Critically large import capacities exceeding 1000 MW occurred for 198 hours, or 2% of the year. These large import capacities mostly occurred during winter months when consumption is higher and solar energy has a smaller role in production. In summer months, the problem is the lack of wind resources, resulting in many instances of no wind and no sun at night, leading to significant energy deficits.

The five highest consumption days of each year were also analyzed to assess the reliance on renewable energy. It was found that the weather at the time plays a significant role. Although a correlation between temperature and consumption was found, no correlation was observed between temperature and production. Renewable energy-based production units were found to cover 70% of total domestic electricity consumption. In poorer years, this figure is around 40%, while in better years it reaches 90%. This indicates that relying on renewable energy during this period is challenging, as electricity production fluctuates greatly. Production heavily relies on wind energy during winter months, leading to situations of either oversupply and exporting excess energy or minimal renewable energy production.

The analysis revealed that electricity exports averaged 1.8 times higher than imports over the 10-year period. Exported electricity was even significant on the highest consumption days. Therefore, the impact of energy storage on the system was investigated. Energy storage is necessary because with the growth of large renewable energy production units in neighboring countries, there may be situations where all countries have surplus energy with nowhere to export, leading to low electricity prices. To align consumption and electricity prices, adding a storage system to the system would be sensible.

The analysis was based on the planned Paldiski energy storage, whose parameters were entered into energyPRO. The results showed that the storage reduces electricity import

hours by nearly 20% annually but does not reduce them during longer periods of renewable energy drought. Additionally, it was found that the storage does not solve the problem of nighttime energy deficit in summer, as solar energy cannot fill the storage sufficiently during the day. In winter, the problem is long periods without wind, for which the storage capacity is insufficient.

The study found that the planned 366 MW biomass-based thermal power plants in the energy and climate plan may suffice considering the number of hours they can operate at full capacity. Since more powerful power plants operate for fewer hours, their energy production cost is very high, which also increases the price of electricity.

In conclusion, renewable energy can be relied upon, as it covers 75% of the required electricity. Adding additional storage helps to balance the import-export ratio, and additional controllable capacities would help improve supply reliability.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Kliimaministeerium, „Kliimaministeerium,“ 2022. [Võrgumaterjal]. Available: <https://kliimaministeerium.ee/euroopa-liidu-kliimaeesmargid>. [Kasutatud 19 04 2024].
- [2] Zero Terrain, „Energiasalv,“ Zero Terrain, [Võrgumaterjal]. Available: <https://energiasalv.ee/kasud/>. [Kasutatud 23 04 2024].
- [3] Elering, „Elering Live; Börsihinnad,“ Elering, [Võrgumaterjal]. Available: <https://dashboard.elering.ee/et/nps/price?interval=minute&period=days&start=2024-04-22T21:00:00.000Z&end=2024-04-23T20:59:59.999Z>. [Kasutatud 23 04 2024].
- [4] Statista, „Capacity factors for selected energy sources in the United States in 2022,“ Statista, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.statista.com/statistics/183680/us-average-capacity-factors-by-selected-energy-source-since-1998/>. [Kasutatud 23 04 2024].
- [5] Vestas, „V236-15.0 MW,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.vestas.com/en/products/offshore/V236-15MW>. [Kasutatud 23 04 2024].
- [6] Energy-Charts, „Public net electricity generation in Estonia in 2023,“ Energy-Charts, [Võrgumaterjal]. Available: <https://energy-charts.info/charts/energy/chart.htm?l=en&c=EE&interval=year&year=2023>. [Kasutatud 23 04 2024].
- [7] E. Commission, „Eesti riikliku energia- ja kliimakava aastani 2030,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://commission.europa.eu/publications/estonia-draft-updated-necp-2021-2030_en. [Kasutatud 19 04 2024].
- [8] Elering, „Elektri tarbimine ja tootmine,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.elering.ee/elektri-tarbimine-ja-tootmine>. [Kasutatud 19 04 2024].
- [9] Copernicus, „ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels?tab=overview>. [Kasutatud 09 05 2024].
- [10] & C. Hendrikson, „Eesti mereala planeering,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://mereala.hendrikson.ee/kaardirakendus.html>. [Kasutatud 09 05 2024].
- [11] Elering, „EESTI ELEKTRIVARUSTUSKINDLUSE ARUANNE,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://elering.ee/sites/default/files/2023-12/Elering_VKA_2023_WEB.pdf. [Kasutatud 10 05 2024].
- [12] Z. S. Baird, D. Neshumayev, O. Järvik ja K. M. Powell, „National Library of Medicine,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8717974/#pone.0261780.ref025>. [Kasutatud 23 04 2024].

LISAD/APPENDICES

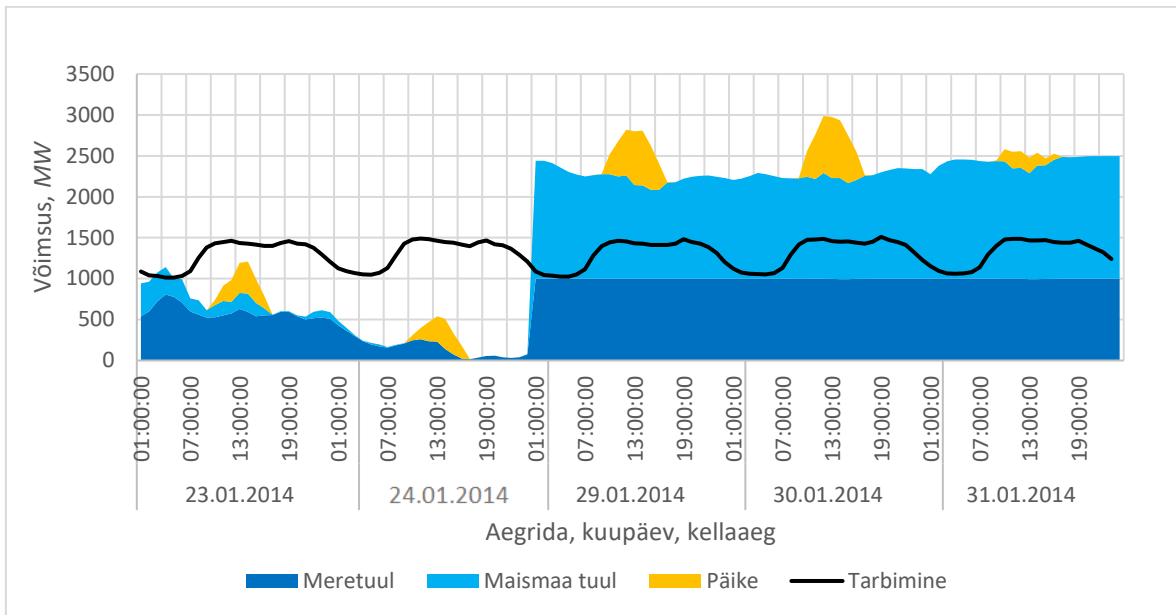
Lisa 1 2014-2023 aasta andmetega analüüsi tulemused

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Keskmine
Aastane tarbimine, GWh	7880	7924	8152	8294	8426	8223	7930	8428	8182	8072	8151
Tarbimistipp, MW	1510	1385	1542	1478	1537	1540	1409	1591	1464	1554	1501
Maismaatuuleparkide toodang, GWh	3705	4328	3848	4274	3719	4229	5001	4501	4058	3359	4102
Päikeseparkide toodang, GWh	1288	1295	1258	1242	1355	1315	1284	1283	1368	1353	1304
Meretuuleparkide toodang, GWh	4133	4441	4126	4408	3951	4489	4974	4685	4135	3869	4321
Toodang kokku, GWh	9125	10064	9232	9923	9025	10033	11260	10469	9561	8581	9727
Maismaatuuleparkide võimsustegur	33%	38%	34%	38%	33%	37%	44%	40%	36%	29%	36%
Päikeseelektrijaamade võimsustegur	12%	12%	12%	12%	13%	13%	12%	12%	13%	13%	12%
Meretuuleparkide võimsustegur	47%	51%	47%	50%	45%	51%	57%	53%	47%	44%	49%
Elektrienergia import, GWh	2092	1724	2142	1990	2519	1771	1392	1748	2048	2507	1993
Elektrienergia eksport, GWh	3334	3864	3222	3619	3118	3582	4722	3789	3428	3015	3569
Siseriiklikuks tarbimiseks toodetud elektrienergia, GWh	5792	6200	6010	6304	5907	6452	6538	6680	6134	5566	6158
Imporditava elektrienergia tundide osa aastast	49%	43%	50%	46%	52%	43%	36%	42%	47%	53%	46%
Keskmine elektrienergia import tunnis, MW	488	454	490	497	549	465	443	471	499	545	490
Maksimaalne järjestikune tundide arv, kui energiat imporditakse, tund	156	136	190	138	226	115	77	115	210	276	164
Keskmine tundide arv kui energiat imporditakse, tund	21	17	20	19	22	16	15	15	17	19	18

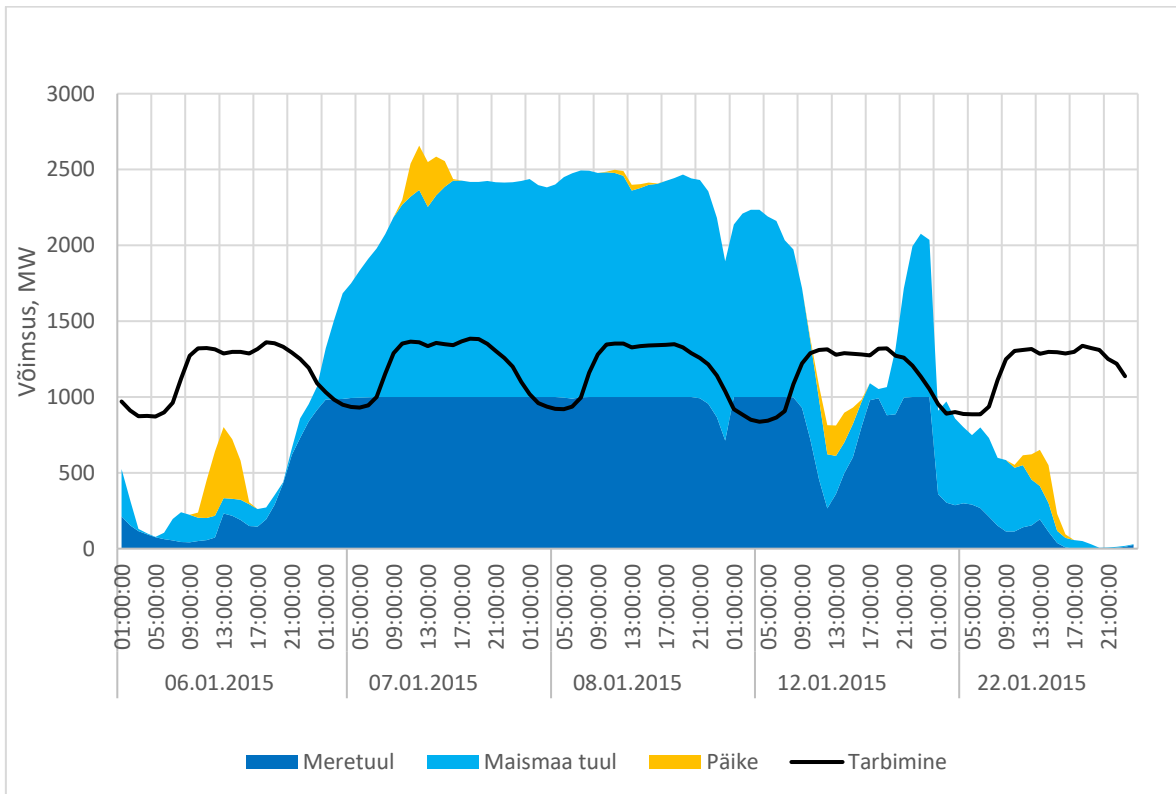
Lisa 2 2014-2023 aastate 5 suurima tarbimisega päeva analüüsi tulemused

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2021	2020	2022	2023	Keskmine
Summaarne tarbimine	156	140	159	151	158	155	160	142	146	153	154
Maismaatuuleparkide toodang, GWh	97	88	56	54	55	67	25	66	37	47	63
Meretuulepargide toodang, GWh	89	77	56	92	72	58	81	88	38	49	75
Päikeseparkide toodang, GWh	12	5	5	13	23	5	18	2	4	5	12
Toodang kokku, GWh	198	170	117	160	151	131	124	157	78	100	150
Elektrienergia import, GWh	37	38	64	35	53	54	44	10	86	69	47
Elektrienergia eksport, GWh	81	67	22	44	47	30	8	25	17	16	43
Siseriiklikuks tarbimiseks toodetud elektrienergia, GWh	117	103	95	116	105	101	117	132	61	84	108
Keskmine import, MW	814	675	738	615	1107	712	516	174	964	774	740
Maksimaalne import, MW	1412	1304	1241	1450	1387	1401	1239	523	1441	1386	1348
Keskmine tarbimine, MW	1308	1172	1331	1265	1327	1297	1346	1195	1225	1283	1292
Max tarbimine, MW	1510	1385	1542	1478	1537	1540	1591	1409	1464	1555	1512
Impordi osakaal kogu ajaperioodist	38%	46%	72%	47%	40%	63%	70%	46%	73%	74%	54%
Taastuenergiaga tarbimise katmise osakaal	62%	54%	28%	53%	60%	38%	30%	54%	27%	26%	46%
Maismaatuuleparkide võimsustegur	62%	57%	36%	35%	35%	43%	16%	42%	23%	30%	41%
Päikeseelektrijaamade võimsustegur	74%	64%	47%	77%	60%	49%	68%	74%	31%	41%	63%
Meretuuleparkide võimsustegur	8%	3%	4%	9%	16%	4%	12%	2%	3%	3%	8%
Keskmine temperatuur	-15	-5	-15	-13	-15	-8	-14	-4	0	-7	-12

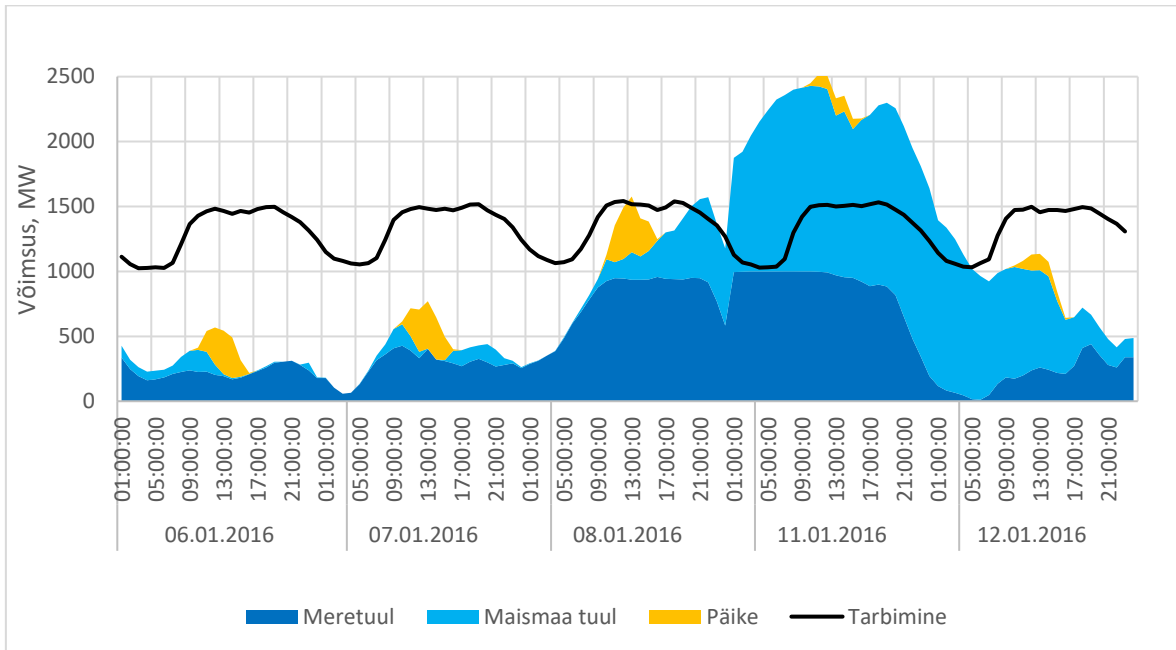
Lisa 3 Viie kõrgeima tarbimisega päevade tootmis- ja tarbimisgraafik 2014.
aasta andmed



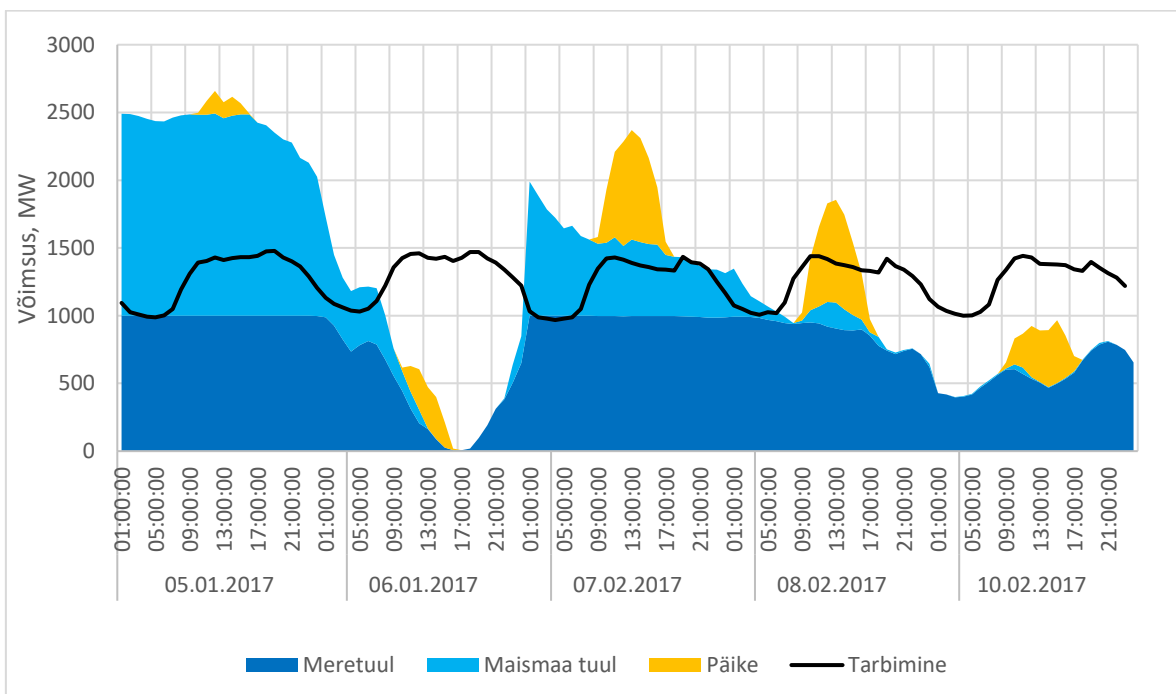
Lisa 4 Viie kõrgeima tarbimisega päevade tootmis- ja tarbimisgraafik 2015.
aasta andmed



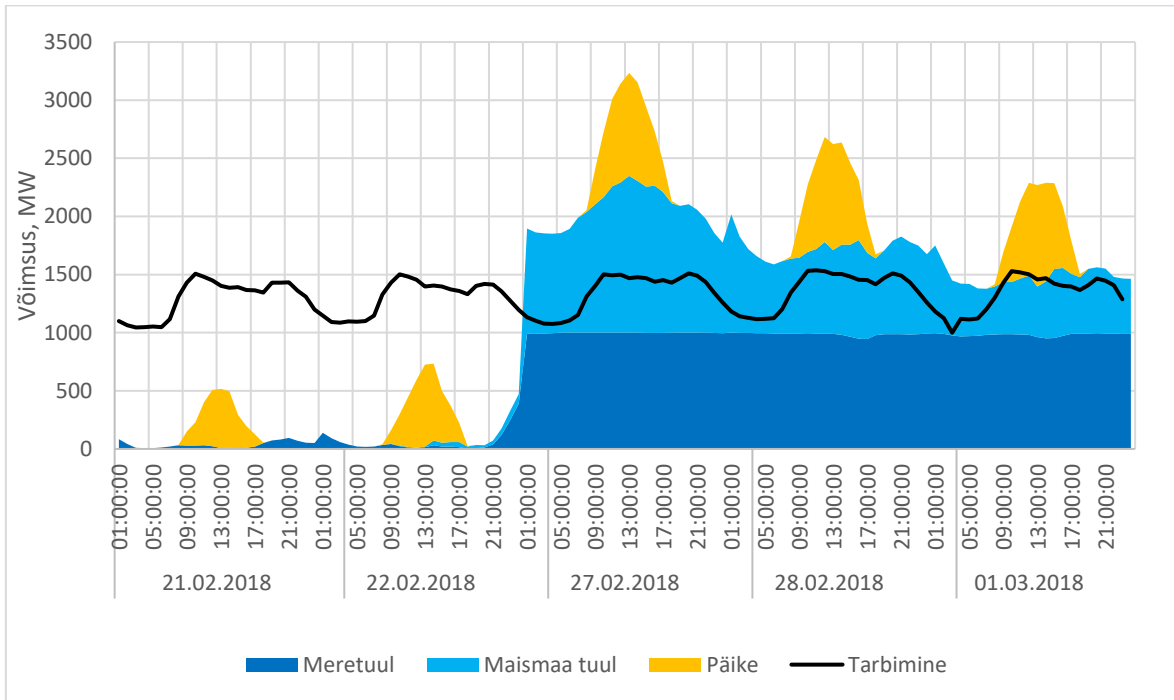
Lisa 5 Viie kõrgeima tarbimisega päevade tootmis- ja tarbimisgraafik 2016.
aasta andmed



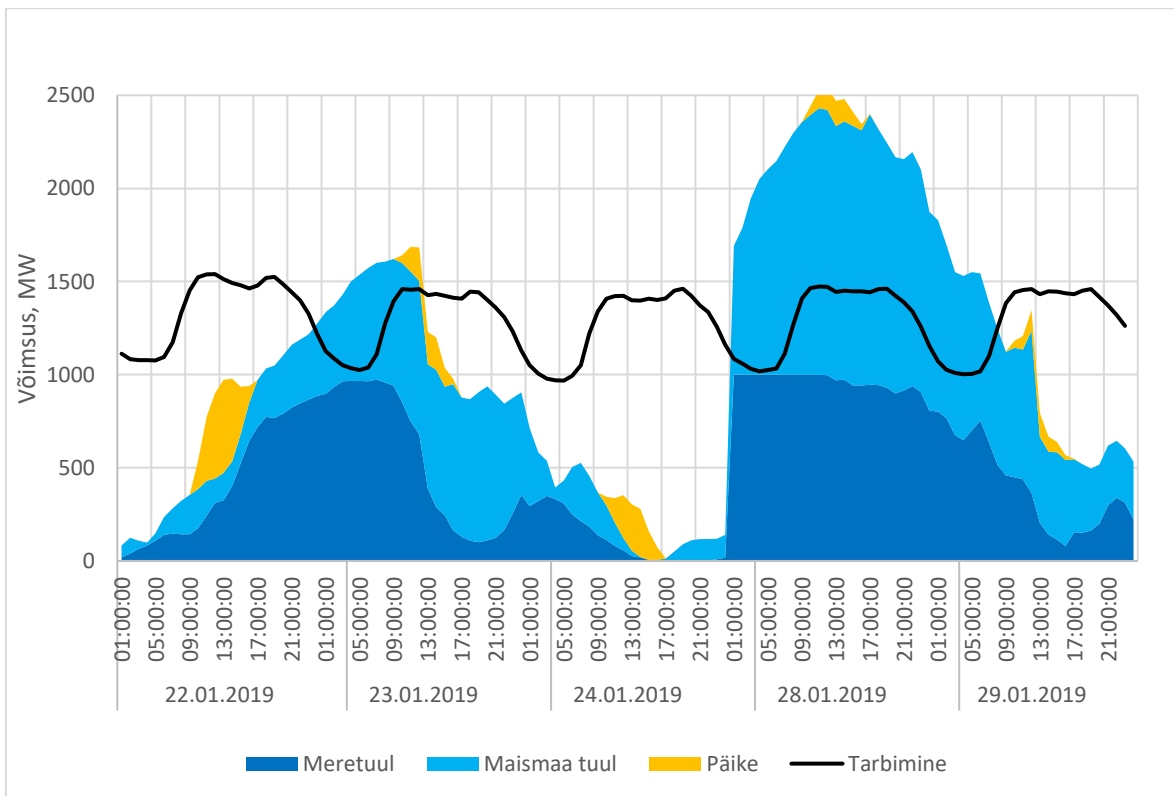
Lisa 6 Viie kõrgeima tarbimisega päevade tootmis- ja tarbimisgraafik 2017.
aasta andmed



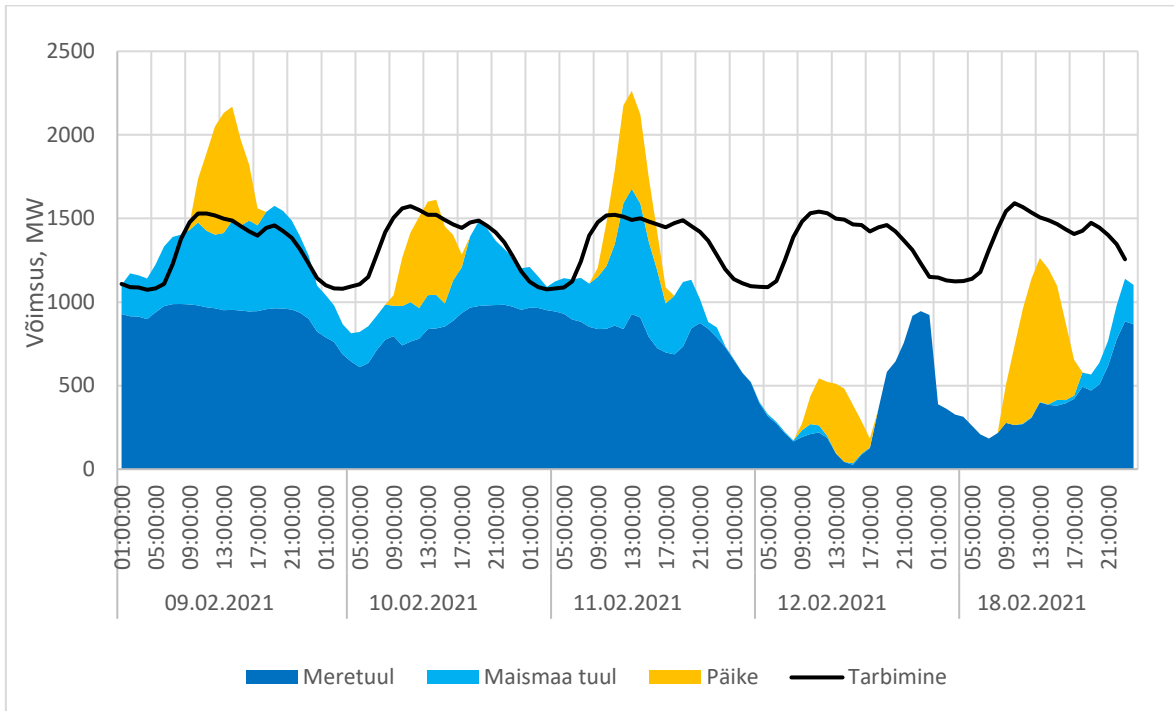
Lisa 7 Viie kõrgeima tarbimisega päevade tootmis- ja tarbimisgraafik 2018.
aasta andmed



Lisa 8 Viie kõrgeima tarbimisega päevade tootmis- ja tarbimisgraafik 2019.
aasta andmed



Lisa 9 Viie kõrgeima tarbimisega päevade tootmis- ja tarbimisgraafik 2021.
aasta andmed



Lisa 10 Viie kõrgeima tarbimisega päevade tootmis- ja tarbimisgraafik 2023.
aasta andmed

