

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

EESTI VARUSTUSKINDLUS KRIISIOLOUKORRAS
ESTONIAN SECURITY OF ELECTRICAL SUPPLY IN
EMERGENCY SITUATIONS

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Robert Kuuba

Üliõpilaskood 179599EAAB

Juhendaja: nooremteadur Hardi Koduvere

Tallinn 2021

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.

"....." 202.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 202.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....".....202... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina _____ (*autori nimi*)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja on

(*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 loomingulise 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.

Lõputöö lühikokkuvõte

Autor: Robert Kuuba

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: Eesti varustuskindlus kriisiolukordades

Kuupäev:

56 lk

18.05.2021

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): nooremteadur Hardi Koduvere

Sisu kirjeldus:

Käesoleva lõputöö eesmärgiks on uurida mudeli toel Eesti elektrilist varustuskindlust kriisiolukorras, konkreetse töö puhul saartalitluses. Mudeliks, millega töö teostati, oli Balmorel. Balmoreli puhul on tegu lineaarsetel võrranditel põhineva energiasüsteemi optimeerimise mudeliga, mida on laialdaselt kasutatud nii Põhjamaades kui ka Eestis, sh ka TalTechis. Mudelis uuritakse stsenaariume, mis püüavad jäljendada Eesti 2030. aasta võimalikku energiasüsteemi. Kusjuures uuritakse kõige pealt stsenaariume, kus on ühendused välisriikidega ja seejärel stsenaariume saartalitluses, mille alusel neid hiljem võrreldakse.

Töö koosneb kolmest osast. Esimeses, teoreetilises osas, kirjeldatakse varustuskindluse olemust ja selle olukorda Eestis viimase aruande baasil. Lisaks kirjeldatakse investeeringuid ja plaane, mis energiasüsteemis toimuma hakkavad. Teises peatükis kirjeldatakse lähemalt kasutatavat mudelit ning selle sisendeid ja väljundeid. Sinna juurde, saab selgitatud töös kasutatav meetodika ning kirjeldatud uuritavad seadmed. Töö põhiosa viimases peatükis esitletakse mudeli uurimisel saadud tulemusi kõikide stsenaariumite kohta, mis järel neid tulemusi võrreldakse. Tulemuste ja nende võrdluse alusel tehakse järeldusi selle kohta, kui häid tulemusi eri stsenaariumid varustuskindluse osas annavad ja millistel juhtudel on varustuskindlus paremini tagatud.

Märksõnad: varustuskindlus, saartalitus, mudel, Balmorel, energiasüsteem

Abstract

<i>Author:</i> Robert Kuuba	<i>Type of the work:</i> Bachelor Thesis
<i>Title:</i> Estonian Security of Electrical Supply in Emergency Situations	
<i>Date:</i> 18.05.2021	<i>56 pages</i>
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor of the thesis:</i> early stage researcher Hardi Koduvere	
<i>Abstract:</i> <p>The goal of the current thesis is to examine, through the use of a model, the state of the Estonian security of electrical supply in a time of crisis. In the context of this thesis the island operation is studied. The mentioned model, that was used in the study, was Balmorel. Balmorel is a model used for the optimization of the energy system, that has been widely used both in the Nordic countries and in Estonia, including in the Taltech university. In the model scenarios are studied, that try to imitate the possible energy system of the year 2030. By the way, first the scenarios that include connections with neighboring countries are studied, and after that the scenarios in island operation, to create a basis for comparison.</p> <p>The thesis consists of three parts. In the first part, that is theoretical, the fundamentals of the security of supply are studied, as well as the situation in Estonia in that regard and the future major plans for the energy system. In the second part Balmorel model with its inputs and outputs is described. After that, the method on how the model is used in the thesis, is shown, and also the descriptions of the scenarios are described. In the final main chapter the results of all the scenarios are brought forward and then compared to each other. Based on the results and comparisons the deductions are made on how well the scenarios performed and how to better ensure the security of supply.</p>	
<i>Keywords:</i> security of supply, island operation, model, Balmorel, energy system	

Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema: **Eesti varustuskindlus kriisiolukorras**

Lõputöö teema inglise keeles: **Estonian Security of Electrical Supply in
Emergency Situations**

Üliõpilane: **Robert Kuuba, 179599EAAB**

Eriala:

Lõputöö liik: **Bakalaureuse töö**

Lõputöö juhendaja: **Hardi Koduvere**

Lõputöö ülesande kehtivusaeg: **30.06.2021**

Lõputöö esitamise tähtaeg: **18.05.21 kell 15.00**

(digiallkiri)

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

Kaasjuhendaja (allkiri)

1. Teema põhjendus

Elektriline varustuskindlus on eluliselt tähtis tegur tagamaks seda, et elekter oleks pidevalt olemas. Seega on vaja uurida, kas varustuskindlus on tagatud inimestele ja ettevõtetele ka siis, kui elektrisüsteem talitleb raskendatud oludes.. Näiteks, kui tarbimine on suur, ühendused välisriikidega häiritud ning kui tootmisvõimsus on avariide tõttu vähenenud. Lisaks on oluline mõelda ka tulevikus energeetikas toimuvatele muudatustele. Viimastest aspektitest tulenevalt on oluline modelleerida juba praegu võimalike tuleviku stsenaariume, sh saartalitlust, et oleks olemas plaan hädaolukorras tegutsemiseks. Veelgi enam on taoline uurimus vajalik selleks, et energiasüsteemi projekteerimisel ja ehitamisel oleks võimalik astuda samme vähendamaks kriisiolukordade tõenäosust kui potentsiaalset mõju.

2. Töö eesmärk

Käesoleva töö eesmärk on teada saada, kui hästi võiks meie energiasüsteem tulevikus saartalitluses hakkama saada, pidades varustuskindlust silmas. Lisaks soovitakse vastata küsimusele, missugune võiks energiasüsteem tulevikus olla, et varustuskindlus oleks tagatud võimalikult hästi.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Milline on hinnang Eesti varustuskindlusele kirjanduse põhjal?

Kui palju on Eesti energiasüsteem võimeline tagama varustuskindlust tulevikus saartalitluse korral?

Milline energiasüsteem saartalitluse korral tagaks paremat varustuskindlust?

4. Lähteandmed

Püstitatud eesmärkide lahendamiseks on plaan kasutada juba Balmoreli mudelis eksisteerivaid lähteandmeid, lisades juurde koos juhendajaga teatud realistlikke sisendeid tuleviku jaoks.

5. Uurimismeetodid

Töö tulemusteni plaanin jõuda, kõige pealt analüüsides Eleringi aruannet varustuskindluse kohta Eestis ning teha kirjanduse põhjal kokkuvõtte üldisest varustuskindluse olukorrast eri tingimustel. Hiljem püüan anda ka kiirülevaate Balmoreli mudelist.

Seejärel kasutatakse elektrituru mudelit Balmorel, et testida Eesti elektrisüsteemi varustuskindlust nii ühendustega kui ka saartalitluses. Modelleeritakse kusjuures stsenaariume selliselt, et need võiks realistlikult tulevikus eksisteerida. Tulemusi

võrreldakse nii omavahel kui ka teoreetilise töö tulemustega. Olulisemateks töövahenditeks on elektriturumudel Balmorel ja tabelarvutustarkvara Excel.

6. Graafiline osa

Graafik teoreetilises osas kirjeldamaks Elutähtsa teenuse tagamist tulevikus.

Teoreetilises osas kaart näitamaks potentsiaalseid alasid meretuuleparkide jaoks.

Mudeli tulemuste esitamisel graafikud tootmisvõimsuste poolt toodetava energia illustreerimiseks nii ajas kui ka summaarselt.

Mudeli tulemuste esitamisel graafikud kajastamaks ajas tarbitavat kui ka stsenaariumi põhjal ära kaetavat tarbimist.

Graafikud illustreerimaks turupõhistes stsenaariumites elektrihindu.

Tulemuste võrdlemisel graafikud võrdlemaks erinevate stsenaariumite varustuskindlusi, saartalitlustega stsenaariumite kaetavat elektritarbimist ajalises vaates ning elektrihindade võrdlus turupõhistes stsenaariumites.

7. Töö struktuur

Loetelu töö peatükkidest koos alapeatükkide, punktide ja alapunktidega.

- Varustuskindlus
 - Varustuskindluse definitsioon
 - Varustuskindluse olukord Eestis
 - Varustuskindlust mõjutavad investeeringud
- Balmoreli mudel
 - Mudeli tööpõhimõtted
 - Tähtsamad sisendid ja väljundid
 - Mudeli kasutamise metodoloogia
- Modelleerimise tulemused
 - Tulemused
 - Järeldused

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Plaanin peamiselt kasutada aruandeid ja teadusartikleid. Mõned viited kirjandusele oleksid järgmised

[1] [2] [3] [4]

- [1] Elering, „Eesti elektri varustuskindluse aruanne 2019,“ Elering, Tallinn, 2019.
- [2] ENTSO-E, „Mid-term Adequacy Forecast Executive Summary,“ ENTSO-E, 2019.
- [3] A. Tampere, „Jaotusvõrgu varustuskindluse probleemid ja nende lahendamine,“ Taltech, Tallinn, 2016.
- [4] K. J. Chalvatzis ja A. Ioannidis, „Energy supply security in the EU: Benchmarking diversity and dependence of primary energy,“ *Applied Energy*, kd. 207, pp. 465-476, 2017.

9. Lõputöö konsultandid

Hetkel pole.

10. Töö etapid ja ajakava

1. Kirjanduse läbitöötamine – 15. veebruar
2. Teoreetiline osa esialgselt valmis -15. märts
3. Modelleerimine valmis – 1. Aprill
4. Metodoloogia ja mudeli kirjeldus valmis – 7. aprill
5. Mudeli tulemused kirjeldatud - 15. Aprill
6. Järeldused ja soovitusel valmis – 22. Aprill
7. Kokkuvõte ja sissejuhatus ning sellega ka kogu töö esimene versioon valmis, juhendajale läbilugemiseks saadetud – 1. Mai
8. Paranduste sisseviimine ja juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine – 10. Mai
9. Töö lõplik versioon valmis – 15. mai

Sisukord

Lõputöö lühikokkuvõte	5
Abstract	6
Lõputöö ülesanne	7
Eessõna	13
Sissejuhatus	14
1. VARUSTUSKINDLUS JA VARUSTUSKINDLUSE OLUKORD EESTIS 2020 SEISUGA	17
1.1 Varustuskindluse definitsioon	17
1.2 Varustuskindlus Eestis 2020 seisuga	18
1.3 Süsteemi töökindlus	19
1.4 Võrgupiisavus.....	20
1.5 Küberturvalisus	21
1.6 Süsteemipiisavus	21
1.7 Süsteemipiisavus kriisiolukorras ja saartalitluses	22
1.8 Eestisse plaanitavad varustuskindlust mõjutavad investeeringud	24
1.8.1 Taastuenergia investeeringud.....	24
1.8.2 Soojuselektrijaamad	25
1.8.3 Salvestustehnoloogiad	25
2 Balmoreli mudel	26
2.1 Mudeli tööpõhimõtted.....	26
2.2 Mudeli sisendid ja väljundid	27
2.3 Modelleerimise metoodika	28
3 Modelleerimise tulemused	31
3.1 Baasstsenaarium	31

3.2 Stsenaarium Taastuv.....	35
3.3 Stsenaarium PK_saar	38
3.4 Stsenaarium Taastuv_saar	42
3.5 Stsenaariumid Tuul_saar ja Salvestita_saar	44
3.6 Stsenaariumite võrdlus.....	48
3.7 Järeldused mudeli tulemustest	51
Kokkuvõte	53
Kasutatud kirjandus.....	55

Eessõna

Käesoleva lõputöö teema pakuti välja Taltech'i Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi nooremteaduri Hardi Koduvere poolt, kelle tehnilise juhendamise toel kasutas autor töös ka Balmoreli mudelit.

Soovin suurt tänu avaldada oma juhendaja Hardi Koduverele, kelle juhendamisel töö valmis.

Lõputöö on valminud Tallinnas.

Sissejuhatus

Üks kahtlemata olulisemaid, kui mitte kõige olulisim faktor, mida ühiskond oma energiasüsteemilt eeldab ja loodab, on kindel varustuskindlus. Teiste sõnadega väljendades, et meil oleks alati energiat võrgust võtta, sõltumata ajast või kogusest. Üldine ajalugu on selles osas olnud suure osas positiivne, sest reeglina on olnud meie ühiskond energiaga varustatud hästi. Ka kõige külmemate talvapäevade tipukoormuse ajal, on olnud süsteemis piisavalt energiat kõikide tarbijate vajaduste rahuldamiseks täiel määral, kui mitte arvestada väga harvu erandeid.

Sellest hoolimata on olnud ka aeg-ajalt erandlike olukordi, kus osadel tarbijatel energiat pole. Praktiliselt me kõik inimestena oleme taolisi situatsioone kogunud ja teame omast käest, kui palju keerulisemaks ja ebamugavamaks see elu muuta võib. Suured volukatkestused võivad lisaks igapäeva elu seiskumisele halvata olenevalt kestvusest majanduse ja pikemal kestvusel maksta elusid.

Just neil põhjustel on oluline teha energeetika sektoris ühelt poolt kõik nii varustuskindluse tagamiseks, ja teisalt ka uurida erinevaid võimalikke olukordi juba varem. Seda nii eesmärgiga astumaks samme kriisisituatsioonide ennetamiseks ja kui pingutustest hoolimata kriis ka tekib, oleks olemas valmidus ja plaan olukord lahendada võimalikult kiirelt ja minimaalsete mõjudega ühiskonnale.

Tavasituatsioonis nii praegu, ning eeldades, et tulevasel elektrisüsteemi ehitamisel ei tehta väga suuri valearvestusi, siis ka tulevikus, varustuskindluse tagamine väga suuri raskusi valmistada ei tohiks. Sellest hoolimata peame omama valmisolekut ja plaani tulevikuks, kui oleme silmitsi tõelise kriisiga. Kuigi kriise on erinevaid, siis ilmselt Eesti kontekstis üheks raskeimaks neist oleks olukord, kui me jääksime saartalitlusse. Reaalsuses võib taoline stsenaarium tunduda küllaltki ebatõenäoline. Samas lootmine sellele, et seda ei toimu, võib osutada ohtlikuks. Isegi kui tõenäosus üheaegseteks rikeks kõikides võrguühendustes teiste riikidega on küllaltki minimaalne, on endiselt olemas teisi põhjuseid, mis võiksid taolise olukorra luua, mida hetkel ennustada oleks äärmiselt keeruline. Siin võib näiteks tuua potentsiaalse globaalse kriisi või siis sõjaolukorra, mille tagajärjel on Eestil võimalik loota vaid kohalikult toodetud energiale.

Olevikku silmas pidades, on meil suhteliselt hea pilt kõikidest oma tootmisvõimekustest ja üldisest tarbimisest. Seetõttu ei ole väga raske omada plaani, kuidas varustuskindlust paremini tagada, juhul kui kriis, sh saartalitluse olukord, peaks meid tabama lähimas tulevikus. Paraku ei ole võimalik aga kindlalt ennustada, missugune näeb Eesti

energiasüsteem välja näiteks kümne aasta pärast või hiljem. Samas on meil endiselt vaja mõelda, kuidas täna tehtavad valikud võivad mõjutada energiasüsteemi ja selle varustuskindlust tulevikus. Sel põhjusel ongi vaja uurida ja modelleerida erinevaid tulevikus esinevaid võimalikke stsenaariume, nagu ka erinevaid kriisisituatsioone erinevate energiasüsteemide korral. See on eelduseks, et energiasüsteemi arengu planeerimisel tehtavad valikud oleks teadlikud ja seeläbi oleks meil tulevikus võimalikult suur valmidus raskes olukorras paremini hakkama saada.

Lähtudes viimasest vajadusest on selle töö eesmärgiks vastata järgmistele uurimusküsimustele:

- Milline on hinnang Eesti varustuskindlusele kirjanduse põhjal?
- Kui palju on Eesti energiasüsteem võimeline tagama varustuskindlust tulevikus saartalitluse korral?
- Milline energiasüsteem saartalitluse korral tagaks paremat varustuskindlust?

Esimesele küsimusele vastamiseks kasutatakse värskeimat varustuskindluse aruannet, et anda teoreetiline ülevaade hetkeolukorrast. Ülejäänud eesmärkide saavutamiseks modelleeritakse erinevaid võimalikke stsenaariume Eesti jaoks 2030. aasta kohta ja kasutatakse vastuste andmiseks saadud tulemustest tehtavaid järeldusi.

Modelleerimiseks saab kasutatud Balmoreli tarkvara ja GAMSi keskkonda. Balmoreli näol on tegu 2001. aastal loodud avalikult kätte saadava lähtekoodiga energia süsteemi optimeerimise mudeliga, millel on suur rõhk elektri sektoril [5]. Üheks Balmoreli valiku põhjuseks on see, et seda mudelit on laialdaselt Eestis kasutatud, sealjuures palju ka just TalTechis. Käesoleva töö juhendajal on olemas suur kogemus konkreetse mudeli kasutamisel, mille najale on võimalik nii modelleerimise protsessi käigus kui ka tulemuste tõlgendamisel toetuda.

Käesoleva lõputöö esimeses peatükis antakse ülevaade varustuskindluse olukorrast Eestis, alustades kõige pealt varustuskindluse defineerimisest. Seejärel kirjeldatakse ametliku allika põhjal olukorda varustuskindluses selle nelja põhielemendi alusel, pöörates suuremat tähelepanu neist süsteemipiisavusele, kuna käesoleva lõputöö rõhk tugineb just sellele. Lisaks saavad välja toodud ka peamised investeeringud ja plaanid, mis mõjutavad Eestis olevat energiatootmist tulevikus ja millele tuginetakse ka mudeli stsenaariumite loomisel.

Järgmisena kirjeldatakse lähemalt kasutatavat Balmoreli mudelit, loetledes üles ka mudeli tähtsamad sisendid ja väljundid. Seejärel kirjeldatakse, kuidas selles lõputöös

mudelit kavatsetakse kasutada ning milliseid stsenaariume uuritakse, tuues välja stsenaariumite olulisemad eeldused ning tingimused ja hiljem kirjeldades ka milliseid tulemusi vaadeldakse.

Kolmanda ning ühtlasi ka kõige mahukama ja olulise peatükiga kirjeldatakse ja näidatakse mudeli uurimisel saadavaid tulemusi ja seejärel tehakse tulemustest võrdlused. Saadud tulemuste ja suurel määral nendest tehtava võrdluse abil tehakse järeltõlge Eesti varustuskindluse tagamisest saartalitluses ja erinevates stsenaariumites.

1. VARUSTUSKINDLUS JA VARUSTUSKINDLUSE OLUKORD EESTIS 2020 SEISUGA

Käesoleva peatüki eesmärk on esiteks anda varustuskindluse definitsioon ja seejärel kiire ülevaade meetodikatest, mille alusel varustuskindlust hinnatakse.

Ülejäänud peatüki eesmärk on anda teatav ülevaade Eesti elektri varustuskindlusest, kui ka selles vallas tehtavatest tegevustest. Kuna käesoleva lõputöö juures on kõige kesksem osa varustuskindlusest seotud süsteemipiisavusega, käsitatakse seda varustuskindluse aspekti teoreetilises osas põhjalikumalt. Mainitud ülevaade pärineb Eleringi poolt välja antud Eesti Elektrisüsteemi Varustuskindluse Aruandel 2020.

1.1 Varustuskindluse definitsioon

Elektri- ja gaasituru aruandes, mille Konkurentsiamet 2021 on välja andnud, defineeriti elektri varustuskindlust kui situatsiooni, mil süsteemi vajadused on rahuldatud, mis tähendab, et süsteemi koormusvajadus kui ka reserve vajadus on täidetud süsteemi tootmise ja impordi võimekuse poolt ja seda lähtudes varustuskindluse normidest. [6]

Rahvusvaheline Energia Agentuur defineerib energilist varustuskindlust kui „katkematut ligipääsu energia allikatele taskukohase hinna eest“. Teiste sõnadega mitmeid varustuskindluse indikaatoreid on võimalik kasutada süsteemi vastupidavuse kontekstis. [7] Näiteks üks vastupidavuse raamistik töötati välja Future Resilient Systems programmi poolt 2017. aastal, mille järgi on võimalik süsteemi kindlust hinnata neljas erinevas dimensioonis:

1. Vastupidavus: esindab süsteemi võimet taluda häiringuid aktsepteeritavates vahemikes.
2. Taas-stabiliseerimine: illustreerib võimet piirata võimekuse vähenemist ja taastada võtme funktsionaalsusi.
3. Ülesehitatavus: kirjeldab süsteemi taastumise protsessi normaalsuse tagasi saamiseni.
4. Taas konfigureerimine: karakteriseerib muudatuste biofüüsilist arhitektuuri/topoloogiat muutmaks süsteemi rohkem veakindlamaks. [7]

1.2 Varustuskindlus Eestis 2020 seisuga

Teoreetilise varustuskindluse hindamise aluseks Eestis on Eleringi poolt välja antud Eesti Varustuskindluse Aruanne 2020. Nimetatud aruannet annab Elering kusjuures välja igal aastal ja tegemist on ühtlasi ka kõige põhjalikuma avalikkult kättesaadava aruandega, mis Eestis olevat varustuskindlusega seotud olukorda kirjeldab. Tegemist on paljuski ka tulevikuvaatava aruandega, ehk lisaks olemasoleva olukorra hindamisele, antakse ka olemasoleva parima teadmise põhjal hinnang väga tihti varustuskindluse olukorrale kuni aastani 2030. [8]

Üldiselt on nii Eestis kui ka Baltikumis aruande analüüsi kohaselt elektrisüsteemi varustuskindlus tagatud. Samas nenditakse, et kiirelt muutuva keskkonna tõttu on vaja pidevalt edasi tegeleda elektrisüsteemi kui energiaturgude järjepideva edasiarendusega, et varustuskindlus oleks tagatud ka tulevikus. [8]

Aruandes tuuakse välja hinnangut kolmele suuremale tegevusele ja mõjutegurile, mis varustuskindlust hetkel mõjuvatavad, tuues välja nii varustuskindlust suurendavad kui vähendavad mõjud. Esiteks toimub Eesti elektrivõrgu sünkroniseerimine Kesk-Euroopa sünkroonalaga, samal ajal ühendades riigi võrgu lahti Venemaaga seotud sünkroonalast, mis vähendab riski süsteemi varustuskindluse ohustamisele kolmandalt osapoolelt. Negatiivses mõttes aga väheneb sünkroonühenduste hulk, mis suurendab saarestumise riski. Teiseks oluliseks mõjuteguriks varustuskindlusele on kliimapoliitika. Ühest küljest lisatakse süsteemi uusi võimsusi (nt tuulepargid) ning energia salvestuse võimalused turul hakkavad muutuma konkurentsivõimeliseks. Teisalt aga viiakse turult välja ette planeeritava tootmistsükliga süsinikuintensiivseid tootmisvõimsusi, millel on paindlik reguleerimisulatus. Viimase olulise tegevusena, mis varustuskindlust mõjutab, tuuakse välja majanduse konkurentsivõime toetamist. Varustuskindlust suurendab seejuures see, et efektiivsema ja õhem võrk koos oma paindliku juhtimise ja liitumisvõimalusega aitavad saavutada pikemas perspektiivis väiksemaid võrgutasusid ja annab liitudes võrguga konkurentsieelise. Lisaks mõjub positiivselt lisanduvate turuvõimaluste (reservide) toomine turule. Teisest küljest võib Eestis paiknevate tootmisvõimsuste garanteerimine teha Eestis olemale tarbijale elektri hinna kõrgemaks ja vähendada kaugemas vaates uute tootmisvõimsuste lisandumist. [8]

Eleringi Varustuskindluse aruandes hinnatakse varustuskindlust võttes arvesse kogu väärtusahelat, milleks on süsteemipiisavus, süsteemi töökindlus, võrgu piisavus ning küberturvalisus [8]. Järgnevalt saab esitatud kiirülevaade varustuskindlusest lähtuvalt iga teguri kohta.

1.3 Süsteemi töökindlus

Toimunud arengute tulemusel Venemaa ühendenergiastüsteemis on tänaseks ilmsiks tulnud süsteemne riski, mille kõige raskemaks tagajärjeks võib osutuda Baltimaade eraldumine süsteemist eraldi sünkroonallasse. Et taolist ohtu vähendada ja kindlustada elektrisüsteemi stabiilsust ja töökindlust, on realiseerimisel projekt Baltimaade liitmiseks Mandri-Euroopa sagedusalaga. [8] Projekti käigus tehakse järgmist:

1. Ehitatakse üles Baltikumi sünkroonala võimekus – Kuigi Baltikumi ootamatu saarestumisega on valmidus toime tulla juba praegu, tuleb süsteemi stabiilsuse säilitamiseks raskemate avariide korral hakkata laialdaselt lühiajalist tarbijate piiramist. Eesmärgiks on tulevaste tegevustega saavutada võimekus sünkroontöökas N-1 olukordades tarbijaid piiramata. Vastavad tegevused on järgnevad [8]:
 - Piisava inertsi tagamine – kindlustab süsteemi stabiilsuse püsimist avariidekorral ja kõrgema kvaliteediga sageduse tavaolukorras. Selleks on vaja tagada Baltimaade süsteemis pidevalt 17 100 MWs jagu inertsi. Lisaks plaanitakse Baltimaadesse paigaldada 9 sünkroonkompensaatorit, et tagada töökindlust avariidest tekkinud sageduse kõrvalekallete korral.
 - Töötatakse välja süsteemiteenuste raamistikku
 - Kaasajastatakse nii olemasolevaid ning rakendatakse täiendavaid juhtimissüsteeme, et saada vastavusse Mandri-Euroopa sagedusalade nõuetega
 - Luuakse kiired avariireservid läbi olemasolevate ühenduste Põhjamaadega kui ka uute rajatavate Leedu-Poola merekaablitega [8]
2. Praegu elluviidav sünkroniseerimine Mandri-Euroopaga ei piira ülekandevõimsusi Baltimaade sees, Baltimaade ja Põhjamaade vahel ega ülejäänud Euroopa võrkude suunas, et turuosaliste kauplemisvõimalused EL siseselt ei kehveneks. [8]
3. Tulenevalt Euroopa kaasrahastusest Mandri-Euroopaga, võrreldes käesoleva situatsiooniga, mil oleme ühendatud Vene energiaühendsüsteemiga, ülekandetariif kõrgemaks ei lähe. [8]

Vastavalt kogemustele kui piisavuse analüüsidele on Eesti elektrisüsteemi piisavus heal tasemel nii praegu kui ka aastal 2030. Tagatud on ka kõrged varustuskindlusenormid. Oluline on, et Eestis oleks süsteemi opereerimiseks 1000 MW kindlat võimsust, mis täna on olemas ja seega on Eestis ka kõrge varustuskindluse tase. [8]

1.4 Võrgupiisavus

Ülekandevõrkudes on tänane situatsioon hea [8]:

- Programmi raames „Liinid puuvabaks“ on süsteemselt hooldatud liinitrasse, mille tõttu on suurel määral langenud puude liinile kukkumised või langetused, mis on varasemalt pikka aega olnud tõsisemaid energia andmata jäämise põhjuseid.
- Ülekandevõrgu tõrgete tõttu jäi 2019. aastal andmata 216.4 MWh (võrdluseks keskmine ühe majapidamise aastane tarbimine u 10 MWh). Kuigi 2019. aasta andmata energia oli viimaste aastate suurimaid, siis ülekandevõrgu ülekandekindlus on aruande järgi endiselt kõrge.
- Merekaablite Estlink 1 ja Estlink 2 kasutatavus on väga kõrge.
- Vajadus siseriiklike piirangute järele ülekandevõrgu koormuste juhtimisel on olnud sisuliselt olematu. [8]

Kindlustamiseks pikaajalist töökindlust ja vähendamaks ülekandevõrgu mittetoimisest andmata jäävat elektrit, on plaan ellu viia mitmeid tegevusi kui ka arendusi. Nende hulgas on nt [8]:

- Eesti ja Läti vahele kolmanda ühenduse loomine
- Olemasolevate Läti-suunaliste ühenduste rekonstrueerimine
- Uute vahendite rajamine piisava reaktiivvõimsuse ja inertsi tagamiseks
- Seisundi- kui ka riskipõhise seadmete hoolduse ja asendamise süsteemi rajamine
- 2020 sügisel valmis uus pika perspektiiviga arenguplaan, vähendamaks muutuvkulusid, kindlustamaks varustuskindluse kasvu ning leidmaks optimaalseid võimalusi investeerimiseks

- Uutel liitujatel võimalik liituda võrguga paindlikel tingimustel, optimeerides seeläbi kulusid ja kasutades paremini võrguresurssi [8]

1.5 Küberturvalisus

Aastal 2019 ülekandevõrkudes küberturbeintsidente, mille tõttu oleks jäänud tarbijatele elektrit andmata, ei toiminud. Küberturbe süsteemse korralduse tagamiseks, on Eleringil kolm tegevussuunda [8]:

- Küberturbe juhtimine ja haldus
- Operatiivse küberturbe tagamine
- Teadlikkuse ja valmisoleku tõstmine [8]

Viimastel aastatel on küberturbe muutunud Euroopa Liidu jaoks tähtsaks teemaks. Sellega seoses on Euroopa Komisjon loomas raamistikku elektrisektori küberturvalisusele ühtse baastaseme seadmiseks. [8]

1.6 Süsteemi piisavus

Elering vaatleb süsteemi piisavust kui olukorda, kus eeldatav elektritarbimine kaetakse kohalike tootmisvõimsuste, impordivõimaluste ning tarbimise juhtimise võimalustega [8].

Elektrisüsteemi piisavusel tagamisel on olulised kolm järgnevat etappi [8]:

1. Vastavalt sotsiaalmajanduslikule tasakaalule rakendatakse normi, mille vastu varustuskindlust hinnatakse;
2. Elektrisüsteemi piisavuse hindamine pikaajaliselt;
3. Juhtumil, mil elektrisüsteemi pikaajalise hinnangu järgi on süsteemi piisavuse indikaatorid paremad, kui näeb ettesüsteemi varustuskindluse norm, on süsteemi piisavus tagatud. Samas kui hinnang näitab, et tuleviku olukord on kehvem normis lubatust, siis tuleb vastavalt juhiste Euroopa Komisjonilt eemaldada turutõrked ning juhul kui muu ei aita, siis võimsusmehhanismi rakendada. [8]

Eleringi kasutab varustuskindlust kontrollivaid simulatsioone, mille tulemustele teostatakse ka kvaliteedikontrolli. Tehtud analüüside põhjal on võimalik järeldada, et Eesti elektrisüsteemi piisavus on igati rahuldav, ja seda suure tõenäosusega vähemalt veel kümne järgneva aasta jooksul. [8]

Tuleb rõhutada, et Elering analüüsidest elektrisüsteemi piisavust, ei lähtu vaid eeldusest, et elektriturg toimib alati oma regulaarsel viisil. Hinnatakse ning tehakse analüüse ka olukordade kohta, mis on küll väikese tõenäosusega, kuid selle eest väga suure efektiga, hinnates nii riskiastet ja luues plaane, tulemaks nende olukordade mõjudega toime. Üks neist võimalikest olukordadest on nt Baltikumi võimalik saarestumine. Taolistest erakorralistest stsenaariumitest tuleb välja tõsine vajadus Eestis paikneva kindla võimsuse järgi. Viimasteks liigitatakse just võimsusi, seda nii juhtivava tarbimise kui tootmise osas, mille peale saab kindel olla ka kõrgete tarbimisperiodide ajal. [8]

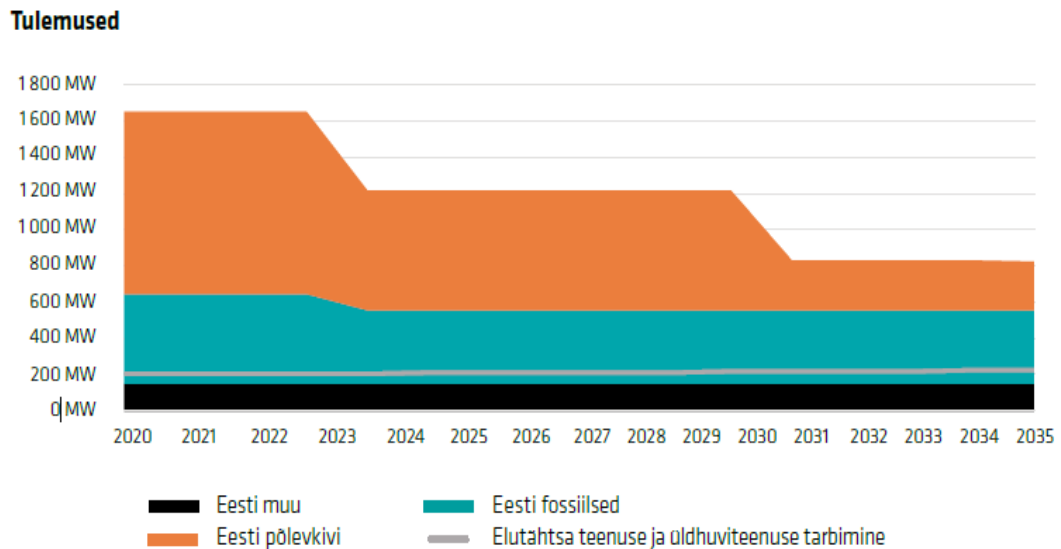
1.7 Süsteempiisavus kriisiolukorras ja saartaliluses

Käesoleva lõputöö eesmärk on uurida Eesti varustuskindluse olukorda modelleerituna siis, kui riiki peaks tagama kriis. Teiste sõnadega on rõhk olukorral, kui riigil on võimalik energeetiliselt loota vaid enda elektritootmis võimsustele ja igasugused välisühendused kõikide teiste riikidega on ära lõigatud. Kuigi lõputöö eesmärk on suunatud tulevikku, ehk vaadelda varustuskindlust siis, kui põlevkivist energia tootmine on kas lõppenud või suuresti piiratud ja riiklik tarbimine on suurenenud, on ülevaate saamiseks oluline uurida ka tänast olukorda. Sellest tulenevalt, vaatleme vastavalt 2020. aasta Eleringi varustuskindluse aruandele olukorda, mil Eesti on täielikult saartaliluses.

Varustuskindluse analüüsis nimetatakse taolist olukorda kui Eesti elutähtsa teenuse stsenaariumiks, mille eeldused on järgnevad [8]:

- Erakordsetel asjaoludel on Eesti jäänud saartalilusse.
- Elektriühendused teiste riikidega puuduvad.
- Elektrisüsteem peab olema suuteline teatud piiramata ajaperioodi jooksul toimima.
- Elutähtsa teenuse kui ka üldhuviteenuse tarbimine peab olema elektrisüsteem võimeline pidevalt katma.

- Elutähtsa teenuse kui ka üldhuviteenuse tarbimine maksimaalselt ei tohiks ületada hinnanguliselt 200 MW. Samas on tähtis aru saada, et tegemist on hinnanguga, ning Elering koos seotud osapooltega on viimas läbi tegevusi, et seda hinnangut täpsustada. Hetkel peab Elering antud hinnangut tegelikust suuremaks ning elektrisüsteemi piisavuse seisukohalt konservatiivseks. [8]



Joonis 1.1 Eesti elutähtsa teenuse stsenaarium [8]

Eleringi tulemuste järgi peaks olema elutähtsa teenuse ja üldhuviteenuse elektritarbimine võimalik katta olemasolevate tootmisvõimsustega. Samas nenditakse, et käesoleva stsenaariumi kriitilisteks väljakutseks oleks taolise elektrisüsteemi stabiilsus ning ka tarbimise ning tootmise bilansis hoidmine. [8]

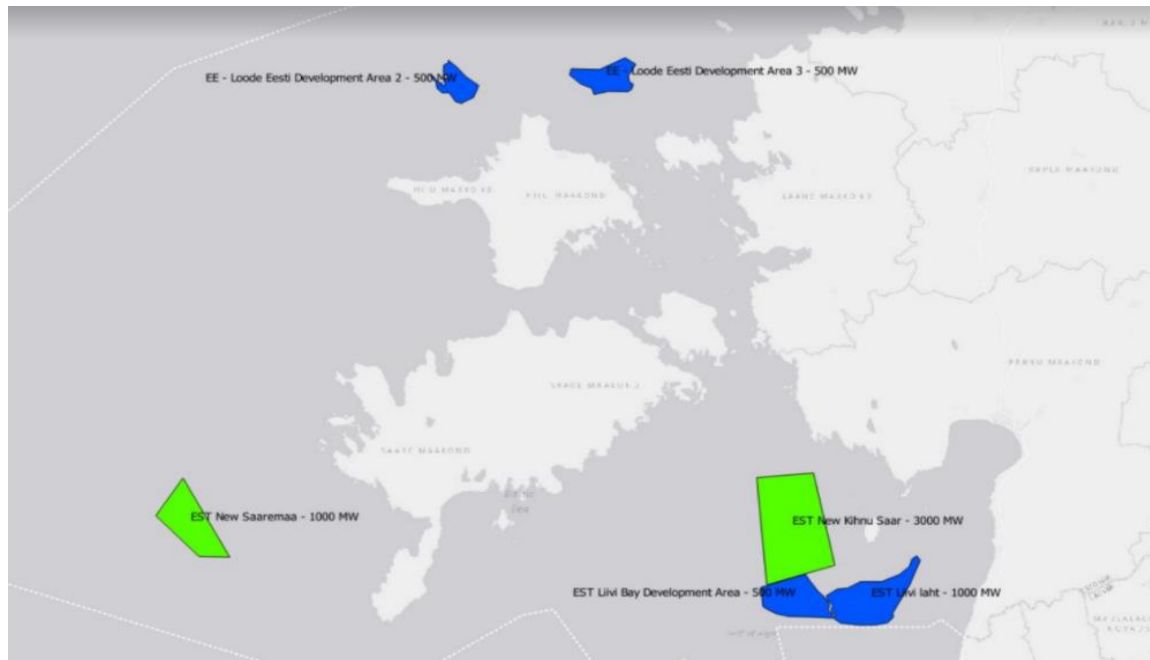
Viimase puhul on siiski jutt elutähtsa teenuse tagamisest. Kui rääkida aga üldisest süsteemi piisavusest, seda ka võimalikus kriisiolukorras, kus oleks täielikult või siis vähemalt suures enamuses kõikide tarbijate vajadused kaetud, oleks oluline omada Eestis igal ajahetkel ligikaudu 1000 MW kasutatavat tootmisvõimsust, millest enamik peaks olema juhitav. [8] See on väärtus, mida on varustuskindluse aruandes rõhutatud mitmetes kohtades süsteemipiisavuse seisukohast. Ka käesoleva lõputöö mudeliga tehtud uuringutes kasutatakse seda väärtust olulise indikaatorina, iseloomustaks kui piisav oleks Eesti varustuskindlus kindlates stsenaariumites tulevikus.

1.8 Eestisse plaanitavad varustuskindlust mõjutavad investeeringud

Tulevate aastate jooksul plaanitakse Eestisse mitmeid suhteliselt suuri investeeringuid, millega kompenseeritakse põlevkivist toodetava elektrienergia vähenemise mõju ja millel on ka mõju varustuskindlusele. Neist investeeringutest osade mõju üritatakse ka simuleerida käesoleva lõputöö raames kasutatava Balmoreli mudelis.

1.8.1 Taastuenergia investeeringud

Esimeseks plaanitavaks suureks lootuseks Eestis tuleviku energia tootmisel on potentsiaalsed meretuulepargid. Läänemere potentsiaalsete tuuleressursside kasutama võtmise kohta on Euroopa Komisjon koostanud ka suure raporti, milles on ära toodud ka potentsiaalsed kohad Eesti jaoks, kus oleks võimalik suuremahuliselt vetes elektrit toota. Kokku toodi välja kuus erinevat ala, kus oleks potentsiaalselt võimalik ehitada kokku tuulikuid koguvõimsusega 6500 MW. [9] Meretuuleparkide plaane on Eesti jaoks välja käidud mitmeid. 2020. aasta mais ilmus uudis Utilitase plaanist rajada Läänemerre koguni kuus võimast tuuleparki, neli Liivi lahte ja kaks Saaremaa läänerannikule, millest iga plaanitavaks maksimaalseks koguvõimsuseks oleks 1200 MW. Seega plaanide täielikul realiseerimisel loodaks merele 7200 MW potentsiaalset tootmisvõimsust. [10] Teistest plaanidest saab välja tuua nt Eesti Energia plaani luua Liivi lahte tuulepark võimsusega 1000 MW. Lisaks on ettevõttel Tuuletraal OÜ plaan rajada 380 MW võimsusega tuulepark Saaremaa, Kihnu ning Pärnu maakonna mandriosa lähedusse, kaaludes ühenduse loomist ka Lätiga. [11]



Joonis 1.2 Meretuuleparkideks sobiliku potentsiaaliga alad Eesti vetes [9]

1.8.2 Soojuselektrijaamad

Väga oluline arendus, mida veab hetkel ettevõtte Fermi energia, näeks ette Eestisse tuumaelektrijaama rajamist. Idee on rajada Eestisse väike kui uudne ja innovatiivne moodulreaktor võimsusega 300 MW. Eri stsenaariumites kaalutakse ka reaktori kombineerimist energiasalvestiga. Plaanide järgi võiks projekt realiseeruda lõplikult ajavahemikus 2030-2040 aastal. [12]

1.8.3 Salvestustehnoloogiad

Salvestustehnoloogiatest esimeseks kirjeldatavaks oluliseks investeeringuks on plaanide järgi 2028. aastaks valmiv pump-hüdro energiasalvesti. Nimelt plaanitakse Tallinna lähedale Paldiskisse luua energiasalvesti, mis annaks energiaturul juurde paindlikkust. Energiasalvesti suudab oma kolme Francis-tüüpi pump-turbiiniga välja anda korraka võimsust 506 MWh ja laadida end võimsusega 509 MW. Ühe tsükli kogu mahtuvus on 6 GWh. [13]

Nimetatud planeeritav pumphüdroelektrijaam pole kusjuures ainuke planeeritav taoline energiasalvesti. Nimelt Eesti Energia plaanib rajada samuti pump-hüdroelektrijaama, planeerides seda Estonia kaevanduse alale. Kusjuures plaanitakse ära kasutada Estonia kaevanduse vanu käike ning põlevkivi väärimisel tekkivat lubjakivi. Kuni 50 MW võimsusega jaama on plaanis ehitama hakata aastal 2023, mis ajaks loodetakse lõpetava projekteerimisega seotud vajalikud uuringud. [14]

2 Balmoreli mudel

2.1 Mudeli tööpõhimõtted

Balmorel on alt-üles osalise tasakaaluga energiasüsteemi optimeerimise mudel, mille fookus on elektrienergia ja kaugküttesoojuse sektoritel. Balmoreli esimene versioon tuli välja aastal 2001. Alates esmasest versioonist on nii teadusasutuste kui ka nõustamiskeskuste mitme riigi suure koostöö tulemusena mudelit edasi arendatud vastavalt areneva energiasektori vajadustele ja nõudmistele. Balmoreli lähtekood on avalikult kättesaadav. Ka selle sisendandmed ning andmete manipulatsioonid on koodis selgelt kättesaadavad. [5]

Balmoreli mudelit kasutatakse üheaegselt elektri ja soojuse genereerimise, ülekande ja tarbimise optimeerimiseks, eeldades täielikult konkurentsivõimelisi turge. Mudeli matemaatiline ülesehitus põhineb lineaarsetel seostel. Mudel võimaldab ka sega-tüüpi täisarvudega modelleerimist, et simuleerida mastaabiefektist tulenevat säästu teatud investeeringute puhul ning elektrijaamade operatiivpiiranguid. [5]

Mudel on andmepõhine ja omab suurt painduvust ajalistes ja ruumilistes valikutes. Aega saab defineerida kronoloogiliselt kolme kihina, samas kui aja põhiühik ei ole eeldefineeritud mudeli struktuuris. Mis puutub ruumi, siis Balmorel on jagatud kolme hierarhilisse geograafilisse üksusesse. Üksikasjalikkuse tase nii ajalises kui ruumilises mõõtmes on valitav kasutaja poolt. [5]

Ressursside turuhinnad ning lõplik energia nõudlus on Balmorelis välised parameetrid. Teatud ressursside kättesaadavust võib väliselt piirata, juhul kui süsteemil puudub või on piiratud ligipääs regioonisisestele müügiturgudele. [5]

Baasmudel hõlmab energiaallikate muundamist soojuseks kui elektriks, salvestamist, ülekannet ja ka seotud kulusid ning kadusid, mis on seotud energia laiali kandmisega. [5]

Pakkumise pool koosneb mitmetest tootmistehnoloogiatest, mille kavandatav võimsus, kasutuselevõtt ning kasutamise lõpetamine on defineeritud väliselt. Uued mahu investeeringud ja isetekkelised kasutuse lõpetamised on leitavad optimeerimise tulemusel. Neil tehnoloogiatel on määratud kütuse tüübid, kütuse efektiivsus, investeerimise kui opereerimise ja hooldamise kulud, elektri ja soojuse tootmise vaheline suhe (koostootmisüksustel), eeldatav tehniline eluiga, kui ka keskkonna

karakteristikud iga tehnoloogia jaoks, nagu nt SO₂, NO_x või CH₄ emissioonid. Muutuvatel taastuvenergia tehnoloogiatel (sh tuul, päikeseelekter, päikese poolt toodetud soojus, jõe poolt aetav või reservuaarist tulev hüdroelekter) omavad väliselt tulevaid tootmis- ning sissevooluprofiile igas ajasegmendis ning geograafilise üksuse kohta, seda piiramise võimalusega. [5]

Baltimorelis eristatakse kahte tüüpi energiasalvestust: lühiajalist elektri ja soojuse salvestust ning pikaajalist elektri, soojuse kui hüdro-reservuaaride salvestusmahtu. Kõik salvestid on piiratud salvestuse dünaamika poolt. [5]

Elektri müük Baltimorelis võib aset leida erinevate regioonide vahel, sõltudes edastusliinide mahtuvusest, hõlmates eksisteerivaid, plaanitavaid ja väliseid investeeringuid ning nende saadavust. Elektrimüüki kolmandate regioonidega, mida ei ole eraldi modelleeritud, võib defineerida andes mudelisse väliseid võimsusvooge ajasegmendi kohta või läbi hindade ja elektri edastuse piirangute, kus täpne müüdava elektri kogus igas ajasegmendis kolmanda regiooniga määratakse väliselt. [5]

Energia tasakaalu piirangud tagavad, et energia toodang võrduks energia tarbimisega igas ajasegmendis kui ka geograafilises üksuses. Tasakaalu tingimus annab energiaallikate hinnad kõigis geograafilistes üksustes ja aja segmentides. Optimaalne lahend leitakse mööda seotud topeltmuutujaid, või varihindu. [5]

Mudelit on võimalik käivitada eri režiimides, sõltuvalt soovitatavast optimeerimise ettenägelikkuse astmest ja sellest, kas väliseid investeeringuid arvestatakse või mitte. [5]

2.2 Mudeli sisendid ja väljundid

Et paremini mõista edaspidiselt kirjeldatud mudeleid ja nende tulemusi, oleks kohane loetleda Baltimoreli mudeli olulisemad sisendid ja väljundid. Esiteks saavad välja toodud mudeli tähtsamad sisendid, mis on järgnevad [12]:

- Elektrienergia ja soojuse tootmise võimsused;
- Ülekandevõimsused;
- Kütuste hinnad, heitmete hinnad, maksud;

- Elektrienergia ja kaugküttesoojuse tarbimised;
- Kasutatavad (uued) tehnoloogiad ja nende hinnad.

Mudeli olulisemad väljundid on järgnevad [12]:

- Elektrienergia ja soojuse tootmine elektrijaamade kaupa;
- Kütuste kasutus;
- Elektrituru hinnad;
- Elektrienergia vood;
- Heitmed;
- Investeeringud uutesse tootmisvõimsustesse ja ülekandevõimsustesse;
- Eelnevatest arvutatavad majandusnäitajad.

Käesolevas lõputöös on mainitud sisenditest kõige olulisemad elektrienergia tootmise võimsused, ülekande võimsused (täpsemalt nende ära jätmine), ja elektrienergia tarbimised. Olulisemateks väljunditeks on elektrienergia tootmine, seda ühtlasi ajas, kuid ka allikate põhjal, teataval määral ka elektrituru hinnad ning turupõhistes stsenaariumites ka elektrienergia vood.

2.3 Modelleerimise metoodika

Esiteks on oluline selgitada, mudeli uurimise eesmärki. Nimelt mudelis modelleeritakse energiasüsteemi terve aasta kohta. Töö eesmärk aga ei ole uurida olukorda, kus Eesti elektrisüsteem on saartalitusel terve aasta vältel, vaid saada ühe aasta modelleerimisel ülevaade üldisemast elektrienergiaga varustamise võimest.

Nagu varasemalt mainitud, kasutatakse käesoleva lõputöö koostamisel Balmoreli mudelit. Modelleeritavaks vaatluse all olevaks aastaks on 2030. Üks kõige olulisemaid kohti just antud töös sisendandmete valikul on tootmisvõimsuste reguleerimine. Olulisimaks sisse viidavaks muutuseks aasta 2030 mudelis, võrreldes nt praeguse olukorraga, on Narva põlevkivil töötavate energiablokkide oluline vähendamine. Täpsemalt jäetakse 2030. aasta baasstsenaariumis töösse vaid kolm plokki. Töösse jäävad plokiid on Auvere plokk võimsusega 274 MW, Narva 11. plokk võimsusega 192

MW ja Narva kaheksas plokk võimsusega 194 MW. Esimeses ja kolmandas alternatiivstsenaariumis võetakse kõik põlevkivil töötavad energiablokid välja.

Esimeses ja kolmandas alternatiivstsenaariumis lisatakse mudelisse suurem meretuulepark võimsusega 1000 MW ning lisatakse ka energiasalvestina toimiv praegu plaanimisjärgus olev Paldiski pumphüdroelektrijaam, mis on võimeline andma välja võimsust umbes 500 MW tühjaks laadumise ajal ja on võimeline hoidma reservis kuni 6000 MWh.

Selleks, et mudel töötaks korrektselt ka siis, kui süsteemis tegelikkuses kogu tarbimist katvat elektri energiat pole, on olemas ka nõu näiv elektritootmise allikas, mis mudeli jaoks küll katab tarbimise ära, aga reaalsuses kajastab oma töötamise ajal süsteemis puudu olevat elektrit. Vastav tootmisvõimsus on võimeline andma võimsust kuni 2000 MW, ehk mis peaks olema suuteline Eesti tarbimisvajadused ära katma igal ajamomendil isegi siis, kui ükski teine tootmisvõimsus ega välisühendus ei töötaks.

Baasstsenaariumis ning ka esimeses alternatiivstsenaariumis on Eestil Läti ja Soomega ühendused olemas. Vahetusvõimsus Soomega on 1016 MW ja Lätiga 879 MW. Esimeses stsenaariumis on kaasatud välisühendustest tulenevalt ka teised riigid. Teises ja kolmandas alternatiivstsenaariumis selleks, et modelleerida saartalitlust, on kõik ülejäänud riigid mudelis väljalülitatud.

Käesolevas töös esitatakse kõige pealt tulemused baasstsenaariumist. Nagu varasemalt mainitud, siis baasstsenaariumis on endiselt olemas Eestil välisühendused Soome ja Lätiga. Põlevkivist elektrienergia tootmist vähendatakse oluliselt võrreldes varasemate aastatega, samas kolm plokki jäävad endiselt töösse. Baasstsenaariumis ei ole modelleeritud meretuuleparki ja Paldiski pumphüdroelektrijaama (edaspidi viidatakse sellele ka lühidalt kui salvestile). Samas teised tootmisvõimsused, kui ka ülejäänud tähtsamad parameetrid jäävad samaks.

Kui baasstsenaariumi tulemused on kirjeldatud, liigutakse edasi järgmiste stsenaariumite juurde. Esimene neist käsitleb olukorda, kus põlevkivist elektrit ei toodeta ning on olemas uued investeeringud 1000 MW meretuulepargi ja 6 GWh salvesti näol pole realiseerunud. Teine stsenaarium käsitleb olukorda saartalitluses, kus toodetakse energiat põlevkivist ja puuduvad varasemalt mainitud investeeringud. Viimases alternatiivstsenaariumis uuritakse saartalitlust, kus põlevkivist elektrit ei toodeta ning on realiseeritud investeeringud.

Lisaks mainitud stsenaariumitele uuritakse veel kahe lisastsenaariumi abil tuulepargi suuruse ning salvesti olemasolu mõju saartalitluse stsenaariumile, kus põlevkivist energiat ei toodeta. Neist esimeses muudetakse meretuulepargi koguvõimsus 1000 MW asemel 2000 MW-ks. Teises kaotatakse pumphüdroelektrijaam (salvesti). Nende stsenaariumite tulemusi uuritakse vähem detailselt, asetades peamine rõhuasetus sellele, kuidas muutub süsteemis puudu oleva energia hulk.

Stsenaariumite tulemuste kirjeldamisel saavad mudeli tulemustest tähelepanu tootmisvõimsuste poolt toodetav energia aastas summaarselt ning toodetava võimsuse muutumine ajas. Turupõhiste stsenaariumite korral uuritakse elektrihinna muutumist ajas ning ka Eestist sisse ja välja liikuvaid energiavooge. Lisaks vaadatakse ka elektri tarbimist ajas ja summaarselt ning ka seda kui palju on saartalitlusega seotud stsenaariumites energiat puudu sellest, et täielikult ära katta kogu tarbimist.

Kõikide erinevate stsenaariumite tootmisvõimsusi, ühendusi välisriikidega ning salvestusvõimekust iseloomustab järgmine tabel. Tabelis on toodud esmalt stsenaariumite koodnimed, mida kasutatakse selguse mõttes töös ka edaspidi, ning koodnimele on juurde kirjutatud üksikasjalikum kirjeldus, et oleks arusaadav, millisele stsenaariumile koodnimi viitab.

Tabel 2.1 Stsenaariumite tootmisvõimsuste tabel

	Soojus elektrij aamad (GW)	Tuul (GW)	Päike (GW)	Salvestus (GWh)	Ühendu sed välisriiki dega
Baas – põlevkiviga investeringuteta turupõhine stsenaarium	1,052	0,329	0,647		On
Taastuv – põlevkivita investeringutega turupõhine stsenaarium	0,392	1,329	0,647	6	On
PK_saar – põlevkiviga investeringuteta saartalitluse stsenaarium	1,052	0,329	0,647		Ei ole
Taastuv_saar – põlevkivita investeringutega saartalitluse stsenaarium	0,392	1,329	0,647	6	Ei ole
Tuul_saar – põlevkivita investeringutega saartalitluse stsenaarium, kuhu on võrreldes varasemaga lisatud 1 GW tuult	0,392	2,329	0,647	6	Ei ole
Salvestita_saar – põlevkivita investeringutega saartalitluse stsenaarium, kust on eemaldatud energiasalvesti	0,392	1,329	0,647		Ei ole

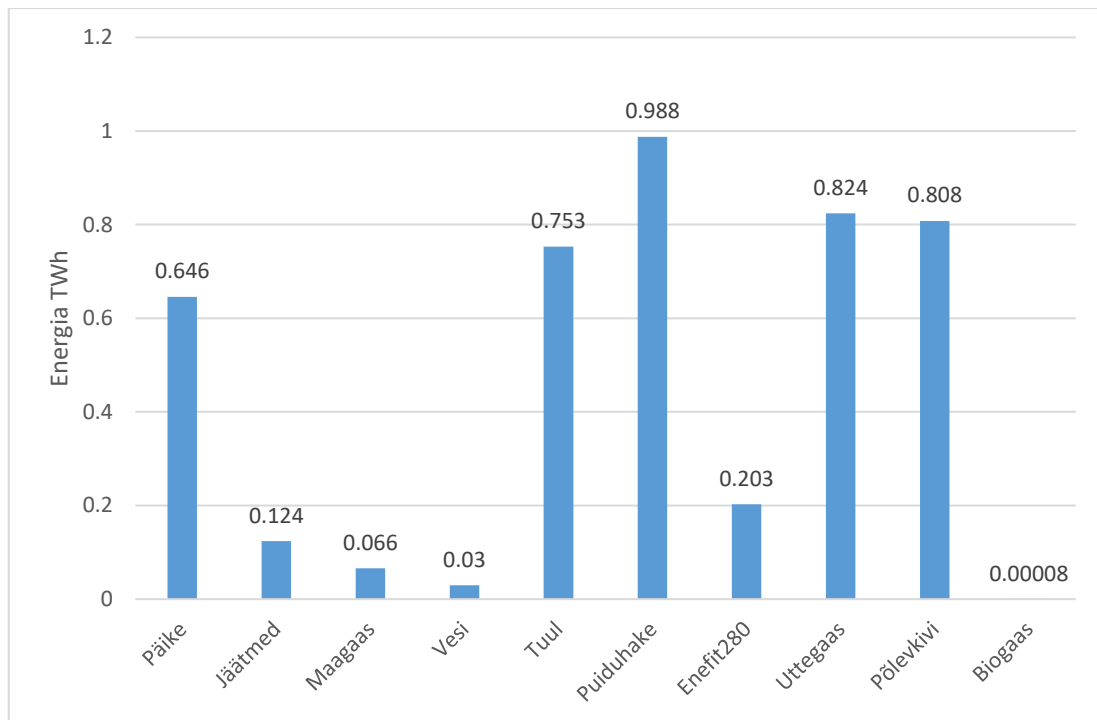
3 Modelleerimise tulemused

3.1 Baasstsenaarium

Esimeseks oluliseks baasstsenaariumi tulemuste osaks käesoleva lõputöö kontekstis on tootmisvõimsuste poolt toodetav energia. Oluline on välja tuua, et Eestis toodetav energia aastas kokku on u 4,42 TWh. Kui samal ajal arvestada, et sama mudeli järgi on aastal 2030 kogu aastane tarbimine ligikaudu 9,36 TWh, võib teha järelduse, et neil tingimustel toodetakse Eestis vajaminevast energiast mõnevõrra vähem kui pool, täpsemalt 47,2%, ja ülejäänud vajaminev elektrienergia sisuliselt imporditakse, eelkõige Soomest. Tuleb muidugi arvestada, et teatav osa toodetud energiast ka eksporditakse, seega on imporditava energia osakaal reaalsuses suurem. Täpsematest arvudest, mis seonduvad energia ekspordi ja impordiga, tuleb veel juttu ka edaspidi. Kahtlemata on vaja arvestada ka asjaolu, et kuigi mudeli järgi toodetakse vaid u 4,42 TWh energiat, siis tegelikkuses peaks olema võimalik oma tarbimisest ära katta mõnevõrra suurem osa ning elektrit toodetakse vähem, sest paljudel juhtudel on majanduslikult mõistlikum energiat sisse osta, kui seda ise toota.

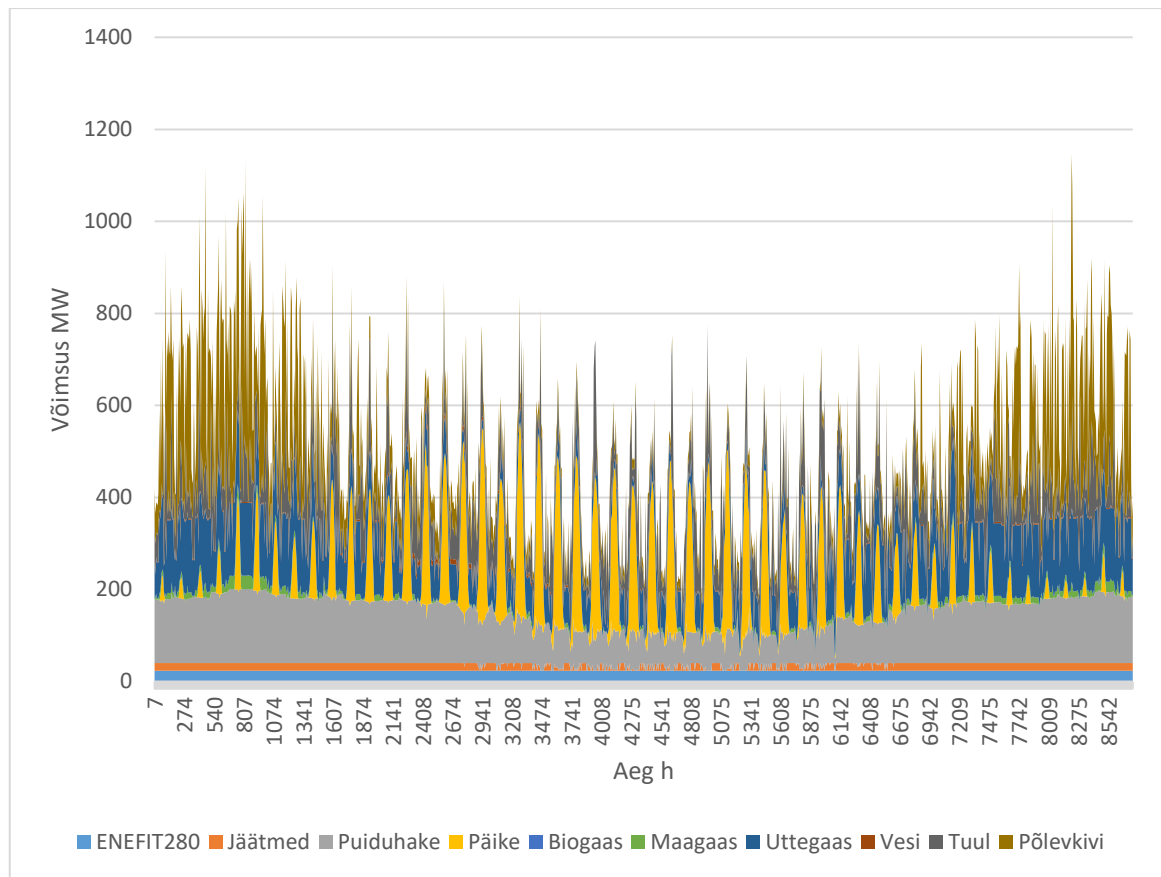
Tabel 3.1 Mudeli järgi Eestis 2030 toodetav elektrienergia stsenaariumis Baas

Energiaallikas	Toodang GWh
Päike	646
Jäätmed	124
Maagaas	66
Vesi	30
Tuul	753
Puiduhake	988
Enefit280	203
Uttegaas	824
Põlevkivi	808
Biogaas	0,08
	4 442



Joonis 2.1 Aastas toodetav summaarne energia allika alusel graafikuna stsenaariumis Baas

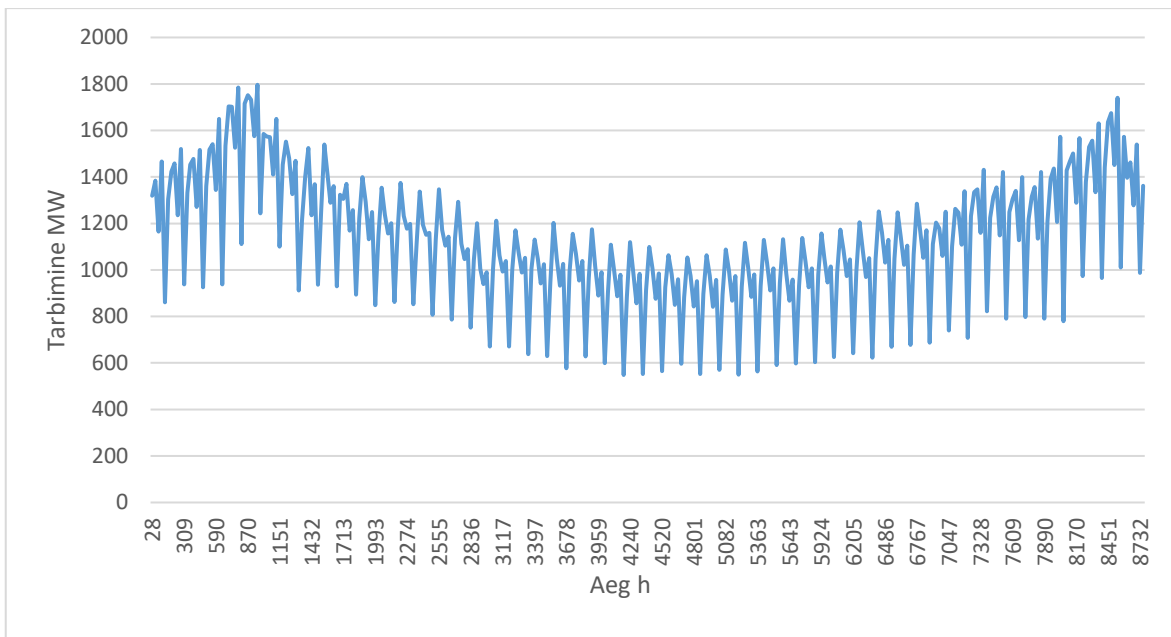
Tulemuste järgi oleksid olulisemad energiaallikad puiduhake, millest toodetaks natuke alla 1 TWh ehk pisut alla neljandiku kogu riigis toodetud energia, millele järgnevas tihedalt põlevkivist, uttegaasist ja tuulest toodetud energia. Kõigist kolmest viimasest allikast toodetav aastane elektrienergia jääb 0,7 ja 0,8 TWh vahele. Olulisel kohal on veel päikesest toodetav energia, u 0,65 TWh energiat. Ülejäänud energiaallikatest nagu nt jäätmetest, gaasist ja veest toodetav energia on suhteliselt väike ja eriti suurt tähtsust ei oma.



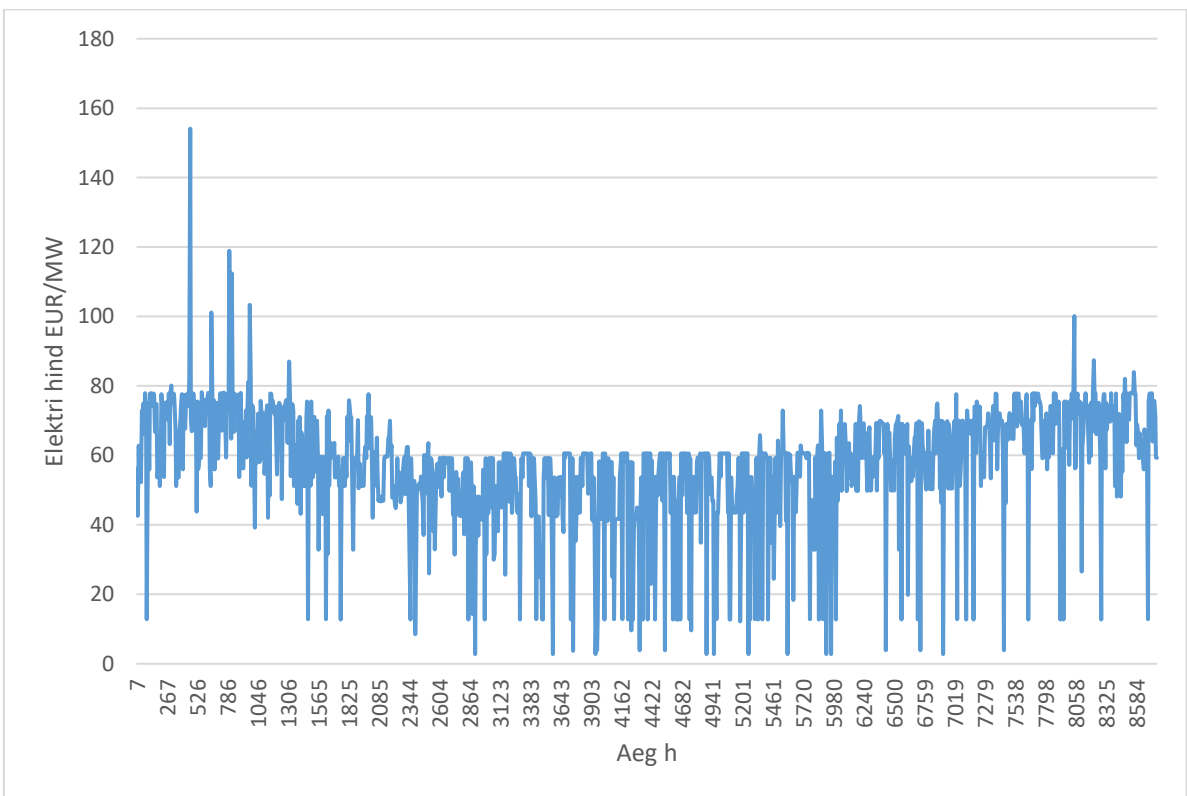
Joonis 3.2 2030 Eestis toodetava energia graafik ajas stsenaariumis Baas

Järgnevalt tuuakse välja ka Eestis aastaselt toodetav energia ajas. Ootuspäraselt toodetakse energiat rohkem talvisel hooajal, ületades kohati üle 1000 MW. Keskmine toodetud energia jääb umbes 500 MW lähedale. Graafikult on võimalik tuvastada, et talvisel perioodil on tuule osakaal toodetavast energiast suurem ning suvel mõnevõrra väiksem. Selgelt tuleb ka esile, et kui talvisel hooajal päikesest toodetav energia on suhteliselt marginaalne, mängib see väga tähtsat rolli just suvisemal perioodil. Suhteliselt stabiilne on aastaselt puiduhakkest toodetav energia. Keskmiselt toodetakse igal ajahetkel energiat võimsusega 508 MW.

Järgmisel graafikul on ka ära toodud elektri tarbimine ja selle muutumine ajas. Tarbimise tipp mudeli järgi talvel on umbes 1800 MW ja suveöödel langeb ligikaudu 550 MW-ni. Keskmine tarbimine püsib umbes 1000 MW lähedal, samas talvisel ajal on see mõnevõrra kõrgem. Kusjuures mudeli järgselt on elektri tarbimine kõigil stsenaariumitel sama. Saartalitluses küll ei peegelda see mitte reaalselt tarbimist vaid kogu tarbimise vajadust.



Joonis 3.3 Aastane energia tarbimine ja selle muutumine ajas



Joonis 3.4 Elektri hinna muutumine ajas stsenaariumis Baas

Lõputöö seisukohalt omab teatavat tähtsust ka hinna suuruse uurimine eri stsenaariumites ning ajas. Mudeli tulemuste järgi valdava osa ajast pole elektri hinna

kõikumine väga suurtes piirides, olles talvisel ajal üldiselt 50-80 EUR/MWh ja suvisel hooajal kõikudes umbes 10 ja 60 EUR/MWh vahel. Võib nentida, et suvel kõiguvad hinnad mõnevõrra rohkem, olles vahest ka 0 euro lähedal. Samas talvisel ajal esineb hinnas kohati järske hüppeid, mil hind küündib üle 120 EUR/MWh ümbruses. Keskmiselt kogu modelleeritava perioodi vältel jääb hind 57 EUR/MWh.

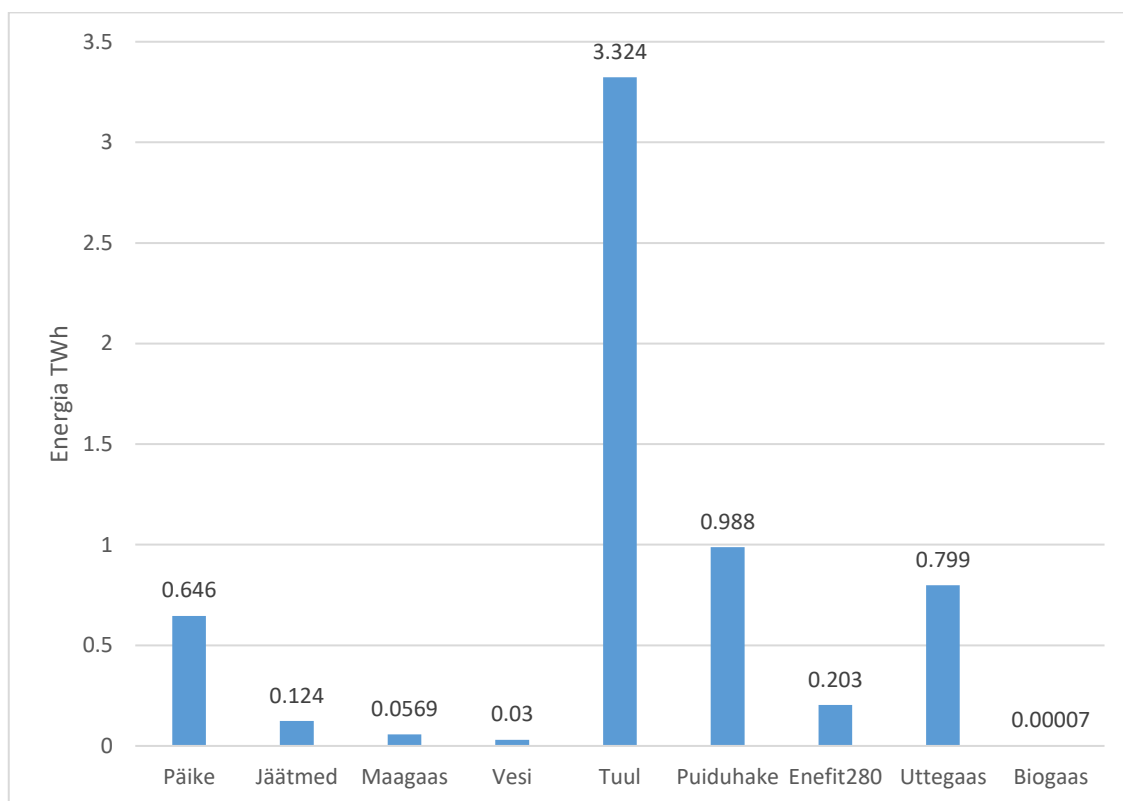
Viimasena saavad ära toodud ka välisühendustest tulenev energiavahetus. Nimelt mudeli järgi imporditaks Soomest umbes 7,78 TWh energiat, ning vastu eksporditakse kõigest 0,09 TWh energiat. Lätist imporditakse umbes 0,35 TWh energiat, samas eksporditakse umbes 2,63 TWh. Seega imporditakse kokku umbes 8,13 TWh ja imporditakse 2,54 TWh, seega üldkokkuvõttes on kogusaldoks import Eestisse 5,41 TWh, mis on selgelt enam kui koha peal toodetav energia.

3.2 Stsenaarium Taastuv

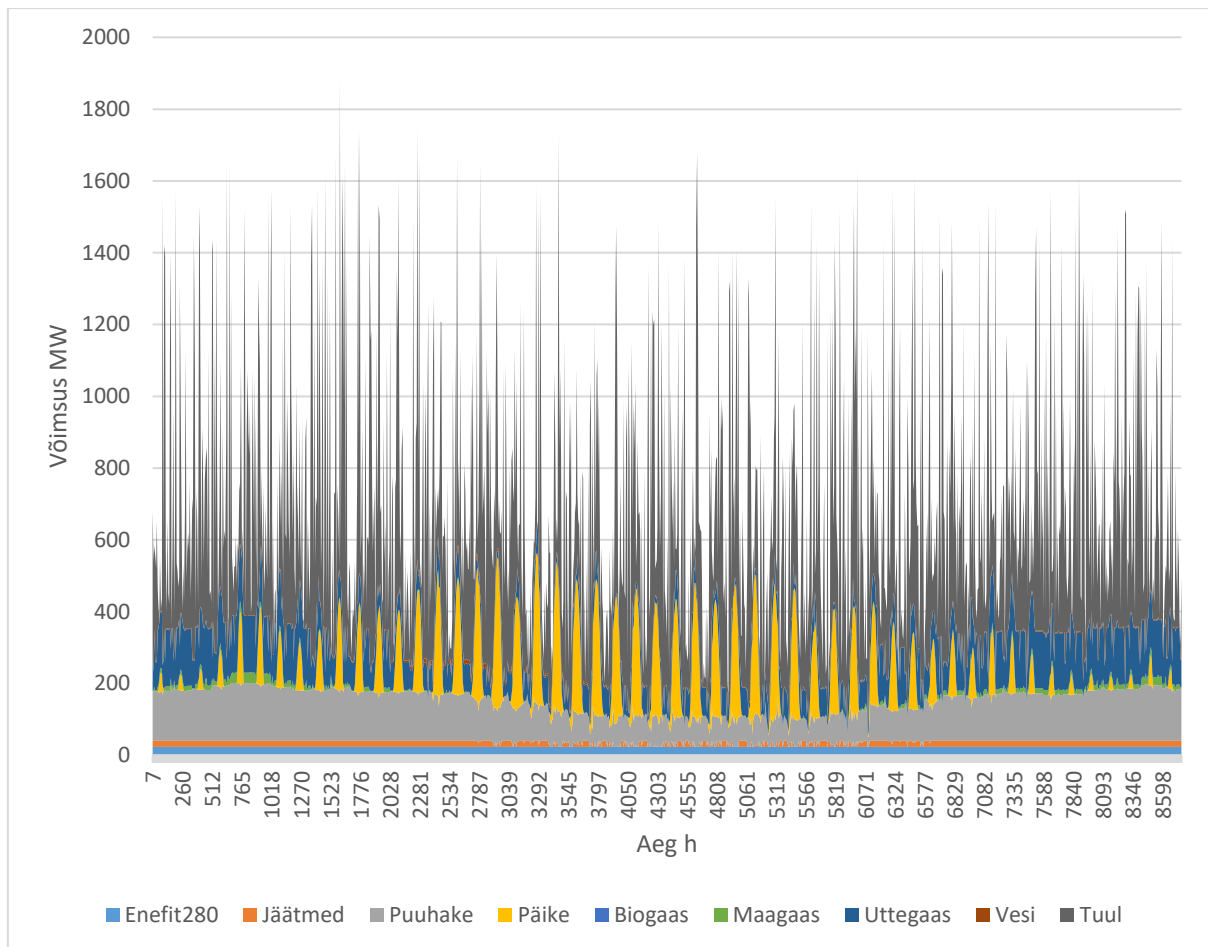
Kõige pealt saavad ka esimese alternatiivstsenaariumi ehk stsenaariumi Taastuv kohta välja toodud kohalike tootmisvõimsuste poolt toodetud energia. Käesoleva stsenaariumi korral toodetak Eestis koha 6,17 TWh energiat. Ka siinses stsenaariumis jääb Eesti aastane tarbimine 9,36 TWh juurde, seega toodetak sisuliselt Eestis vajaminevast energiast natuke vähem kui kaks kolmandikku. Kohalikult vajatavast energiast toodetakse seega 65,9%. Kuna ka selles stsenaariumis on lubatud välisühendused Soome ja Lätiga, tuleb arvestada nii energia ekspordi kui impordiga. Energia ekspordist ja impordist tuleb täpsemalt juttu selle stsenaariumi kohta hiljem.

Tabel 1.2 Stsenaariumi Taastuv mudeli järgi energiaallikate poolt toodetav energia

Energiaallikas	Toodang GWh
Päike	646
Jäätmed	124
Maagaas	57
Vesi	30
Tuul	3 324
Puiduhake	988
Enefit280	203
Uttegaas	799
Biogaas	0,07
	6 171



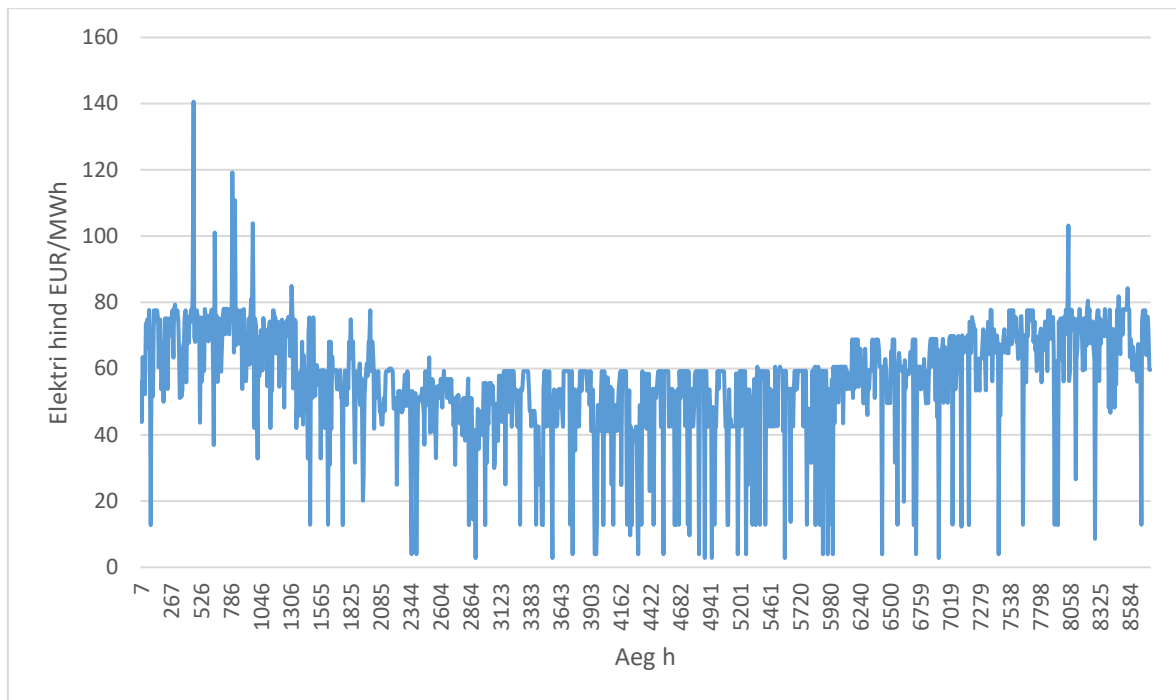
Joonis 3.5 Mudeli järgi energiaallikate poolt toodetud energia stsenaariumis Taastuv Mudeli alusel muutub ilmselt eelkõige 1000 MW võimsusega meretuulepargi lisamise tõttu kõige olulisemaks energiaallikaks tuul. Tuule abil toodetakse 3,32 TWh energiat, mis on rohkem kui pool kogu toodetavast energiast. Tuulele järgneb puiduhakkest toodetav energia, mis on umbes 0,99 TWh, millele järgnevad omakorda uttegaas, 0,799 ja päikeseenergia, 0,646 TWh. Ülejäänud energiaallikate osakaal kogu toodetavast energiast on suhteliselt vähetähtis. Eraldi tuleb rääkida energiasalvesti poolt genereeritavast energiast. Paldiski pumphüdroelektrijaam(salvesti), mis otseselt uut energiat ei tooda, annab peale salvestamisi võrku tagasi 1,366 TWh.



Joonis 3.6 Tootmisvõimsuste toodangud ajas stsenaariumis Taastuv

Sõltuvalt suures osas hetkel genereeritavast tuuleenergiast varieerub toodetav elektrienergia suuresti, ületades kohati 1600 MW, kuid üldiselt ei lange alla 400 MW. Nagu eelnevast juba selgus, siis tuulest toodetav energia, olles küll vägagi kõikuva iseloomuga, on mudelist saadava info põhjal selgelt domineeriv. Ka päikesest toodetav energia on kõikuva iseloomuga, olles samal ajal ka hooajaline. Puiduhake osakaal kogutoodangust on samas konstantsema iseloomuga, kuigi suvisel hooajal väiksem. Keskmiselt toodetakse mudeli põhjal igal ajahetkel elektrit võimsusega 704 MW.

Järgmine graafik iseloomustab stsenaariumi põhjal toimuvat elektri energia tarbimist ajas. Kuna elektrienergia tarbimine on mudeli põhjal identne võrreldes baasstsenaariumiga, siis hetkel puudub põhjus sel pikemalt peatuda.



Joonis 3.7 Elektri hinna muutumine ajas stsenaariumis Taastuv

Käesoleva stsenaariumi põhjal ilmneb stsenaarium Baasile suuresti sarnane elektri hinna kõikumine. Talvisel hooajal kõigub hind suuresti 50 ja 80 EUR/MWh kohta. Suvisel hooajal on elektri hinna kõikumist rohkem, kõikudes peamiselt 10 ja 60 EUR/MWh vahel. Stsenaariumi Taastuv kohaselt jääb keskmiseks elektri hinnaks umbes 56 EUR/MWh kohta.

Lõpetuseks tulemused mudeli järgi energia ekspordist ja impordist. Mudeli järgi imporditakse Soomest Eestisse 7,699 TWh energiat ja tagasi eksporditakse 0,119 TWh. Samas Lätist imporditakse 0,433 TWh ja eksporditakse 4,179 TWh. Teiste sõnadega summaarselt imporditakse Eestisse 3,833 TWh rohkem kui välja eksporditakse, mis moodustab kogu tarbimisest natuke üle kolmandiku.

3.3 Stsenaarium PK_saar

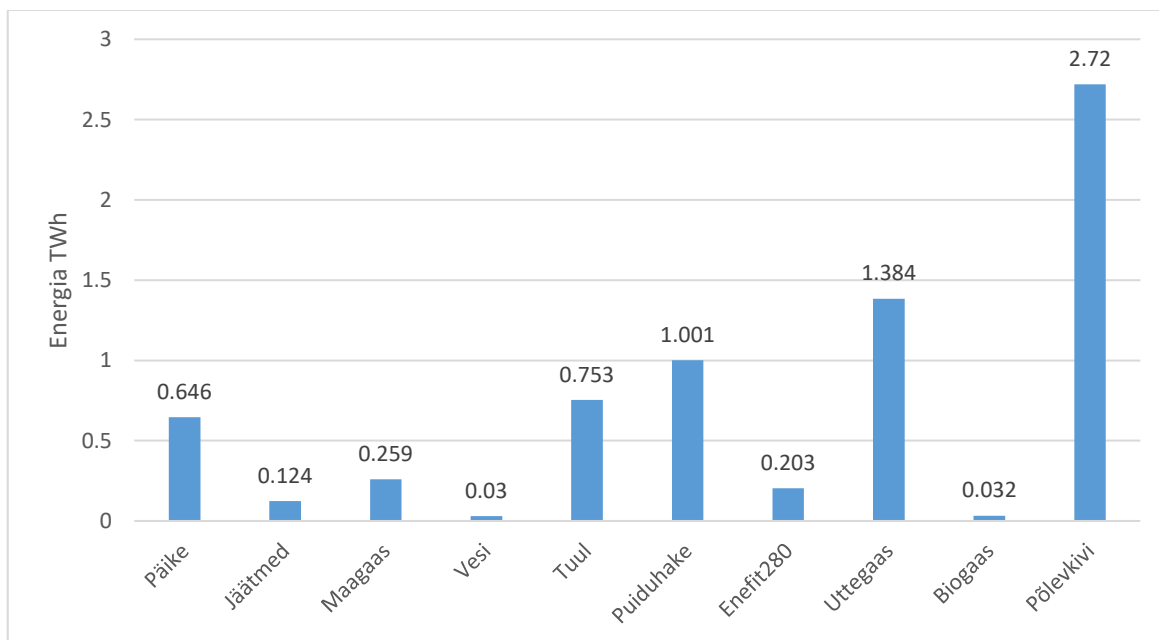
Esimesena saavad taas välja toodud mudeli tulemustest tootmisvõimsuste poolt toodetud energiakogused. Kokku toodetakse 7,152 TWh elektrienergiat. Kusjuures kogu tarbimine on ka selles stsenaariumis 9,36 TWh. Mudelist selgub ka, et kogu toodetud energiat ei ole võimalik tarbida, mis on ilmselt seotud olukorraga, kus taastuvenergia tõttu toodetava energia hulk ületab parasjagu tarbimist. Mudelist järeldub, et 2,701 TWh jagu energiat jääb puudu sellest, et kogu tarbimine ära katta. See tähendab, et realselt õnnestub tootmisvõimsustel tarbitavat elektrit toota 6,659 TWh ning toodetud

energiast läheb raisku 0,493 TWh. Seega taolises saartalitluses suudavad tootmisvõimsused kogutarbimisest katta 71,1%.

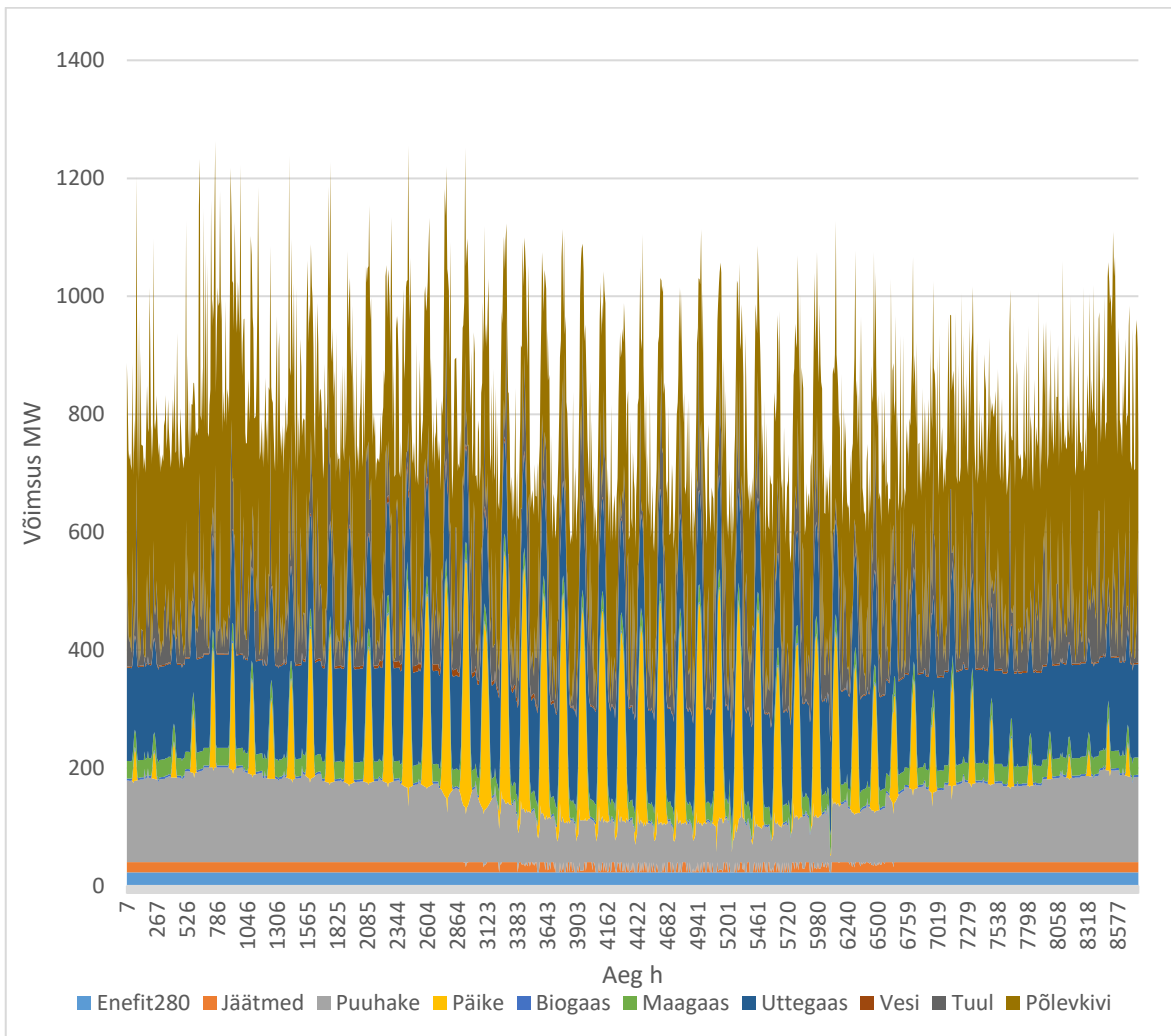
Ootuspäraselt on käesoleva stsenaariumi tootmisvõimsustest olulisim põlevkivi, millest toodetakse 2,720 TWh. Sellele järgnevad uttegaas ja puiduhake, millest toodetakse vastavalt 1,384 TWh ja 1,001 TWh. Märkimisväärne kogus energiast toodetakse veel ka taastuvatest allikatest ehk tuule ja päikese abil, vastavalt 0,753 TWh ja 0,646 TWh. Ülejäänud allikatest toodetavad energiakogused on suhteliselt väikesed.

Tabel 3.3 Tootmisvõimsuste poolt toodetav energia PK_saar stsenaariumil.

Energiaallikas	Toodang GWh
Päike	646
Jäätmed	124
Maagaas	259
Vesi	30
Tuul	753
Puiduhake	1 001
Enefit280	203
Uttegaas	1 384
Biogaas	32
Põlevkivi	2 720
Kokku	7 151
Andmata energia	2 716

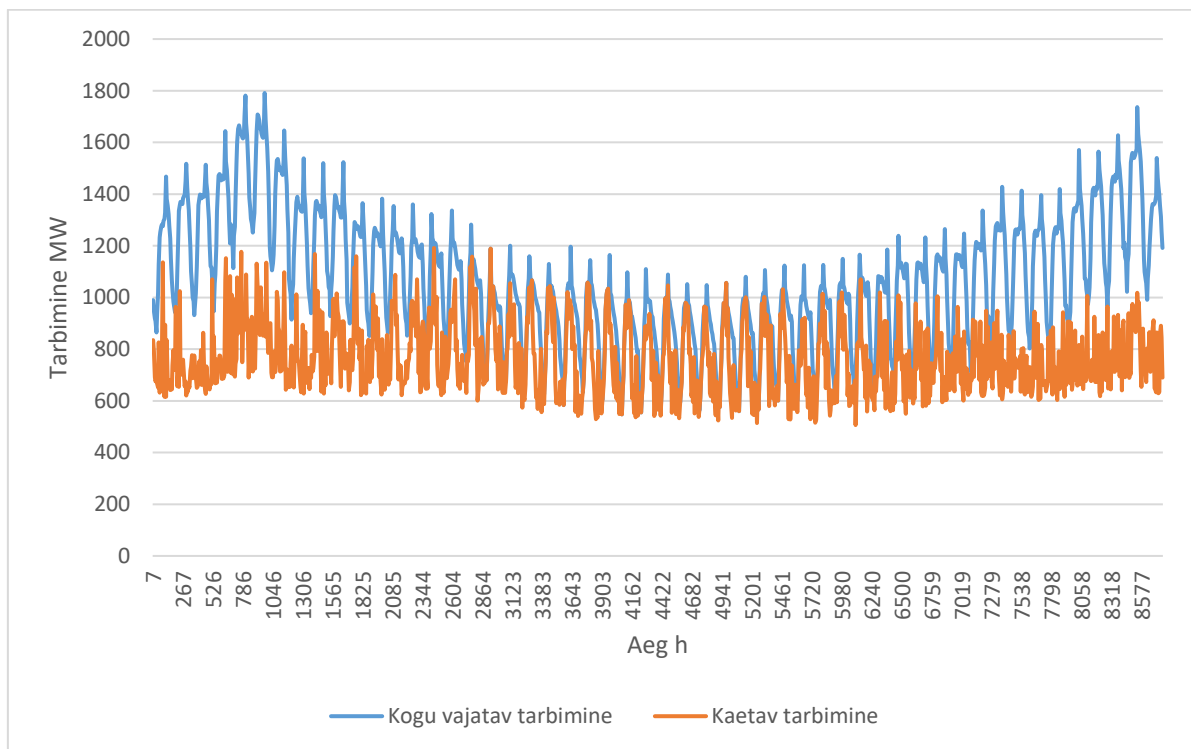


Joonis 3.8 Aastas tootmisvõimsuste poolt toodetav energia stsenaariumil PK_saar



Joonis 3.9 Tootmisvõimsuste poolt väljaantava võimsuse muutumine ajas stsenaariumis PK_saar

Keskmiselt suudavad tootmisvõimsused toota 816 MW. Üldine tootmisvõimsus kusjuures aasta jooksul püsib võrdlemisi sarnasena. Tootmisvõimsuste poolt välja antava võimsuse graafikult on näha, et tähtsaim energiaallikas on põlevkivi, mille poolt välja antav võimsus on ajas suhteliselt stabiilne, ehkki suvisel hooajal mõnevõrra väiksem kui talvisel hooajal. Puiduhakke ning uttegaasi puhul on ka võimalik täheldada suhteliselt ühtlast toodangut, mis talvisel hooajal on suurem ja suvisel hooajal on väiksem. Päikeseenergia puhul on näha selgelt osakaalu suurenemist suvisemal ajal. Tuule poolt genereeritav energia on aastaringi suhteliselt ebaühtlane.



Joonis 3.10 Mudelijärgne kogu tarbimine ja tarbimine, mis on tootmisvõimsustega kaetud stsenaariumis PK_saar

Veel saab saartalitluse puhul välja toodud graafik, mis kajastab mudeli põhjal nii täielikku tarbimist, mis süsteemis toimuma peaks ning tarbimist ajas, mille tootmisvõimsused on realselt võimalised ära katma. Kõige üldisem tulemus, mida on võimalik graafiku najal teha on see, et suvisel ajal on oluliselt lihtsam katta vajalikku tarbimist võrreldes talvise ajaga. Üldiselt jääb kaetav osa tarbimisest 600 ja 1000 MW vahele. Kui keskmiselt võrgus kokku vajatav võimsus on 1068 MW siis keskmine tootmisvõimsuste poolt tarbimisele kättesaadav võimsus on 760 MW.

Käesoleva stsenaariumi PK_saar puhul on objektiivselt raske hinda analüüsida. Kõige olulisem põhjus seisneb selles, et mudeli tingimustele vastavalt on näiva tootmisallika poolt toodetava elektri hind (tegemist on tootmisvõimsusega, mis kajastab realsuses võrgus puudu olevat energiat) 3000 EUR/MWh. Kuna aga valdaval osal ajast on võrgus rohkem või vähem energiat puudu, siis seetõttu on mudeli järgi ka väga suurel osal ajast võrgus energia hind 3000 EUR/MWh. Erandiks on suvine hooaeg, kus esineb omajagu ka aega, kus elektri hind kõigub umbes 500 EUR/MWh juures. Kuna ka saartalitluse olukorras nii kõrge hind on suhteliselt ebatõenäoline, siis käesoleva uurimuse raames saartalitlusega seotud stsenaariumites elektri hinda põhjalikumalt ei käsitleta.

3.4 Stsenaarium Taastuv_saar

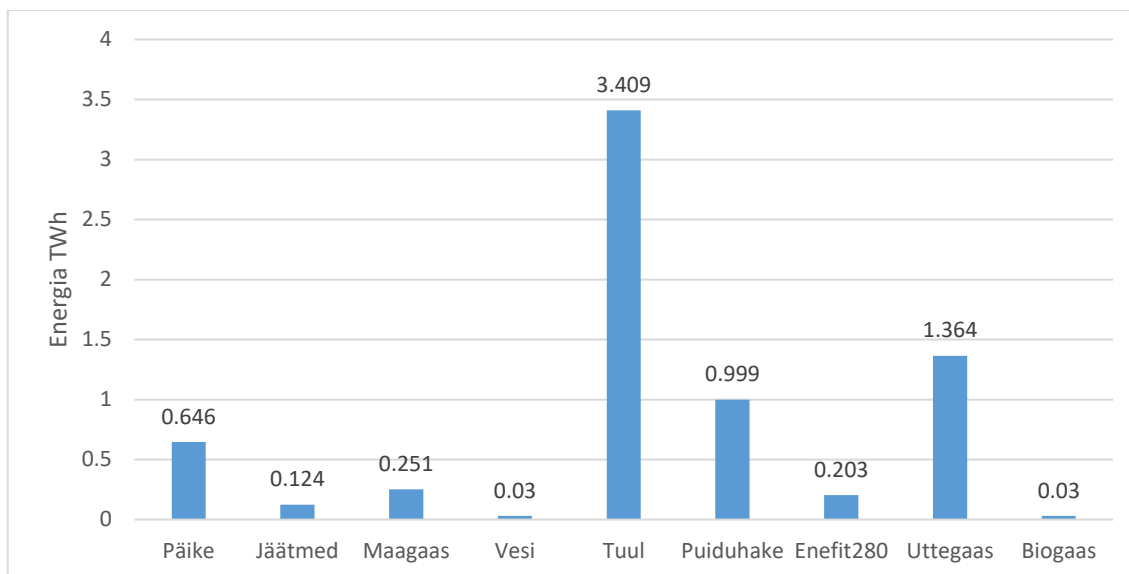
Esmalt saavad ka käesoleva stsenaariumi puhul ära toodud tootmisvõimsuste poolt toodetud energia. Nagu kõigis eelnevates stsenaariumites, on ka siin kogu tarbimine 9,36 TWh. Ka siinses stsenaariumis puuduvad välisühendused ja tuleb esile nõ näiv tootmisvõimsus, mis mudeli jaoks energiat toodab, kuid tegelikkuses näitab võrgus puudu olevat energiat.

Mudeli tulemustest selgub, et kokku on 2,867 TWh energiat, mille puhul käesolev energiasüsteem tarbimist katta ei suuda. Pumphüdroelektrijaama salvestist käib läbi kokku 0,425 TWh. Kokkuvõttes õnnestub vajatavast tarbimisest katta 69,4%. Kui arvestada, et kokku toodetakse aastas 7,054 TWh, kuid ära õnnestub tarbida 6,493 TWh, siis kokkuvõttes läheb raisku umbes 0,561 TWh toodetud energiat.

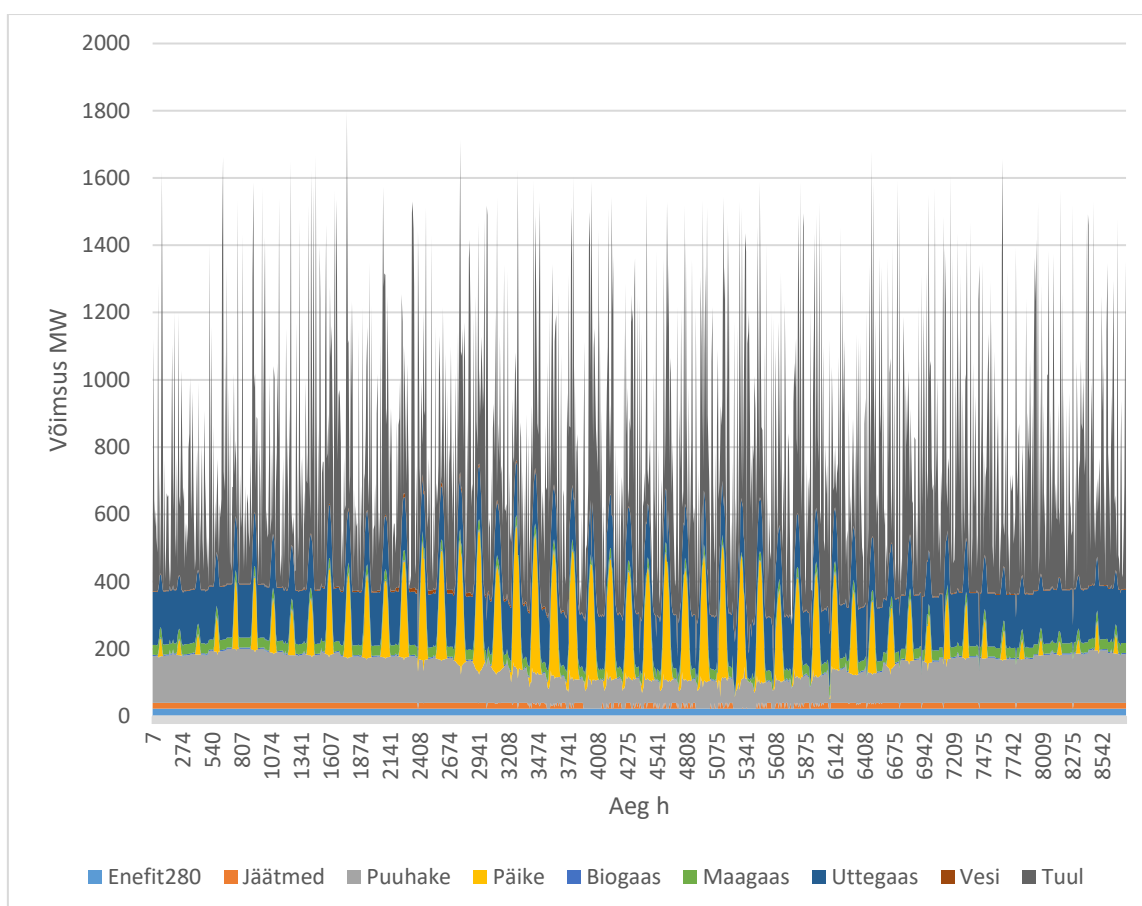
Käesoleva stsenaariumi Taastuv_saar korral on endiselt kõige suuremaks energiaallikaks tuule poolt toodetav energia, 3,409 TWh, mis moodustab natuke alla poole riigis toodetavast energiast. Sellele järgneb uttegaasist genereeritav energia 1,364 TWh ja puiduhake 0,999 TWh. Päikeseenergiat toodetakse 0,646 TWh, ülejäänud energiaallikad pole märkimisväärsed.

Tabel 3.4 Tootmisvõimsuste poolt genereeritud energia stsenaariumis Taastuv saar

	Toodang, GWh
Päike	646
Jäätmed	124
Maagaas	251
Vesi	30
Tuul	3 409
Puiduhake	999
Enefit280	203
Uttegaas	1 364
Biogaas	30
	7 054
Andmata energia	2 867

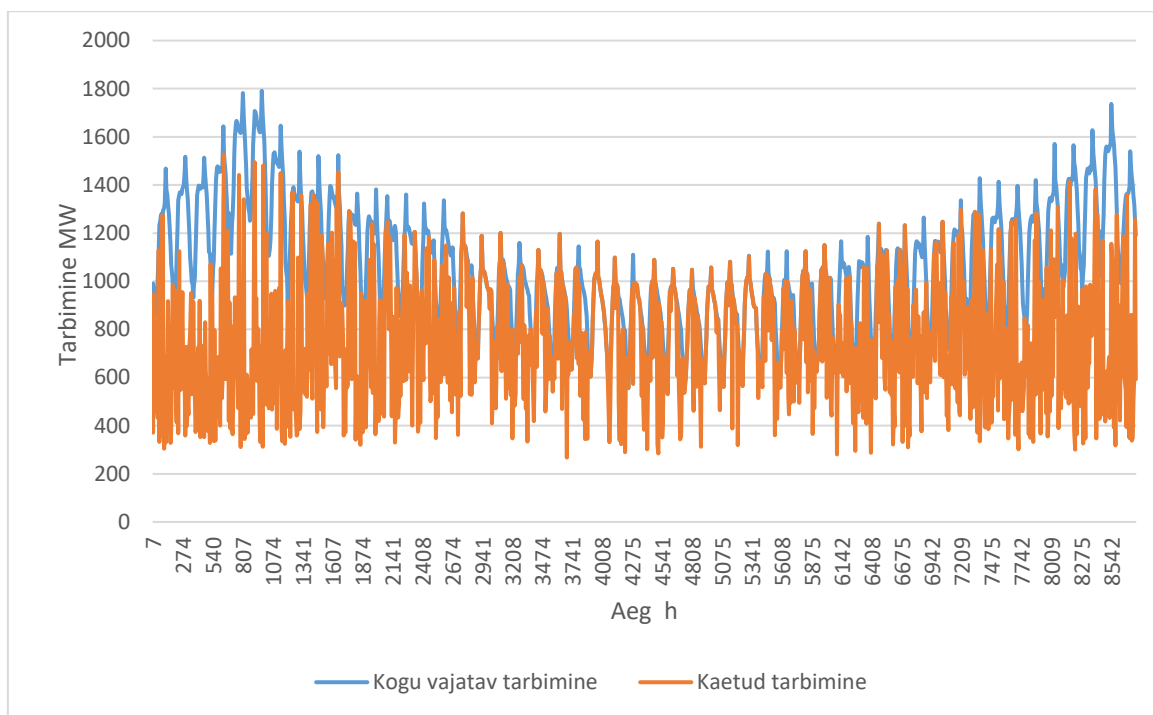


Joonis 3.11 Tootmisvõimsuste poolt toodetud energia stsenaariumis Taastuv_saar



Joonis 3.12 Tootmisvõimsuste poolt toodetav energia ajas koos ajas puudu oleva energia ning ka salvestist vabastatava energiaga stsenaariumis Taastuv_saar

Järgnevalt antakse ülevaade tootmisvõimsuste poolt välja antavast võimsusest ajas. 'Ka sellel graafikul on näha tuuleenergia ühest küljest nii suurt osakaalu kui ka suurt kõikumist. Kõikuv on ka päikeseenergia toodang, mille osakaal on suurem suvisel ajal ning talvel üsna olematu. Puiduhakkest ja uttegaasist toodetav elektrivõimsus on suhteliselt ühtlane, kuigi puiduhakke puhul on välja antav võimsus suvel väiksem.



Joonis 3.13 Süsteemis kogu soovitatav tarbimine ning stsenaariumi järgi kaetud tarbimine stsenaariumis Taastuv_saar

Viimasena käsitletakse kiirelt käesoleva stsenaariumi Taastuv_saar elektri tarbimist. Graafikult selgub, et kui suvisel ajal on küll reeglina pidevalt natuke energiat süsteemist puudu, siis vähemalt suurem osa vajadusest on kaetud. Talvisel hooajal on selgelt võimalik näha, et süsteemist õnnestub saartalitluses ära katta ligikaudu vaid pool. Kusjuures süsteemi keskmine tarbimisevajadus on umbes 1069 MW ning keskmine süsteemis tarbimiseks saadaval olev võimsus on 744 MW.

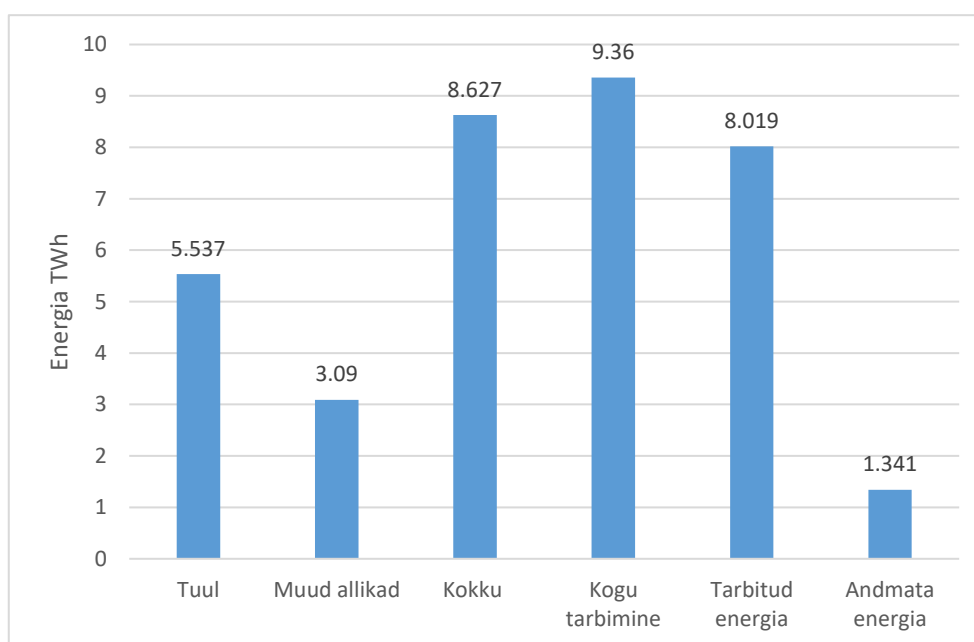
3.5 Stsenaariumid Tuul_saar ja Salvestita_saar

Viimase kahe stsenaariumi uurimise eesmärk on põgusalt uurida kahte järgnevat mõjutegurit. Esiteks, kuidas mõjutab varustuskindlust kui võrgus oleks oluliselt rohkem tuuleenergiale tuginevat tootmisvõimsust. Teiseks uuritakse, milline on pumphüdrolelektrijaamal põhineva salvesti tähtsus.

Esimeses lisatakse mudelisse veel 1000 MW jagu tootmisvõimsust. Muus osas sarnaneb kõik kolmandale alternatiivstsenariumile. Tegu on endiselt saartalitlusega ja eksisteerib salvesti.

Tabel 3.5 Tähtsamad tulemused stsenaariumis Tuul_saar

	Energia GWh
Tuul	5 537
Muud allikad	3 090
Kokku	8 627
Kogu tarbimine	9 360
Tarbitud energia	8 019
Andmata energia	1 341

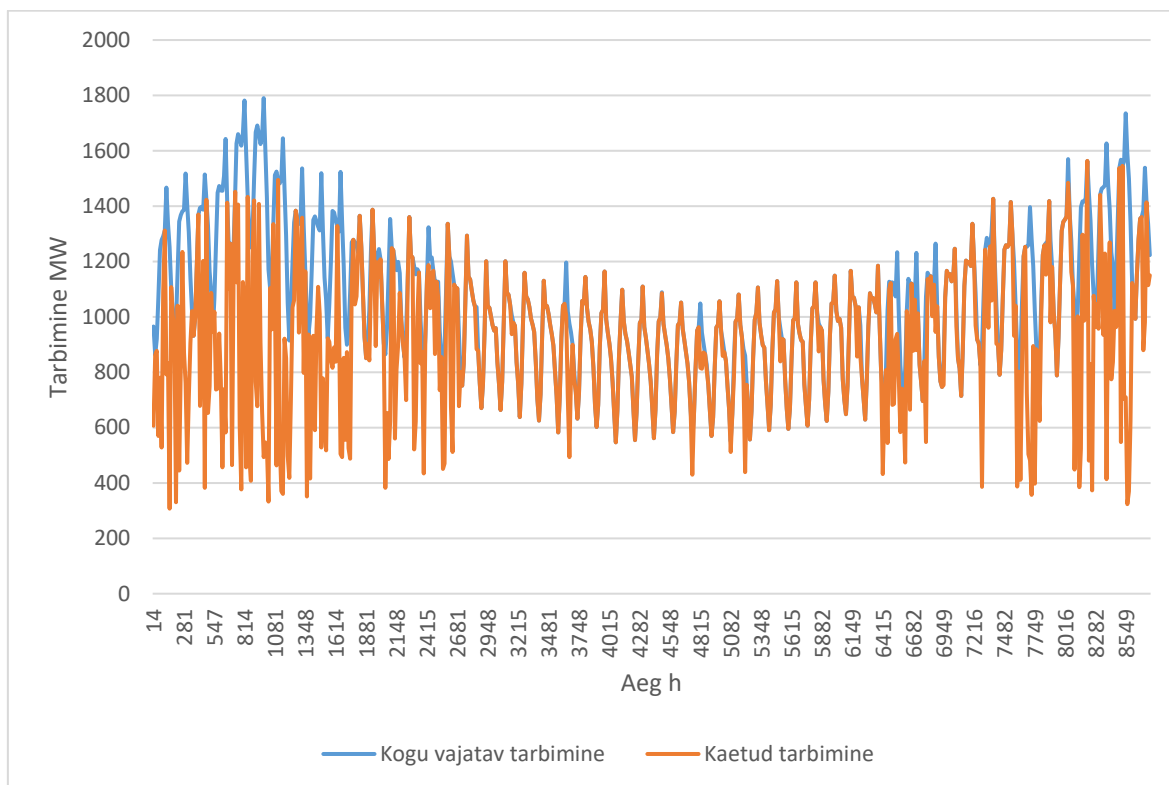


Joonis 3.14 Tähtsamate tulemuste graafik stsenaariumis Tuul_saar

Mudeli tulemustest selgub, et tuulest toodetakse kokku 5,537 TWh ja kõik ülejäänud allikad toodavad kokku 3,090 TWh, seega kokku toodetakse võrgus 8,627 TWh. Mudeli põhjal ära tarbida õnnestub sellest 8,019 TWh, seega kokku õnnestub aastasest tarbimise vajadusest katta 85,7%. Kusjuures andmata jääb umbes 1,341 TWh. Kusjuures energiasalvestist antakse tagasi võrku 1,031 TWh.

Kui uurida elektri mudeli põhiskogutarbimist ning osakaalu, mis õnnestub hetkese stsenaariumiga katta, võib öelda, et suhteliselt suurel osal aastast on peaaegu kogu tarbimisvajadus olemasolevate allikate poolt kaetud. Suuremat kõikumist on näha talvisel hooajal, kuid isegi siis on tavaliselt suurem osa vajadusest täidetud. Keskmiselt

vajatakse tarbitavat võimsust 1130 MW, ning keskmiselt õnnestub tootmisvõimsustel koos salvestiga katta tarbimist võimsusega 908 MW.



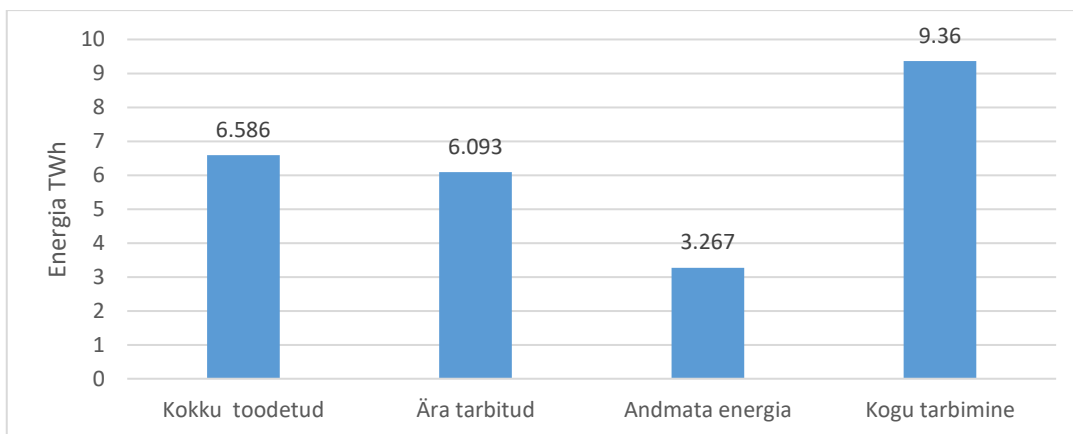
Joonis 3.15 Kogu tarbimine võrreldes tootmisvõimsuste poolt kaetud tarbimisega stsenaariumis Tuul_saar

Järgnevalt uuritakse pumphüdroelektrijaama salvesti mõju, luues stsenaariumi, kus seda ei ole. Tegevuse eesmärk on luua baas võrdluseks kolmanda alternatiivstsenaariumiga, mille ainsaks erinevuseks praegusega on salvesti olemasolu.

Tabel 3.6 Olulisemad tulemused stsenaariumis Salvestita_saar

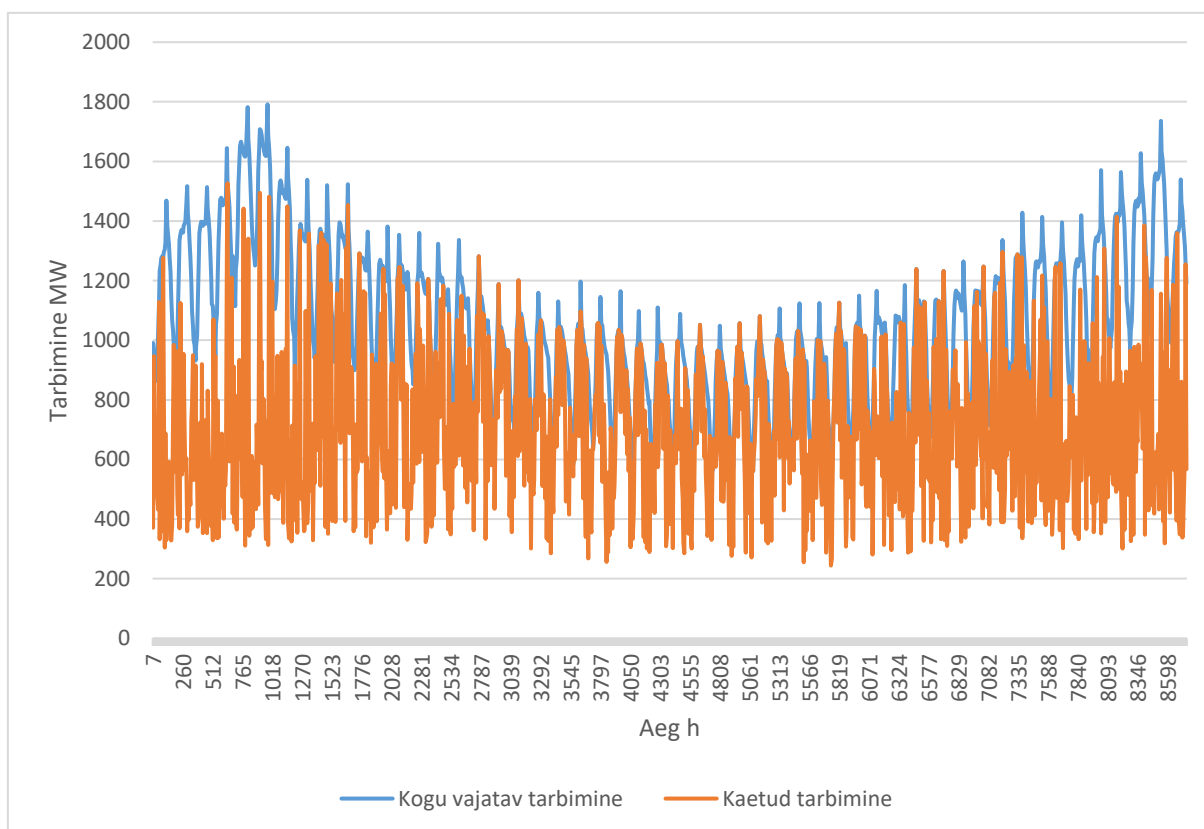
	Energia GWh
Kokku toodetud	6 586
Ära tarbitud	6 093
Andmata energia	3 267
Kogu tarbimine	9 360

Mudeli tulemustest selgub, et käesoleva stsenaariumi Salvestita_saar korral toodetakse aastas kokku 6,586 TWh, millest omakorda realselt tarbimisvajadusse õnnestub rakendada 6,093 TWh. Andmata jääb kokku 3,267 TWh energiat. Kogu tarbimisest õnnestub ära katta umbes 65,1%.



Joonis 3.16 Tähtsamad tulemused stsenaariumist Salvestita_saar

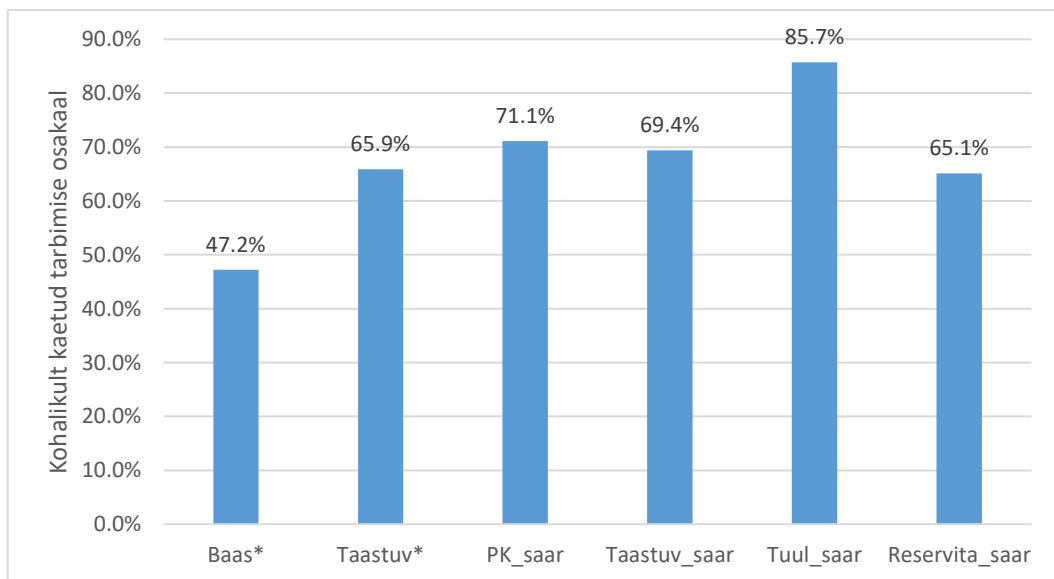
Energia tarbimise juures võib täheldada selgelt, et üldiselt on selle stsenaariumi Salvestita_saar korral energiat puudu. Nagu ka varasemate stsenaariumite puhul on täheldada trendi, et suvisel hooajal varustuskindluse tagamine saartalitluse tingimustes on selgelt edukam kui talvel. Kusjuures keskmisest kogutarbimisest 1069-st MW õnnestub keskmiselt tootmisvõimsustel võrku anda 696 MW.



Joonis 3.17 Kogu vajatav tarbimine ja tootmisvõimsuste poolt kaetav tarbimine stsenaariumis Salvestita_saar

3.6 Stsenaariumite võrdlus

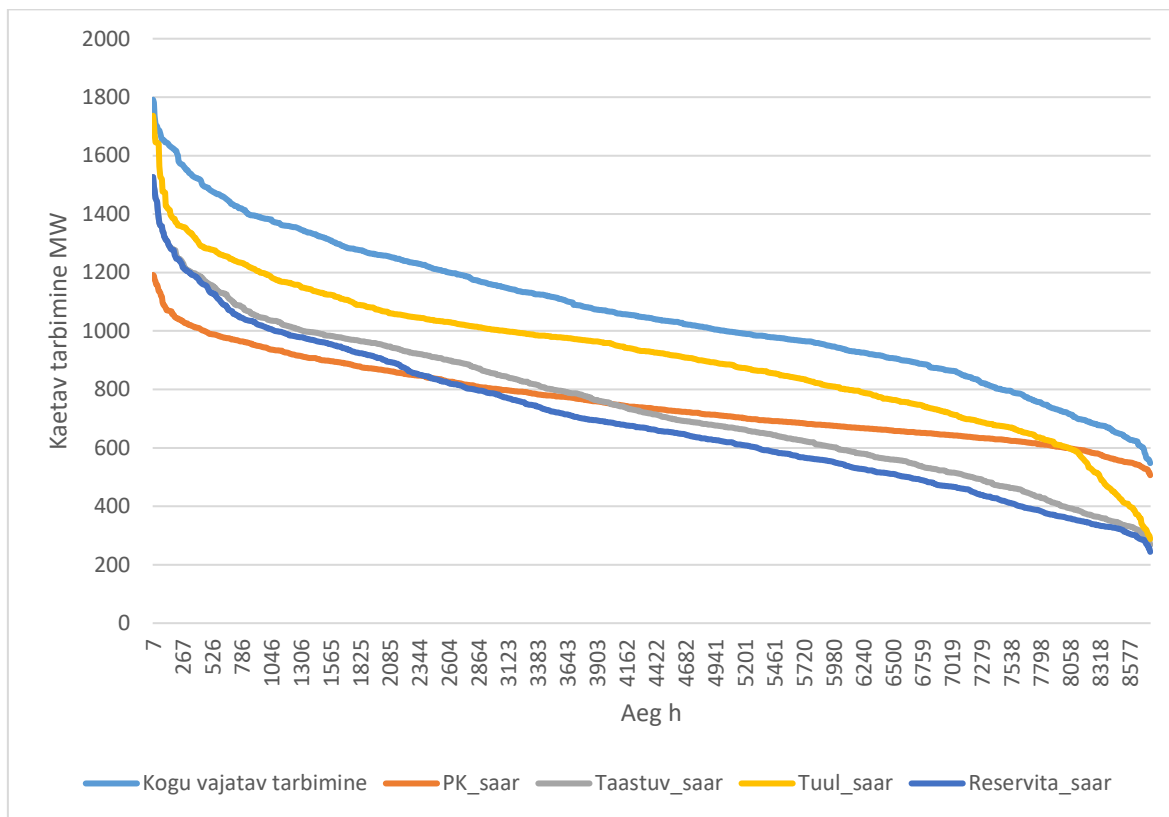
Esimese võrdluse eesmärk on iseloomustada igas stsenaariumis riigi siseste tootmisvõimsuste võimet katta ära kohalikku tarbimist. Esimesed kaks stsenaariumi on siin tähistatud tärniga, kuna tegemist on turupõhiste stsenaariumitega. Nendes stsenaariumite tulemused ei peegelda otseselt mitte energiasüsteemi tegelikku võimet tarbimist ära katta, vaid pigem kohaliku energiasüsteemi konkurentsivõimet võrreldes imporditava energiaga. Siinkohal oleks vajalik ka selgitada meetodikat, mille abil tulemused on koostatud. Nimelt käesolevaid tulemusi pole saadud mitte uurides kohalikult toodetava energia osakaalu aastas kogu süsteemi tarbimise vajadusest. See annaks tulemuseks kõrgema protsendi, kuid poleks nii täpne, sest alati pole kogu kohalikult toodetavat energiat süsteemis ära tarbida. Turupõhistes stsenaariumites on leitud tulemused lahutades kogutarbimisest maha energiahulk, mille võrra on energia import Eestisse suurem kui eksport ja seejärel võrreldud saadud tulemuse suhet kogu tarbimisega. Saartalitluse puhul on käsitatud analoogselt, lihtsalt maha on lahutatud näiva allika poolt toodetud energia, mis kajastab süsteemis puudu olevat energiat.



Joonis 3.18 Stsenaariumite võime katta ära aastast kohalikku tarbimist riigi siseselt toodetava energiaga

Tulemustest endist selgub, et turupõhiselt vähemalt kohaliku energia konkurentsivõime osas on stsenaarium Taastuv (65,9%) selgelt parem põlevkiviga stsenaariumist (47,2%). Saartalitluse puhul on varustuskindluse mõttes parim olukord stsenaariumis Tuul_saar (85,7%), kattes aastasest tarbimisvajadusest 14,6% enam, kui stsenaarium Põlevkiviga_saar, mis suutnuks katta 71,1%. Saartalitlustest kehvim oleks olukord

stsenariumis Salvestita_saar, kus salvestit pole (65.1%). Stsenariumi Taastuv_saar korral õnnestuks tarbimisest katta 65.9%.



Joonis 3.19 Saartalitluse stsenaariumite kaetud tarbimised võrreldes kogu tarbimisega järjestatult suuremalt madalamale

Järgnevalt saab välja toodud võrdlus, mille eesmärk on vaadelda saartalitlustega stsenaariumites seda, kuidas mudeli järgi õnnestus tarbimist ajas katta võrreldes kogu tarbimise vajadusega. Kõik karakteristikud on järjestatud kaetud tarbimisvõimsuse järgi suurimast väikseimani.

Selgelt enim suudab tarbimist ära katta stsenaarium Tuul_saar. Teooria osas sai välja toodud, et süsteemil peaks olema võimekus genereerida vähemalt 1000 MW võimsust tarbimise katmiseks, et tagada ka saartalitluses suhteliselt hea varustuskindlus. Stsenaariumis Tuul_saar suudetakse enamikul osal ajast, mil vajatav tarbimine on üle 1000 MW, seda tingimust katta. Kõikides ülejäänud stsenaariumites suudetakse seda tingimust täita vaid üürikesel osal ajast. Kõige vähem suudab 1000 MW võimsust välja anda stsenaarium PK_saar. Hoolimata sellest, et PK_stsenaariumis suudetakse kõige lühemat aega ära katta 1000 MW tarbimist, jääb ta võrreldes teiste saartalitluste stsenaariumitega ometi teisele kohale, näidates üles võimet anda välja stabiilselt

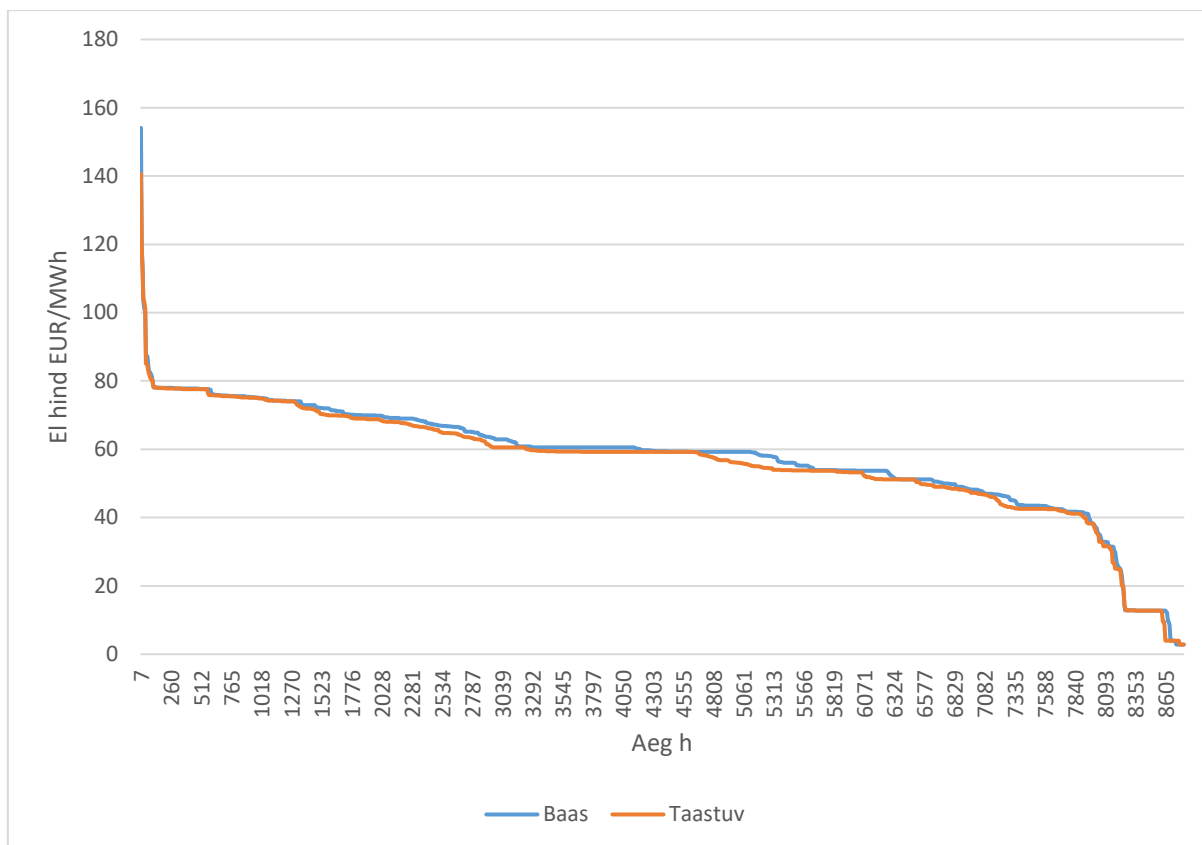
võimsust keskmiselt 700 MW lähedal ja sellega endiselt vajatavast tarbimisest katta suhteliselt suurt osa.

Oluline tähelepanek on see, et erinevalt kõigist ülejäänuid, stsenaariumis PK_saar ei lange tarbimiseks välja antav võimsus alla 500 MW. Kõikides teistes stsenaariumites on sisuliselt tunde, kus tarbimiseks on võimalik välja anda vaid umbes 250 MW. Siit tuleb selgelt välja probleem, mis esineb kõikidel põlevkivita stsenaariumitel saartalitluse korral, mida sai uuritud. Nimelt juhtivate tootmisvõimsuse puuduse tõttu on teataval osal ajast saadaval väga vähe võimsust.

Kolmandale kohale jääb hetkel süsteem stsenaarium Taastuv_saar korral. Mis ühest küljest suudab küll teataval osal ajast anda välja tarbimiseks oluliselt suuremat võimsust kui stsenaariumis PK_saar, kuid suurel osal ajast jääb alla selle

Kehvimat võimet tarbimist katta näitas stsenaarium Salvestita_saar. Selles stsenaariumis suudetakse 1000 MW tarbimist katta küll pisut kauem kui põlevkiviga saartalitluse korral, kuid muul ajal jääb teistele stsenaariumitele alla. Sisuliselt erinevus Taastuv_saar stsenaariumiga pole eriliselt suur. Stsenaariumis Taastuv_saar suudetakse reservjaama abil anda välja mõnevõrra suuremaid keskmisi võimsusi tarbimiseks jaoks kui Salvestita_saar stsenaariumis.

Kiirelt saab antud ka võrdlus elektri hindadest turupõhiste stsenaariumite kohta. Mudeli tulemustest selgub, et nii Baas kui Taastuv stsenaariumi hinnad on suhteliselt sarnase iseloomuga. Siiski on võimalik täheldada, et Taastuv stsenaariumi puhul on elektri hind natukene odavam kui stsenaariumis Baas.



Joonis 3.20 Turupõhiste stsenaariumite elektri hinnad

3.7 Järeldused mudeli tulemustest

Siin saavad ära toodud mõningased olulisemad järeldused, mida kõikide stsenaariumite tulemuste põhjal. Käesolevast mudelist järeldub (viidates joonisele 3.18), et saartalitluse korral Eesti varustuskindlus on mõnevõrra paremini tagatud stsenaariumis PK_saar, kus on kasutusel endiselt piiratud mahus põlevkivi. Samas see erinevus pole väga suur, vähem kui 2%, võrreldes stsenaariumiga Taastuv_saar. Samas turupõhine stsenaarium annab selgelt vastupidist tulemust, sest sealt lähtub, et kohaliku energia konkurentsivõime stsenaariumis Taastuv on oluliselt parem kui põlevkiviga Baas stsenaariumis. Viimast võib pidada positiivseks uudiseks maailma üldises kontekstis, kus kliima soojenemise ja rohepöördest tulenevalt on vaja teha pingutusi rohelisemaks energia tootmiseks. Saartalitluse seisukohast selgub, et kuigi lahendus suudab katta küllalt suure osa tarbimisest, võiks tootmisvõimsust, eelistatavalt juhitavat, olla siiski mõnevõrra rohkem.

Samas tuleb arutada ka salvesti rolli mudelis. Nimelt reservjaama süsteemist välja jätmisel langeks mudeli järgi võimalik kaetav tarbimine 69,4%-lt 65,1%-le, ehk siis

toimuks 4,3% langus. Käesoleva stsenaariumi puhul selgub mudeli tulemustest, et reservjaama abil väga suurt võitu ei saavutata. Sellest siiski ei tohiks välja lugeda, et reservjaam oma taolisel kujul ei oma mõtet. Tuleb siiski arvesse võtta, et stsenaariumi Taastuv_saar puhul andis reservjaam võrku tagasi nt umbes kolm korda vähem energiat kui turupõhises stsenaariumis Taastuv ja umbes 2,5 korda vähem kui stsenaariumis Tuul_saar. Kuigi mudeli abil ei uuritud eraldi viimaseid stsenaariume ilma reservjaama mõjuta, võib arvestades reservjaamast võrku antud elektri põhjal teha järelduse, et neis stsenaariumites oli reservjaama kasu kõvasti suurem. Peamine järeldus, mida siit ilmselt teha, on see, et reservjaama kasulikus sõltub suuresti, missuguse energiasüsteemi kontekstis seda kasutatakse. Samuti ka see, et saartalitluse olukorras 1 GW meretuulepark pole piisavalt suure võimsusega, et taoliste parameetritega energiasalvestit saartalitluses tõhusalt kasutada õnnestuks.

Arutluse koht on kahtlemata ka selles, et mis oleks mõistlik kogus tuulega seotud tootmisvõimsust. Mudeli põhjal meretuulepargi võimsuse kahekordistamisel suudeti tõsta varustuskindlus 69,4%-lt 85,7%-le. Kuigi tegemist on märkimisväärse tõusuga, siis on võimalik küsida vastu, et arvestades investeeringute mahtu, kas see ennast ka päriselt õigustab. Loomulikult tuleb eristada, et käesolevas töös uuriti hädaolukorra situatsioonis toimetulemist ning tavapäraselt tehakse investeeringuid pidades silmas tasuvust tavaolukorras. Saartalitluse seisukohast siiski käesoleva stsenaariumi kombinatsioon katab varustuskindlust selgelt paremini, kui kõik teised selle töö raames uuritud energiasüsteemid.

Oluline koht järelduste tegemisel on joonisel 3.19, mis käsitleb kaetava tarbimise osakaalu kogu nõutavast tarbimisest. Stsenaariumis Tuul_saar, oli olukord selles osas suhteliselt hea. Teistes stsenaariumites oli tingimus tagatud oluliselt vähem. Samas ei saaks olukorda nimetada ideaalseks üheski stsenaariumis, sest kindlat ja juhitavat 1000 MW kokku saartalitluses üheski neist otseselt polnud. Oluline oli ka juhitava võimsuse puudus. Ilma põlevkivita stsenaariumites oli teatud osal ajast kättesaadav võimsus väga madal. Samas saartalitluse olukorras on äärmiselt oluline, et oleks arvestatavas koguses energiat, mis oleks alati kindlalt kätte saadav. Juhul kui tulevikus on vajalik põlevkivist täielikult loobuda, võiks olla sobivaks lahenduseks näiteks tuumajaama loomine või siis püüda suurendada biojätmetel töötavate jaamade hulka.

Kokkuvõte

Käesoleva lõputöö eesmärk oli uurida võimalikku Eesti varustuskindlust tulevikus. Rõhuasetus oli eelkõige uurida varustuskindlust justnimelt kriisisituatsioonis, täpsemalt saartalitluses. Uurimiseks modelleeriti erinevaid stsenaariumi Balmoreli tarkvaras, kasutades GAMSi keskkonda.

Eleringi poolt välja antava Varustuskindluse Aruanne 2020 kohaselt on Eestis energiasüsteemi varustuskindlus tagatud, ent elektrisüsteemiga on vaja töötada ka tulevikus ja võib juhtuda, et süsteemis toimuvad muutused, mida me praegu ette ei näe. Aruandes hinnati Eesti varustuskindlust kogu väärtusahelat arvestades, milleks on süsteemipiisavus, süsteemi töökindlus, võrgu piisavus ning küberturvalisus. Eleringi tulemuste järgi peaks olema võimalik katta elutähtsa teenuse ja üldhuviteenuse teenuse elektritarbimine olemasolevate tootmisvõimsustega, ent nenditakse väljakutset hoida elektrisüsteemi stabiilsust ning tarbimise ja tootmise bilansi kriitilises olukorras. Märgitakse ära, et Eestis võiks olla igal ajahetkel ligikaudu 1000 MW kasutatavat tootmisvõimsust, millest enamik võiks olla juhitav. [8]

Hetkel on Eestis mitmeid plaane ja projekte, mis tulevikus võiksid suurel määral Eesti energiasüsteemi mõjutada. Plaanitakse rajada mereparke, millega võib energiasüsteemi lisanduda vähemalt 1 GW potentsiaalset tootmisvõimsust. Varsti plaanitakse ka rajada Paldiskisse suure võimsuse kui ka mahutavusega pumphüdroelektrijaam (mahutades kuni 6 GWh ja suutes välja anda kuni 500 MW). Lisaks plaanib Fermi Energia rajada Eestisse väikest tuumajaama.

Balmoreli mudelit kasutades modelleeriti 2030 aastat silmas pidades kokku kuus stsenaariumi. Esimeses kahes stsenaariumis vaadeldi turupõhiseid olukordi, kus ühendused välisriikidega on olemas. Neist omakorda esimeses uuriti olukorda, kus endiselt kasutatakse teataval määral põlevkivi, teises olukorda ilma põlevkivita, kuid omades 1 GW meretuuleparki ja pumphüdroelektrijaamal põhinevat energiasalvestit. Järgmised kaks stsenaariumi olid olemuselt sarnased eelnevatele, kuid ilma välisühendusteta, st saartalitluses. Vähemal määral uuriti saartalitlusega stsenaariumi, kus mainitud uutele investeeringutele lisati veel 1 GW meretuulepark, et püüda mõista tuulevõimsuse lisamise mõju. Viimase stsenaariumina uuriti pumphüdroelektrijaama mõju, luues võrdluseks alus stsenaariumiga, kus seda polnud. Tulemustest uuriti toodetud energia hulka, energia hulka toodetud allika järgi nii summaarselt aastas kokku kui jooksvaid tootmisvõimsusi ajas, tarbimiseks kättesaadava energia osakaalu

kogu vajatud tarbimisest. Turupõhistes stsenaariumites uuriti ka energiavooge naaberriikide vahel, uurides nii kohaliku energia konkurentsivõimet.

Tulemustest selgus, et kuigi turupõhises situatsioonis suudetakse põlevkivita ning meretuulepargi ja salvestiga stsenaariumis omada kõrgema konkurentsivõimega energiat kui põlevkiviga stsenaariumis, siis saartalitluse korral uuritud põlevkiviga stsenaarium andis kergelt parema tulemuse. Selgus, et reservjaama olemasolu varustuskindlusele uuritavas stsenaariumis oli väike. Samas teistes stsenaariumites leidis reservjaam suuremat kasutust, seega ei tohiks seda antud mudeli tulemuse põhjal alahinnata. Võis ka nentida seda, et veel 1 GW meretuulepargi lisamine juba olemas oleval suurendaks ka varustuskindlust, kuigi on majandusliku arutluse koht, kas see sellest hoolimata end ära tasub. Mudelis tuli esile ka taastuvate energiatega stsenaariumites esile probleem, mis oli seotud väheste juhitavate energiaallikatega. Nimelt teataval osal ajast oli kättesaadava energia hulk väga väike.

Kogu tööle hinnangut andes tuleb kindlasti aru anda, et käesolev töö annab ikkagi vaid piiratud vaate varustuskindluse võimalikust olukorrast. Selleks, et paremat ülevaadet saada, oleks vaja mudelis uurida hulgaliselt erinevaid võimalikke stsenaariume ning analüüsida ja võrrelda põhjalikumalt nende tulemusi, mis ilmselt poleks taolise mahuga lõputöö raames võimalik. Lõputöö suudab ehk natuke panna lugejaid mõtlema varustuskindlusest kriisi olukorras ja mõelda võimalikele lahendustele, kuidas ka hädaolukorras endiselt energiale juurdepääsu tagada.

Kasutatud kirjandus

- [1] Elering, „Eesti elektri varustuskindluse aruanne 2019,“ Elering, Tallinn, 2019.
- [2] ENTSO-E, „Mid-term Adequacy Forecast Executive Summary,“ ENTSO-E, 2019.
- [3] A. Tampere, „Jaotusvõrgu varustuskindluse probleemid ja nende lahendamine,“ Taltech, Tallinn, 2016.
- [4] K. J. Chalvatzis ja A. Ioannidis, „Energy supply security in the EU: Benchmarking diversity and dependence of primary energy,“ *Applied Energy*, kd. 207, pp. 465-476, 2017.
- [5] F. Wiese, R. Bramstoft, H. Koduvere, T. F. Bolkesjo, M. Münster ja H. Ravn, „Balmorel open source energy system model,“ *Energy Strategy Reviews*, kd. 20, pp. 26-34, 2018.
- [6] Konkurentsiamet, „Aruanne elektri- ja gaasiturust Eestis 2019-2020,“ Konkurentsiamet, Tallinn, 2021.
- [7] P. Gasser, J. Suter, M. Cinelli, M. Spada, P. Burgherr, S. Hirschberg, M. Kadzinski ja B. Stojadinovic, „Comprehensive resilience assessment of electricity supply security for 140 countries,“ *Ecological Indicators*, kd. 110, nr 105731, Märts 2020.
- [8] Elering, „Eesti varustuskindluse aruanne 2020,“ Elering, Tallinn, 2020.
- [9] European Commission, „Study on Baltic Offshore Wind Energy Cooperation Under Bemip,“ Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019.

- [10] S. Liiva, „Enneolematult suured plaanid: Utilitas tahab rajada Läänemerre kuus võimast meretuuleparki,“ *Ärileht*, 19 Mai 2020.
- [11] Keskkonnatehnika, „Eesti esimesed meretuulepargid võivad valmida enne 2030. aastat,“ *Keskkonnatehnika*, 19 Detsember 2019.
- [12] FERMI, Teostatavusanalüüs väikse moodulreaktori (VMR) sobivusest Eesti energiavarustuse tagamiseks ja kliimaeesmärkide täitmiseks 2030+, Tallinn: FERMI, 2020.
- [13] Energiasalv, „Project of the Estonian Pumped-Hydro Storage,“ Energiasalv, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://energiasalv.ee/project/>. [Kasutatud 7 Aprill 2021].
- [14] Eesti Energia, „Eesti Energia sai pumphüdroelektrijaama rajamiseks rohelise tule,“ Eesti Energia, 20 Detsember 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.energia.ee/et/uudised/avaleht/-/newsv2/2020/12/20/eesti-energia-sai-pumphydroelektrijaama-rajamiseks-rohelise-tule>. [Kasutatud 9 Aprill 2021].
- [15] Keskkonnaministeerium, „Põlevkivi Kasutamise Riiklik Arengukava 2016-2030,“ Keskkonnaministeerium, Tallinn, 2015.