



TALLINNA TEHNICAÜLIKOOI

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**LÄTI 330/110 KV ELEKTRISÜSTEEMI
MODELLEERIMINE NING PÜSISEISUNDI ANALÜÜS
SUUREMAHULISE LOKAALSE TAASTUVENERGIA
TOOTMISE TINGIMUSTES**

**MODELLING OF THE LATVIAN 330/110 KV POWER
SYSTEM AND STEADY-STATE ANALYSIS UNDER
LARGE-SCALE LOCAL RENEWABLE ENERGY
GENERATION CONDITIONS**

Bakalaureusetöö

Üliõpilane: Sten Buldas

Üliõpilaskood: 222558EAAB

Juhendaja: Henri Manninen, teadur

Tallinn 2025

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.

/ kuupäev digiallkirjas /

Autor: Sten Buldas

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab bakalaureusetööle esitatud nõuetele

/ kuupäev digiallkirjas /

Juhendaja: Henri Manninen

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

/ kuupäev digiallkirjas /

Kaitsmiskomisjoni esimees Katrin Järv

/ allkirjastatud digitaalselt /

LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ REPRODUTSEERIMISEKS JA LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS¹

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Sten Buldas,

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose LÄTI 330/110 KV ELEKTRISÜSTEEMI MODELLEERIMINE NING PÜSITALITLUSE ANALÜÜS SUUREMAHULISE LOKAALSE TAASTUVENERGIA TOOTMISE TINGIMUSTES , mille juhendaja on Henri Manninen

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.

15.05.2025

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 loominguulise 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 ÜLESANNE

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Üliõpilane: Sten Buldas, 222558EAAB

Õppekava, peeriala: EAAB16/22 Elektroenergeetika ja mehhatroonika,
elektroenergeetika

Juhendaja(d): Henri Manninen, Teadur, -, Henri.manninen@taltech.ee

Konsultant: Eesnimi Perekonnanimi, Amet, Ettevõtte, Telefon, E-post

Lõputöö teema:

LÄTI 330/110 KV ELEKTRISÜSTEEMI MODELLEERIMINE NING PÜSISEISUNDI ANALÜÜS SUUREMAHULISE LOKAALSE TAASTUVENERGIA TOOTMISE TINGIMUSTES

MODELLING OF THE LATVIAN 330/110 KV POWER SYSTEM AND STEADY-STATE
ANALYSIS UNDER LARGE-SCALE LOCAL RENEWABLE ENERGY GENERATION
CONDITIONS

Lõputöö põhieesmärgid:

1. koostada Läti elektrivõrgu 330/110 kV mudel 2030. aastal;
2. leida Läti elektritootmise kooslus 2030. aastal;
3. prognoosida Läti elektritarbimine 2030. aastal;
4. analüüsida elektrisüsteemi tööd äärmuslikes tingimustes;
5. pakkuda välja lahendusi võimalike riskide vähendamiseks.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Elektrivõrgu elementide ja sisendparameetrite otsing avalikest andmebaasidest ja hankedokumentidest	30.02.2025
2.	2030. aasta tootmisandmete leidmine hankedokumentidest ning valitsuskavadest	14.03.2025
3.	Tarbimisprognoosi väljatöötamine aastaks 2030	21.03.2025
4.	Võrgumudeli valmisenhitamine PSS/Es (toimub paralleelselt juba eelnevate etappidega)	02.04.2025
5.	Stsenaariumite valimine ja kirjeldamine	16.04.2025
6.	Tulemuste analüüsimine	30.04.2025
7.	Järelduste ja kokkuvõtete kirjutamine	07.05.2025

Töö keel: Eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: 15.05.2025

Üliõpilane: Sten Buldas

“15” mai 2025a

Juhendaja: Henri Manninen /allkiri/

"15" mai 2025a

Programmijuht: Katrin Järv /allkiri/

"15" mai 2025a

Programmi: /allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

1. SISSEJUHATUS.....	7
2. Läti elektrisüsteemi iseloomustus.....	9
2.1 Elektrisüsteemi peamised komponendid	10
2.2 Taastuenergia roll ja arengutrendid Lätis	11
3. ANDMETE ALLIKAD JA TÖÖTLEMINE.....	13
3.1 Elektriliinid ja -kaablid	14
3.2 Trafod.....	15
3.3 Generaatorid	16
3.4 Pingereguleerimisseadmed	17
3.5 Tarbijad	17
4. STSENAARIUMITE KIRJELDUSED	18
4.1 STSENAARIUM 1 - "Talvine tipukoormus".....	19
4.2 STSENAARIUM 2 - "Suvine minimaalne koormus"	20
4.3 STSENAARIUM 3 - "Suvine maksimaalne koormus"	20
4.4 STSENAARIUM 4 - "Suvine maksimaalne rohkemate paneelidega"	21
4.5 STSENAARIUM 5 - "Suvine maksimaalne rohkemate tuulikutega"	21
5. STSENAARIUMITE TULEMUSED.....	23
5.1 STSENAARIUM 1 - "Talvine tipukoormus".....	24
5.2 STSENAARIUM 2 - "Suvine minimaalne koormus"	27
5.3 STSENAARIUM 3 - "Suvine maksimaalne koormus"	30
5.4 STSENAARIUM 4 - "Suvine maksimaalne rohkemate paneelidega"	32
5.5 STSENAARIUM 5 - "Suvine maksimaalne rohkemate tuulikutega"	34
6. JÄRELDUSED.....	36
7. KOKKUVÕTE.....	38

EESSÕNA

Lõputöö teema sõnastati juhendaja Henri Mannineni abil. Lõputöös käsitletakse 5 stsenaariumit Läti elektrisüsteemist aastal 2030. Põhifookuses on taastuenergia lisandumisega kaasnevate pingemuutuste uurimine ning teisejärguliselt uuriti ületootmismahu ja ekspordivõimekust Leedusse ning N-1 olukordasid 330 kV võrgus. Suur osa andmeid võrgumudeli koostamiseks võeti M. Palutederi bakalaureuse lõputööst, kes juba varasemalt oli 330 kV elektrivõrgu PSS/Es üles ehitanud. Kõik andmed, mida sealt ei leidnud, leiti näiteks Openinframap veebilehelt, ENTSO-E Transparency platvormilt, AST kodulehelt või muudest avalikest allikatest.

Tulemused kokkuvõttes olid järgmised:

- 1) Läti võimsate hüdroelektrijaamade ja SEJ-de toel saab elektrisüsteem hakkama ka talvistes keerulistes oludes, mil taastuenergiaüksused toodavad mõnel tunnil kollektiivselt väga vähe energiat. Pinged jäävad pigem madalaks, ent 0.9-1.1 pu piiresse. Suvistes ületootmisolukordades on pinged võrgus pigem kõrged, vaid üksikul juhul ohtlikult kõrged, 1.095 pu~ Daugavpils piirkonnas.
- 2) N-1 olukorrad mõjutasid alati kõige enam Režekne alajaama Ida-Lätis, sest sinna ühendub vaid üks 330 kV liin, mille väljalülitumisel langeb 330 kV lattidel pinge alati alla 0.9 pu. Selle olukorra vältimiseks tuleks rajada nt Krustpils – Režekne 330 kV liin, mida viimases 10 aasta elektrisüsteemi arendusplaanis kujutatud ei ole.
- 3) Ekspordimahud on kõige suuremad suvel, ning mõnel juhul ulatusid peaaegu 2000 MW'ni, millest piisaks, et katta ära ka kogu Leedu elektritarbimine. Ületoodang on hea, kuniks keegi seda kusagil tarbida soovib, ent reaalsuses võib ületoodang põhjustada taastuenergia jaamade väljalülitamist ja toodangu piiramist, mis muudab taastuenergia elektrijaamade rajamise lõpuks vähem ahvatlevaks.

Tänu sooviksin avaldada M. Palutederile põhjaliku mudeli sisendandmete kirjelduse eest tema lõputöös. See on ka põhjus, miks käesolevas lõputöös sisendandmete kirjeldamisele on vähe rõhku pandud, kuigi see on selle lõputöö kahtlemata mahukaim osa koos mudeli enda üles ehitamisega. Lisaks soovin tänada oma juhendajat Henri Mannineni, kes alati kiiresti vastas, kui mul arusaamatusi või küsimusi tekkis. Lisaks soovin tänada kursusekaaslasid Markus Karolini ja Andres Nirgit, kes ühel või teisel hetkel oskasid mind aidata mõne probleemiga, mis PSS/E programmi kasutamisega tekkisid.

1. SISSEJUHATUS

Viimase kümnendi jooksul on Euroopa Liidu energiapoliitika liikunud jõuliselt rohelisema majanduse suunas, eesmärgiga vähendada elektritootmisega kaasnevat keskkonnamõju. Selle tulemusel on liikmesriigid võtnud endale kohustuse suurendada taastuvenergia osakaalu märgatavalt juba aastaks 2030 ning ka hilisemaks ajaks [1].

Oluline muudatus Balti riikide elektrisüsteemides toimus 2025. aastal, mil Eesti, Läti ja Leedu ühendati lahti Venemaa kontrolli all olevast BRELL sagedusalast ning integreeriti Mandri-Euroopa sünkroonlasse. See üleminek on toonud kaasa uusi väljakutseid, eeskätt seoses elektrisüsteemi sageduse ja pingestabiilsusega, mis on muutunud võrreldes varasemaga haavatavamaks süsteemirikete suhtes [2].

Balti elektrisüsteemi ebastabiilsus võib suureneda veelgi lähitulevikus, kui võrku lisanduvad suures mahus lokaalsed taastuvenergia tootmisüksused, mille toodang sõltub ilmastikuoludest ning on seetõttu raskesti ennustatav. Sellised äkilised ja mahukad tootmisvõimsuste kõikumised võivad põhjustada tõsiseid häireid elektrisüsteemi töös, nagu juhtus näiteks 28. aprillil 2025 Pürenee poolsaarel, kus seniste andmete kohaselt põhjustas ulatuslik taastuvenergia toodangu kõikumine üleriigilise elektrikatkestuse, mis tuletab teravalt meelde, kui oluline on valmis olla ootamatusteks. [3]

Suurte elektrikatkestuste vältimiseks on oluline eelnevalt läbi viia põhjalikud analüüsid ja simulatsioonid, hinnates elektrisüsteemi käitumist erinevates tulevikustsenaariumides nii püsi-, siirde- kui ka rikketalitluses. Käesolevas bakalaureusetöös keskendutakse Läti 330/110 kV elektrisüsteemi püsitalitluse analüüsile, mis võimaldab hinnata süsteemi pingete ja võimsusvoogude stabiilsust ning tuvastada potentsiaalsed probleemid, mis võivad tekkida suuremahulise taastuvenergia integreerimisel elektrivõrguga.

Läti elektrisüsteem eristub Eesti ja Leedu omadest eelkõige suurte hüdroelektrijaamade olemasolu poolest, mis võimaldavad teatud perioodidel katta suure osa riigi elektritarbimisest. Samas võib taastuvenergia tootmisüksuste (eriti päikese- ja tuuleparkide) laialdane lisandumine põhjustada süsteemis olukordi, kus tootmisvõimsus ületab tarbimise ning võrgupinged tõusevad ohtlikult kõrgeks. Vastupidiselt võivad talvised perioodid, kus päikeseparkide ja tuuleparkide elektritootmine on minimaalne ja elektritarbimine võrgus maksimaalne, tekitada olukordi, kus ilma impordivõimaluseta jäävad võrgupinged liiga madalaks.

Kuna Läti energiapoliitika näeb ette võimsate tuule- ja päikeseparkide rajamist lähitulevikus, on hädavajalik eelnevalt veenduda elektrisüsteemi töökindluses erinevates ekstreemsetes olukordades. Selleks koostas käesoleva töö autor Läti elektrivõrgu mudeli tarkvaras PSS/E, kus modelleeriti lisaks varem uuritud 330 kV põhivõrgule ka 110 kV jaotusvõrku. Selline laiendatud mudel võimaldab saada täpsemat ülevaadet süsteemis toimuvatest elektrilistest protsessidest ja seega ka anda realistlikumat hinnangut võrgu talitluskindlusele [4].

Töö raames analüüsitakse viit stsenaariumi, mis põhinevad Läti elektrisüsteemi prognoositud koormustel ja tootmisvõimsustel 2030. aastaks. Need on: (1) talvine tipukoormus päeval, (2) suvine minimaalne koormus, (3) suvine tipukoormus päeval, (4) suvine päevane tipukoormus suurenenud päikeseparkide võimsusega (päike+) ja (5) suvine päevane tipukoormus suurenenud tuuleenergia tootmisega (tuulikud+). Kõiki stsenaariume on detailselt kirjeldatud ja analüüsitud vastavalt peatükkides 4 ja 5.

2. LÄTI ELEKTRISÜSTEEMI ISELOOMUSTUS

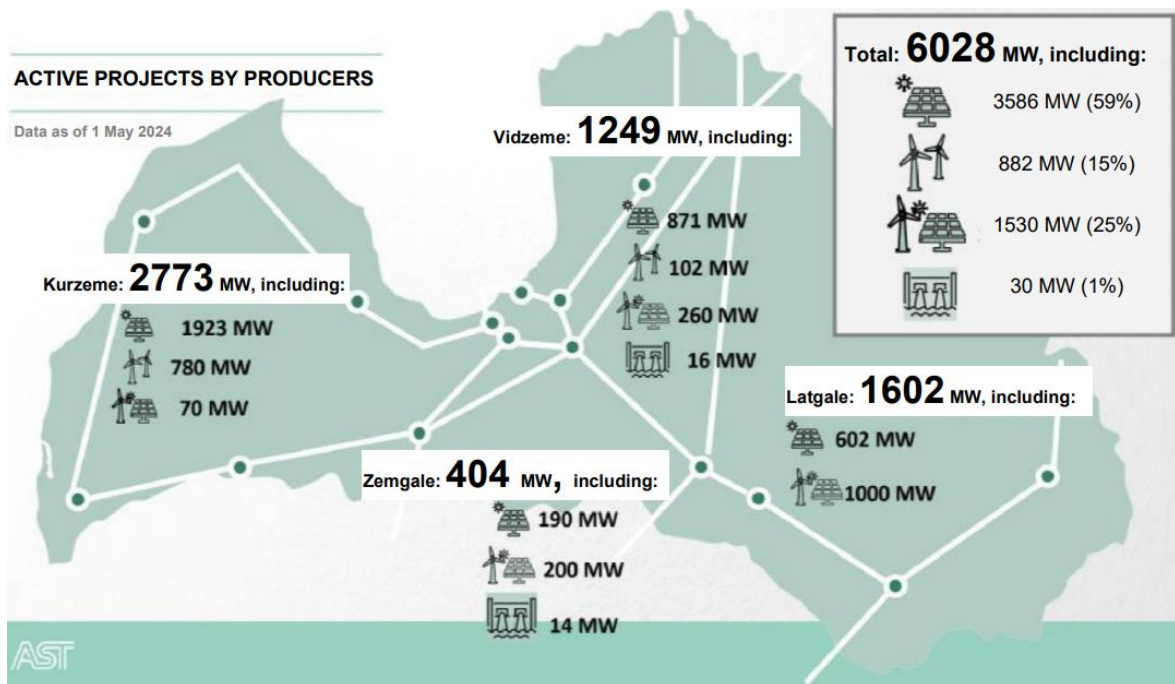
Läti elektrisüsteem kuulub Balti elektrisüsteemi hulka ning on ühendatud Eesti ja Leedu elektrivõrkudega. Varasemalt oli süsteem seotud Venemaa elektrisüsteemiga BRELL sagedusalas, kuid alates 2025. aastast kuulub Läti Mandri-Euroopa sünkroonlasse. See ühendus on loonud uued võimalused, ent ka esitanud süsteemile uusi nõudmisi. [2]

Elektrisüsteemi põhivõrk koosneb kahest pingest – 330 kV ja 110 kV. 330 kV põhivõrk ühendab suuremaid alajaamu, tootmisüksusi ning tagab ülekandevõimsuse riigi erinevate piirkondade ja naaberriikide vahel. 110 kV võrk täidab nii ülekande- kui jaotamisfunktsiooni ühendades suuremad piirkondlikud alajaamad ja kohalikud tarbijad, ent luues ka mõned välisühendused. [5]

Läti elektrivõrgu olulisteks sõlmpunktideks on suuremad alajaamad nagu Salaspils, Viskali, Aizkraukle, Liksna. Peamised tootmisüksused paiknevad Daugava jõel asuvates hüdroelektrijaamades – Kegumsis, Plavinsis ja Rigas vastavate võimsustega 264 MW, 883.5 MW ja 402 MW ning koostootmisjaamades Rigas TEC-1 ja TEC-2-s vastavate elektriliste võimsustega 158 MW ja 881 MW. Need jaamad katavad suure osa Läti elektritarbimisest, eriti kevadiste üleujutuste ajal, mil tootmisvõimsused on kõige suuremad. [5]

Lisaks hüdroenergiale sõltub Läti elektritootmine ka viimastel aastatel lisandunud tuule- ja päikeseparkidest. Tuuleparke on installeeritud 2025. aasta seisuga 136 MW ning päikeseparke 450 MW. Tänu headele looduslikele tingimustele on Läti tuuleenergia potentsiaal märkimisväärne, eriti Kurzeme piirkonnas, kus tuuleparkide rajamine on aktiivselt hoogustunud. Päikeseparkide hulk on kasvamas üle kogu riigi, tuues kaasa täiendavaid väljakutseid võrgu töökindlusele ja stabiilsusele. [6] [7]

Läti elektrisüsteemi arendamine toimub kooskõlas Euroopa Liidu ja riiklike energiaeesmärkidega, mis näevad ette taastuvenergia osakaalu märgatavat kasvu ja elektrisüsteemi tehnoloogilist moderniseerimist. Elektrisüsteemi stabiilsuse tagamiseks on kavas teha mitmeid võrgutugevdusi ja rekonstrueerimisi ning lisainvesteeringuid, mille eesmärk on tagada võrgu paindlikkus ja töökindlus ka tulevikus suureneva taastuvenergia tootmismahu tingimustes. [1] [8]



Joonis 2.1 Lätis arenduses olevate taastuvenergia projektide võrgukaart 01.05.2024 seisuga. [8]

2.1 Elektrisüsteemi peamised komponendid

Läti elektrisüsteem koosneb mitmetest olulistest tehnilistest komponentidest, mis tagavad süsteemi töökindluse ja efektiivsuse. Võrgu põhikomponentide hulka kuuluvad kõrgepingeliinid, trafod, generaatorid ja pingereguleerimisseadmed nagu reaktorid, kondensaatorpatareid ja sünkroonkompensaatorid. [5]

Kõrgepinge elektriliinid (330 kV ja 110 kV) tagavad elektrienergia ülekande suuremate vahemaade taha ning ühendavad olulisi elektritootmisüksuseid ja tarbimiskeskuseid. Elektriliinide tehnilised näitajad, nagu juhtmete ristlõige, pikkus, materjal ja aktiivtakistus määravad liinide ülekandevõimsuse ning energiakao.

Trafod tagavad erinevate pingetasemete vahelise ühenduse ja võimaldavad võrgu paindlikkust ning optimeerimist. Alajaamades kasutatakse astmelülititega autotrafosid, mis võimaldavad reguleerida ülekandesuhteid vastavalt vajadusele. [8]

Generaatorite tehnilised näitajad nagu aktiivvõimsus (nimivõimsus) ja reaktiivvõimsuse tootmise võime määravad nende rolli võrgu sageduse ja pingete hoidmisel. Igal

generaatoritel on erinevad tehnilised omadused, mis mõjutavad nende võimekust stabiliseerida elektrivõrku.

Pingereguleerimisseadmed nagu šuntreaktorid, kondensaatorpatareid ning sünkroonkompensaatorid aitavad hoida võrgu pingetasemeid nõutud piirides, tagades süsteemi stabiilsuse ja töökindluse ka kiiresti muutuva tootmise või tarbimise korral.

2.2 Taastuvenergia roll ja arengutrendid Lätis

Taastuvenergia osakaal Läti elektritootmises on viimastel aastatel märgatavalt kasvanud, seda eriti tänu toetavale riiklikule ja Euroopa Liidu poliitikale ja päikeseparkide arendamisega. Läti taastuvenergia tootmise potentsiaal seisneb tänase seisuga peamiselt hüdroenergiast, ent tulevikus ka tuuleenergiast ja päikeseenergiast.

Hüdroenergia on ajalooliselt olnud Läti elektritootmise alustalaks, moodustades märkimisväärse osa kogu riigi elektritootmisest. Daugava jõel paiknevad suuremad hüdroelektrijaamad Plavinas, Kegums ja Riga võimaldavad Lätis toota märkimisväärse koguse elektrit, eriti kevadisel suurvee perioodil. Hüdroelektrijaamade tootmisvõimsus ulatub kokku 1586.8 MW-ni. [7]

Järgnevatel aastatel oluliseks trendiks on tuuleenergia kasutuselevõtu kasv. 2025. aasta seisuga on Lätis installeeritud 136 MW, millest kõik on maismaa tuulikud. Läti läänes, peamiselt Kurzeme piirkonnas, on tuuleparkide rajamiseks soodsad tuuleolud, mistõttu arendajad on alustanud mitmete suuremahuliste projektide elluviimisega. Plaanitakse rajada nii maismaa kui ka avamere tuuleparke. Läti riiklik energia- ja kliimakava aastast 2021 seab tuuleenergia võimsuse sihtmärgiks aastaks 2030 ligikaudu 1100 MW, ent ELWIND projekti täiemahulisel realiseerumisel võib see küündida lausa 1600 megavatini. [9] [10] [11] [12]

Aastal 2025 oli Lätis päikeseparkide installeeritud koguvõimsus 450 MW [7], ning prognooside kohaselt suureneb see arv 2030. aastaks märkimisväärselt, maksimaalselt 1672 megavatini, sõltuvalt erinevate projektide realiseerumisest. Päikeseenergia kasutamine Lätis on samuti kiiresti hoogustunud. Päikeseparkide rajamist soosivad nii riiklikud toetusmehhanismid kui ka päikesepaneelide hindade langus maailmaturul. Võrguga on plaanis liituda 2030. aastaks veel European Energy 148 MW, Ignitis Renewables 413 MW, Sunly 553 MW, Pienava 110 MW päikeseparkidel. [13] [14] [15]

Suurte taastuenergia tootmistahtude lisandumine toob reeglina elektrivõrgule kaasa mitmeid väljakutseid, nagu toodangu varieeruvuse tasakaalustamine ning elektrivõrgu pingetaseme ja stabiilsuse säilitamine. Toodangu varieeruvus ei ole aga Lätis niivõrd suureks probleemkohaks küllaltki suuremahuliste hüdroelektrijaamade tõttu, mis saavad paari päeva ulatuses toimida energiasalvestitena. Võrgus pingetasemete hoidmine ja stabiilse sageduse säilitamine nõuab aga üha nutikamaid võrgu juhtimissüsteeme ning täiendavad pingereguleerimis- ja kompenseerimisseadmed.

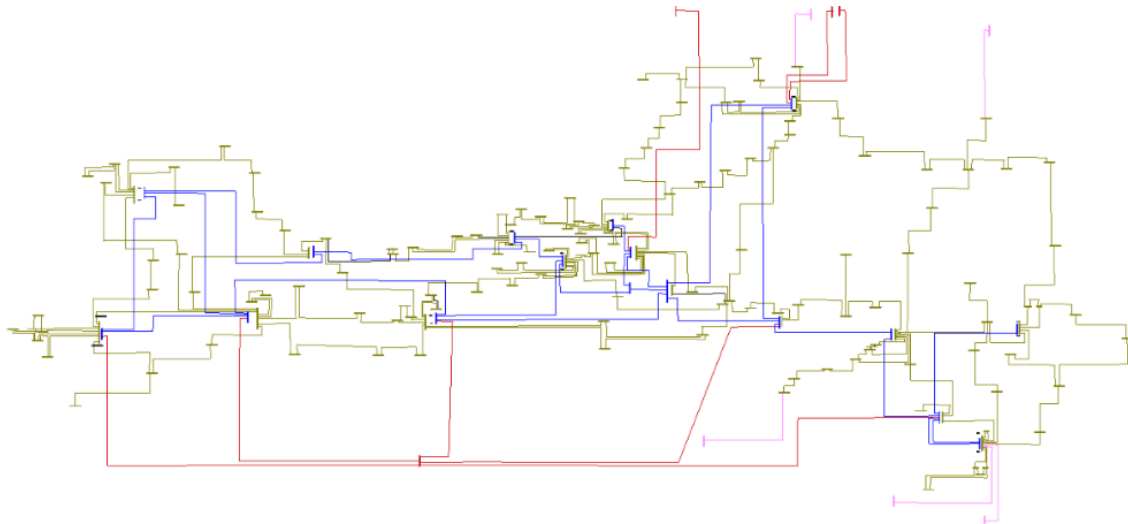
[16]

3. ANDMETE ALLIKAD JA TÖÖTLEMINE

Läti 2030. aasta elektrivõrgu mudeli koostamiseks on tarvis koguda suurel hulgal erinevaid väga spetsiifilisi andmeid. Kõik need andmed on olemas võrguoperaatoril (*Transmission System Operator, TSO*), kelleks on Lätis Augstsprieguma tīkls (AST). Kuna ASTil puudub kohustus kõiki neid andmeid avalikustada, siis tuleb võrgumudeli koostamisel teha teatavaid lihtsustusi ja oletusi. Kõige keerulisem on teada täpset tarbimise jagunemist alajaamade vahel, ent ka päikeseenergia hajatootmist alajaama põhiselt ja spetsiifiliste seadmete nimiaandmeid. Väga palju oli abiks M. Palutederi lõputöö. [4]

Läti elektrisüsteem koosneb salvestussüsteemidest, alajaamadest, elektriliinidest, tarbijatest ning tootjatest nagu iga teine tavapärane elektrisüsteemgi. Mudeli koostamiseks on oluline teada, mis seadmed on alajaamades – nendeks on trafod, sünkroonkompensaatorid, reaktorid ja kondensaatorpatareid. Kõik sisendandmed on kogutud avalikest allikatest ja andmebaasidest, mis tähendab, et kui nendesse allikatesse sisestatud informatsioon on väär, siis on ka need sisendandmed mudelisse valed.

Kõiki andmed koguti MS Excelisse ja seejärel töödeldi neid seal. Andmetöötamise eesmärgiks oli lihtsustada andmete PSS/E mudelisse sisestamist, sest töömaht oleks vastasel juhul olnud bakalaureuse töö raames autori hinnangul liialt suur. Järgnevalt käsitletud andmeallikate ja -hulkade põhjal modelleeriti Läti elektrisüsteem (joonis 3.1). Süsteemisõlmeks, mis hoiab võrgus pinget ning tagab võrgule kõik puuduoleva või tarbib kõik üle jääva aktiiv- ja reaktiivvõimsuse, määrati Leedu, kuhu kõik Leedusse suunduvad ühendused ühendati ühele süsteemisõlmemele. Joonisel on sinise värviga 330 kV elektrivõrk, rohelisega 110 kV, punase värviga on tehtud kõik 330 kV välisühendused ning roosa värviga 110 kV välisühendused. Joonisel puuduvad trafod, reaktorid ja tarbijad, sest mudelis sisestati need vaid *Network Data* vaates tabelitena, et mudel arvutusi teeks korrektselt.



Joonis 3.1. PSS/E mudelis koostatud Läti 330/110 kV elektrivõrk. [17]

5.1 Elektriliinid ja -kaablid

Elektriliinid on elektrisüsteemis hädavajalikud, et kanda elektri kümnete, sadade ja isegi tuhandete kilomeetrite kaugusele ehk tootmispaigast tarbijateni. Elektriliinidel ja -kaablitel on arvutatavad parameetrid, mis sõltuvad liini pikkusest, juhtmetüübist, faasivahelistest kaugustest, lõhisfaaside vahelistest kaugustest ning juhtme temperatuurist. Läti elektrivõrgu 330 kV pool koosneb 31st elektriliinist, mida on kokku 1742 km õhuliine ehk vähemalt 4355 visangut (eeldades visangu pikkuseks 400 meetrit) ja 22 km kaabelliine. 110 kV pool moodustub 194st liinist, mida on kokku 3813 km õhuliine ehk vähemalt 12710 visangut (eeldades visangu pikkuseks 300 meetrit) ja kaabelliine 84 km. Kõikide liinide pikkused mõõdeti Openinframapi (OIM) [5] rakenduse ja Google Mapi [18] satelliitfotode põhjal. Imanta – Rigas TEC 1 330 kV liinitrassi määramiseks kasutati ka ASTi kodulehelt leitavat kaarti, sest liin ei ole OIMi täies mahus sisestatud. [17]

Kuigi kaabelliinidel on teistsugused parameetrid kui õhuliinidel, siis töömahu vähendamiseks arvutatakse kõikide liinide parameetrid eeldades, et kõik liinid on õhuliinid. 330 kV õhuliinide puhul määrati ka iga liini täpne lõhisfaaside arv, et arvutustulemused oleksid täpsemad. Juhtmetüübiks 330 kV liinidel eeldati ACSR Condor ehk 402-AL1/52-ST1A [19] ja 110 kV liinidel ühe lõhisfaasiga ACSR Hawk ehk 242-AL1/39-ST1A [19]. Reaalsuses võib ühel liinil olla kasutatud erinevaid juhtmetüüpe ka erinevate lõhistuste arvuga, ent kogu 110 kV elektrivõrgul lõhistuste ja juhtmetüüpide empiiriliselt määramine, käies liinitrassid Google Maps *Streetviews* [18] läbi ja lugedes

läbi sadu hankedokumente, ei ole Bakalaureuse lõputöö mahus realistlik, ning antud lihtsustusega saavutatakse piisav soovitud täpsus. Samuti võib olla tekkinud üksikuid vigu liinitrasside määramisel, sest andmehulk on suur ning tõenäosus vigade tegemiseks seetõttu samuti suurem.

330 ja 110 kV liinidele loodi eraldi lehed, kuhu koguti liinide kohta informatsioon, milleks oli peaaesjalikult liini algus- ja lõppalajaam, liini pikkus km. 330 kV liinide puhul märgiti üles ka lõhistus, mis leiti Google Maps Streetview [18] abil. Vastavalt juhtmetüübile, arvutati välja Kõikidele liinidele parameetrid aktiivtakistus R , reaktiivtakistus X ja mahtuvus C [20]. Kui kõik liinid olid sisestatud Excelisse käsitsi, siis loodi 330 ja 110 kV liinidele ühisleht. Ühislehele kopeeriti PSS/E'st *Branch* tabel, kus olid kõik liinid juba algus- ja lõpppunktidega olemas, ent parameetrid ei olnud veel sisestatud. Seejärel ühtlustati Alajaamade nimed TRIM käsuga ühtlaseks nii liinide ühislehel kui ka eraldi lehtedel. Seejärel kasutati IFERROR ja XLOOKUP funktsioone käsikäes, et automaatselt täita liinide ühisleht sisendandmete R , X ja C 'ga. Kasutatud ei ole aktiivjuhtivust, sest G on suhteliselt väga väike võrreldes B 'ga (mis sõltub sisendparameetrist C). G arvestamine ei mõjuta oluliselt võimsusvoogusid, kui vaadata kogu süsteemi, seega täiendava arvutusmahu vältimiseks G 'd antud töös arvestatud ei ole. Seejärel sai liinide ühislehelt kopeerida tabeli PSS/Esse, et liinide takistused jõuaksid mudelisse.

5.2 Trafod

Trafod on alajaamades ehk kõige olulisemad ja ka kallimad seadmed. Nende ülesandeks on pingestmete muundamine ning võrguosade galvaaniline eraldamine. Kuna suured jõutrafod Läti ülekandevõrgus on peaaegu alati kolmemähiselised (nt 330/110/20 kV) siis on lihtsustamise eesmärgil eeldatud, et kõik trafod on kolmemähiselised 330/110/20 kV autotrafod. Reeglina on kolmandale mähisele ühendatud reaktor. Autotrafodel on ka võimalus astmelülitusteks, mida antud töös ei ole arvestatud. Igas alajaamas on kaks 125 MVA trafot. Mõned suuremate alajaamade trafod võivad olla ka 200 MVA. Kõige enam leidis trafode kohta avaliku informatsiooni ASTi elektrivõrgu 10 aasta arengukavast. Kolmemähiseliste trafode mähiste takistused sai töö autor juhendajalt. Trafode andmeid märkimisväärselt palju töötlemata ei pidanud. [7]

3.3 Generaatorid

Generaatorite ehk elektrijaamade andmed on leitud peamiselt Openinframapist ja Palutederi lõputööst [4]. Aasta 2030 eesmärgid ja planeeritavad võimsused on leitud erinevate veebiväljaannete ja ettevõtete lehtedelt. Elektrijaamade ülesanne on võrku toota elektrit. Teine oluline ülesanne on reaktiivvõimsuse reguleerimine võrgus ehk kui näiteks antud sõlmes, kuhu generaator ühendub on pinge liiga kõrge, siis tuleb generaatoril vastavalt reaktiivvõimsust kompenseerida, et pinge langeks soovitud piiridesse. Generaator saab reguleerida ka võrgus lähedal asuvate sõlmede pingeid, ent mida kaugemale generaatorist minna, seda väiksem mõju on generaatoril nende pingete mõjutamisel. Kõige keerulisem on leida päikeseparkide täpseid asukohti ning täpseid nimivõimsuseid. Seetõttu on lihtsustusena kogu Läti päikeseparkide tootmisvõimsus jaotatud laiali kõikide alajaamade vahel võrdselt. Lätis on rajatud pigem vähe päikeseparke, ent taastuenergia eesmärkide täitmiseks on plaanis Lätis nende tootmisvõimsuseid märgatavalt suurendada.

Lätis on veel 2 suurt ja üks väiksem maagaasil toimiv soojuselektrijaam Rigas TEC-1 ja Rigas TEC-2 vastavalt elektriliste võimsustega 158 ja 881 MW ning Liepaja 12 MW [5]. Lisaks veel 3 suuremat hüdroelektrijaama: Riga, Kegums ja Plavinas vastavalt 402, 264, 883.5 MW [5] elektriliste võimsustega. Väiksemate võimsustega biomassi ja –gaasi jaamasid on üle Läti 166 MW jagu. [7]

Kõik suured tootmisüksused on koondunud Daugava jõe äärde. Kohati seepärast, et Daugava jõel on piisav veehulk, et hüdroturbiinidest on palju kasu, teisalt on just ajalooliselt suurimad asulad tekkinud jõe kallastele, mistõttu on ka tänaseks suur osa tarbimisest koondunud jõe vahetusse lähedusse ja on mõistlikum toota elektrit tarbimisele võimalikult lähedal.

Tabel 3.1. Olemasolevad ja plaanitud võimsused [7]

	2025	2030
Päikesepargid, MW	450	1200-1674
Tuulepargid, MW	136	1100-1600
Hüdroelektrijaamad, MW	1588	1588
Biomassi ja –gaasi jaamad, MW	166	166
Kivisöe ja gaasi jaamad, MW	1112	1112

Generaatorite sisend-aktiivvõimsused lisati iga vastava alajaama juurde tootmistüübi järgi, kui nende asukoht oli teada. Kui teati vaid planeeritud installeeritavat võimsust, siis lisati generaator kas kirjanduse põhjal mõne viidatud piirkonnas asuva alajaama külge või tegi töö autor seda meelevaldselt.

3.4 Pingereguleerimisseadmed

Info šuntreaktorite kohta võeti Palutederi lõputööst [4]. Lätis on pingereguleerimiseks kasutatud ka kolme sünkroonkompensaatorit, mille andmed leiti ASTi veebilehelt. Iga sünkroonkompensaator suudab tarbida või genereerida kuni 100 Mvar elektrilist võimsust [21]. Lisaks reaktoritele ja sünkroonkompensaatoritele on ka Lätis vähemalt ühes alajaamas (Daugavpilsis) kondensaatorpatareid. Satelliitpiltide põhjal võib väita, et 330 kV alajaamades rohkem kondensaatorpatareisid ei ole, ent kuna satelliitfotod ei ole alati kõige ajakohasemad, siis võib mõnes alajaamas siiski veel kondensaatorpatareisid leida. Pinget reguleeritakse veel generaatoritega, kuid nendele on pühendatud peatükk 3.1.3, mistõttu neist antud peatükis ei räägita. [4]

3.5 Tarbijad

Infot aasta 2024 tarbimise kohta leiti nii ASTi kodulehelt kui ka Entso-e Transparency platvormilt. Kuna andmed ASTi ja Entso-e vahel erinesid küllaltki märgatavalt, otsustas töö autor kasutada vaid ASTi andmeid. Näiteks Entso-E platvormilt saadud andmete kohaselt oli Läti elektritarbimine 2024. aastal 6.9 TWh, AST andmetel aga 6.5 TWh. Vastavalt erinevatele stsenaariumitele, teisedandati uuritava tunni tarbimine 2030. aastale vastavaks. Uuritava tunni aktiivtarbimine jaotati ära kõikide alajaamade vahel. Reaktiivvõimsus arvutati igale sõlmele välja vastavalt valemile 4.1. T-liiniks nimetatakse käesolevas töös liini, mille üks otspunkt ei ole alajaamas, vaid hoopis teise liini peal, moodustades T-kuju. Mudelis on ka mõned sõlmed, kus ühenduvad T-liini osad, aga neid ei loeta alajaamadeks, mistõttu nendele sõlmedele tarbimist ei ühendatud. [7] [22]

4. STSENAARIUMITE KIRJELDUSED

Stsenaariumite koostamisel peeti silmas seda, et modelleeritakse võimalikke piiriolukordi, mis ühel või teisel hetkel aset leida võivad ja ka suuremate taastuvenergia tootmismahude juures, ehk seisundeid, mille juures süsteem võiks olla võimalikult haavatav pingete langemisele või vastupidi tõusmisele. Stsenaariumite paika panemisel on tehtud teatavaid lihtsustusi ja ka eeldusi. Iga lihtsustus ja eeldus muudab stsenaariumi vähem reaalsusele sarnaseks, ent kuna detailsete stsenaariumite loomine on märgatavalt ajamahukam, siis otsustas töö autor töömahu suurenemise vältimiseks jääda lihtsamakoeliste stsenaariumite juurde, kus on tehtud rohkem eeldusi. Läti elektritarbimine on eeldatud kõikide stsenaariumite puhul aasta lõikes olema 7.6 TWh. Aastal 2024 oli Läti elektritarbimine ASTi andmete põhjal 6.465 TWh. See tähendab, et prognoositav tarbimise kasv on 17.6% vastavalt valemile 4.1, kus P_{2024} on 2024. aasta reaalne energiatarbimine teravatt-tundides, P_{2030} on 2030. aasta ennustatav energiatarbimine teravatt-tundides ja k on resulteeruv kordaja protsentides. Kogu riigi elektritarbimine jagati igas stsenaariumis kõikide mudelisse sisestatud alajaamade vahel võrdselt ära vastavalt valemile 4.2, kus võeti näiteks olukord, mil Läti aktiivenergiatarbimine P_1 oli uuritava tunnil 1000 MW. Alajaamasid PSS/E mudelis on 153, millele vastab valemis n . Seega igale alajaamale langeb aktiivkoormus 6.536 MW. [23]

Valem 4.1.

$$k = \frac{P_{2030} - P_{2024}}{P_{2024}} * 100\%$$

Valem 4.2.

$$P_{\text{alajaam}} = \frac{P_1}{n} = \frac{1000}{153} = 6.536 \text{ MW}$$

Lisaks aktiivvõimsusele tarbitakse võrgus ka reaktiivvõimsust. Kuna selle kohta avalikud andmed aegridadena puuduvad, siis lähtuti tariifide kehtestamise piirist tarbijaile, et arvutada välja eelduslik maksimaalne reaktiivvõimsuse tarbimine käsitletud tundidel. Tariifid kehtestatakse tarbijale, kelle $\tan\varphi$ ületab 0.4 [24]. Seega riigis tarbitav reaktiivvõimsus igas stsenaariumis arvutati välja valemiga 4.3, kus P on tarbitav aktiivvõimsus ning φ on faasinurk aktiiv- ja näivvõimsuse faasivektori vahel.

Valem 4.3.

$$Q = \sqrt{\left(\frac{P}{\cos(\arctan(0.4))}\right)^2 - P^2}$$

Generaatorid, lisaks aktiivvõimsuse tootmisele, kompenseerivad ka võrgus reaktiivvõimsust. Erinevad tootmisüksused suudavad seda teha erinevas mahus. Päikese- ja tuuleparkide reaktiivvõimsuse kompenseerimise võimekus arvutati valemi 4.4 abil, ning ülejäänud tootmisüksuste reaktiivvõimsuse kompenseerimine arvutati vastavalt valemitele 4.5 ja 4.6. Valemities 4.4 – 4.6 tähistab P generaatori nimivõimsust. Seega reaktiivvõimsuse kompenseerimise võimekus sõltub tootmisüksuste tüübist ja nende installeeritud võimsusest. Kõik generaatorid, kaasa arvatud süsteemisõlme generaator sõlmel LT-2, üritavad hoida pinget 1.07 pu juures, et hoida kaod võrguüleselt võimalikult madalal, ent samas mitte jõuda liialt lähedale ülemisele 1.1 pu piirile. Kuna mida kõrgemad on võrgus pinged, seda madalamad on voolude väärtused ja seda väiksemad on aktiivvõimsuskad võrgus. [25]

Valem 4.4. $-Q_{\min} = Q_{\max} = 0.4 * P$

Valem 4.5. $Q_{\min} = -0.48432 * P$

Valem 4.6. $Q_{\max} = 0.75 * P$

Kõikide stsenaariumite puhul jääb samaks alajaamade arv n, mis on 153 pingereguleerimisseadmete arv ja parameetrid, liinide parameetrid ja ühendused ning trafode sisendparameetrid.

4.1 STSENAARIUM 1 – “Talvine tipukoormus”

Kõige suurema tarbimise katmine on reeglina kõige keerulisem. Lisaks on tihti talviti tootmisüksuseid raskendavad olud. Läti 2024. aasta tiputarbimine oli AST andmetel 1218 MW ning see leidis aset 03.01.2024 kell 17:00 [22]. Aasta 2030 ennustatav tiputarbimine on eelduslikult samuti 17.6% suurem kui 2024. aastal ehk 1432.37 MW. Reaktiivvõimsuse tarbimine üleriigiliselt arvutati vastavalt valemile 4.3.

Valem 4.3. $Q = \sqrt{\left(\frac{1432.37}{\cos(\arctan(0.4))}\right)^2 - 1432.37^2} = 572.948 \text{ Mvar}$

Talvisel perioodil on eeldatud, et päikesepaneelid on kaetud lumega ning energiat ei tooda, Lätis on täielik tuulevaikus ning hüdroelektrijaamad suudavad arendada vaid 20% nimivõimsusest, sest Daugava jõgi on pinnalt jäätunud, ent vähene pinnaalune veevool säilib. Ühtlasi suudavad kõik taastuenergia tootmisüksused reaktiivenergiat kompenseerida täies mahus. Sellega simuleeritakse olukorda, kus taastuenergia

tootmisüksused, mida on rohepoliitikast ajendatult palju installeeritud, ei panusta elektrienergia tootmisesse, sest ilmastikuolud seda ei luba, aga saavad siiski osaleda reaktiivvõimsuse kompenseerimisel, et aidata hoida võrgus pingeid enam-vähem stabiilsena. Selline olukord seab elektrisüsteemi potentsiaalselt tootmisüksuste puuduse alla ja võib tingida võrgus probleeme pingete hoidmisega seonduvalt. Biomassi, biogaasi ja maagaasi elektrijaamad töötavad maksimaalselt täiel võimsusel.

4.2 STSENAARIUM 2 – “Suvine minimaalne koormus”

Kõige madalama tarbimise katmine elektrisüsteemile raskust ei valmista. Küll aga võib tekkida olukord, kus tootmisüksuseid on võrku ühendatud liiga palju, mille tagajärjel pinged süsteemis võivad tõusta lubatud piiridest välja. Läti elektritarbimine oli kõige madalam 24.06.2024 kell 16:00, mil tarbimine oli vaid 371 MW [22]. Aastale 2030 kohandatud aktiivtarbimine oleks seega 436.142 MW ning reaktiivtarbimine 174.4568 Mvar vastavalt valemile 4.3.

Kuna kell 16:00 päikesepaneelid enam täisvõimsusel ei tooda, siis piiratakse nende võimsus 70%-le nimivõimsusest. Tuuleolud on eelduslikult ideaalsed ning tuulepargid toodavad täisvõimsusel, ilma et neid piirata oleks võimalik. Reaktiivvõimsust võrgus tuulepargid samuti sel juhul mõjutada ei saa. Lisaks eeldame, et hüdroelektrijaamad saavad elektrit toota maksimaalselt 60% ulatuses nimivõimsusest, ent reaktiivvõimsuse tootmine ei ole mõjutatud, modelleerides suvist veevoolu, mil vett on vähem kui kevadise suurvee ajal, aga märgatavalt rohkem kui talvise jääga. Biomassi, biogaasi ja maagaasi jaamasid ei käivitata, sest tarbimine kaetakse ära taastuvate energiaallikatega.

4.3 STSENAARIUM 3 - “Suvine maksimaalne koormus”

Sooja perioodi tipukoormuse katmine on mõnes mõistes vähem kriitiline olukord kui näiteks talvise tipukoormuse täitmine, ent oluline on siiski jälgida ületootmise mõju tundidel, mil näiteks päikesepaneelid ja tuulikud töötavad täiel võimsusel.

10.05.2024 kell 10:00 oli tarbimine 923 MW [22]. See tähendaks aastal 2030 tarbimist 1085.065 MW ja 434.026 Mvar.

Kuigi kell 10:00 veel päikesepaneelid täiel mahul elektrienergiat ei tooda, siis olukorra raskendamiseks eeldame päikesepaneelidelt täisvõimsusel töötamist. Maikuus ei ole see täiesti realistlik, ent jahedamad ilmad lubavad juba varastel kellaegadel märgatavalt suuremas mahus energiatootmist, mistõttu ei ole säärane lihtsustus täiesti alusetu. Eeldame, et sel juhul päikesepaneelid reaktiivvõimsust tarbida ei suuda. Tuuleolud on samuti ideaalsed ning tuulikud töötavad sundtootmises täisvõimsusel, reaktiivvõimsust tarbida ei suuda. Hüdroressursse on 80% nimivõimsusest, sest kevadise suurvee hooaeg on lõppenud, ent jõgedes on veetase veel väga hea. Biomassi, biogaasi ja maagaasi jaamasid ei käivitata, sest tarbimine kaetakse ära taastuvate energiaallikatega.

4.4 STSENAARIUM 4 - "Suvine maksimaalne rohkemate paneelidega"

Antud stsenaariumi eesmärgiks on modelleerida hajatootmise mõju elektrivõrgule, antud juhul päikesepaneelide näol. Ehk kui Lätis kõik planeeritavad päikeseparkide projektid saavad teoks, saavutatakse Lätis päikesepaneelide elektriline installeeritud võimsus 1672 MW [13] [14] [15]. Antud stsenaarium mängitakse läbi muidu täpselt samadel oludel, mis stsenaarium 3.

Mitmed päikeseparkide arendajad nagu Sunly, European Energy ja Ignitis Renewables planeerivad või juba ehitavad suuremahulisi päikeseelektrijaamu üle kogu Läti. Soodsad päikesepaneelide hinnad maailmaturul soodustavad kiiret ja suuremahulist päikeseenergia integreerimist elektrivõrguga. [13] [14] [15]

4.5 STSENAARIUM 5 - "Suvine maksimaalne rohkemate tuulikutega"

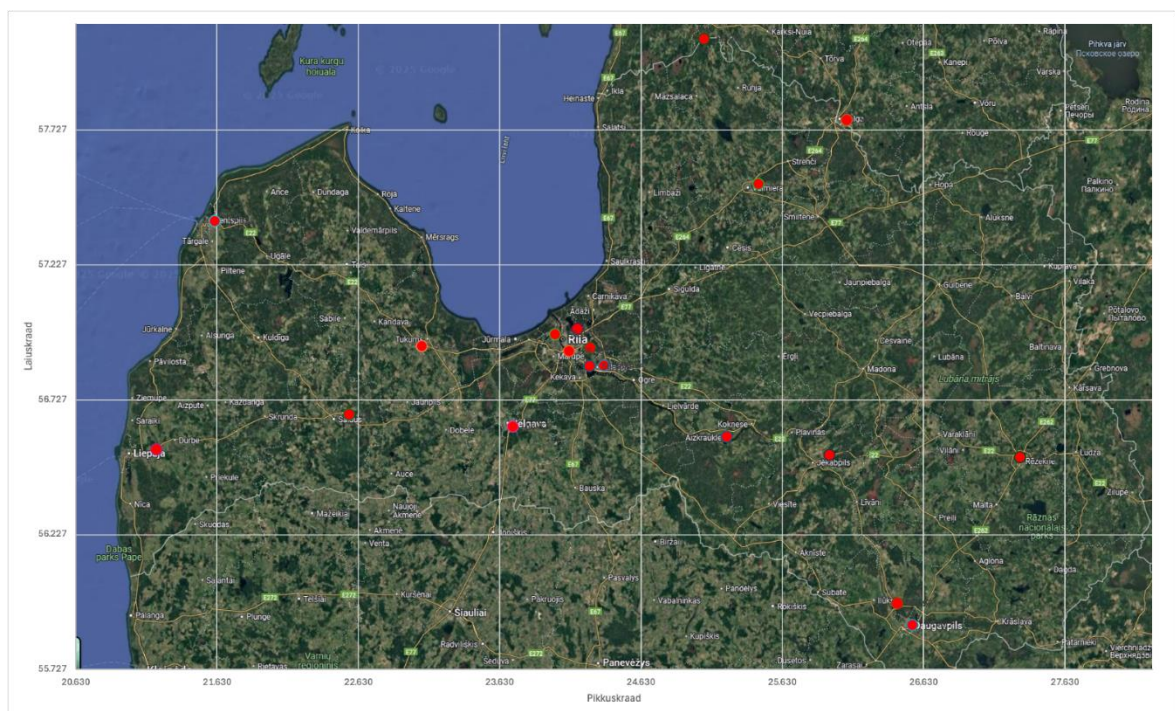
Antud stsenaariumi eesmärgiks on modelleerida suuremahulise lokaalse taastuvenergia tootmise mõju elektrivõrgule, antud juhul meretuulepargi näol. Ehk kui Lätis teostatakse täies mahus Elwind projekt [26], siis saavutatakse Lätis tuulikute elektriline

installeeritud võimsus 1600 MW [10] [11] [12]. Antud stsenaarium mängitakse läbi muidu täpselt samadel oludel, mis stsenaarium 3.

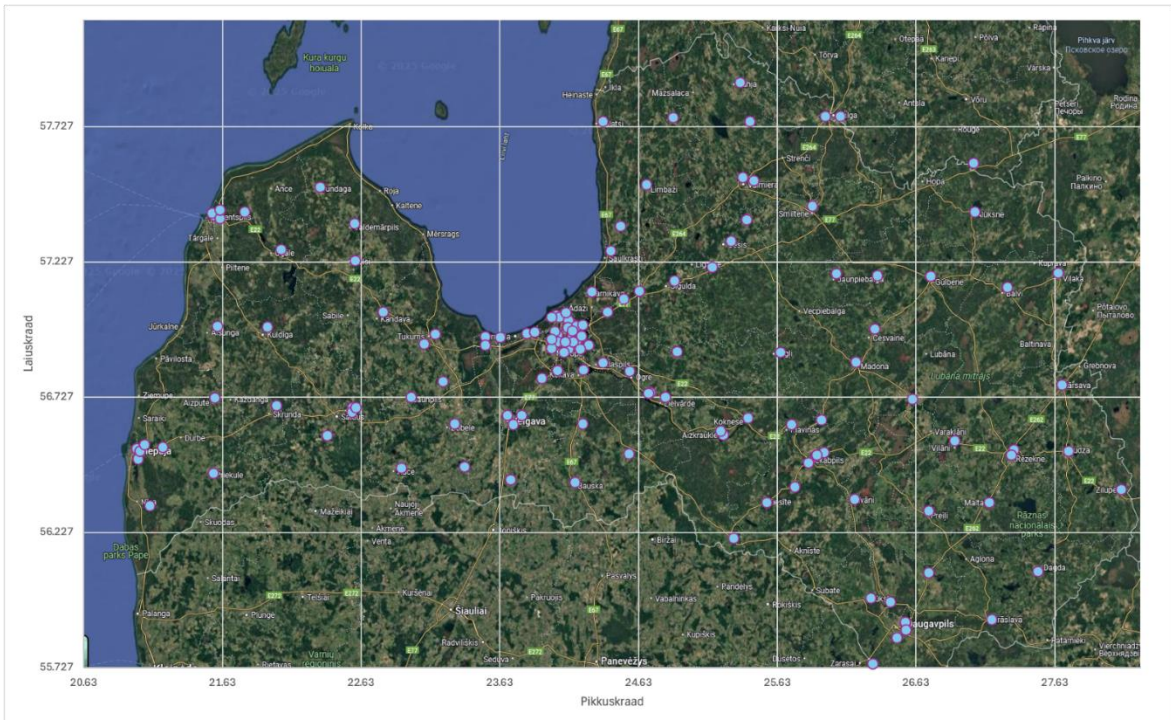
Elwind tuulepark on plaanitud rajada Läti Lääne-rannikule avamerele, umbes 20 km kaugusele kaldast Jūrkalne asumi lähiste. Lähimad 330 kV alajaamad planeeritud ehituspaigast on Grobina ja Ventspils, ent esialgse plaani kohaselt ühendatakse kogu 1 GW tuulepark Ventspils alajaama kaudu Läti elektrivõrguga. Ülejäänud stsenaariumites on eeldatud Elwind projekti mõõdukat täitmist 500 MW meretuulepargi näol. [26]

5. STSENAARIUMITE TULEMUSED

Kõige olulisemad näitajad võrgu piirtingimuste uurimisel on maksimaalne ja minimaalne pinge väärtus, mistõttu tõstetakse esile iga stsenaariumi puhul kõige kõrgema pingega ja kõige madalama pingega sõlm. 330 kV sõlmede puhul on lisatud ka tabel sõlmede nimetustega. 110 kV võrgu puhul tabelit sõlmedega lisatud ei ole, et vältida sadu ridu pikkade tabelite lisamist töö põhiosasse. Tulemuste visualiseerimiseks loodi eraldi 330 kV ja 110 kV sõlmede kaardid, mis on nähtaval joonistel 5.1 ja 5.2, kus iga stsenaariumi puhul tõstetakse esile helerohelise värviga maksimaalse pingega sõlm ning kollase värviga kõige madalama pingega sõlm.



Joonis 5.1 330 kV sõlmede geograafiline paiknemine Lätis



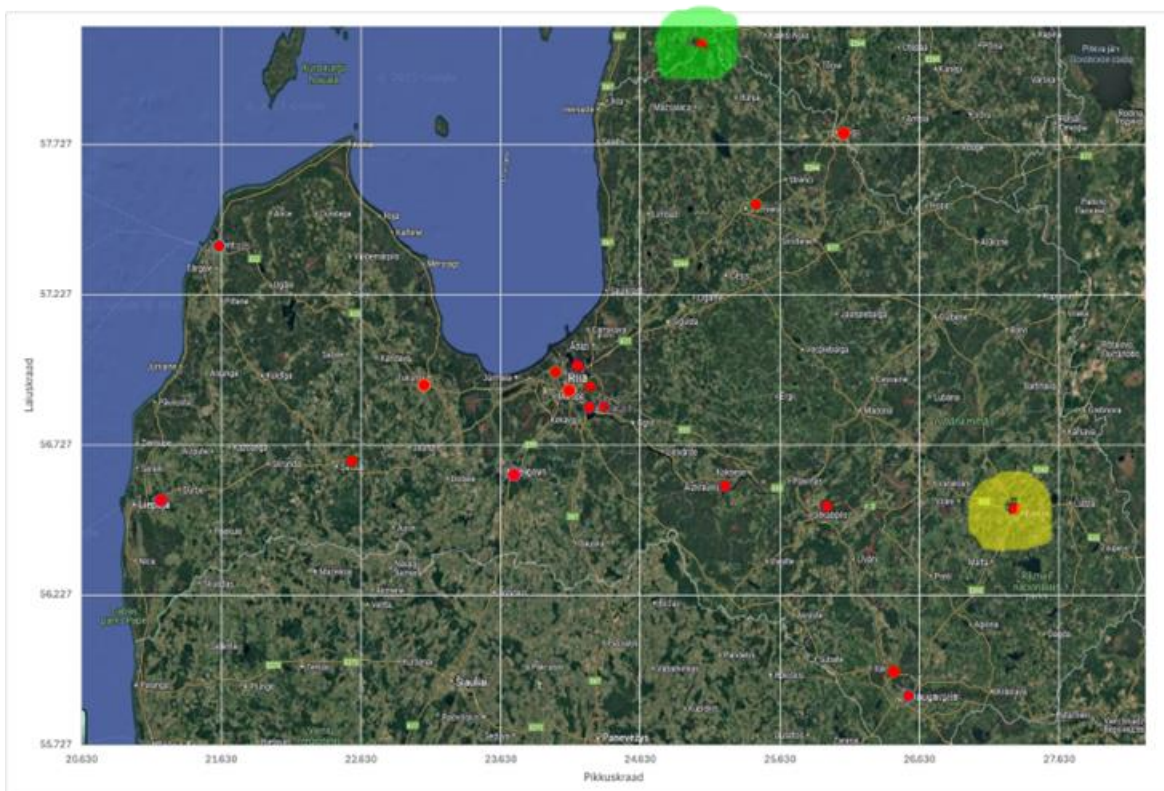
Joonis 5.2 110 kV sõlmede geograafiline paiknemine Lätis

Lisaks hinnatakse igas stsenaariumis Leedu süsteemisõlmes tarbitava või toodetava aktiivvõimsuse põhjal importimis/eksportimismahtu. Antud lähenemine ei ole ehk kõige täpsem, kuid siiski aitab hinnata energia ületootmismäärasid riigi tasandil Leedu suunal. Samuti uuritakse N-1 olukordi 330 kV võrgus.

5.1 STSENAARIUM 1 – “Talvine tipukoormus”

Võrgu talvine maksimaalne pinge oli 330 kV sõlmedest Eesti ja Läti piiril asuval sõlmel liinil Rigas TEC-2 – Kilingi-Nõmme, millel ei asu koormust ning kus pinge ulatub 356.27 kV’ni. Antud pinge on lubatud pingete vahemiku 297 – 363 kV ülemise otsa lähedal, mis on ootuspärane, arvestades, et süsteemisõlm hoiab pinget 1.07 pu lähedal. Madalaim pinge oli sõlmel Režekne alajaamas, väärtusega 349.7899 kV. Seega ka madalam pinge väärtus on lubatud piirides. 330 kV võrk seega toimib probleemideta. N-1 analüüsi tulemusel on näha, et Režekne - Likсна liini väljalülitamisel langeb Režekne alajaamas

pinge 0.611 pu'ni, mis on alla igasugust arvestust. Tulemuste analüüsis selgitatakse, mispärast tekib sedavõrd ekstreemne olukord just selle liini väljalülitumisel. Süsteemisõlmele ühendatud generaatorilt võib näha, et generaator on tarbib 76.1 MW elektrienergiat. See tähendab, et ka talvise tipukoormuse ajal kehvades oludes on Läti elektrisüsteem suuteline tootma rohkem elektrienergiat, kui tarbitakse. Ekspordi number 76.1 MW ei ole küll suur, ent siiski märgatav varu ka süsteemi jaoks, juhul kui võrgu püsiseisundit häiritaks.



Joonis 5.3 330 kV sõlmede maksimaalse ja minimaalse pinge paiknemine

110 kV elektrivõrgus on kõige kõrgem pingeline Jaunpils alajaamas, kus pingeline on 117.7 kV ehk 1.07 pu. See tähendab, et antud sõlmes suudetakse hoida 1.07 pu'd. Kõige madalam pingeline on Riias asuvas Sarkandaugava alajaamas, väärtusega 99.98 kV, mis on lubatud alumisele piirile äärmiselt lähedal, ent siiski jääb pingeline lubatud piiridesse ning võrk toimib. Küll aga kui taolises võrgus peaks toimuma väheke tõsisem häiring, veel enam näiteks kui tarbimine antud alajaamas peaks kasvama ootamatult, siis võib see põhjustada automaatse lahtilülituse ning osa tarbijaist jääksid vähemalt ajutiselt elektrita.



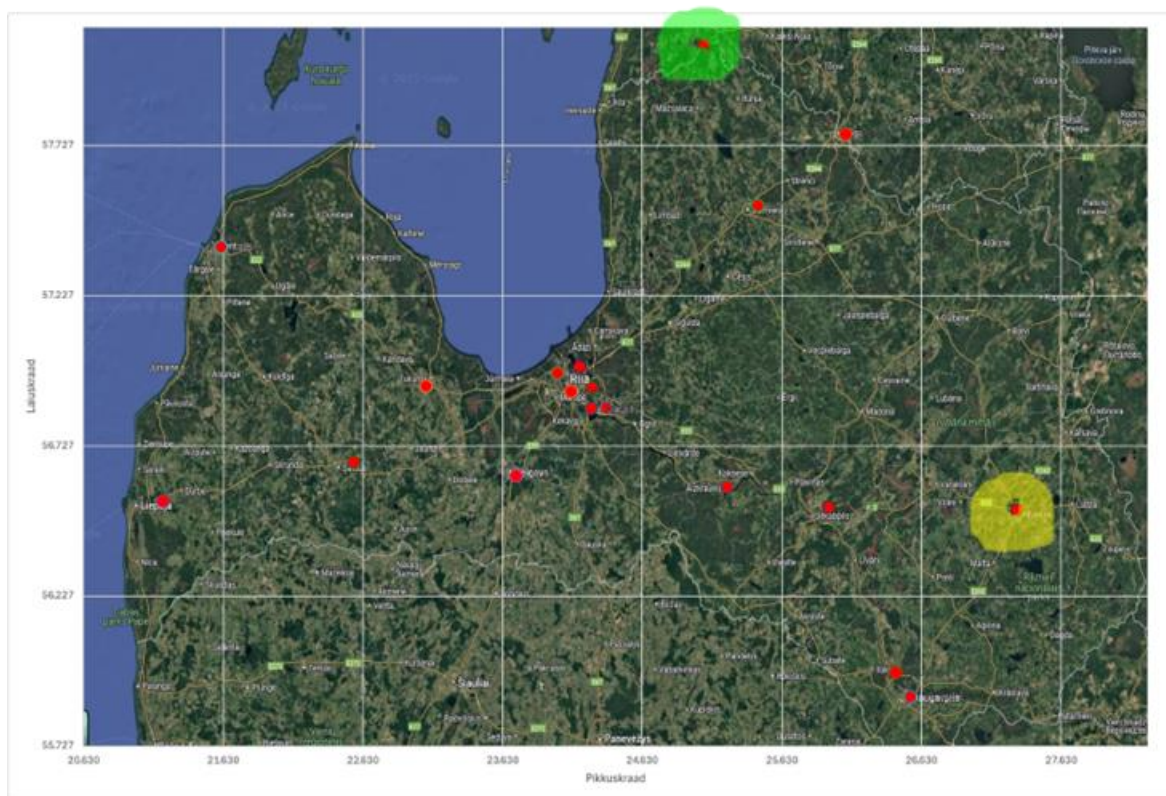
Joonis 5.4 110 kV sõlmede geograafiline paiknemine Lätis

Tabel 5.1 330 kV alajaamade pinged Talvise tipukoormuse olukorras

Alajaama nimetus mudelis	Pinge väärtus, kV	Pingenurga väärtus, kraadi
AIZKRAUKLE1	353.1	0.79
BISUCIEMS1	351.2716	1.9
BROCENI1	352.5581	-0.15
DAUGAVPILS1	352.5399	-0.66
GROBINA1	353.1	-0.49
IMANTA1	350.7502	2.01
KRUSTPILS1	353.1	0.13
LIKSNA1	352.6304	-0.57
REŽEKNE1	344.2565	-1.25
RIGAS HES	353.1	2.32
RIGAS TEC-1A	352.094	2.41
RIGAS TEC-2A	353.1	2.68
SALASPILS1	352.6147	2.11
TUME1	349.2726	0.68
VALMIERA1	346.5155	0.82
VENTSPILS1	353.1	-0.57
VISKALI1	351.0051	0.8
LT-2 (süsteemisõlm)	353.1	0
EE-1	346.6248	0.82
EE-2	346.6248	0.82
EE-3	356.2662	2.55

5.2 STSENAARIUM 2 – “Suvine minimaalne koormus”

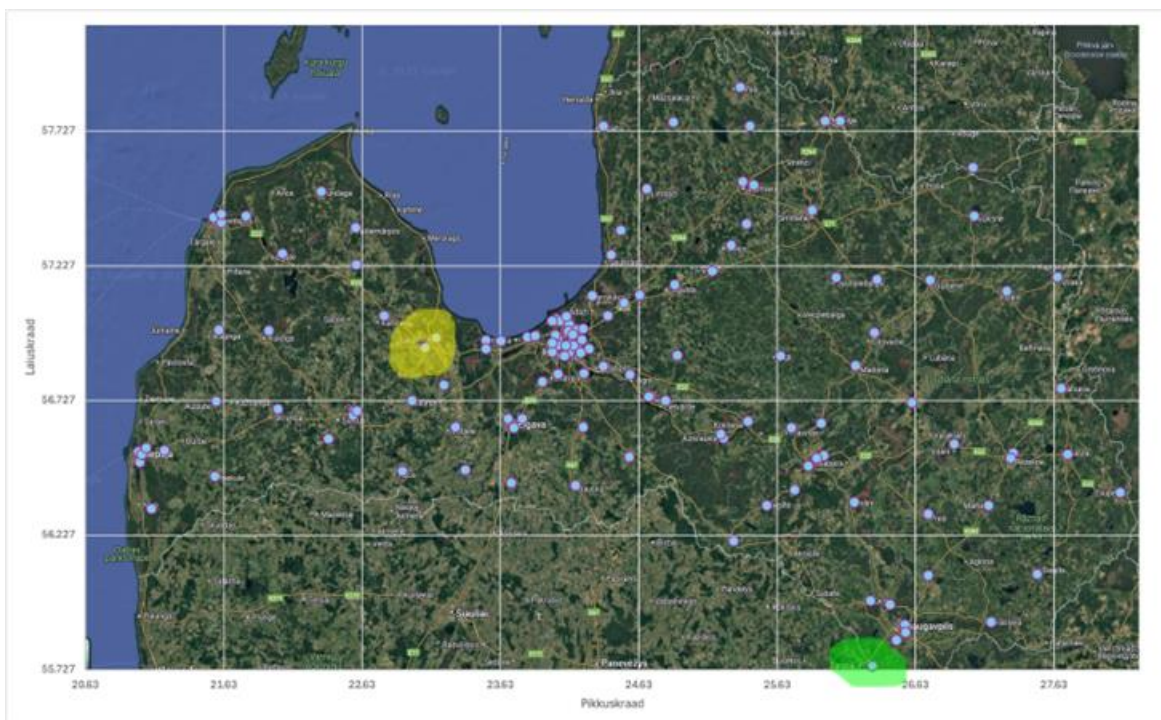
Olukord 330 kV võrgus on visuaalselt identne eelmisele stsenaariumile. Maksimaalne pinge väärtus on 355.83 kV sõlmel EE-3. Minimaalne pinge on 349.79 kV Režekne sõlmel. See tähendab, et tavatalitluses ei ole 330 kV võrgus mingeid probleeme. N-1 olukorras (Režekne - Liksna liini lahtilülitamisel) on näha taaskord samataolist, ent vähem hullu vaatepilti - Režekne alajaamas langeb pinge 330 kV lattidel 0.88 pu peale. See tähendab, et võrk ei suuda normaaltalitluses jätkata, kuid olukord ei ole lootusetu. Analüüsi osas pakutakse välja variante, kuidas vältida Režekne alajaama pingetaseme langemist alla ettenähtud piiri. Süsteemisõlme generatori aktiivvõimsusvoog näitab, et see tarbib 1464.2 MW, mis tähendab, et sarnases olukorras, mil taastuenergia üksused ei tööta küll täisvõimsusel, ent tarbimine on väga madal, jääb Läti elektrivõrgus väga palju energiat üle, mida naaberriikidesse (antud mudeli puhul Leedusse) suunata.



Joonis 5.5 330 kV sõlmede maksimaalse ja minimaalse pinge paiknemine

110 kV elektrivõrgus avaneb võrreldes stsenaariumiga 1 erinev pilt. Pinged on kõige madalamad alajaamas Tume, kus pinge langeb 108.35 kV peale, mis on vägagi aktsepteeritav pingeväärtus. 110 kV võrgu kõrgeim pingeväärtus on 120.61 kV, mis asub 110 kV ühenduskohas Leeduga, Daugavpilsist edela suunas. Kuigi pinge 120.61,

mis vastab 1.096 pu'le, on lubatud piirides, on näha, et 110 kV elektrivõrk on ülemise pingepiiri läheduses ning väiksemate häiringute korral võivad tekkida süsteemis rikked. Kui uurida olukorda lähemalt, siis tabelis 5.3 väljatoodud pingete põhjal on näha, et kogu Daugavpils piirkond on väga kõrge pingetasemega, mis viitab sellele, et süsteem on veel küll tasakaalus, ent mõne kergemagi rikke või mõjutuse korral võib 110 kV võrk Daugavpils läheduses ülekoormusest välja lülituda, mis jätaks väga paljud tarbijad elektrita.



Joonis 5.6 110 kV sõlmede maksimaalse ja minimaalse pinge paiknemine

Tabel 5.2 330 kV alajaamade pinged Talvise tipukoormuse olukorras

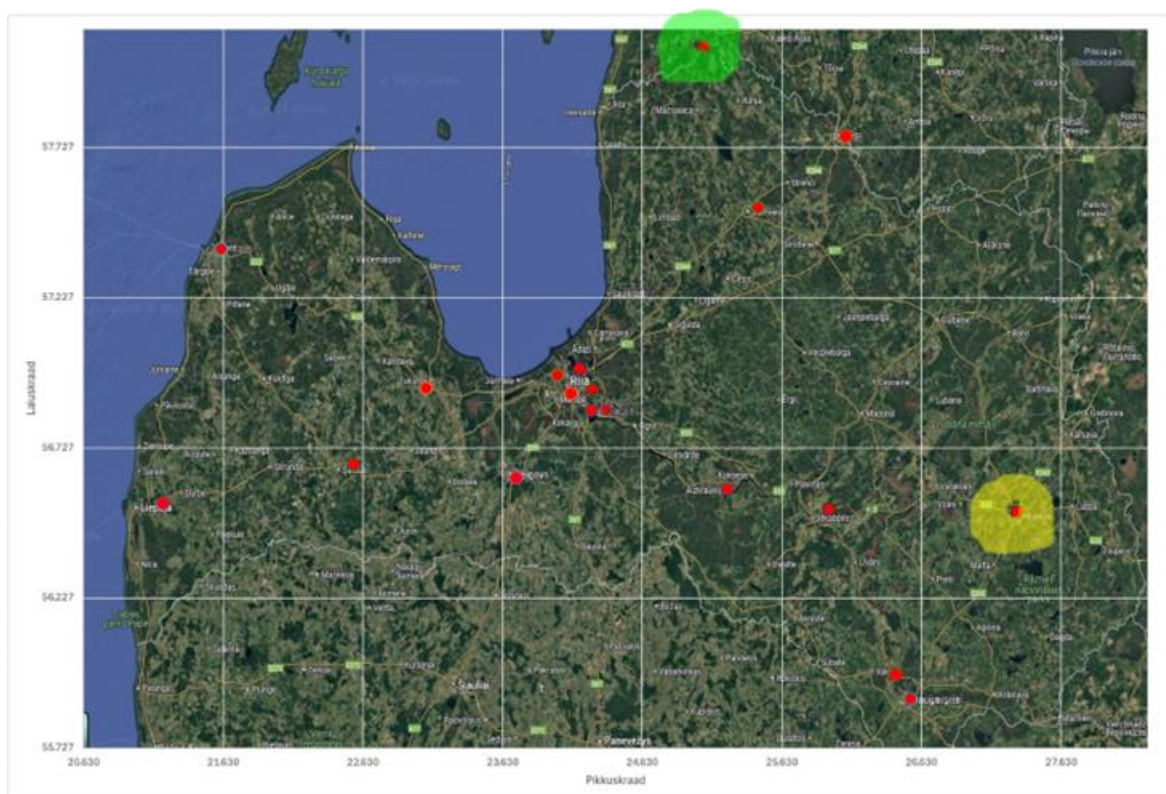
Alajaama nimetus mudelis	Pinge väärtus, kV	Pingenurga väärtus, kraadi
AIZKRAUKLE1	353.1	3.13
BISUCIEMS1	352.0131	3.32
BROCENI1	353.1323	0.83
DAUGAVPILS1	353.4032	1.02
GROBINA1	353.1	0.88
IMANTA1	351.4753	3.45
KRUSTPILS1	353.3383	2.17
LIKSNA1	353.1	0.98
REŽEKNE1	349.7899	1.69
RIGAS HES	353.1	3.5
RIGAS TEC-1A	351.7457	3.51
RIGAS TEC-2A	352.666	3.46
SALASPILS1	352.7591	3.29
TUME1	351.1578	3.17
VALMIERA1	350.7141	3.79
VENTSPILS1	353.1	1.75
VISKALI1	351.7096	1.82
LT-2 (süsteemisõlm)	353.1	0
EE-1	350.8248	3.79
EE-2	350.8248	3.79
EE-3	355.8283	3.33

Tabel 5.3 Väljavõtte 110 kV sõlmede pingete tabelist suvise minimaalse koormuse juures

Sõlme nr mudelis	Sõlme nimi mudelis	Arvutatud pinge, kV
28	DAUGAVPILS2	120.5866
29	DAUGAVPILS B	120.5839
37	GAJOKS	120.5353
39	GRIVA	120.5039
47	ILUKSTE	119.7647
121	ŠPOGI	119.3141
307	LT-7	120.6093
308	LT-8	120.6115

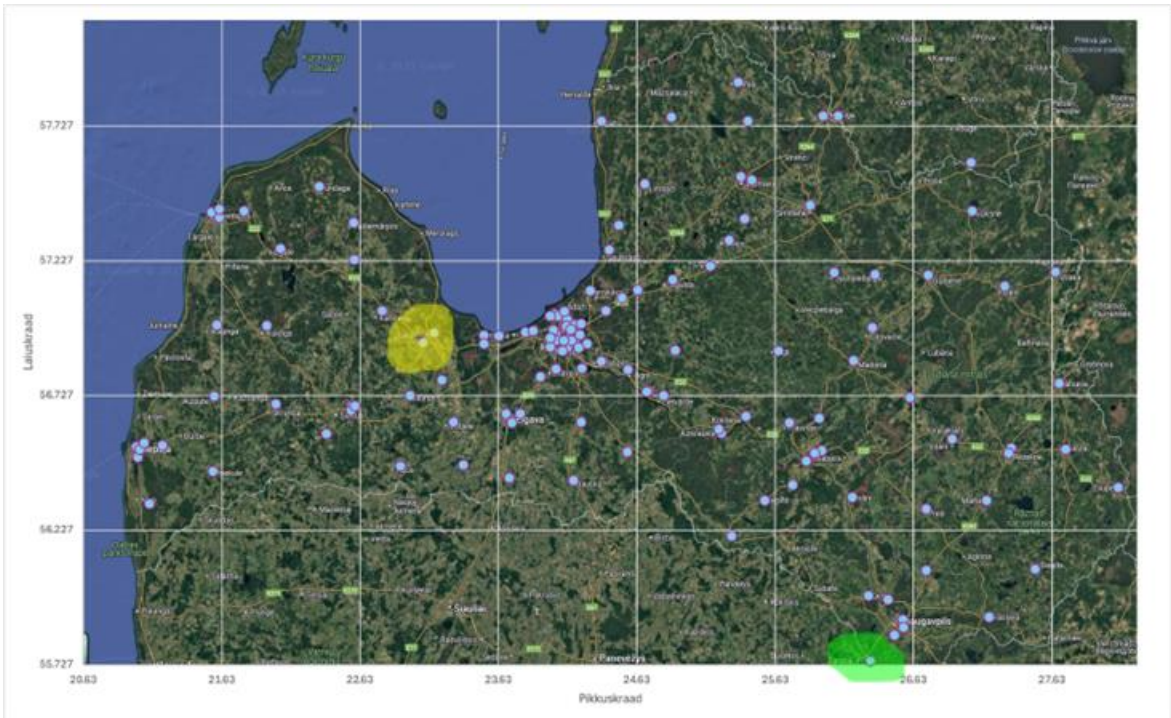
5.3 STSENAARIUM 3 - "Suvine maksimaalne koormus"

330 kV võrgus valitseb taaskord tuttav vaatepilt – EE-3 sõlmel on pinge kõrgem kui kuskil mujal võrgus, väärtusega 355.71 kV. Madalaima pinge leiab taas Režekne alajaamast, kus pinge on 349.79 kV. Need pinged on siiski vägagi sobivas piirkonnas, täpselt 1.07 pu läheduses, mis tähendab, et kaod 330 kV võrgus on võimalikult madalad. N-1 olukorras Režekne - Liksna liini lahtilülitamisel on Režekne alajaamas 330 kV lattidel pinge 0.86 pu, mis ei vasta standardsele minimaalsele piirangule 0.9 pu. Süsteemisõlme generaatori aktiivvõimsuse näit on ligilähedane eelmise stsenaariumi näidule - 1481.5 MW ehk ekspordi võimekus Leedu suunal oleks 1481.5 MW.



Joonis 5.7 330 kV sõlmede maksimaalse ja minimaalse pinge paiknemine

110 kV elektrivõrgus vaatab vastu taaskord väga sarnane vaatepilt eelmisele stsenaariumile. Kõrgeim pinge on taaskord LT-8 sõlmel Daugavpils läheduses. Pinge väärtus sõlmel on 119.29 kV. Madalaim pingeväärtus asub jällegi Tume alajaamas. Väärtuseks sel korral 107.55 kV. Antud pinged on veidi madalamad ning märgatavalt vähem ohtlikult lähedal ülemisele piirile.



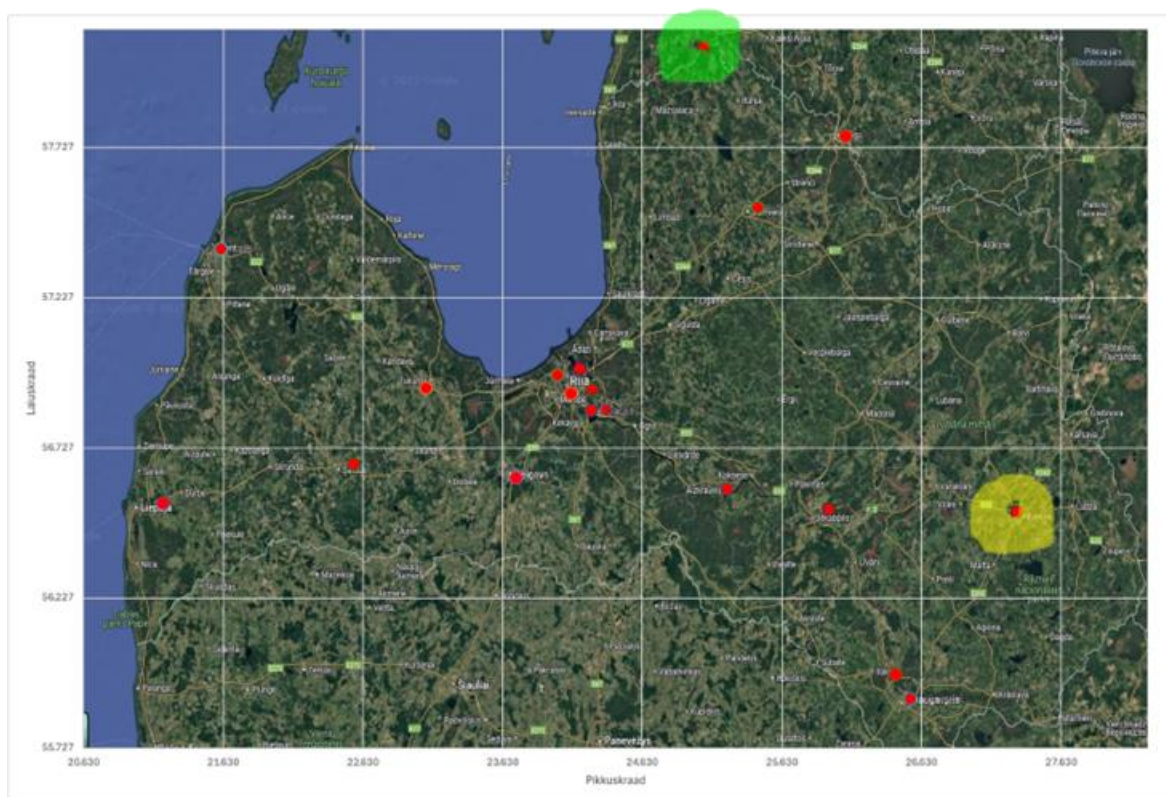
Joonis 5.8 110 kV sõlmede maksimaalse ja minimaalse pinge paiknemine

Tabel 5.4 330 kV alajaamade pinged Suvise tipukoormuse olukorras

Alajaama nimetus mudelis	Pinge väärtus, kV	Pingenurga väärtus, kraadi
AIZKRAUKLE1	353.1	3.58
BISUCIEMS1	351.8256	3.39
BROCENI1	353.0789	0.74
DAUGAVPILS1	353.3366	0.93
GROBINA1	353.1	0.72
IMANTA1	351.1848	3.5
KRUSTPILS1	353.223	2.38
LIKSNA1	353.1	0.91
REŽEKNE1	349.41	1.4
RIGAS HES	353.1	3.66
RIGAS TEC-1A	351.5206	3.59
RIGAS TEC-2A	352.5525	3.59
SALASPILS1	352.6706	3.45
TUME1	350.6306	3
VALMIERA1	350.4323	3.92
VENTSPILS1	353.0593	1.49
VISKALI1	351.5488	1.83
LT-2 (süsteemisõlm)	353.1	0
EE-1	350.5428	3.91
EE-2	350.5428	3.91
EE-3	355.7138	3.46

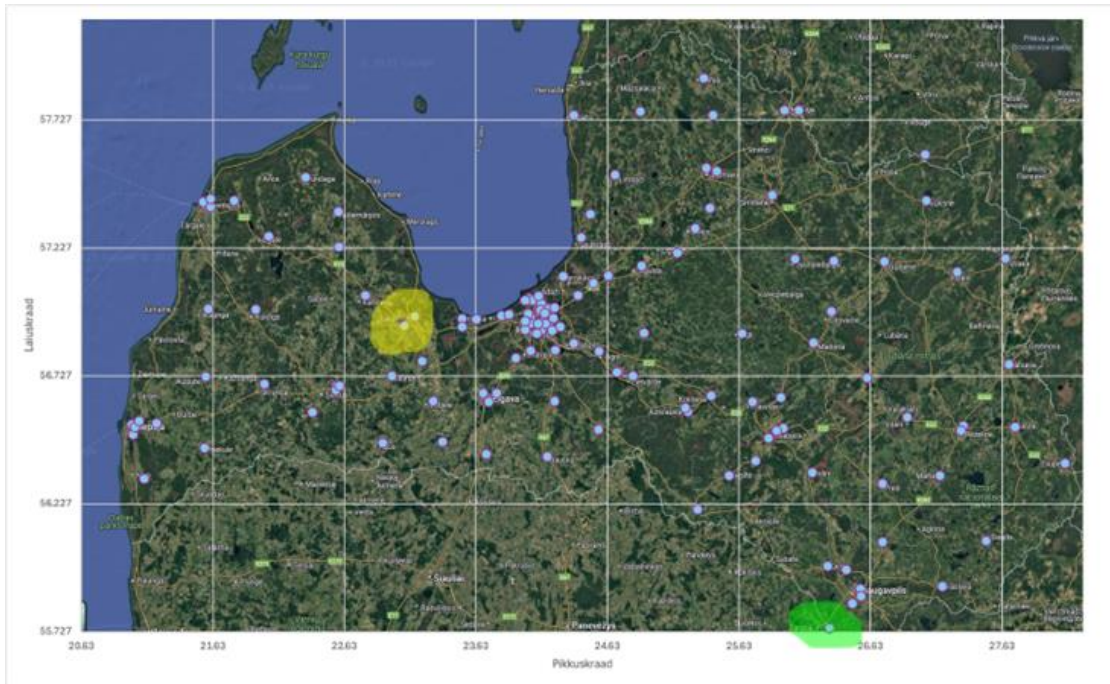
5.4 STSENAARIUM 4 - "Suvine maksimaalne rohkemate paneelidega"

330 kV võrgus avaneb sarnane vaatepilt stsenaariumiga 3. Kõrgeim pinge on taaskord EE-3 sõlmel, väärtusega 356.27 kV. Minimaalne pinge 349.89 kV taaskord Režekne sõlmel. Pinged on normaalvahemikus, mitte liialt kõrged ega madalad. N-1 olukorras Režekne - Liksna liini väljalülitamisel langeb Režekne alajaamas pinge 0.89 pu'ni, mis on peaaegu lubatud piirides, ent siiski mitte lubatud väärtus elektrisüsteemi vaates. Aktiivvõimsusvoog liigub jätkuvalt Leedust välja, seekord lausa 1938.1 MW suurusena.



Joonis 5.9 330 kV sõlmede maksimaalse ja minimaalse pinge paiknemine

110 kV võrgus on näha, et pinge on jätkuvalt kõrgeim LT-8 sõlmel ning madalaim Tume alajaamas, vastavate väärtustega 118.50 ja 109.49 kV. On näha, et madalaim pinge on peaaegu 1.0 pu, mis tähendab, et kaod on ka 110 kV võrgus pigem madalad. Ülemine pingepiir ei ole samuti liialt lähedal, et võrguhaldur midagi ette võtma peaks.



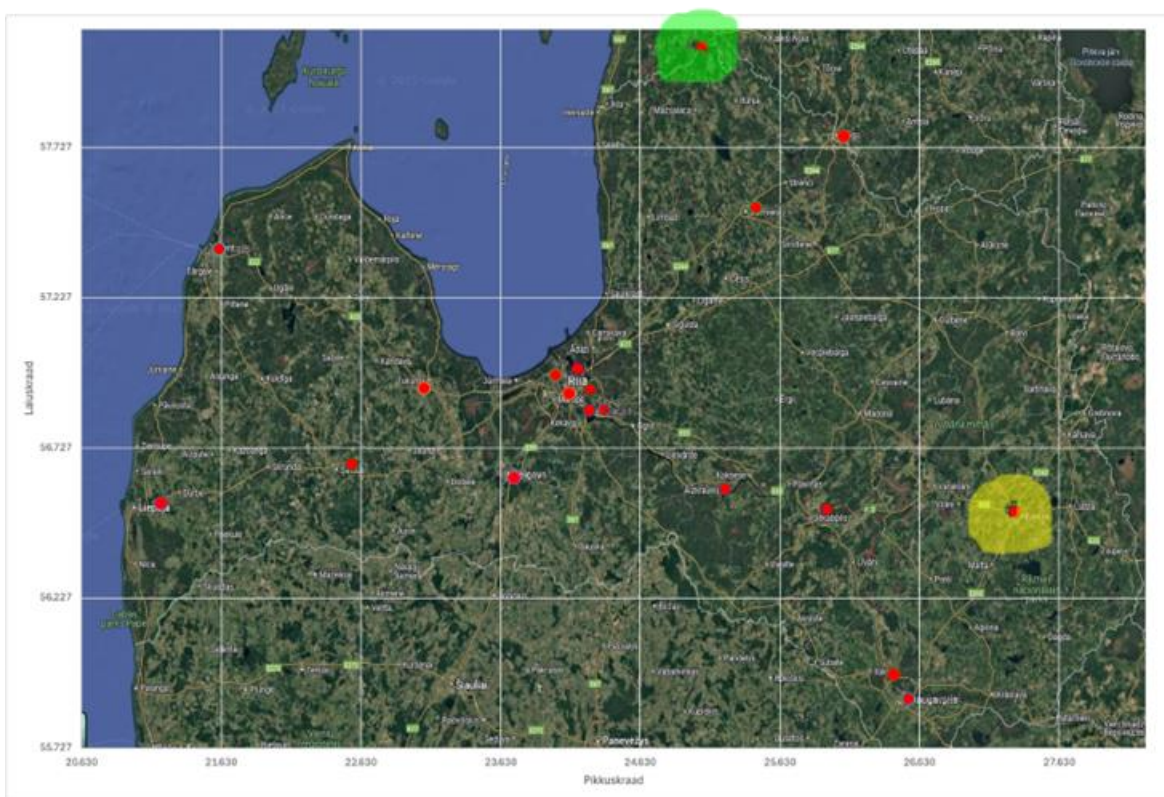
Joonis 5.10 110 kV sõlmede maksimaalse ja minimaalse pinge paiknemine

Tabel 5.5 330 kV alajaamade pinged Suvise tipukoormuse olukorras lisapaneelidega

Alajaama nimetus mudelis	Pinge väärtus, kV	Pingenurga väärtus, kraadi
AIZKRAUKLE1	353.1	1.49
BISUCIEMS1	352.6114	3.13
BROCENI1	353.1	1.94
DAUGAVPILS1	353.3427	0.79
GROBINA1	353.1	2.72
IMANTA1	352.6229	3.46
KRUSTPILS1	353.2896	1.16
LIKSNA1	353.1	0.74
REŽEKNE1	349.8912	1.53
RIGAS HES	353.1	3
RIGAS TEC-1A	353.0965	3.29
RIGAS TEC-2A	353.1	3.05
SALASPILS1	353.0065	2.78
TUME1	353.1	5.29
VALMIERA1	350.9238	2.84
VENTSPILS1	353.1	6.38
VISKALI1	352.11	1.93
LT-2 (süsteemisõlm)	353.1	0
EE-1	351.0345	2.84
EE-2	351.0345	2.84
EE-3	356.2662	2.92

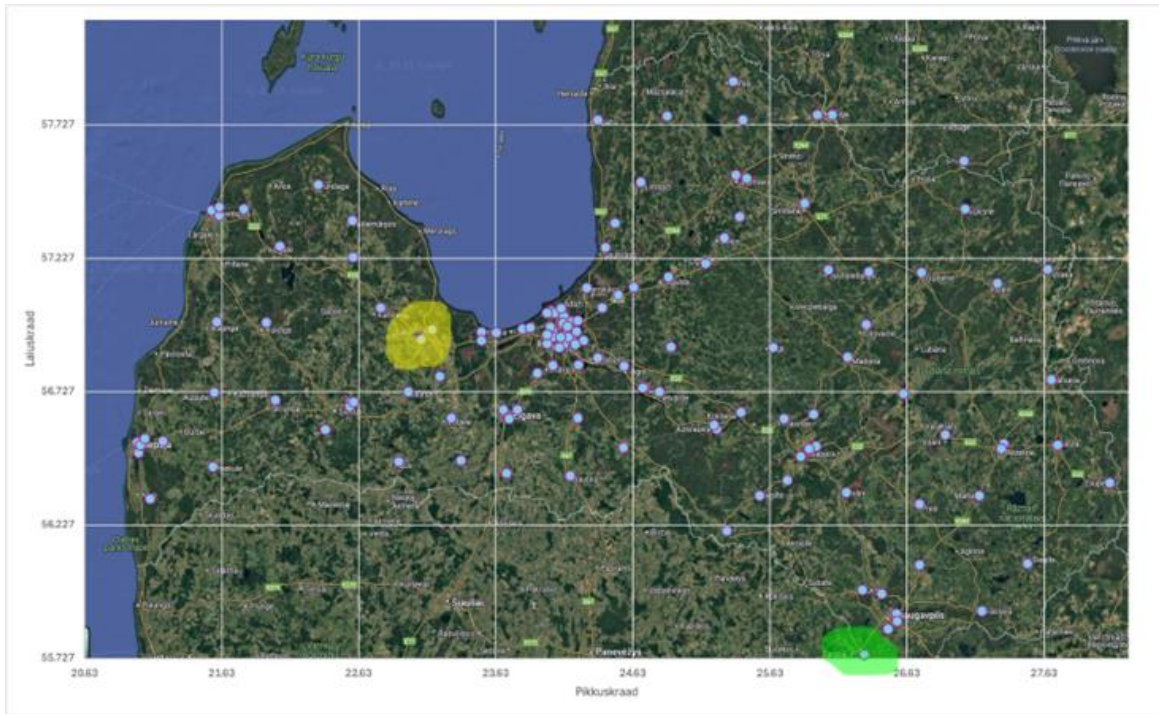
5.5 STSENAARIUM 5 - "Suvine maksimaalne rohkemate tuulikutega"

330 kV võrgus on taaskord pinged normipiires. Madalaim pinge jällegi Režekne alajaamas 349.41 kV, kõrgeim pinge EE-3 sõlmel 356.27 kV. N-1 olukorras Režekne alajaama lattidel langeb pinge 0.86 pu'ni, mis illustreerib jällegi olukorda, kus ei ole võimalik sel võrguosal tegelikkuses töötada. Ületootmismahd on 1881.5 MW, mis tähendab, et Lätil on suur ületoodang, millega saaks ära katta kogu Leedu elektritarbimise



Joonis 5.11 330 kV sõlmede maksimaalse ja minimaalse pinge paiknemine

110 kV võrgus on pinged kõige madalamad taaskord Tume alajaamas, kus pingeväärtus on 108.97 kV. Kõrgeim pinge asub jätkuvalt EE-3 sõlmel ning pinge väärtus seal on 119.20 kV, mis ei ole ülemisele pingepiirile liialt lähedal, et probleeme tekiks.



Joonis 5.12 110 kV sõlmede maksimaalse ja minimaalse pinge paiknemine

Tabel 5.6 330 kV alajaamade pinged Suvise tipukoormuse olukorras lisatuulikutega

Alajaama nimetus mudelis	Pinge väärtus, kV	Pingenurga väärtus, kraadi
AIZKRAUKLE1	353.1	1.14
BISUCIEMS1	352.4013	2.79
BROCENI1	352.7014	2.4
DAUGAVPILS1	353.3297	0.42
GROBINA1	352.5806	3.45
IMANTA1	352.3008	3.16
KRUSTPILS1	353.301	0.8
LIKSNA1	353.1	0.4
REŽEKNE1	349.4086	0.83
RIGAS HES	353.1	2.62
RIGAS TEC-1A	352.9008	2.92
RIGAS TEC-2A	353.1	2.66
SALASPILS1	352.9678	2.4
TUME1	352.5211	5.93
VALMIERA1	350.5929	2.16
VENTSPILS1	353.1	9.35
VISKALI1	351.9631	1.77
LT-2 (süsteemisõlm)	353.1	0
EE-1	350.7035	2.15
EE-2	350.7035	2.15
EE-3	356.2662	2.53

6. JÄRELDUSED

Stsenaariumite 1-5 pingetest võib järeldada, et hoolimata millise aastaajaga on tegemist, saab 330 kV elektrivõrk kenasti hakkama tavatalitluses. Kõik pinged püsivad väga selgelt lubatud piirides, sest ühelgi aastaajal tootmisüksustest puudu ei jää, kuniks ükski tootmisüksus hoolduses ei ole. Kuna maagaasi/biomassi jaamade hooldusi ajastatakse tavaliselt soojemale perioodile, siis kuniks elektrijaamadega midagi ootamatult ei juhtu, ei peaks Lätis põhivõrgu *blackout*'i pärast muretsema. Samas tuleb mainida, et iga stsenaariumi puhul oli selgelt näha, kus on pinged kõrgemad ja kus madalamad, joonistus välja veidi tasakaalust väljas olev võrk. Režekne alajaam on Läti 330 kV elektrivõrgus justkui tupik, sest sinna ühendub vaid üks 330 kV liin. Varasemalt ühendus sealt veel lisaks Liksnale ka liin Venemaale, kust küll juba aastaid elektrikaubandust korraldatud ei olnud, kuid ühendus venemaaga aitas stabiliseerida võrgusagedust ja -pingeid.

BRELList desünkroniseerimise järgselt aga on Režekne alajaam keerulises olukorras. Nimelt, uurides N-1 olukordi, tuli igas stsenaariumis sama tulemus välja. Liksna - Režekne liini ühenduse katkemisel jääb pinge Režekne 330 kV lattidel liiga madalaks, mis tähendaks, et vähemasti 330-110 kV ühendus Režekne alajaamas tuleks samuti katkestada, kuniks liinirike kõrvaldatakse. Talvise stsenaariumi puhul oli näha, et pinge langeb kannatamatult madalale (0.611 pu'ni) ning seda olukorda saaks parandada vaid uue 330 kV elektriliini rajamisega näiteks Režekne ja Krustpilsu vahele. Sellega välditaks olukorda, kus Režekne alajaama 330 kV latid peaks end täiesti lahti ühendama. Kuid kui Režeknesse ühendada juurde tootmisüksuseid, siis võib juhtuda, et Režekne suudaks tarbijate vajadusi katta eraldiseisvana ülejäänud elektrisüsteemist, seda peaaegselt just suvisel perioodil. Kuna suvisel perioodil jäid pinged alumisest piirist 0.9 vaid väheke madalamale, nt stsenaariumi 3 kohaselt oli pinge 330 kV lattidel 0.86 pu, siis võib olla mõeldav paigaldada antud alajaama kondensaatorpatarei, mis tõstaks lokaalselt pinge lubatud piiridesse. Antud mõttekäik on loogiline vaid sel juhul, kui Režekne 330 kV õlale on ühendatud ka suurtarbijaid, sest vastasel juhul ei ole mõistlik 110 kV võrgust energiat 330 kV poolele tuua. Uuritud olukordades jäi pinge 330 kV õlal sedavõrd kõrgeks vaid seepärast, et 110 kV poolelt toideti 330 kV võrku, mida praktikas autorile teadaolevalt ei tehta, mistõttu kondensaatorpatarei lisamine ei omaks ilmselt suurt sisulist väärtust. Stsenaariumis 4 oli näha kõige paremat seisutaset pingega, mil see küündis 0.89 pu'ni. Kõrgem pingetase on ilmselt põhjustatud tootmisüksuste installeeritud võimsuse suurenemisest lokaalselt selles alajaamas. Vastavalt stsenaariumile lisati igasse alajaama võrdsel hulgal lisa päikeseparkide võimsust ning need päikesepargid suudavad pingeid veidike lokaalselt stabiliseerida, kuid mitte

piisavalt. Pikas perspektiivis päästab vaid uue 330 kV elektriliini, näiteks Krustpils ja Režekne vahele, rajamine.

Mida rohkem taastuenergiaüksuseid Läti kavatseb installeerida, seda suurem on potentsiaal elektri eksportimiseks. Kuna elektrivõrk just Kurzeme ja Latgale piirkonnas on küllaltki tugev, siis Leedu suunal elektrit eksportida läbi viie ühenduse on füüsiliselt väga tehtav. Probleeme võib tekkida aga näiteks stsenaariumit 5 silmas pidades, mil Ventspilsiga ühendatakse 1 GW meretuulepark. Kuna Leedus on samuti palju tuuleparke ning neid planeeritakse ka seal veelenam ehitada, siis võib hakata rolli mängima tootmisüksuste üheaegsustegur. Ehk eriti kui näiteks tuult "püütakse" samalt merelt, siis on tootmisüksuste tootmismustrid väga sarnased ning mõlemad riigid võivad tahta eksportida elektrit samaaegselt, tekitades olukordi, kus peab hakkama tootmisüksuseid piirama, sest muidu ei ole võrgus seda elektrit kuhugi suunata ning elektrivõrk sulab üles, sest liinid ei pea lõpuks nii suurtele volutugevustele vastu.

Hajutatud päikeseelektritootmine tundub võrgu pingete hoidmise seisukohalt küllaltki arukas idee. Antud töös käsitleti kõiki koormuseid alajaamade vahel võrdsetena, mistõttu võrdses osas alajaamadele tootmisüksuste lisamine stsenaariumi 4 järgi toimis pingete hoidmiseks väga hästi. Teisalt on päikeseparkide üheaegsustegur teiste päikeseparkidega veelgi märgatavam kui tuuleparkidel, sest päike tõuseb ühes vaadeldavas piirkonnas samaaegselt, mistõttu liiga suurel määral päikeseparkide rajamine ei ole samuti loogiline, sest tundidel, mil päike paistab, toodetakse energiat ülemäära palju. Siis peab energiat kas salvestama või kuhugi eksportima, kui seda jääb üle. Läti süsteemi eripära on loomulikult see, et neil on väga võimsad hüdroelektrijaamad võrreldes oma riigi elektritarbimisega. Hüdroelektrijaamad on võimelised energiat paariks päevaks salvestama, eeldusel, et paisud täis ei ole.

110 kV elektrivõrgus on pingete kõikumised palju märgatavamad. Kõige haavatavam on elektrivõrk just väga madala tarbimiskoormuse korral, kui taastuenergia tootmisüksused siiski toodavad. Sedasi võivad pinged ületada lubatud maksimaalse piiri. Teisalt, talvisel perioodil on oht, et 110 kV liinidel ei suudeta pinget piisavalt kõrgel hoida. Eriti oludes, mil elektritootmine on raskendatud, näiteks siis kui Daugava jõgi on jäätunud ja tuult samuti ei puhu. Küll aga selliseid ilmastikust tingitud kokkusattumisi väga tihti ette ei tule, sest Daugava jõgi jäähtub viimasel aastakümnel suures mahus pigem harva [27]. Kuid siiski teatavad pingete ebastabiilsused võrgus on, eriti kui alajaam on tootmisüksustest elektriliselt kaugel nagu stsenaariumis 1 on Sarkandaugava. Seetõttu tuleb ASTi 10 aasta elektrivõrgu arenduskava kindlasti kasuks, sest plaanis on rekonstrueerida liine, välja vahetada maste tagamaks liinide töökindluse ning välja vahetada ka 110 kV trafosid pidades silmas uusi tootmisüksuseid, mis võrguga liituvad. [8]

7. KOKKUVÕTE

Töö käigus koguti avalikest allikatest sisendandmeid erinevatele elektrilistele komponentidele nagu trafod, elektriliinid ja pingereguleerimisseadmed. Kaardistati kogu Läti 330 ja 110 kV elektrivõrk 2030. aasta seisuga. Kogutud andmeid töödeldi ning need vormistati tabeliteks. Tabelid sisestati PSS/Esse, kus uuriti Läti elektrivõrgu püsitalitlust viie erineva stsenaariumi korral. Stsenaariumite eesmärgiks oli uurida Läti elektrisüsteemi talitlust, peamiselt pingeid erinevatel sõlmedel, olukordades, mil võrguga ühendatakse suures mahus taastuenergia tootmisüksuseid. Lisaks uuriti veel N-1 olukordi iga stsenaariumi puhul ning hinnati energia ekspordivõimalusi ja võimekust Leedu suunal.

Saadud tulemused näitasid, et püsitalitlusrežiimis püsisid kõigis stsenaariumites nii 330 kV kui 110 kV võrgus pinged lubatud piirides. Tarbimise tippude korral (talv ja suvi) hoidis süsteemisõlm pinget eelduspäraselt vahemiku ülemise piiri lähedal. Madalaim pingetase esines Ida-Lätis Režekne alajaamas – ent ka see jäi tavatingimustes normipiireesse. Väga madala koormuse korral (suvine minimaalne) kerkis mõnes 110 kV alajaamas pinge suhteliselt kõrgele, lähenedes maksimaalsele lubatud piirile, kuid jäädes siiski piiridesse. Kõikides suvistes stsenaariumites oli näha ka suurt ületoodangu mahtu: taastuenergia ja hüdroelektri toodang ületas oluliselt tarbimist, mistõttu tuli ülejääk suunata ekspordile (mudelil Leedu suunda). Seega suvisel perioodil oleks Lätil võimekus märkimisväärset elektrenergia ülejääki naaberriikidesse edastada.

Analüüs tõi esile ühe peamise kitsaskoha. Kõigis stsenaariumides ilmnes, et Režekne 330 kV sõlm Ida-Lätis on väga tundlik: ainsa seda toitva 330 kV liini väljalülitamisel (N-1 olukord) langes Režekne 330 kV lattide pingetase alla lubatud miinimumi. See tähendab, et praegune võrgustruktuur ei taga piisavat töökindlust erakorralise rikke puhul. Samas tõid taastuenergia suurenemisega stsenaariumid mõningat leevendust – näiteks kui mudelisse lisati olulisel hulgal päikeseparke üle riigi (stsenaarium 4), tõusis Režekne alajaama minimaalne pinge rikkeolukorras varasemaga võrreldes veidi kõrgemale (peaaegu lubatud piiridesse). See näitab, et lokaalne tootmine võib aidata hoida pinget stabiilsemana, kuigi üksi sellest ei piisa antud probleemi lahendamiseks. Suuremahulise meretuulepargi lisamine (stsenaarium 5) ei põhjustanud samuti normaalrežiimis pingete ületamisi ega muid püsitalitluse häireid – Läti lääneosas on 330 kV võrk piisavalt tugev, et 1 GW meretuulepargi võimsusega toime tulla. Küll aga tuleb arvestada naabervõrkude sarnaste arengutega: juhul kui samaaegselt tekib suur ületootmine nii Lätis kui Leedus (nt tugev tuul meretuuleparkides), võib piiriülese

ülekandevõimsuse puudumine põhjustada tootmise ajutist piiramist. See aspekt viitab vajadusele parema koordineerimise ja võimalike täiendavate ühenduste järele tulevikus.

Töö käigus pakuti välja soovitusi tuvastatud kitsaskohtade leevendamiseks. Režekne piirkonna varustuskindluse parandamiseks on strateegiliselt oluline rajada täiendav 330 kV liiniühendus (näiteks Režekne–Krustpils suunal), mis looks Ida-Lätis ringsüsteemi ja väldiks üksiktoitel töötamise riske. Lühiajaliselt võiks kaaluda Režekne alajaama varustamist reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks kondensaatorpatareiga, et pingelangust rikkehetkedel leevendada. Samuti on otstarbekas soodustada uute tootmisüksuste rajamist Läti idaossa, mis suurendaks kohaliku tootmise osakaalu ja parandaks pingetasemeid selles piirkonnas. Üldiselt kinnitavad analüüsi tulemused ka AST 10-aastase arenduskava vajalikkust – kavandatavad põhivõrgu rekonstrueerimised, liinitugevdused ja alajaamade uuendused on olulised, et toime tulla nii kasvava koormuse kui tootmisega.

Kokkuvõttes on lõputöö autor tulemustega rahul, sest need näitavad, et Läti 330/110 kV elektrivõrk on tavatingimustes suuteline integreerima märkimisväärset mahus uusi taastuenergia allikaid, säilitades seejuures nõutud pingetasemed. Siiski tasub tulemustesse suhtuda kriitiliselt, sest töö tegemisel on tehtud niimõnigi lihtsustus, nagu näiteks koormuste võrdne jagamine alajaamade vahel, energia eksport vaid Leedu suunal, maakaablitega mitte arvestamine jms. Analüüs viitas parendusvajadusele Ida-Läti võrgustruktuuris, et tagada töökindlus ka rikete korral. Töö laiem panus seisneb selles, et pakuti välja konkreetsed lahendusvariandid ja rõhutati võrgutugevdamise tähtsust rohepöörde ning BRELL-süsteemist lahkumise taustal. Tulemused ja järeldused on väärtuslikud sisendid edaspidiseks võrgu planeerimiseks – need aitavad suunata investeeringuid sinna, kus need on kõige kriitilisemad, ning loovad eelduse, et Läti elektrisüsteem suudab tulevikus kasvava taastuenergia tootmise tingimustes stabiilselt ja tõrgeteta toimida.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Directorate-General for Energy. "Renewable Energy Targets". Euroopa Komisjon. Kasutatud 04.05.2025. [Online]. Saadaval: https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-targets_en?prefLang=et
- [2] M. Ots, A. Vahtla. "Estonia, Latvia, Lithuania disconnected from Russian power grid," *Eesti Rahvusringhääling*, Veeb., 08, 2025. [Online]. Saadaval: <https://news.err.ee/1609599566/estonia-latvia-lithuania-disconnected-from-russian-power-grid>.
- [3] J. Guillermo Sánchez León. "Spain-Portugal blackouts: what actually happened, and what can Iberia and Europe learn from it?", *The Conversation*, Mai, 02, 2025. [Online]. Saadaval: <https://theconversation.com/spain-portugal-blackouts-what-actually-happened-and-what-can-iberia-and-europe-learn-from-it-255666>.
- [4] M. Paluteder, "Läti elektrisüsteemi ekvivalentse püsitalitluse mudeli koostamine ja analüüs PSS/E tarkvaras", [Bakalaureusetöö], Inseneriteaduskond, Taltech, Tallinn, Eesti 2025. [Online]. Loetud aadressil: <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/9df9d7ae-f7dc-464e-a8c7-d8d0c23edc52>. Kasutatud 03.05.2025.
- [5] Openinframap. Kasutatud 14.05.2025. [Online]. Saadaval: <https://openinframap.org/#6.87/56.909/24.267>
- [6] "Power plant profile: Kurzeme Offshore Wind Project, Latvia," *PowerTechnology*, Nov 17, 2025. [Online]. Saadaval: <https://www.power-technology.com/data-insights/power-plant-profile-kurzeme-offshore-wind-project-latvia/?cf-view>
- [7] ENTSO-E Transparency Platform. Kasutatud 10.05. [Online]. Saadaval: <https://transparency.entsoe.eu/>
- [8] Augstprieguma Tikls AS, "Power transmission system development plan 2025-2034," 2024. [Online]. Saadaval: https://www.ast.lv/sites/default/files/editor/10_GAP_2025_2034_APSTIPRINAT_S_en_gb.pdf
- [9] European Comission, "Latvia's national energy and climate plan 2021-2030," 2019. [Online]. Saadaval: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/lat213963.pdf>
- [10] Latvenergo. Kasutatud 08.05.2025. [Online]. Saadaval: <https://latvenergo.lv/en/ves-attistiba>
- [11] "Wind Power Growth Markets: Nordex Receives Major Orders From Poland And Latvia," *Renewable Energy Industry*, Sept 09, 2024. [Online]. Saadaval: <https://www.renewable-energy-industry.com/countries/article-6740-wind-power-growth-markets-nordex-receives-major-orders-from-poland-and-latvia>
- [12] "Vestas enters Latvian market with 59 MW wind project," *Vestas*, Mai 03, 2021. [Online]. Saadaval: <https://www.vestas.com/en/media/company-news/2021/vestas-enters-latvian-market-with-59-mw-wind-project-c3338792>
- [13] "Solar generation capacity in Latvia is 500 MW," *Uzlādēts*, Juuli 23, 2024. [Online]. Saadaval: <https://uzladets.lv/saules-generacijas-jauda-latvija-ir-500-mw/>

- [14] M. Markosyan, "Sunly starts work on 225 MW of solar projects in Latvia," *Renewables Now*, Nov 1, 2024. [Online]. Saadaval: <https://renewablesnow.com/news/sunly-starts-work-on-225-mw-of-solar-projects-in-latvia-873127/>.
- [15] "Targale Solar Park: 148 MW solar energy in Latvia's Ventspils region," *State of Green*, Aprill 28, 2025. [Online]. Saadaval: <https://stateofgreen.com/en/solutions/targale-solar-park-148-mw-solar-energy-in-latvias-ventspils-region/>
- [16] A. Farris, C. Helston, "Run of River Power," *Energy BC*, 2017. [Online]. Saadaval: <https://www.energybc.ca/runofriver.html>.
- [17] Augstprieguma Tikls AS, "Transmission network and substations". Kasutatud 04.05.2025. Saadaval: <https://www.ast.lv/lv/transmission-network-info/parvades-tikls-un-apaksstacijas>
- [18] Google Maps. Kasutatud 10.05.2025. [Online]. <https://www.google.com/maps>
- [19] Augstprieguma Tikls AS, "Application for the Initial Environmental Impact Assessment of the Intended Action "The Construction of the 330 kV Electricity Transmission Line Ventspils (LV) – Brocēni (LV) – Varduva/Telšiai (LT) on the Territory of Latvia", Sep 02, 2024. [Online]. Saadaval: https://www.ast.lv/sites/default/files/editor/Information_PowerLine_Ventspils-Broceni_Varduva.pdf
- [20] Midal Cables, "Conductor Data Sheet: Aluminum Conductors Steel Reinforced". Kasutatud 04.03.2025. [Online]. Saadaval: <https://www.midalcable.com/storage/products/acsr/acsr-metric.PDF>
- [21] Augstprieguma Tikls AS, "Synchronous condensers". Kasutatud 30.04.2025. [Online]. Saadaval: <https://www.ast.lv/en/projects/synchronous-condensers>
- [22] Augstprieguma Tikls AS, "Power System State". Kasutatud 30.04.2025. [Online]. Saadaval: <https://www.ast.lv/en/content/power-system-state>
- [23] KPMG Baltics SIA, "Study on electricity consumption trends in the Baltics and Nordics," 2024. [Online]. Saadaval: https://www.ast.lv/sites/default/files/editor/Consumption_forecast_Final_Executive_Summary.pdf#:~:text=6,2
- [24] ENTSO-E, "ENTSO-E Overview of transmission tariffs in Europe: Synthesis 2011," 2011. [Online]. Saadaval: https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/pre2015/Market/Transmission_Tariffs/TariffSynthesis_2011_FINAL.PDF
- [25] M. Abel, "Aktiivenergia kaod Eesti elektrisüsteemis", [Magistritöö], Inseneriteaduskond, Taltech, Tallinn, Eesti 2015. [Online]. Loetud aadressil: <https://digikogu.taltech.ee/et/Download/3d88afac-2f1f-4d98-978c-f27e79c7e54e> Kasutatud 03.05.2025._
- [26] ELWIND. Kasutatud 01.05.2025. [Online]. Saadaval: <https://elwindoffshore.eu/elwind/>
- [27] I. Latkovska, E. Apsīte, D. Elferts "Long-term changes of the ice regime of rivers in Latvia," *Hydrol. Res.*, vol 47, no. 4, pp. 782–798. Aug, 1, 2016, doi: <https://doi.org/10.2166/nh.2016.012>. [Online]. Saadaval: <https://iwaponline.com/hr/article/47/4/782/991/Long-term-changes-of-the-ice-regime-of-rivers-in>.