

Tootvate tarbijate ja tarbimise juhtimise mõjuanalüüs aastani 2040

Uuring

Uuringu koostasid: Arko Kesküla, Tiit Sepp
Kontaktisik: Tiit Sepp, tiit.sepp@stacc.ee, tel +372 55 16 983

STACC OÜ
Narva mnt 20, 51009 Tartu

Uuringu tellija: Arenguseire Keskus
Kontaktisik: Märt Masso, mart.mass@riigikogu.ee

Arenguseire Keskus
Lossi plats 1a, 15165 Tallinn

Uuringus sisalduva teabe kasutamisel palume viidata:
Kesküla, A., Sepp, T. (2024). Tootvate tarbijate ja tarbimise juhtimise mõjuanalüüs aastani 2040. Tallinn:
Arenguseire Keskus.

Arenguseire Keskuse uuringud
ISSN 2733-337X

Arenguseire Keskuse uurimissuuna „Aktiivsed tarbijad tuleviku energiasüsteemis“ veebileht:
<https://arenguseire.ee/uurimissuunad/aktiivsed-tarbijad-tuleviku-energiasteemis/>

Arenguseire Keskus on ühiskonna ja majanduse pikaajalisi arenguid analüüsiv mõttekoda Riigikogu juures. Meie missioon on aidata kaasa varase valmisoleku loomisele poliitikakujunduses.

Aprill 2024

Sisukord

Lühikokkuvõte	2
1. Sissejuhatus	3
2. Mõisted ja definitsioonid	4
3. Kasutatavad andmed	4
4. Eesti energiaturg täna	4
5. Eesti elektritootjad	6
6. NPS hinna, mFRR, tarbimise ja päikeseenergia seosed	9
6.1. Korrelatsioonanalüüs	9
6.2. Dünaamika	10
7. Tootvad tarbijad täna	13
7.1. Tootvate tarbijate mõju elektrivõrgule	16
7.2. Tootvate tarbijate mõju elektri sagedusturule	18
8. Aktiivsed tarbijad täna	21
8.1 Aktiivsed tarbijate mõju elektriturule	22
9. Prognoosid aastaks 2040	23
10. Tarbimistippude silumine akude ja päikeseenergiaga	25
10.1 Tootvad tarbijad: tarbimise juhtimine	28
10.2 Aktiivsed tarbijad: tarbimise juhtimine	32
11. Aku hinna mõju	34
12. TT-de energia tootmise maakondlik profiil Eestis	36
Kokkuvõte	39
L.1 Talvekuude tarbimise ja PV tootmise dünaamika	42
L.2 Kevade ja sügiskuude tarbimise ja PV tootmise dünaamika	43
L.3 Aku juhtimise simulatsiooni mudel	43
L.4 Aku hinna mõju ja võrgutasud	45

Lühikokkuvõte

Eesti energiaturg on viimastel aastatel oluliselt muutunud, eriti tänu taastuvenergiaallikate, eelkõige päikeseenergia, kiirele kasvule. Tootvate tarbijate arv on suurenenud, toetades energia hajutatuse suurendamist ja jätkusuutlikkuse poole liikumist. Aastal 2022 registreeriti Eestis 8922 tootvat tarbijat, kes tootsid võrku kokku 60,93 GWh elektrienergiat. Hoolimata nende kasvavast arvust ja panusest päikeseenergia sektorisse, on nende mõju üldisele elektriturule endiselt suhteliselt piiratud.

Aktiivsete tarbijate arv näitab hinnatundlikkust, kuid nende võimekus elektritarbimist ajaliselt nihutada on piiratud. Nende tarbimine moodustab vaid väikese osa kogutarbimisest. See viitab vajadusele täiustada juhtimisvahendeid ja tehnoloogilisi lahendusi, mis võimaldaksid efektiivsemat energiatarbimise juhtimist.

Prognooside kohaselt võib aastaks 2040 tootvate tarbijate arv oluliselt kasvada, sõltuvalt turutingimustest ja tehnoloogilisest arengust. Tootvate tarbijate suurenev arv mõjutab oluliselt energiatootmise ja tarbimise mustreid ning suurendab energiaressursside hajutatust, mis on oluline jätkusuutlikuma energiasüsteemi poole liikumisel.

Samal ajal on tarbimistippude silumine muutunud üha olulisemaks, kuna tarbimistippude maht on ajas suurenenud. Päikeseenergia tootmise suutlikkus katta tarbimistippe on piiratud, eriti vähese päikesevalgusega perioodidel. Efektiivne silumine nõuab akutehnoloogia ja teiste energiasalvestuslahenduste rakendamist, mis võimaldaks energia nõudlust ja pakkumist paremini tasakaalustada.

Aku hind on kriitiline tegur, mis mõjutab investeeringu tasuvust ja akutehnoloogia kasutust. Madalamad akusüsteemide hinnad suurendavad aktiivsete ja tootvate tarbijate võimet juhtida oma tarbimist, mis omakorda suurendab nende panust süsteemi stabiilsusesse.

1. Sissejuhatus

Uuring keskendub aktiivsete ja tootvate tarbijate mõjule elektri tootmisele ja tarbimisele. Tulevikku vaatavad analüüsid peavad võimalikuks, et Eesti elektrienergia süsteemis võib oluline osa seni passiivsetest tarbijatest muutuda tulevikus aktiivseteks turuosalisteks, mille tulemusena on elektrienergia süsteemis üha rohkem ja hajutatult majapidamisi, kes toodavad võrku energiat ja juhivad oma energianõudlust.

Uurimisküsimused:

1. Mis on tootva tarbimise mustrid ja profiil täna ning kui suur osa majapidamistest võivad olla tootvad tarbijad aastal 2040 erinevate eelduste korral? Kui tundlik on tootvate tarbijate arv erinevatele kriitilistele mõjuteguritele?
2. Kui palju elektrienergiat saavad tootvad tarbijad toota aastal 2040 erinevate eelduste korral? Kui tundlik on energia tootmine erinevatele kriitilistele mõjuteguritele?
3. Kui palju elektrienergiat saavad aktiivsed tarbijad juhtida aastal 2040 erinevate eelduste korral? Kui suure osakaalu võib see moodustada kogu elektrienergia nõudlusest? Kui tundlik on aktiivsete tarbijate elektrienergia nõudluse juhtimise maht erinevatele kriitilistele mõjuteguritele?
4. Milline on tootva tarbimise ja aktiivse tarbimise võimalik mõju elektrienergia süsteemi stabiilsusele – energia pakkumise ja nõudluse bilansile? Millest sõltuvalt tootev ja aktiivne tarbimine suurendab või vähendab bilansi riski ja millises ulatuses?
5. Kui palju peaks tootvatel tarbijatel ja aktiivsetel tarbijatel olema juhitavat tarbimise võimsust ja salvestusvõimsust, et siluda tarbimise tippide ja muutuvate tootmisvõimsuste pakkumise põhjasid?
6. Milline võib olla tootva tarbimise ja aktiivse tarbimise mõju elektrienergia hinnale? Kuidas see võiks mõjutada hinna stabiilsust, sh vähendada hinna tippide ja kõikumist ning kuidas see võiks mõjutada hinna keskmist? Kas ja kuidas võib see muutuda üle aastate?

2. Mõisted ja definitsioonid

Tootvad tarbijad (TT) - elektritarbijad, kes omavad tarbimispunktis ka tootmisvõimekust, kuni 25kWh.

Aktiivsed tarbijad (AT) - elektritarbijad, kes juhivad on energianõudlust sõltuvalt elektri hinnast.

Positiivne energiabilanss - olukord, kus elektrienergia süsteemis on elektrit liiga palju. Tasakaalu saavutamiseks tuleb tootmist vähendada või tarbimist suurendada.

Negatiivne energiabilanss - olukord, kus elektrienergia süsteemis on elektrit liiga vähe. Tasakaalu saavutamiseks tuleb tootmist suurendada või tarbimist vähendada.

Tarbimistipp - periood, mil elektrienergia nõudlus ületab tavapärasest tarbimistaset, põhjustades energia tootmise ja jaotamise süsteemis suurenenud koormuse.

PV- päikeseenergia tootmine

3. Kasutatavad andmed

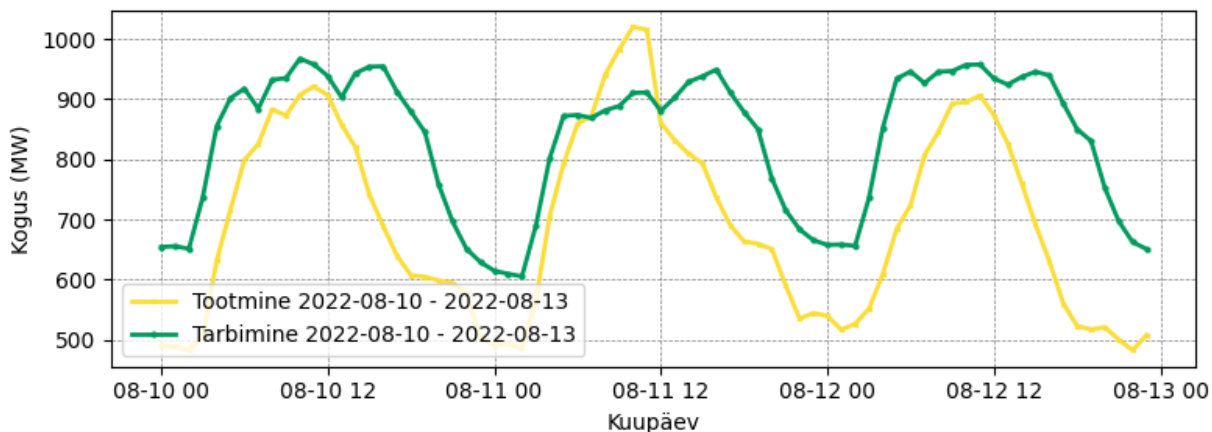
Uuringu aluseks on neli andmeallikat, mis annavad ülevaate Eesti elektrisüsteemi toimimisest.

1. [Eleringi API](#) (/api/nps/price, /api/system, /api/balance), mis võimaldab reaajas jälgida elektri tootmis-, tarbimis- ja hinnainfot.
2. Eleringi avaldatud andmefail „[võrguga ühendatud tootmismoodulite andmed 2023_0.xlsx](#)“, mis sisaldab teavet tootmisüksuste võimsuse ja liitumisaegade kohta.
3. Statistikaameti päeva- ja tunnipõhised elektri tootmis- ja tarbimisandmed, mille kaudu saab ülevaate energiabilanssi üldisele toimimisele ja tarbijagruppide mõjust elektriturule.
4. [Baltic transparency töölaud](#), mis avaldab teavet sagedusturu hindade ja mahtude kohta.

4. Eesti energiaturg täna

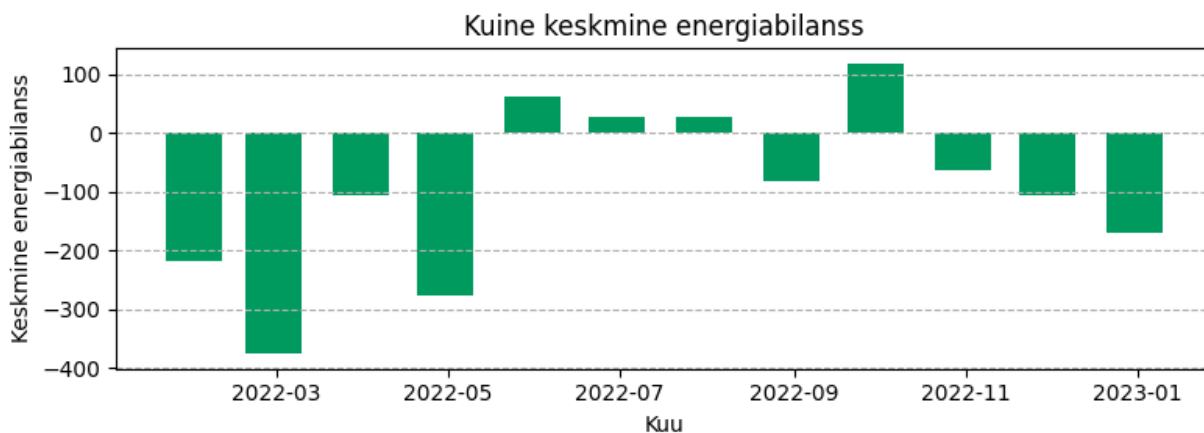
Analüüsisime Eleringi API kaudu kogutud andmeid aastatest 2021 ja 2022, et mõista Eesti elektri tootmise ja tarbimise tendentse. Uurisime, kui palju elektrienergiat toodeti ja tarbiti ning tuvastasime perioodid, mil energiabilanss oli kas positiivne või negatiivne. Tootmise ja tarbimise kõikumiste analüüsimisel saime selge pildi sellest, millal elektrisüsteemi ressursid olid piisavad nõudluse katmiseks ja millal esinesid puudujäägid.

Joonisel 1 on kujutatud kolme augustipäeva Eesti tootmis- ja tarbimiskõverat, kus tarbimine on valdavalt suurem kui tootmine. Päevad on juhuslikult valitud näited tüüpilisest suvisest tarbimis- ja tootmismustritest.



Joonis 1. Eestis toodetud ja tarbitud elekter 2022. aasta kolmel suvepäeval.

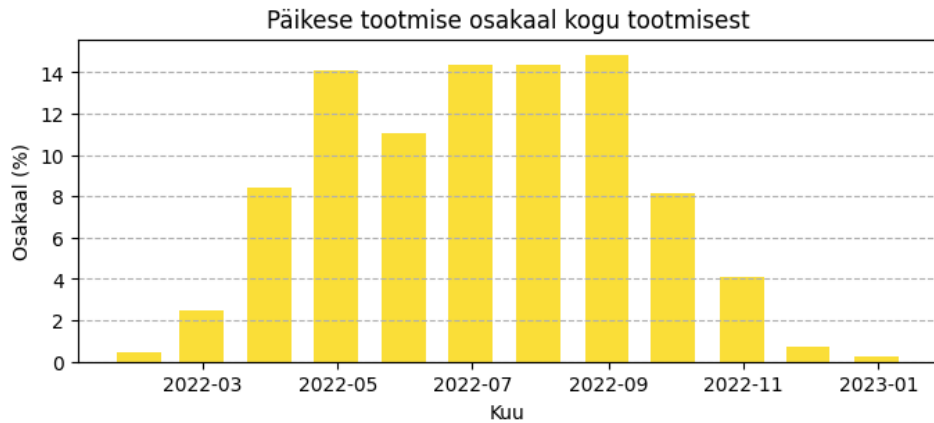
Jooniselt 2 näeme, et aasta alguses ja lõpus oli negatiivne energiabilanss, mis tähendab, et tarbimine ületas märkimisväärselt tootmist. Seevastu juuni, juuli, august ja oktoober olid kuud, kus energiabilanss oli positiivne, näidates, et tootmine ületas tarbimist. Selline muster viitab selgelt hooajaliste erinevustele tarbimises ja tootmises, eriti seost päikeseenergia tootmisega.



Joonis 2. Eesti keskmine energiabilanss aastal 2022.

Päikesepaneelide olulisust Eesti elektritootmisportfellis kinnitavad andmed, mis näitavad nende panuse suurenemist märtsist septembrini (Joonis 3) – ajal, mil päikesevalguse hulk on suurim. See tõstab esile taastuvenergia, eriti päikeseenergia, kasvavat rolli Eesti energiamaajanduses. Siiski, väljaspool neid kuid päikeseenergia panus järsult langeb, jõudes peaaegu nullini detsembris ja jaanuaris. Seda erisust ei ole võimalik stabiliseerida ka salvestustehnoloogiatega, sest hooajaülene salvestustehnoloogia rakendamine on kulukas ja pikendab tasuvusaega kordades. Samuti on selleks vaja kasutada tehnoloogiad, mis täna pole väiketarbijatele kättesaadavad. Ülevaate pikaajaliste energiasalvestiste kasutusvõimalustest võib leida Jacqueline et al. 2020¹.

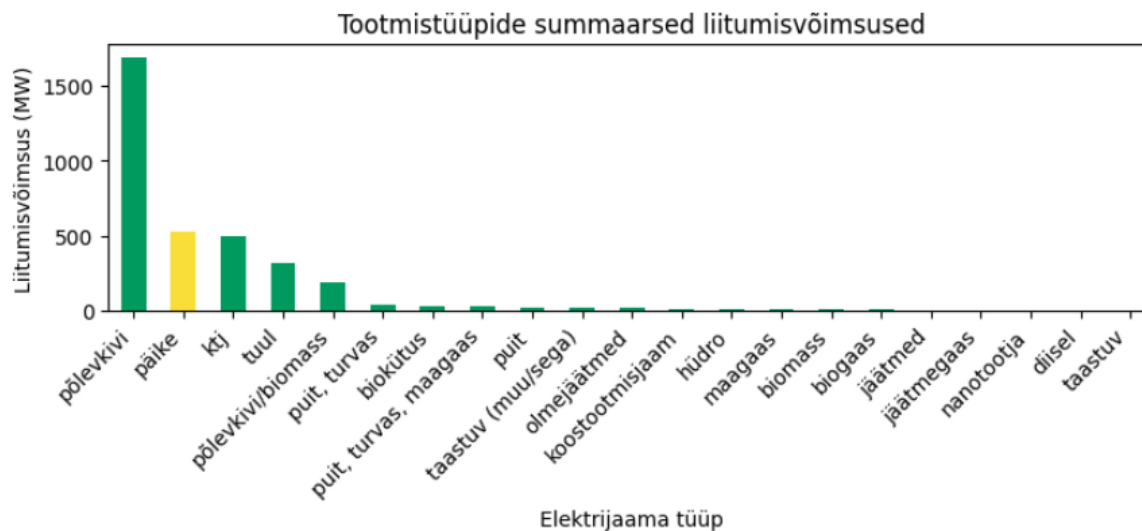
¹ Jacqueline A. Dowling, Katherine Z. Rinaldi, Tyler H. Ruggles, Steven J. Davis, Mengyao Yuan, Fan Tong, Nathan S. Lewis, Ken Caldeira; Role of Long-Duration Energy Storage in Variable Renewable Electricity



Joonis 3. Päikesepaneelide poolt toodetud elektri osatähtsus aastal 2022.

5. Eesti elektritootjad

Eesti elektritootmise maastikul on viimastel aastatel aset leidnud olulised muutused, eriti taastuenergia sektoris, kus päikeseenergia kasutuselevõtt on olnud silmapaistvalt kiire. Eleringi avaldatud andmete analüüs näitab, et Eesti energiatootjate spekter on lai, ulatudes suurtest põlevkivi baasil toimivatest energiatootjatest kuni väiksemate, alla 0.8 kW tootmisvõimsusega nanootjateni. Selles kontekstis säilitab põlevkivienergia küll oma positsiooni Eesti peamise energiaallikana (Joonis 4), kuid päikeseenergia kasvav panus energiatootmisse on märkimisväärne. Samas tuleb ka rõhutada, et liitumisvõimsus ei näita tootmistüübi panust energiatootmisse, sest põlevkivijaamad ja koostootmisjaamad kasutavad oma liitumist energia võrku andmiseks keskmiselt ~80% ulatuses, tuul ~35% ulatuses ja päike ~11% ulatuses (kasutustegur). Näiteks, päikese liitumisvõimsus on teisel kohal, aga energiatoodang on 4-ndal kohal.

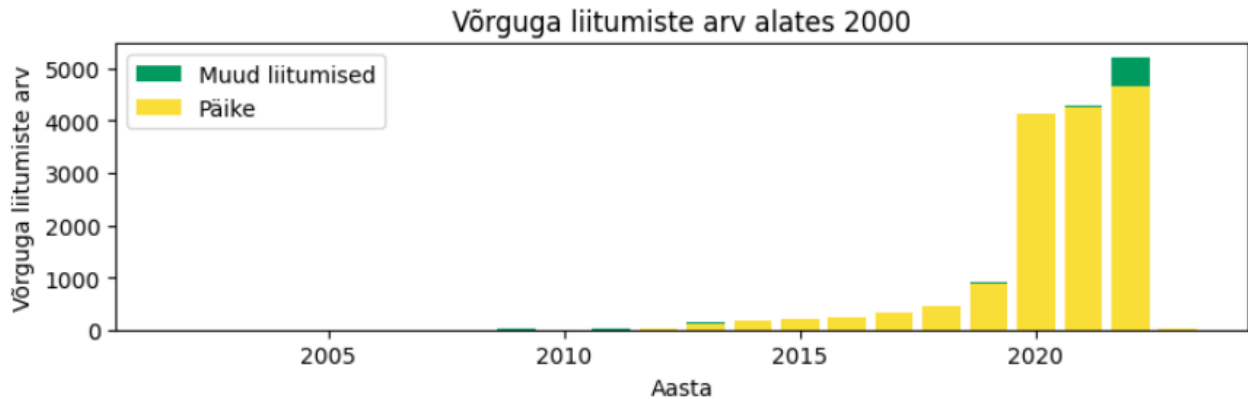


Joonis 4. Eesti tootmisvõimsuste tüüpide summaarsed liitumisvõimsused 2022 aasta seisuga.

Analüüsid andmeid võrguga liitunud jaamade arvu ja tootmisvõimsuse osas, on ilmne, et päikeseenergia osakaal on jõudsalt kasvanud (Tabel 1 ja Joonis 5). Aastatel 2011 kuni 2022 on liitumiste arv kasvanud märkimisväärselt, alates vaid ühest liitumisest aastal 2011 kuni 4659 uue liitumiseni aastal 2022. See kasvutrend näitab selgelt päikeseenergia populaarsuse ja kättesaadavuse suurenemist Eesti energiamajanduses (Joonis 6).

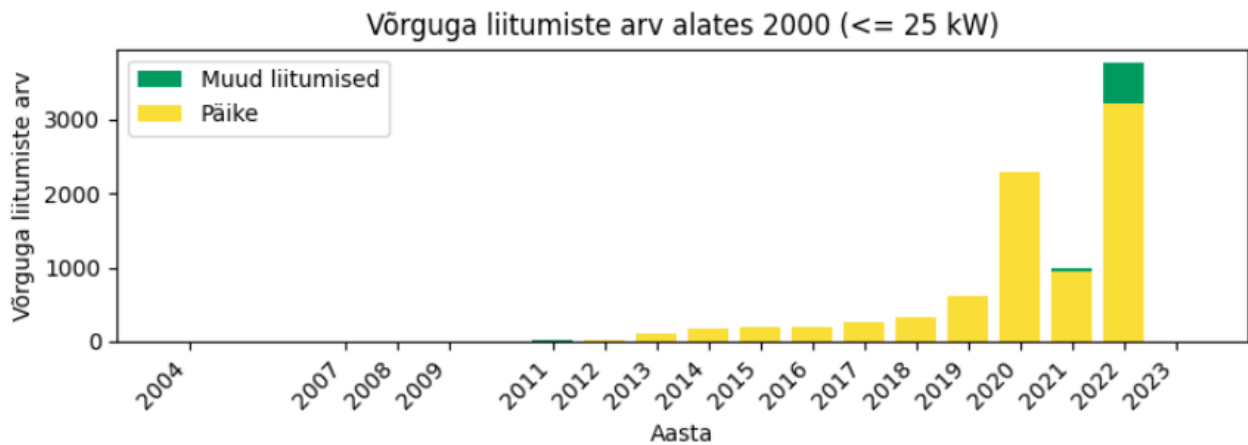
Tabel 1. Eesti elektrijaamade arv 2022 aasta seisuga.

Elektrijaama tüüp	Arv	Osakaal (%)
Päike	15424	95.3
Nanotootja	596	3.7
Tuul	54	0.3
Hüdro	43	0.3
Põlevkivi	15	0.1
Kõik muu	49	0.3



Joonis 5. Elektrivõrguga liitunud elektritootjad alates 2000.

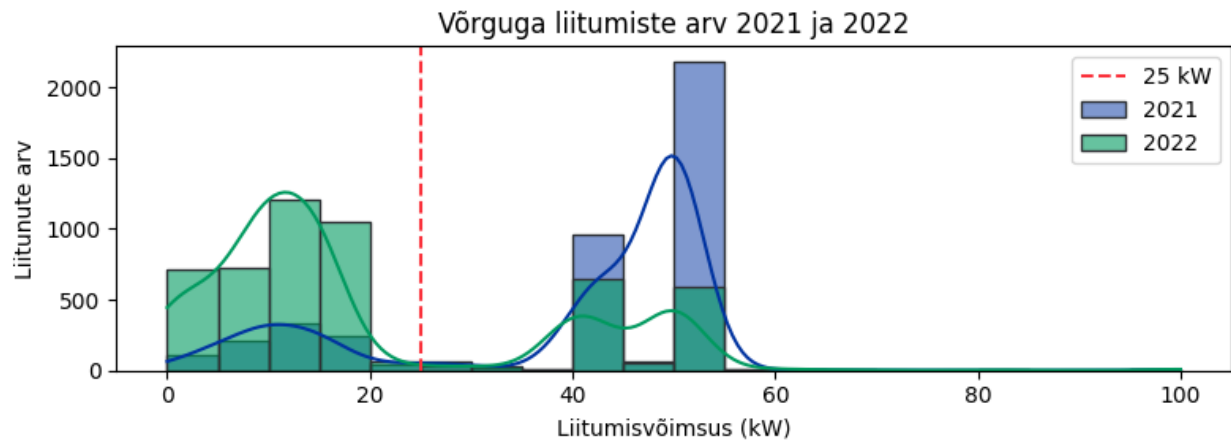
Veelgi huvitavam on vaadata liitumiste jaotust tootmisvõimsuse järgi. Aastatel 2011 kuni 2022 on enamik liitumisi olnud kuni 25 kW tootmisvõimsusega (Joonis 6), mis viitab suurele hulgale väiketootjatele, eriti kodumajapidamistele ja väikeettevõtetele, kes investeerivad päikeseenergiasse. See trend muutus aga aastal 2021, kus kogu liitumiste arv oli 4247, kuid väiketootjaid, kelle tootmisvõimsus jäi alla 25 kW, oli ainult 946. See erinevus viitab sellele, et 2021. aastal liitus võrguga suur hulk suure tootmisvõimsusega päikeseparke. Selle põhjuseks oli riiklike taastuvenergiatoetuse programmide lõppemine².



Joonis 6. Elektrivõrguga liitunud elektritootjad tootmisvõimsusega kuni 25kW.

Aastal 2021 domineerisid uute liitumiste seas 50 kW tootmisvõimsusega päikesepargid (Joonis 7), mis näitab, kuidas poliitilised ja majanduslikud stiimulid võivad mõjutada investeringuid taastuvenergiasse. Aastal 2022 on aga taas tõusnud alla 25 kW tootmisvõimsusega päikesepaneelide populaarsus, mis näitab väiketootjate taasaktiveerumist päikeseenergia sektoris.

² <https://elering.ee/taastuvelektri-toetus>



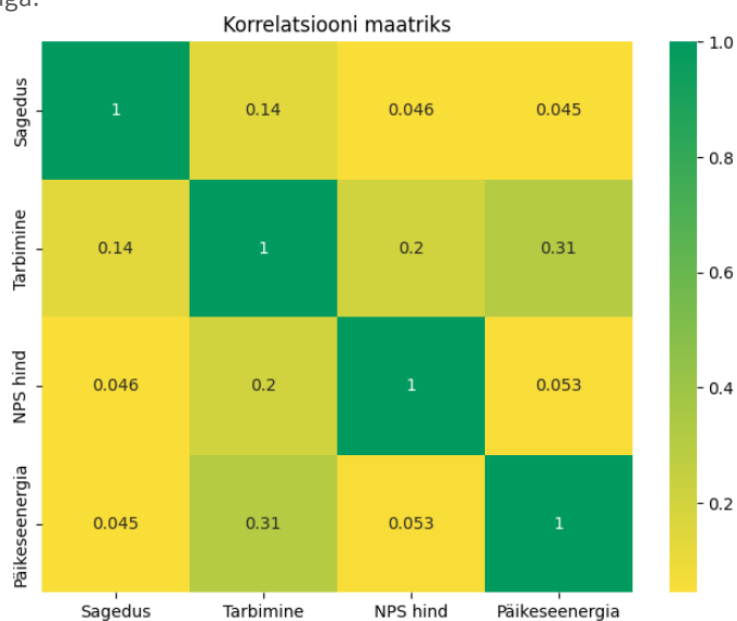
Joonis 7. 2021 ja 2022 aastal elektrivõrguga liitunud päikeseparkide arv ja tootmisvõimsused.

6. NPS hinna, mFRR, tarbimise ja päikeseenergia seosed

mFRR (manual Frequency Restoration Reserve) on turu tasakaalustusmehhanism, mis aitab hoida elektrisüsteemi sagedust stabiilsena, reguleerides lühiajaliselt tootmise ja tarbimise tasakaalu. Analüüsis kasutati Nord Pooli hinnainfot ja mFRR andmeid, et uurida elektritarbimise ja tootmise dünaamikat. See võimaldab tuvastada seoseid elektri tarbimise ja tootmise võimekuse ja turuhindade vahel. Eesmärk oli mõista, kuidas päikeseenergia tootmine mõjutab elektri hinda ning millised on nende mõjud elektrisüsteemi tasakaalule ja stabiilsusele. Samuti annab sagedusturu analüüs ülemise mõistliku lae suurtele energiasalvestusvõimsustele.

6.1. Korrelatsioonanalüüs

Erinevate seoste tuvastamiseks kasutati korrelatsioonanalüüsi, kus sisendiks on tunnipõhised andmed ajavahemikus 2022. aasta aprillist novembrini. Analüüsiks valiti selline periood, kuna teistel kuudel on päikesest saadava energia hulk märkimisväärselt väiksem. Analüüsi tulemused on esitatud korrelatsioonimaatriksis (Joonis 8), mis kirjeldab nende muutujate omavahelisi suhteid Pearsoni korrelatsioonikordajaga.



Joonis 8. Elektrisüsteemi sageduse (Hz), tarbimise (MWh), hinnanaütajate (€/MWh) ja päikeseenergia tootmise (MWh) vaheliste Pearsoni korrelatsioonide analüüs tunnipõhistel andmetel, 2022. aasta aprillist novembrini

Elektrisüsteemi sageduse ja **tarbimise** vaheline korrelatsioonikordaja on 0.14, viidates väga nõrgale positiivsele lineaarsele suhtele. See tähendab, et kuigi tarbimise suurenedes tõuseb teoreetiliselt ka sagedus, on see seos liiga nõrk, et teha tähenduslikke järeldusi ja viitab pigem parameetrite sõltumatusele. See viitab sellele, et lisaks tarbimise muutustele mõjutavad elektrisüsteemi sagedust ka muud tegurid. Tehniliselt peaks tarbimise suurenedes sagedus kergelt vähenema. Tuvastatud nõrk vastupidine korrelatsioon viitab kergele ülekompenseerimisele elektrivõrgu juhtimisel.

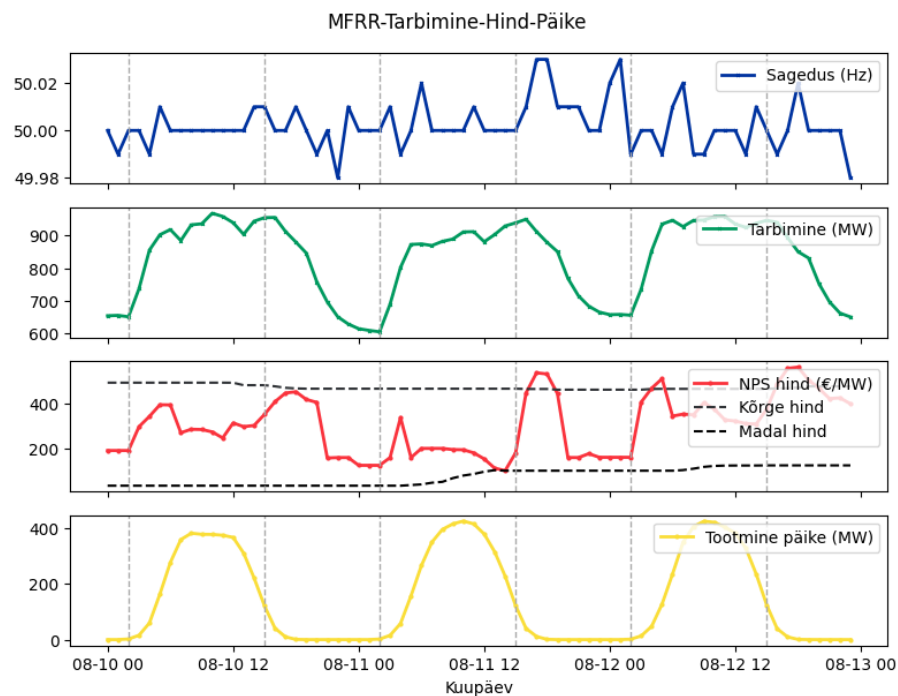
Päikeseenergia tootmise ja tarbimise vaheline korrelatsioonikordaja 0.31 annab märku mõõdukast positiivsest seosest, mis näitab, kuidas päikeseenergia tootmise kasvu korral täheldatakse ka tarbimise suurenemist. See suurenemine võib olla seotud mitte ainult energiakasutuse kasvuga päikesepaistelisel perioodidel või päikeseenergia suurema kaasamisega elektrivõrku, vaid ka peegeldada inimeste igapäevast elurütmi. Nimelt võib korrelatsioon vihjata sellele, kuidas tarbimine on suurem päeval ja väiksem öösel, nii nagu ka päikeseenergia tootmine.

NPS hinna ja päikeseenergia tootmise vaheline korrelatsioon on väga nõrk, korrelatsioonikordaja on 0.053. See näitab, et päikeseenergia tootlikuse ja elektrienergia hinna vahel pole alati kehtivat põhjusliku seost. Kuigi päikeseenergia tootmise otsene mõju hinnale võib olla minimaalne, samas p-väärtus (9.72e-06) näitab, et selline seos teatud perioodidel eksisteerib. Siin on oluline märkida, et enim mõjutab Eestis elektrienergia hinda täna import/eksport elektri osakaal ja Eesti suhteline energiabilianss naaberriikidega, mistõttu peaks kõigis hinna puudutavates järeldustes, mis seda eiravad, olema mõõdukalt konservatiivne.

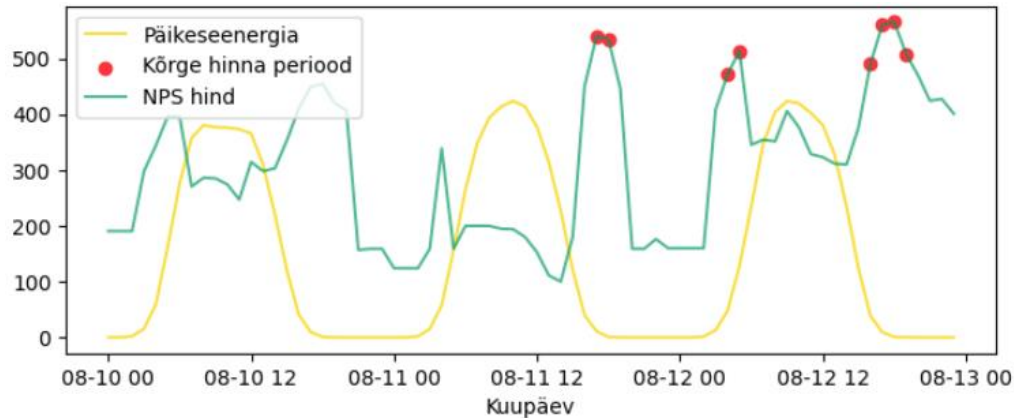
NPS hinna ja tarbimise vaheline korrelatsioonikordaja on 0.2. See kirjeldab tendentsi, kus suurem nõudlus elektrienergia järele viib hinna kõrgenemiseni.

6.2. Dünaamika

Päevase tarbimise ja tootmise dünaamika uurimisel (Joonis 9, 10) esineb tüüpiline muster, kus elektritarbimine suureneb enne päikesepaneelide tootmisperioodi algust. Sellel perioodil on Nord Pooli süsteemi hind (NPS) tüüpiliselt kõrgem, mis peegeldab suurenenud nõudlust ja väiksemat tootmisvõimekust. Sama olukord kordub õhtuti: kui päikesepaneelide tootmine väheneb, püsib tarbimine kõrge ning elektri hind on selgelt kõrgem.

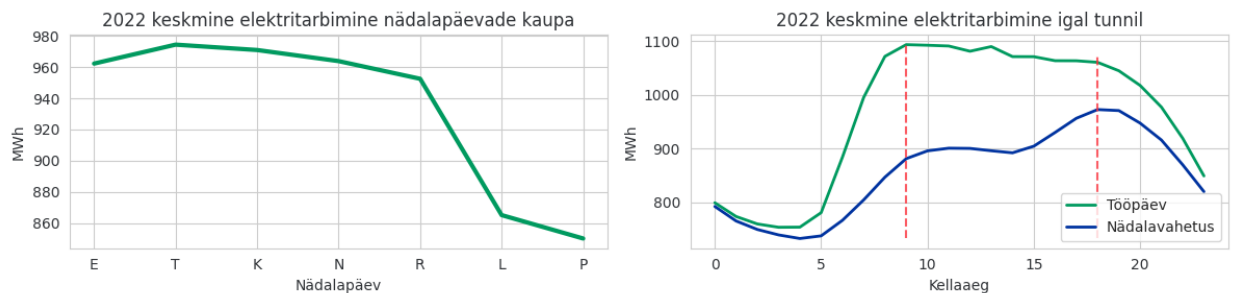


Joonis 9. Elektrisüsteemi sagedus (Hz), tarbimine (MW), NPS hind (€/MW) ja päikese poolt toodetud elekter (MW).



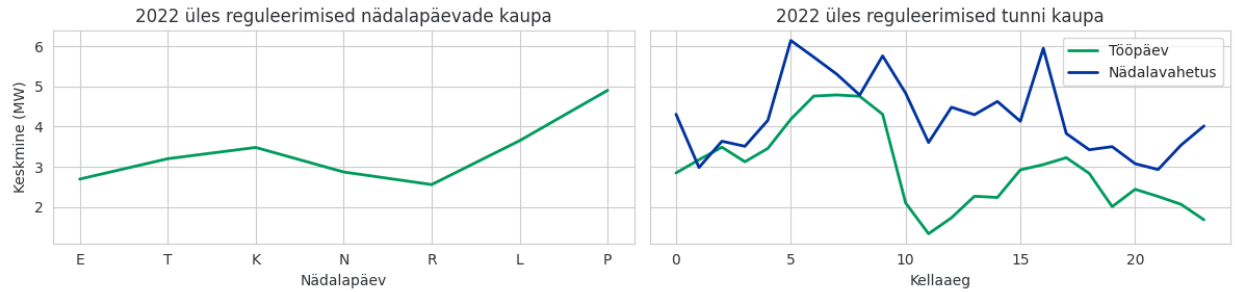
Joonis 10. Päikeseenergia tootmine ja NPS hind

Vaadates Eesti elektritarbimist nädalapäeviti (Joonis 11), täheldame nädalavahetustel ligikaudu 10% tarbimise vähenemist võrreldes tööpäevadega. Tunnipõhises vaates algab tarbimise tõus tööpäeviti hommikul kella viiest, jõudes esimese haripunkti kella üheksa ja kümne vahel. Lõunaa ajal on märgatav teine tarbimistipp, misjärel tarbimine järk-järgult väheneb, minnes miinimumini öösel kella kolme paiku. Nädalavahetustel on tarbimismuster erinev: esimene tipp ilmub kella 11 paiku hommikul ja teine õhtune tipp on 18–19 vahel.



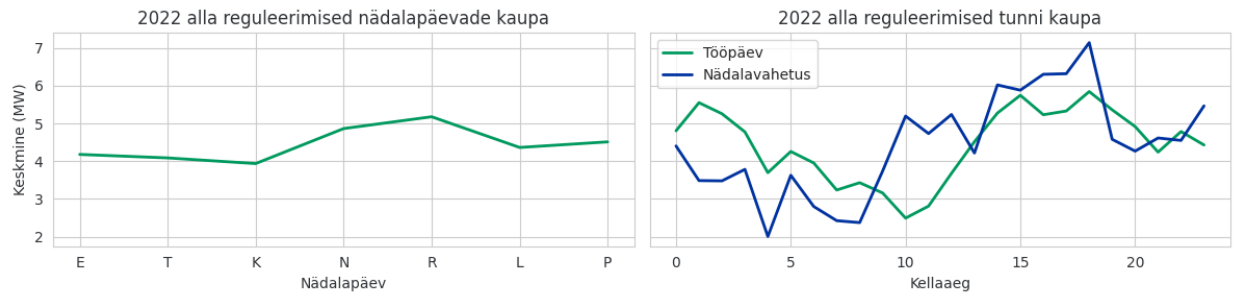
Joonis 11. 2022 Eesti keskmine elektritarbimine päevade ja tundide lõikes

2022 Eesti keskmised mFRR üles reguleerimised päevade ja tundide lõikes (Joonis 12) näitab, et nädalavahetustel toimub keskmiselt rohkem üles reguleerimisi, mis viitab suuremale ebastabiilsusele elektrisüsteemis nendel päevadel. Tunnipõhiselt on tööpäevadel näha kahte ülesreguleerimise tippu. Hommikul kella kaheksast kümneni ja pärastlõunal kella kolmest kuueni. Need ajad kattuvad elektritarbimise tõusuga, mis näitab, et süsteemi tasakaalustamiseks on sel perioodil vajalik kas tootmise suurendamine või tarbimise vähendamine. Nädalavahetuste suuremad üles reguleerimiste mahud (võrreldes tööpäevadega) viitavad võimalusele, et tarbijate käitumine on raskemini ette prognoositav, mis võib põhjustada suuremat eabilanssi ja nõuab rohkem sekkumisi süsteemi tasakaalu säilitamiseks.



Joonis 12. 2022 Eesti keskmised mFRR üles reguleerimised nädalapäevade ja tundide lõikes

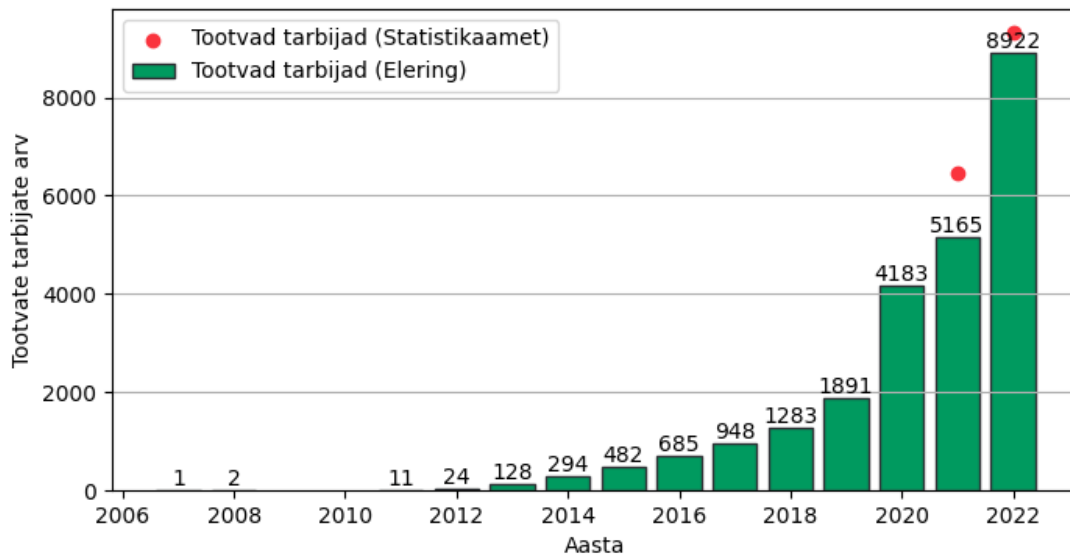
2022 Eesti keskmised mFRR alla reguleerimised nädalapäevade ja tundide lõikes (Joonis 13) on näha, et keskmiselt toimub alla reguleerimisi rohkem neljapäeval ja reedel. Tunnipõhises analüüsis on nädalavahetuste ja tööpäevade alla reguleerimised üsna sarnased, suurim erinevus ilmneb nädalavahetustel kella 10 ja 11 vahel hommikul, kus sel ajal on võrgus elektrienergiat üle, mis nõuab tarbimise suurendamist või tootmise vähendamist süsteemi tasakaalustamiseks.



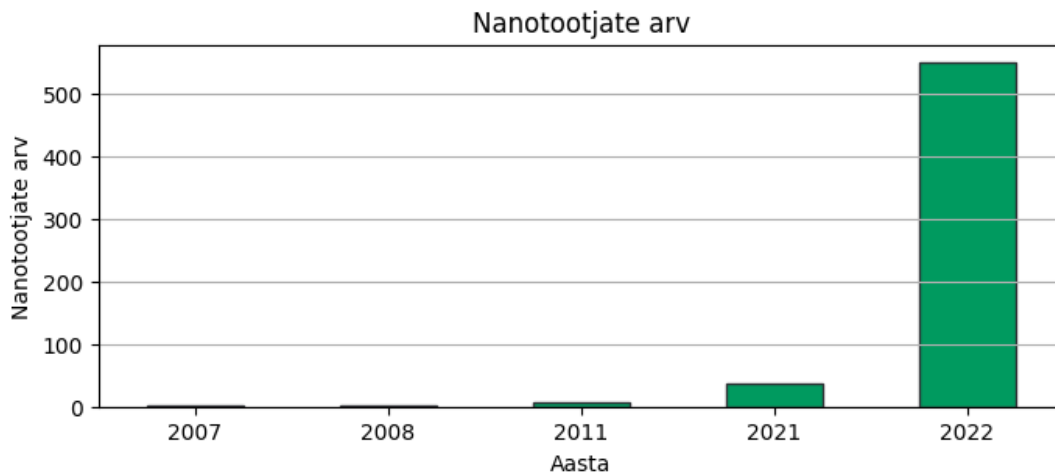
Joonis 13. 2022 Eesti keskmised mFRR alla reguleerimised päevade ja tundide lõikes

7. Tootvad tarbijad täna

Tootvate tarbijate (TT) arvu leidmiseks, kasutasime kahte lähenemist. Esimeses etapis analüüsisime Eleringi "Võrguga ühendatud tootmismoodulite" andmeid, kust valisime välja 25 kWh või väiksema võimsusega tootmisüksused. Selle filtreerimise tulemusel saadi andmed tootvate tarbijate aastase arvu kohta ajavahemikus 2007 kuni 2022, mis näitab tootvate tarbijate arvu järjepidevat kasvu – alates vaid ühest tootjast aastal 2007 kuni 8922 tootjani aastal 2022 (Joonis 14). Kuni 25 kWh võimsustega on kaasatud kõik väiketootjad minnes välja ka nanotootjateni, kelle hulga muutus on näha (Joonisel 15).



Joonis 14. Tootvate tarbijate arv aastatel 2006 - 2022.



Joonis 15. Nanotootjate (<0.8 kW), kes täna eranditult on kõik PV tootjad, arv aastatel 2007 - 2022.

Teiseks lähenemiseks kasutati Statistikaameti päevase agregatsiooniga elektri tootmis- ja tarbimisandmeid. Selle analüüsi käigus keskenduti ainult nendele mõõtepunktidele, kus toimus elektri tootmine, et identifitseerida tootvad tarbijad. Seejärel leiti iga mõõtepunkti ajalooline maksimaalne tootmisvõimsus, mis võimaldas arvutada TT-de arvu, kelle tootmisvõimsus on kuni 25 kWh.

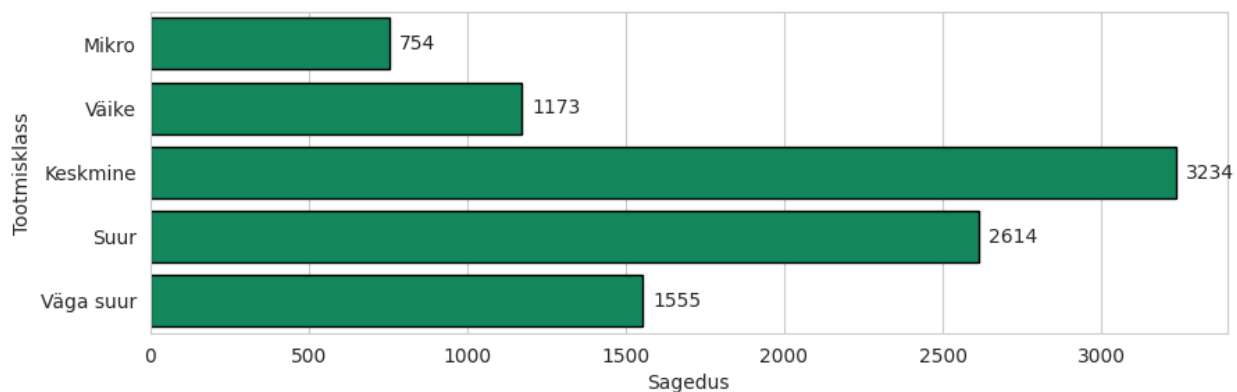
Statistikaameti andmetel tõusis tootvate tarbijate (TT) arv 2021. aastal 6445-lt 2022. aastaks 9331-ni, mis näitab selget kasvutrendi. Sellega paralleelselt suurenes TT-de poolt toodetud ja võrku müüdüd elektrienergia maht märkimisväärselt: 38,82 GWh-lt 2021. aastal 60,93 GWh-ni 2022. aastal.

Tuleb märkida, et kuigi TT-de arv kasvas, vähenesid samal perioodil nende võrgust tarbitud elektrienergia maht 872 GWh-lt 2021. aastal 665 GWh-ni 2022. aastal. See näitab, et aastal 2022 suunasid TT-d oluliselt rohkem toodetud energiat isiklikuks tarbimiseks, vähendades seeläbi vajadust võrgust tarbitava energia järele. Lisaks võib osa 2022 aastal lisandunud uutest tootjatest olla väikesemahulised päikesepargid, mis ei tarbi energiat samal määral kui suuremad tarbijad.

Lisime tootvatele tarbijatele (TT) vastavalt nende tootmisvõimsusele kategooriad, mis võimaldab detailsemalt analüüsida TT-de panust ja käitumismustreid. Tootmisvõimsuse alusel jaotusid TT-d järgmistesse kategooriatesse:

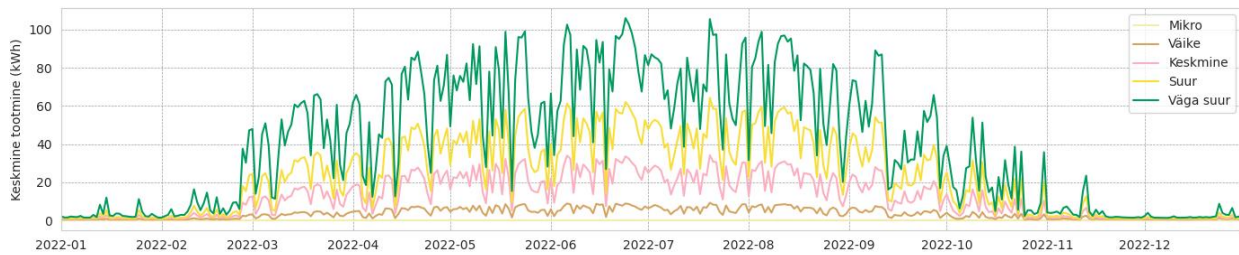
- Mikro: 0 kuni 2 kWh (väiketootmine)
- Väike: >2 kuni 5 kWh
- Keskmine: >5 kuni 10 kWh (keskmine tootmine, suurima osakaaluga)
- Suur: >10 kuni 15 kWh
- Väga suur: >15 kuni 25 kWh (suuremad tootjad)

Jooniselt 16 on näha, et kõige rohkem, 3234 TT-d, kuulusid “Keskmine” kategooriasse, mis näitab, et suurim osa tootvatest tarbijatest omab keskmist tootmisvõimsust vahemikus 5 kuni 10 kW. Järgnesid “Suur” kategooria 2614 TT-ga ja “Väga suur” kategooria 1555 TT-ga, mis kinnitab, et suuremahuliste tootjate osakaal on märkimisväärne. Väiksemates kategooriates oli “Väike” kategoorias 1173 TT-d ja “Mikro” kategoorias 754 TT-d.



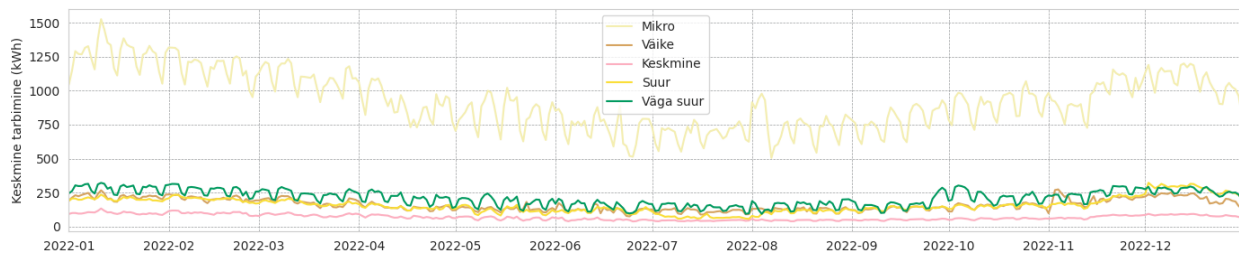
Joonis 16. Tootvate tarbijate tootmisvõimsused.

Joonisel 17 on näha erinevate tootmisvõimsuste tootmismustreid. Sõltumata tootmisvõimsuse kategooriast, järgivad tootmisprofiilid sarnast mustrit. Ehk päikeseenergia tootmise dünaamika on suhteliselt ühtlane läbi erinevate võimsuskategooriate.

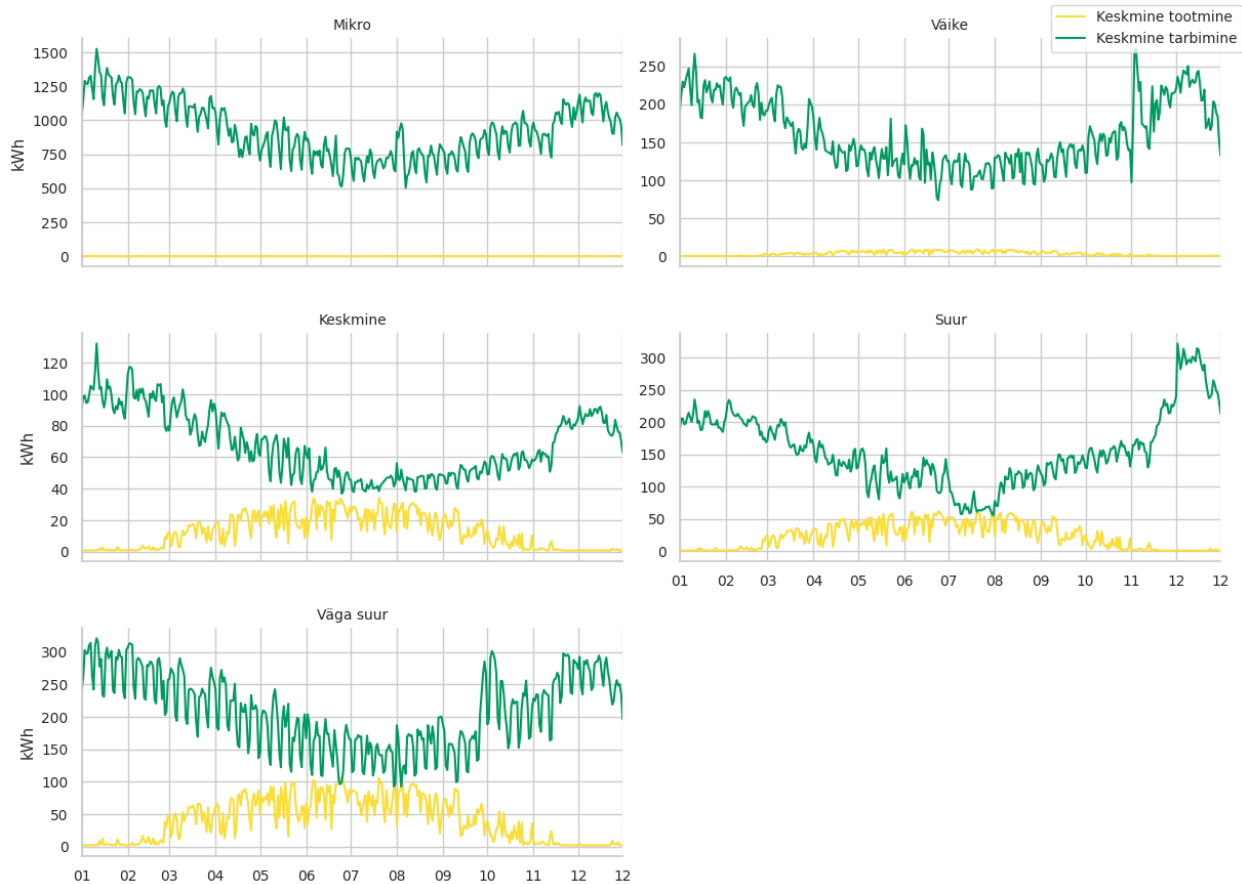


Joonis 17. Tootvate tarbijate tootmismustrid eri tootmisvõimsuste juures.

Joonisel 18 ja 19 on näha TT-de tarbimismustreid, kus eriti torkab silma "Mikro" kategooria suur tarbimine võrreldes teiste kategooriatega. "Mikro" kategooria TT-de suurem tarbimine võrreldes nende tootmisvõimsusega viitab tõenäoliselt sellele, et nendes punktides tarbitakse suurem osa või kogu kohapeal toodetud elektrienergia ise ära. See võib olla märk, et "mikrotootjad" paigaldavad päikesepaneelid peamiselt oma elektrivajaduste katmiseks, kasutades ära kogu toodetud energia ja nende tegelik tootmisvõimsus on suurem kui "Mikro".



Joonis 18. Tootvate tarbijate tarbimismustrid eri tootmisvõimsuste juures.

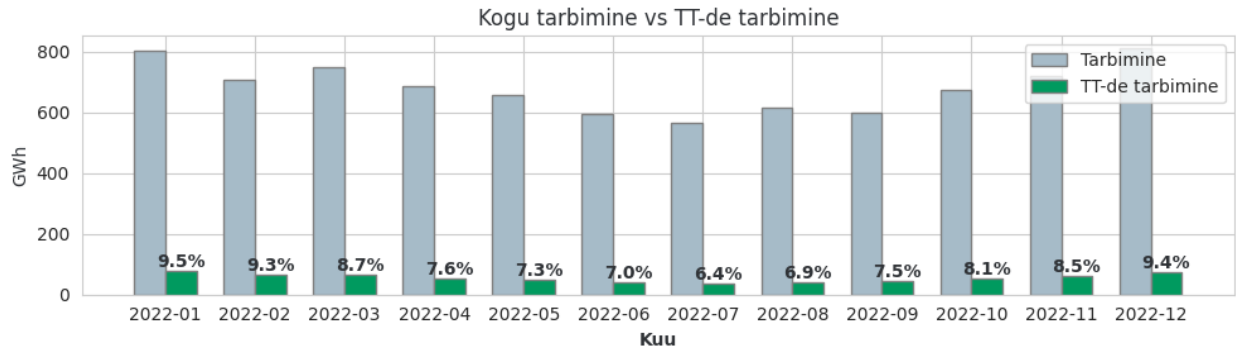


Joonis 19. Tootvate tarbijate tarbimismustrid eri tootmisvõimsuste juures (Kollane - keskmine tootmine; roheline - keskmine tarbimine).

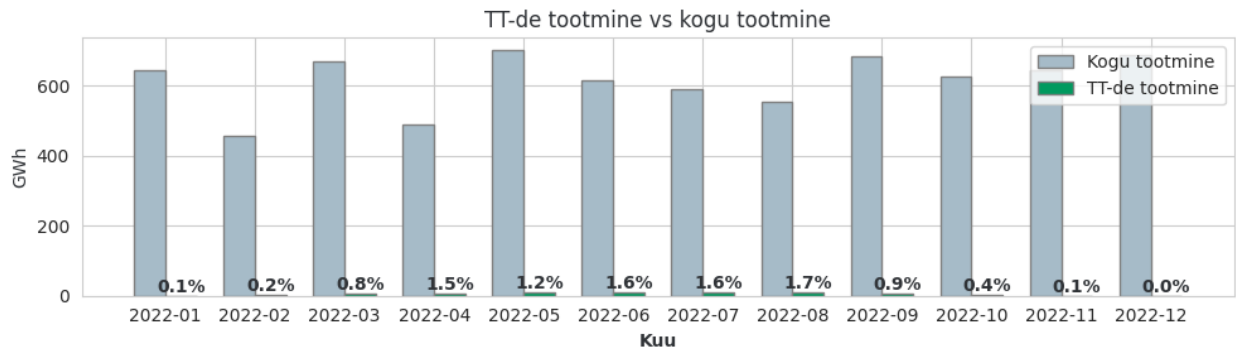
Ajaga lisandub järjest rohkem elektrivõrgust hooajaliselt (pool)autonoomselt toimivaid tootvaid tarbijaid, kes kevadest sügiseni kasutavad ööpäevaringselt enda toodetud ja salvestatud päikese-energiat kohapeal. Elektrivõrgu vaatest naasevad nad tarbijana oktoobrist-veebbruarini. Tavalise elektritootja liitumist ei hakka nad taotlemagi (ja juhul kui taotlevad, siis võib-olla nanotootja oma), nende tootmine ja tarbimine ei kajastu praegu statistikas, ega hakka ka tuleviku statistikas otseselt kajastuma. Nende arvu saaks hakata kaudselt tuletama, kui on näha, et märtsist-oktoobrini on elektrivõrgust tarbimine minimaalne.

7.1. Tootvate tarbijate mõju elektrivõrgule

2022 aasta andmed näitavad, et tootvate tarbijate (TT) keskmine tarbimine moodustab Eesti kogutarbimisest ligikaudu 8% (vt joonis 20). Võrreldes seda kogu elektritootmisega, selgub, et TT-de panus on keskmiselt alla 1% kogutoodangust, isegi suvekuudel ei ületa see 2% (vt Joonis 21). Seega, kuigi TT-d annavad panuse energiasüsteemi, näiteks suurendades hajutatud tootmist ja soodustades enesetarbimist, on nende mõju Eesti elektrituru kogutoodangule marginaalne. Eriti ilmneb see TT-de osakaalu kaudu kogutoodangust, mis on alla ühe protsendi, viidates nende piiratud mõjule elektrituru üldisele dünaamikale.

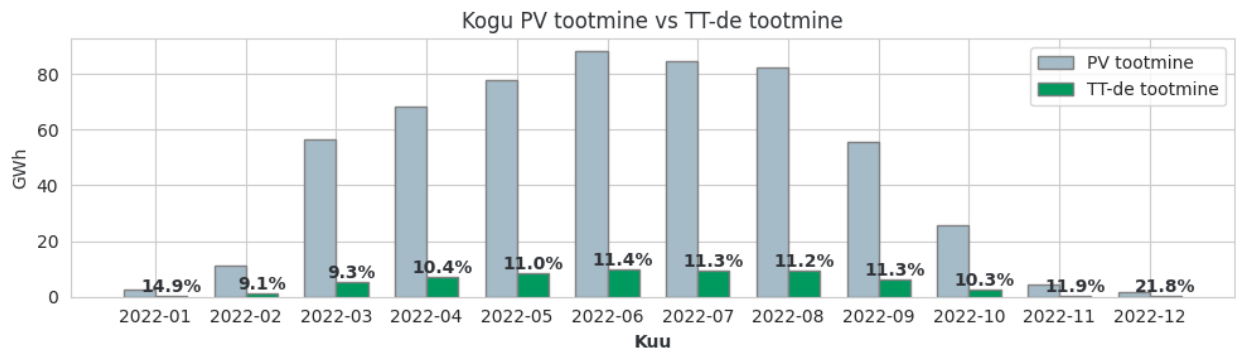


Joonis 20. Eesti 2022 aasta elektritarbimine ja tootvate tarbijate elektritarbimine.



Joonis 21. Eesti 2022 aasta elektritootmine ja tootvate tarbijate elektritootmine.

Päikeseenergia (PV) tootmise kõrgeimate perioodide jooksul (suvekuudel) on TT-de toodang umbes 11% kogu PV tootmisest (vt Joonis 22). Talvekuudel, kui PV tootmise maht on madalam, tõuseb TT-de osakaal 15–21%-ni. Kuna talveperioodil on PV tootmine peaaegu nullilähedane, ei oma TT-de osakaalu suurenemine märkimisväärset mõju.



Joonis 22. Eesti 2022 aasta PV elektritootmine ja tootvate tarbijate elektritootmine.

Kokkuvõtteks, TT-de toodangu lisaväärtus energiasüsteemile peegeldub peamiselt hajutatud tootmise suurenemises ja enesetarbimise võimaldamises. Nende mõju kogu Eesti elektritootmise mahule on siiski piiratud, olles kõige olulisem päikeseenergia tootmise kontekstis suveperioodil. Vaatamata sellele jääb TT-de kogupanus elektrituru tootmisvõimsusse väikeseks.

7.2. Tootvate tarbijate mõju elektri sagedusturule

Eelmises peatükis uurisime tootvate tarbijate (TT) arvu kasvu ja nende energiatootmise dünaamikat. Selles osas keskendume TT-de mõjule elektri sagedusturule, eriti seoses päikeseenergia tootmisega.

Meie esialgne hüpotees oli, et tootvate tarbijate päikeseenergia tootmine võib põhjustada eabilanssi sagedusturul, kuna päikeseenergia on juhitamatu ja selle tootmiskaht võib prognoositust erineda. Selle hüpoteesi kontrollimiseks jagasime Eesti elektritandmed kolme aastaaja klassi: suvi (mai, juuni, juuli, august), talv (november, detsember, jaanuar, veebruar) ja kevad/sügis (märts, aprill, september, oktoober).

Analüüsid sageduse reguleerimiste mahte ja sagedusi erinevatel aastaegadel (Tabel 2), ilmnes, et:

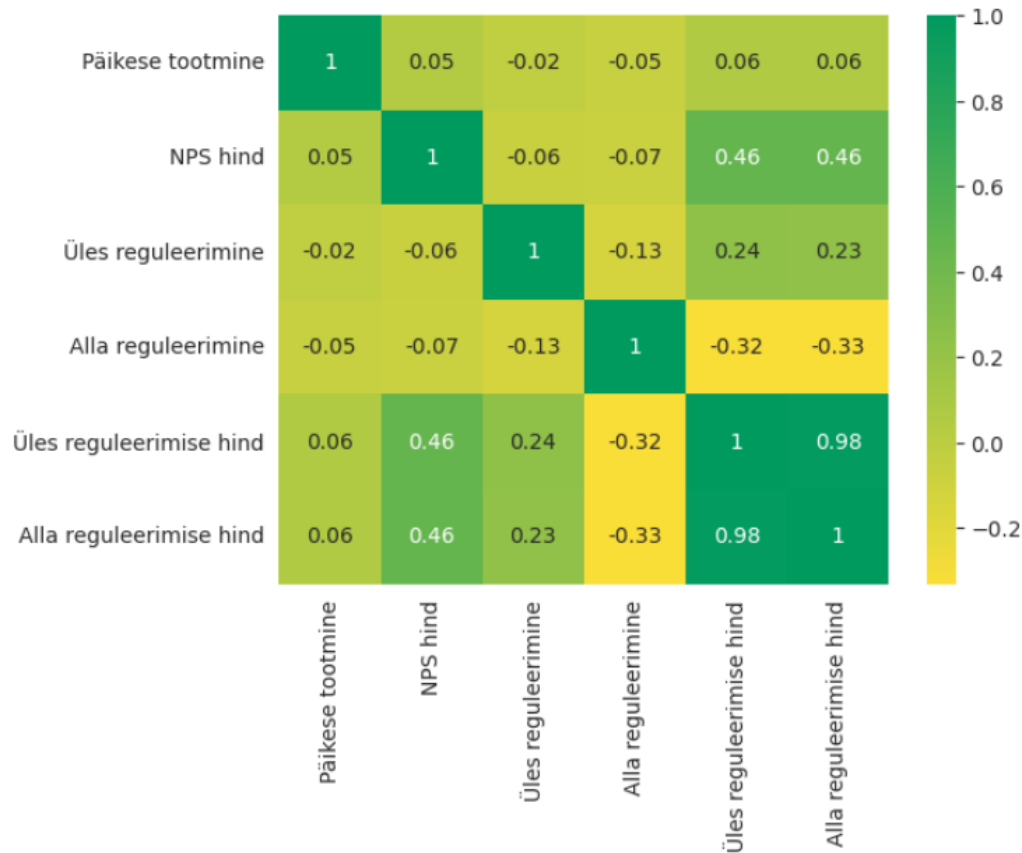
- **Suvekuudel**, kui päikeseenergia tootmine on kõrgeim, suureneb tõenäosus, et turul tekib energia ülejääk, eriti kui tootmist ei saa täpselt juhtida vastavalt nõudlusele. See toob kaasa suurema vajaduse allareguleerimise järele, et vähendada süsteemi ülekoormust ja säilitada sageduse stabiilsus. Kuid andmed näitavad, et allareguleerimise maht on suvel madalam (2.6 MW) võrreldes kevad/sügis ja talvega.
- **Talvel, kevadel ja sügisel**, kui päevad on lühemad ja elektrikütte kasutus suureneb, esineb sageli suurem vajadus energia allareguleerimise järele. Need aastaajad toovad lisaks temperatuurikõikumistele ka suurenenud tuuleenergia tootmise, mis võib samuti suurendada energia ülejääki süsteemis. Tuuleenergia, mida iseloomustab selle varieeruvus, võib põhjustada prognoosidest erinevaid tootmiskahte, mis omakorda nõuab aktiivset reguleerimist, et hoida elektrisüsteemi stabiilne.

Tabel 2: Sagedusturu reguleerimised erinevatel aastaegadel.

Aastaeg	Keskmine üles reguleerimise maht (MW)	Keskmine alla reguleerimise maht (MW)	Üles reguleerimiste arv	Alla reguleerimiste arv	Üles reguleerimiste protsent (%)	Alla reguleerimiste protsent (%)
Suvi	3.8	2.6	1236	952	41.9	32.2
Talv	3.1	4.7	1051	1060	35.8	36.1
Sügis/Kevad	3.1	6	1091	1072	37.9	37.2

Viisime läbi ka korrelatsioonianalüüsi (Joonis 23) Pearsoni korrelatsioonikordajaga, kus võrdlesime tunnipõhistel andmetel päikeseenergia tootmist (MWh), NPS hinda (€/MWh), üles- ja allareguleerimise mahtusid (MWh) ning nende hindu (€/MWh). Leidsime, et:

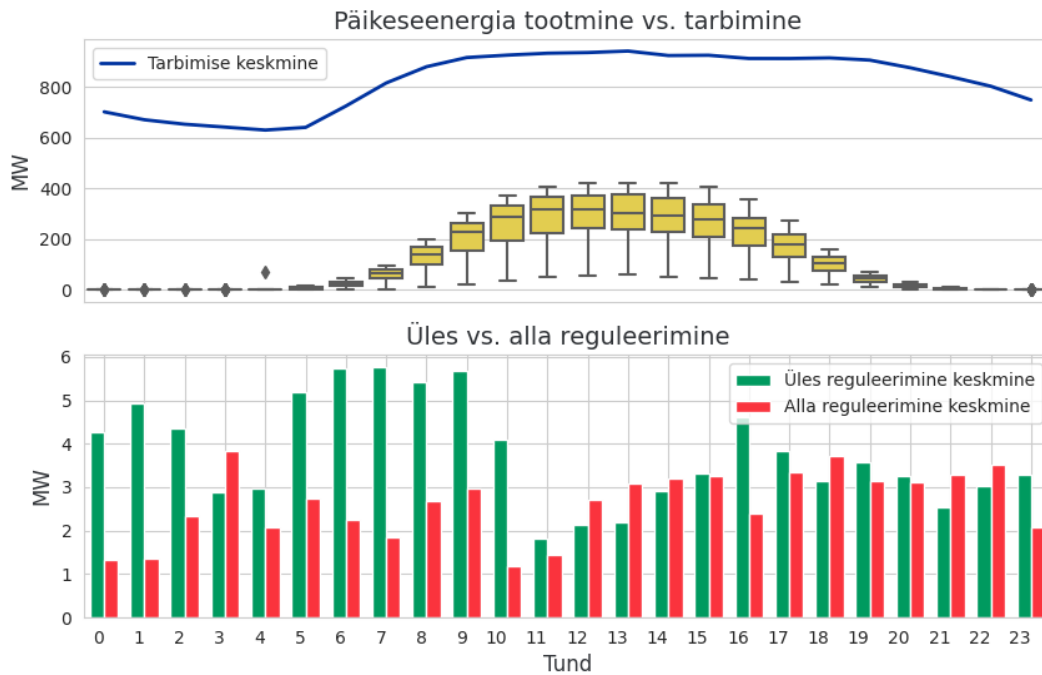
- Päikeseenergia tootmise ja sageduse reguleerimiste vahel puudub statistiliselt oluline seos (korrelatsioonikordajad lähedal nullile).
- NPS hind korreleerus üles- ja allareguleerimise hindadega (korrelatsioonikordaja 0.46 ehk keskmine seos), mis näitab, et kõrgem NPS hind kajastub otseselt reguleerimiste maksumuses.



Joonis 23: Päikeseenergia tootmise, NPS hinna, üles- ja alla reguleerimise korrelatsioonimaatriks (Pearsoni korrelatsioonikordaja).

Joonis 24 näitab suvekuudel toimuvat tarbimise ja päikeseenergia tootmise dünaamikat ning sageduse haldamiseks tehtud üles- ja allareguleerimiste keskmiseid mahte. Joonise ülemises osas on näha, et tarbimine on kõige kõrgem hilisõhtul, kui PV tootmine on madal või olematu. Alumisel joonisel on näha, et hommikul alates kella viiest suureneb üles reguleerimise vajadus, mis vastab tarbimise suurenemisele. See võib viidata sellele, et enne päikeseenergia tootmise algust peab süsteemi tasakaalu hoidmiseks suurendama tootmist või vähendama tarbimist.

Kui võrrelda suviseid andmeid talviste või kevad/sügis andmetega (vt Lisa L.1 ja L.2), kus PV tootmine on märkimisväärselt väiksem, on oluline märkida, et sarnane üles reguleerimise vajadus on olemas ka siis. Ehk üles reguleerimine hommikutundidel ei ole otseselt seotud PV tootmisega, vaid pigem üldise tarbimise suurenemisega sel ajal.

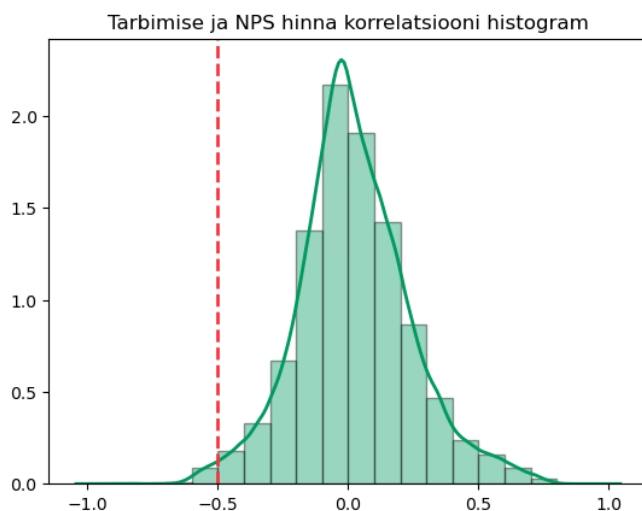


Joonis 24: Ülemine - suvekuude tarbimise ja PV tootmise dünaamikat; alumine - sageduse haldamiseks tehtud üles- ja allareguleerimiste keskmised mahud.

Kuigi TT-de osakaal kogu päikeseenergia tootmisest on ~12%, ei näita meie analüüs, et TT-de tegevus põhjustaks olulist mõju sagedusturule. Selle põhjuseks võib olla asjaolu, et kuigi päikeseenergia tootmine on juhitamatu, on selle osakaal Eesti elektrisüsteemis siiski suhteliselt väike. Seega, vaatamata TT-de tootmisvõimsuse kasvule ja selle võimalikule mõjule lokaalsel tasandil, ei kajastu see oluliselt elektrisüsteemi üldises stabiilsuses.

8. Aktiivsed tarbijad täna

Aktiivsete tarbijate leidmiseks kasutasime kahte erinevat korrelatsioonimeetodit, et korreleerida tarbijate elektritarbimist Nord Pool Spot (NPS) hinnaga (Joonis 25). Tarbijad, kelle elektritarbimise ja NPS hinna vahel esines negatiivne korrelatsioon (korrelatsioonikordaja väiksem kui -0.5), klassifitseeriti aktiivseteks tarbijateks nii Pearsoni kui ka Spearmani korrelatsioonimeetodi puhul. See tähendab, et aktiivsed tarbijad kohandasid oma elektritarbimist vastavalt elektri hinnale, vähendades tarbimist kõrgema hinna perioodidel. Korrelatsioone arvutati päevapõhise agregatsiooniga andmetel, kuna tarbimisandmeid ei ole andmeallikatest väiksema ajalise sammuga saadaval.



Joonis 25. Tarbimise ja NPS hinna korrelatsiooni (Pearson) histogramm.

2021 aastal tuvastati Pearsoni korrelatsioonimeetodil 7078 aktiivset tarbijat, Spearmani korrelatsioonimeetodil aga 24683. Aastal 2022 leiti Pearsoni meetodil 3320 ja Spearmani meetodil 8398 aktiivset tarbijat (Tabel 3).

Erinevus kahe korrelatsioonimeetodi vahel tuleneb nende statistiliste testide erinevast lähenemisest andmete analüüsimisel. Pearsoni korrelatsioon mõõdab lineaarseid seoseid kahe kvantitatiivse muutuja vahel, eeldades andmete normaaljaotust. Spearmani korrelatsioon aga ei eelda andmete normaaljaotust ja on robustsem mitte-lineaarsete suhete ja väljapaistvate väärtuste suhtes, mis võib põhjustada suurema arvu tarbijate klassifitseerimist aktiivseteks eriti volatiilse hinnaga perioodidel nagu 2021. aasta.

Tabel 3: Aktiivsete tarbijate arv erinevate korrelatsioonimeetoditega

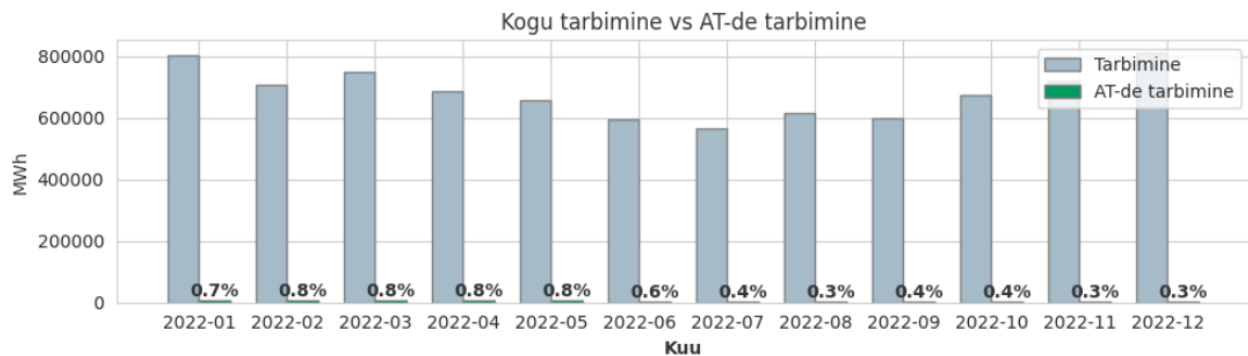
Meetod/Aasta	2021	Osakaal (%)	2022	Osakaal (%)
AT-d (Pearson)	7078	0.9	3320	0.4
AT-d (Spearman)	24683	3.3	8398	1.1

Spearmani meetodiga tuvastatud andmed on ebatavalised, näidates, et aktiivsed tarbijad võiksid teoreetiliselt katta kuni 20.6% kogutootmisest ja tarbida ainult 1.5% kogutarbimisest. On ebatõenäoline, et selline suur osa tootmisest kuulub tarbijatele, kes tegelikult tarbivad elektrienergiat väga vähe. See vihjab, et Spearmani meetod on määratlenud aktiivseks tarbijaks ka elektritootjaid, mis moonutab aktiivsete tarbijate tegelikku profiili ja mõju elektriturule. Seetõttu eelistame käesolevas aruandes Pearsoni meetodit, mis annab realistlikuma pildi kodutarbijate käitumisest ja nende mõjust elektriturule.

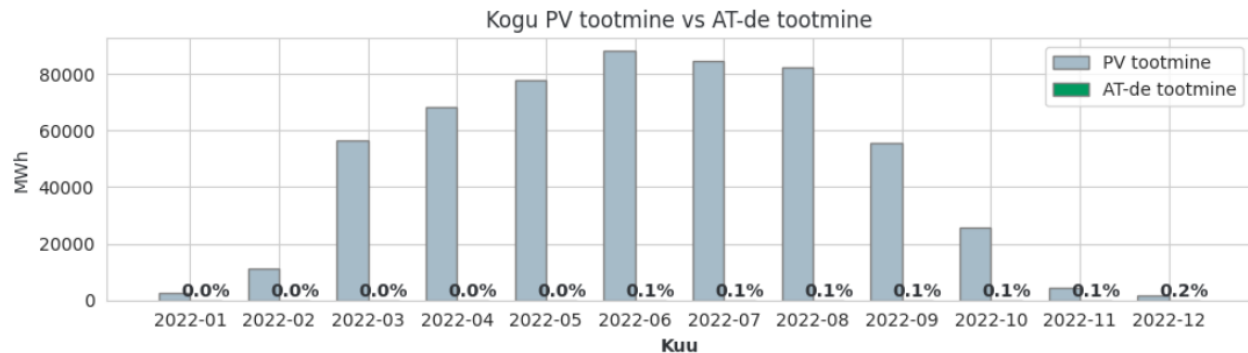
Tuleb märkida, et kasutatud meetodika toob esile tarbijate hinnatundlikkust, kuid ei pruugi anda täielikku ülevaadet sellest, kui palju tarbijad suudavad oma tarbimist ajas nihutada. Eriti 2021. aastal, kui elektri hinnad näitasid märkimisväärset kõikumist ja saavutasid erakordselt kõrgeid tippe, suurenes aktiivsete tarbijate arv märgatavalt. Hoolimata meetodite erinevusest on aktiivsete tarbijate osakaal madal, jäädes alla 4%.

8.1 Aktiivsed tarbijate mõju elektriturule

Aastal 2022 moodustas aktiivsete tarbijate (AT) keskmine tarbimine vaid 0.6% kogu Eesti elektritarbimisest. Nende keskmine tootmise maht oli veelgi väiksem, jäädes kogu elektritootmise mahust alla 0.005%, millest omakorda moodustas päikeseenergia tootmise osas vaid 0.1%. Jooniselt 26, mis kujutab 2022. aasta kogutarbimist võrreldes AT-de tarbimisega, on selgelt näha, et AT-de tarbimise osakaal on marginaalne. Samuti on näha Jooniselt 27, kus võrreldakse kogu päikeseenergia tootmist AT-de tootmisega, et AT-de panus on tühine.



Joonis 26: 2022. aasta kogutarbimist võrreldes AT-de tarbimisega



Joonis 27: 2022 kogu päikeseenergia tootmist vs AT-de tootmine.

Analüüsi järel on järeldatud, et aktiivsete tarbijate mõju Eesti elektriturule on minimaalne. Hoolimata nende tarbimise ja tootmise absoluutarvudest, ei ole nende proportsionaalne osakaal piisav, et avaldada olulist mõju riiklikule elektritootmisele ega -tarbimisele.

9. Prognoosid aastaks 2040

Eleringi tootmismoodulite andmestiku põhjal leidsime tootvate tarbijate (TT) juurdekasvu aastani 2022, millele rakendasime mitmeid sigmoidfunktsioone. Logistiline kasvumudel, Gompertzi kasvumudel, Bassi difusioonimudel ja Richardsi kasvumudel. Nende mudelite abil saame prognoosida TT-de arvu kasvu tulevikus, mis lähtuvad olemasolevatest kasvutrendidest.

Sigmoidfunktsioonide, tuntud ka kui S-kujulised kasvukõverad, abil saame modelleerida erinevate nähtuste küllastumist ajas. Need mudelid eeldavad, et kasv on alguses kiire, aeglustub järk-järgult ja läheneb lõpuks kindlale küllastumispunktile (küllastumispunkt on selles analüüsis 103265, ehk 50% Eesti ühepereelamutest³). Erinevate mudelite kasutamine võimaldab arvestada mitmesuguste kasvutingimustega ja ennustada tulevikus toimuvaid muutusi.

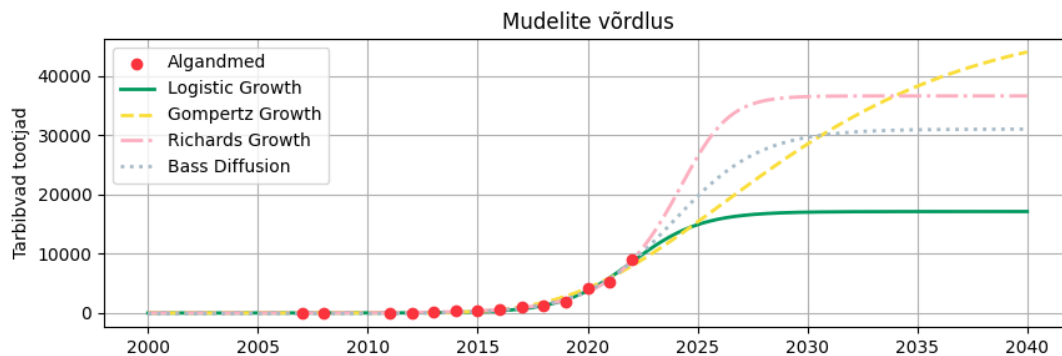
- **Logistiline kasvumudel** on üks lihtsamaid ja enimkasutatavaid mudeleid, mis eeldab kindlat küllastumistaset, mille suunas kasv püüdleb. Selle mudeli eeliseks on lihtsus ja lai rakendatavus, kuid see võib alahinnata muutuste kiirust alg- ja lõppfaasis.
- **Gompertzi kasvumudel** on keerukam ja arvestab kasvu algfaasis aeglasemat ja seejärel kiirenevast kasvutempot, mis muudab selle sobivaks tehnoloogilise arengu ja innovatsiooni leviku modelleerimiseks. Mudel võib aga olla liiga optimistlik küllastumispunkti saavutamise osas.
- **Bassi difusioonimudel** keskendub uute tehnoloogiate vastuvõtu kiirusele, arvestades nii innovaatoreid kui ka varajasi järgijaid. Mudel on kasulik prognoosimaks uute tehnoloogiate levikut, kuid võib olla keeruline parameetrite täpseks määramiseks.
- **Richardsi kasvumudel** pakub paindlikkust, lubades muuta kasvukõvera kuju, mis võimaldab arvestada erinevate kasvufaasidega. See mudel on kõige paindlikum.

Tabelis 4 on esitatud eri mudelite prognoositud kasvunumbrid. Nagu näha, prognoosib logistiline kasvumudel kõige tagasihoidlikumat kasvu, samal ajal kui Gompertzi mudel ennustab TT-de arvu suurimat kasvu. Gompertzi mudel näitab ka kõige lineaarsemat kasvutrendi, eriti küllastumisfaasi lähenedes (Joonis 28). Richardsi mudeli prognoos viitab kiirele kasvule järgmise viie aasta jooksul, mis jõuab platoole ja millele järgneb aeglane kasv küllastuspunkti. See stsenaarium kajastab olukorda, kus algne kasvuimpulss saavutatakse kiiresti, näiteks tänu soodsatele riiklikele meetmetele või turu muutustele, mis motiveerivad PV süsteemide kasutuselevõttu.

Tabel 4: Tootvate tarbijate arvu prognoosid erinevate kasvumudelite alusel (ühik tuhandetes)

Aasta	Logistiline kasv	Gompertzi kasv	Richardsi kasv	Bassi Diffusioon
2025	15k	15k	26k	20k
2030	17k	28k	36k	30k
2035	17k	38k	37k	31k
2040	17k	44k	37k	31k

³ <https://rahvaloendus.ee/et/tulemused/eluruumid-ja-eluruumidega-hooned>



Joonis 28. Simulatsioonimudelite võrdlus

Lisaks tootvate tarbijate arvule prognoosime ka nende elektriturule müüdava ja tarbitava energia mahtu. Keskmine TT müüb aastas umbes 6530 kW elektrit ja tarbib 71278 kW. Tabelis 5 on prognoositud tootmise ja tarbimise mahud gigavatt-tundides (GW) aastani 2040, lähtudes igast mudelist.

Tabel 5: TT-de prognoositud tootmise ja tarbimise mahud erinevate mudelite alusel aastani 2040

Aasta	Logistiline kasv		Gompertzi kasv		Richardsi kasv		Bass Diffusion	
	Tootmine (GW)	Tarbimine (GW)	Tootmine (GW)	Tarbimine (GW)	Tootmine (GW)	Tarbimine (GW)	Tootmine (GW)	Tarbimine (GW)
2025	97	1061	100	1093	172	1878	128	1401
2030	111	1211	186	2029	238	2599	193	2111
2035	112	1219	250	2725	239	2608	202	2201
2040	112	1219	287	3136	239	2608	202	2209

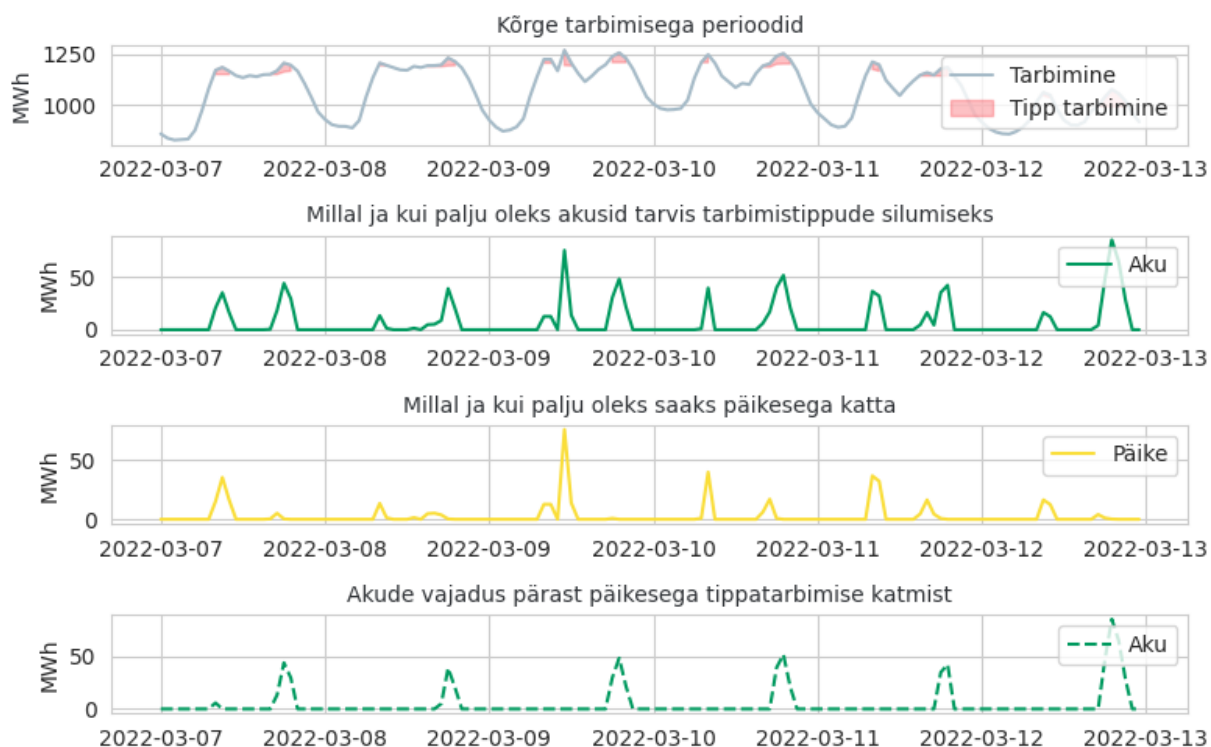
Sõltuvalt kasutatavast mudelist on TT-de panus elektriturul varieeruv, näidates nii konservatiivseid kui ka optimistlikke stsenaariume tootmise ja tarbimise osas. Lõplikuks mõõdupuuks nende prognooside paikapidavuses on aja jooksul rakendatavad poliitika ja turu arengud, mis mõjutavad otseselt päikeseenergia süsteemide omaksvõttu.

10. Tarbimistippude silumine akude ja päikeseenergiaga

Tarbimistipp on periood, mil elektrienergia nõudlus ületab tavapärase tarbimistaset, põhjustades energia tootmise ja jaotamise süsteemis suurenenud koormuse. Tarbimistippude silumine on elektrisüsteemide jaoks oluline, sest see aitab säilitada võrgu stabiilsust ja vähendada energiahindade volatiilsust. Tarbimistippude ajal suureneb koormus energiatootmissüsteemidele, mis võib viia ressursside puudujäägini ja suurendada energiatootmise kulusid. See omakorda võib kajastuda kõrgemates energiahindades lõpptarbijate jaoks. Siludes tarbimistippe, näiteks akutehnoloogia või päikeseenergia abil, on võimalik energia nõudlust ühtlustada, vähendades sellega vajadust kallima tootmisvõimsuse järele. See aitab tagada, et energia on saadaval mõistlikuma hinnaga ja suurendab üldist varustuskindlust.

Tippude leidmiseks rakendasime meetodikat, mis põhineb viimase 30 tunni tarbimisandmete kolmanda kvartiili (75-protsentiili) arvutusel iga tunni kohta. Hetki, kus tarbimine ületas selle kvartiili, peeti tarbimistippudeks.

Joonisel 29 kujutatakse 2022. aasta märtsikuu ühe nädala elektritarbimise dünaamikat Eestis. Ülemisel graafikul on kuvatud üldine elektritarbimine, kus roosa värviga on esile tõstetud tarbimise tippphetked. Alumises osas on esitatud analüüs, mis näitab, millal ja millises mahus oleks akude kasutamine tarbimistippude silumiseks vajalik. Järgnevatel joonistel illustreeritakse päikeseenergia potentsiaalset panust tarbimistippude ajal ning aku vajadust pärast päikeseenergiaga silumist.



Joonis 29. Kõrge tarbimisega perioodid, aku vajadus, päikesega katmise võimalus ja aku vajadus pärast päikese kasutamist.

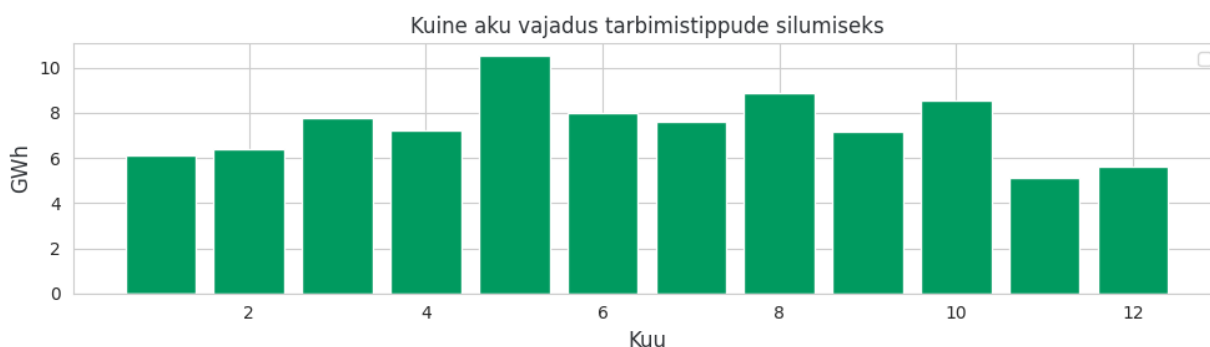
Aastatel 2020–2023 (**Tabel 6**) on tarbimistippude summaarne maht järjepidevalt suurenenud. Erilist tähelepanu väärib 2022. aasta, kui tarbimistippude kulud tõusid erakordselt kõrgele, peamiselt seetõttu, et keskmine Nord Pool Spot (NPS) hind oli enam kui kahekordne võrreldes varasemate aastatega. Vaadeldaval perioodil on päikeseenergia tootmise maht samuti kahekordistunud, kuid selle suutlikkus tarbimistippe siluda pole sama kiirusega kasvanud. Kui aastatel 2020 ja 2021 oli päikeseenergia tootmise osakaal tarbimistippude silumisel vastavalt 42,4% ja 54%, siis 2022. ja 2023. aastal püsis see suhtarv ligikaudu 63% juures.

2022 aastal oleks tarbimistippude silumiseks vajalik 89 GWh energiat. Päikeseenergiaga oleks teoreetiliselt võimalik katta 56 GWh, mis tähendab, et pärast päikeseenergia kasutamist oleks akude abil vaja siluda veel 33 GWh tarbimistippe. Kui võtta arvesse, et tootvad tarbijad (TT) genereerivad umbes 12% kogu päikeseenergia tootmisest, on nende võimekus tarbimistippude vähendada alla 8%. See osutab vajadusele laiendada silumisvõimalusi, kas akude või mõne muu tehnoloogiaga, et paremini hallata nõudluse tippu ja vähendada süsteemi koormust.

Tabel 6: Päikeseenergia tootmise ja tarbimistippude silumise võrdlus aastatel 2020–2023

Aasta	PV toodang (MW)	TT toodang (MW)	Tarbimistippe (MW)	Keskmine NPS hind (€/MW)	Tarbimistippude hind (mln €)	PV võime siluda tippu (%)	TT võime siluda tippu (%)
2020	31978	3837	75374	33.7	3.5	42.4	5.1
2021	39544	4745	73243	86.7	7.7	54	6.5
2022	55719	6686	88926	192.8	20.7	62.7	7.5
2023	66887	8026	105697	90.8	11.1	63.3	7.6

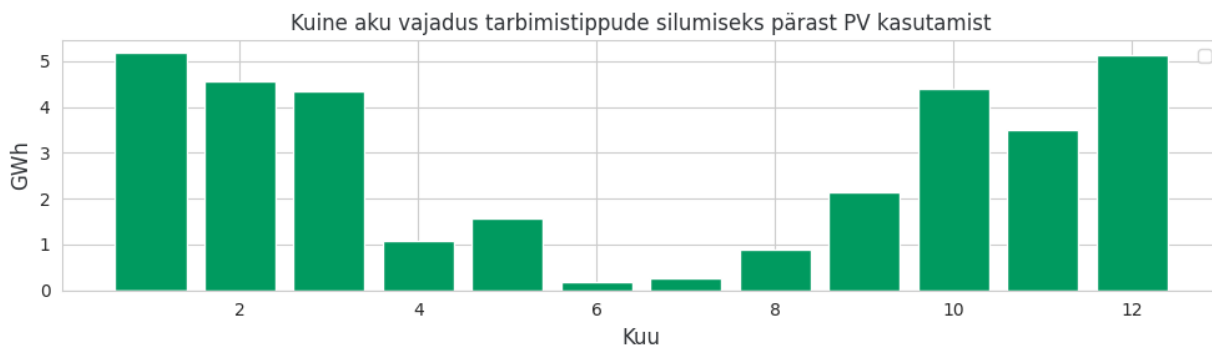
Joonis 30 kajastab igakuist akude energiavajadust, mis oleks vajalik tarbimistippude silumiseks aastal 2022. On näha, et suvekuudel on tarbimistippude maht eriti kõrge, ulatudes üle 10 GWh mais. Talvekuudel on näha väikest langust akude vajaduses.



Joonis 30. Kuine aku vajadus tarbimistippude silumiseks

Joonis 31 toob esile akuenergia vajaduse pärast seda, kui päikeseenergia on juba kasutatud tarbimistippude katmiseks. Sealt on näha, et päikeseenergia suudab märkimisväärselt vähendada akuenergia vajadust suvekuudel, kus akude vajadus läheneb nullile. Seevastu väljaspool suveperioodi –

talvel, kevadel ja sügisel, kui päikeseenergia tootmine on madal – on akude roll energiatippude silumisel oluliselt suurem.



Joonis 31. Kuine aku vajadus tarbimistippude silumiseks pärast PV kasutamist

Tabelis 7 on esitatud hüpoteetiline analüüs aktiivsete tarbijate (AT-de) võimekusest siluda tarbimistippe GWh-des kuus. Tabeli ridade tähistus näitab akude mahtuvust kilovatt-tundides (kWh) ja veergude tähistus aktiivsete tarbijate arvu vastava akuga. Arvutused põhinevad eeldusel, et iga aku mahtuvust kasutatakse kaks korda ööpäevas, et optimeerida aku eluiga. Arvutused on näitlikud ja pakuvad ülevaadet, kui suurt mõju võivad omada aktiivsete tarbijate rakendatavad energiasalvestussüsteemid elektritarbimise tipukoormuse maandamisel.

Tabel 7: Potentsiaalne tarbimistippude silumise võimekus (GWh kuus) aktiivsete tarbijate ja erineva mahtuvusega akude põhjal.

Aku (kWh)/AT-d	6000	8000	10000	12000	14000	16000
2.5	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4
5	1.8	2.4	3	3.6	4.2	4.8
7.5	2.7	3.6	4.5	5.4	6.3	7.2
10	3.6	4.8	6	7.2	8.4	9.6
15	5.4	7.2	9	10.8	12.6	14.4

Eeldades, et igal aastal esineb kindel arv tarbimistippe, võimaldavad need arvutused hinnata, milline akude mahtuvus ja millises koguses aktiivseid tarbijaid on teoreetiliselt vajalik, et need tipud täielikult siluda.

10.1 Tootvad tarbijad: tarbimise juhtimine

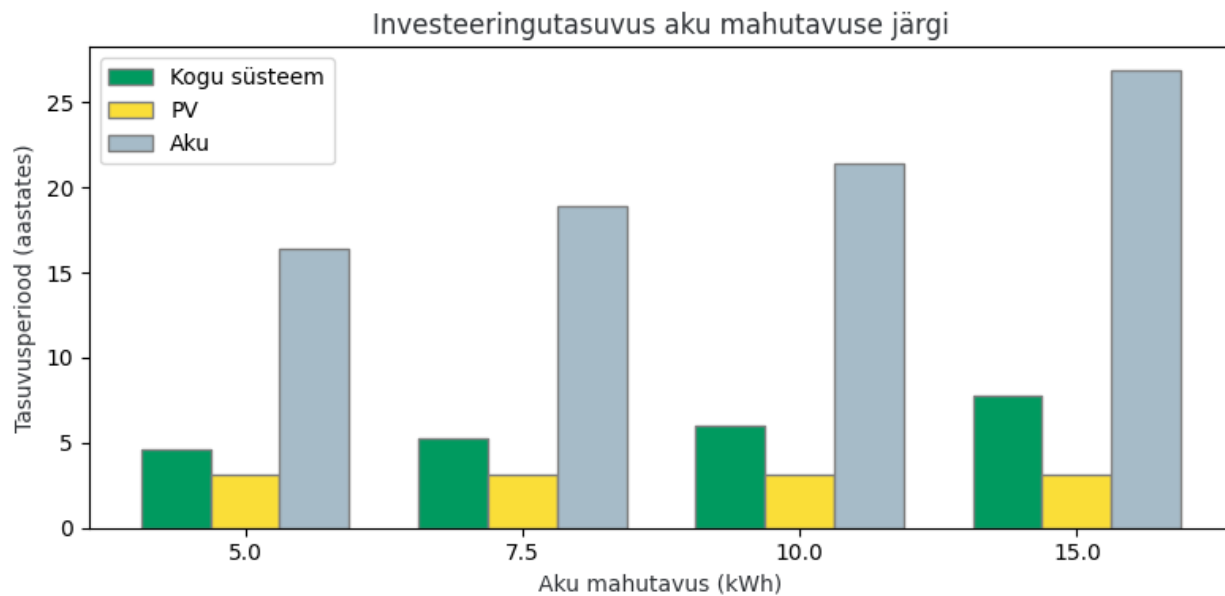
Elektrienergia tarbimise juhtimine on oluline aspekt tootvate tarbijate (TT) tegevuses. Tootvate tarbijate tunnipõhised keskmised tarbimisandmed, mida me kasutasime, saadi Statistikaametist klasterdatud andmestikust. Need andmed ei kirjelda üksikut TT-d, vaid annavad ülevaate TT-de keskmisest tarbimismustrist. Oluline on märkida, et saadud andmetes ei kajastu TT-de endi tarbimine, vaid nende võrgust ostetud elektrienergia maht. Joonisel 32 on illustreeritud TT-de keskmise päevase tarbimismustri dünaamika aastal 2022.



Joonis 32. TT-de keskmine päevane tarbimine aastal 2022.

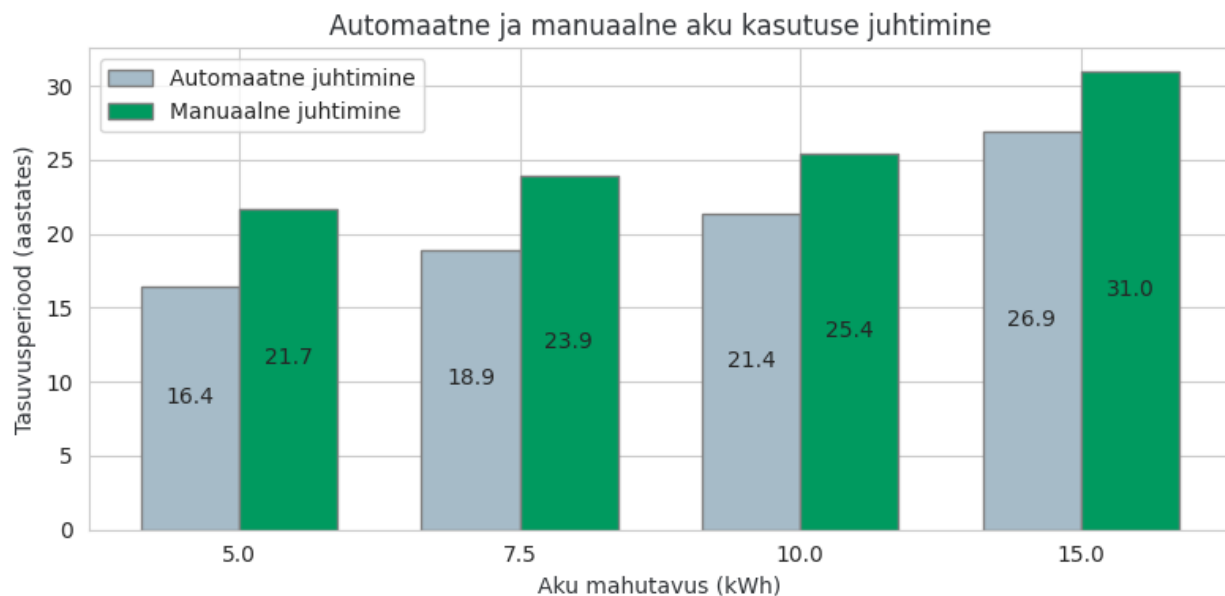
TT-de seas on kõige levinum tootmisklass "Keskmine", kus tootmisvõimekus jääb vahemikku 5-10 kWh. Simuleerisime sellise keskmise tootva tarbija (PV tootmisvõimekus 7.5kW) võimekust juhtida oma tarbimist läbi aku ja PV. Simulatsioon võtab arvesse Nord Pool Spot (NPS) hinda, võrgutasusid (0.08 €/kWh ostmisel ja 0 €/kWh müümisel), aku laadimiskiirust (3 kWh) ning aku laadimiste arvu (6500 tsüklit). Arvutatakse, millal on kõige mõistlikum elektrienergia osta võrku integreeritud akusse, millal laadida seda PV-st, millal müüa energiat akust võrku ning millal kasutada akut omatarbeks. Optimeerimise peamine eesmärk on minimeerida lõpptarbijale kilovatt-tunni maksumust.

Teise simulatsiooni käigus rakendati akut manuaalselt, juhindudes ajaloolistest trendidest, kus tundide lõikes on tavaliselt kas madalam või kõrgem elektri hind. Manuaalne juhtimine peegeldab hetkeolukorda paremini, kuna enamikul PV ja aku omanikel pole automaatset juhtimissüsteemi, mis optimeeriks nende seadmete kasutust. On oluline, et akut rakendatakse ainult juhul, kui müüdava kWh hind ületab aku mahtuvuse, tsüklite arvu ja maksumuse põhjal arvatud kWh omahinda. Kui turuhind jääb sellest madalamaks, ei ole aku kasutamine majanduslikult otstarbekas. Simulatsioonide ja aku juhtimisstrateegiade täpsemad detailid on esitatud lisan L.3.



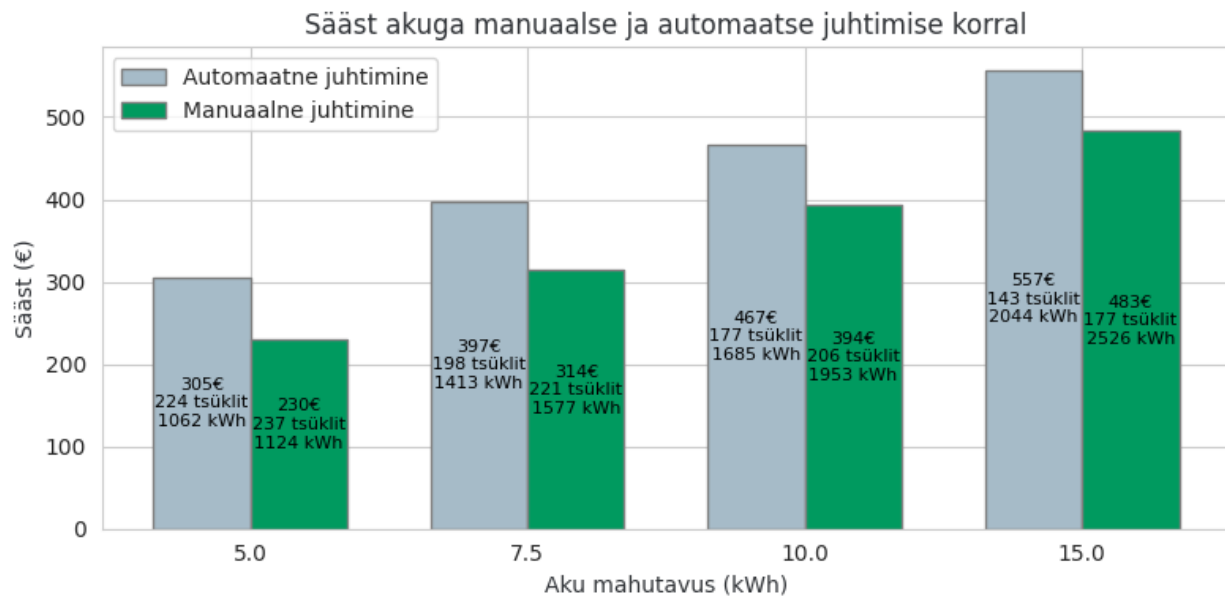
Joonis 33. Investeeringu tasuvus aastates erinevate aku mahutavuste jaoks. Roheline PV ja aku; kollane ainult PV; hall ainult aku.

Joonis 33 kujutab erinevate mahutavuste ja kombinatsioonidega akusüsteemide tasuvusperioode. Kui akut kasutatakse eraldiseisvalt, on investeeringu tasuvusaeg üsna pikk, ulatudes 15 aastast kuni üle 25 aasta, sõltuvalt aku mahutavusest. Kui akusüsteemid on aga kombineeritud PV-ga, väheneb tasuvusperiood märkimisväärselt, langedes 5 aastani 5 kWh süsteemi puhul ja 8 aastani 15 kWh süsteemi puhul. Kombineerimine parandab majanduslikku tasuvust, sest PV tootmine vähendab vajadust osta energiat võrgust, mis suurendab süsteemi tõhusust ja kiirendab investeeringu tasuvusperioodi.



Joonis 34. Akude automaatse ja manuaalse juhtimise tasuvusperioodid (aastates) erineva mahutavusega akude jaoks.

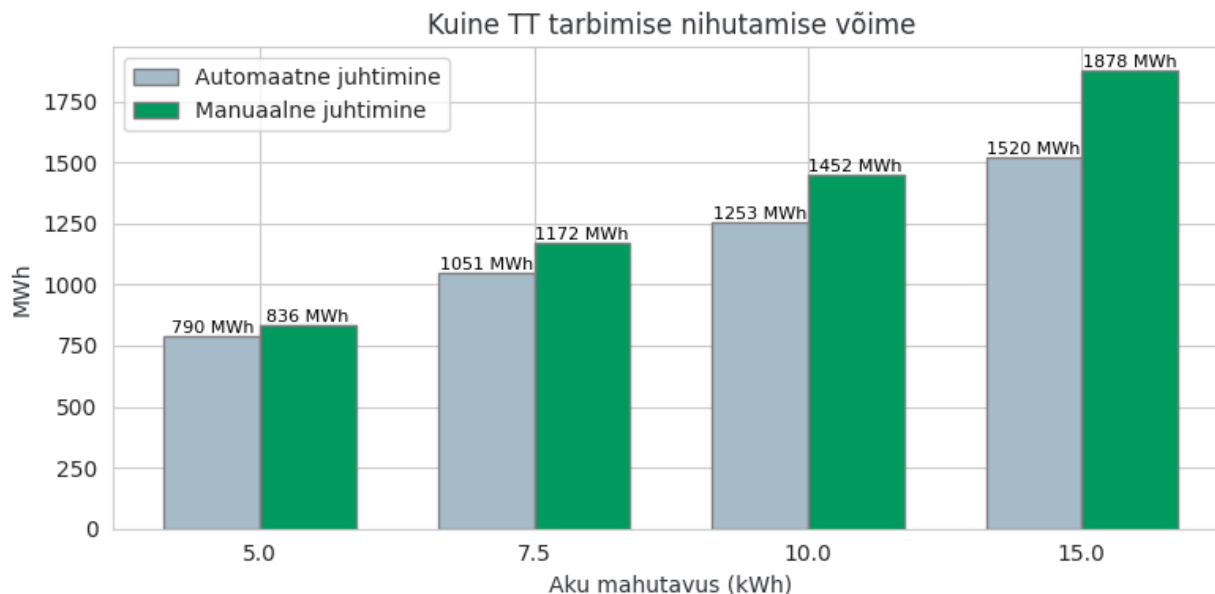
Joonis 34 toob esile aku tasuvusajad, võrreldes automaatset ja manuaalset juhtimist. Automaatne juhtimissüsteem optimeerib energia kasutamist reaajas, arvestades energiahindu, võrgutasusid ja aku laetust, mis tähendab tõhusamat ja kuluefektiivsemat kasutust. Seevastu manuaalne juhtimine, mis põhineb ajaloolistel hinnaandmetel ja eeldab sekkumist vaid kindlatel tundidel, toob kaasa pikemad tasuvusajad.



Joonis 35. Automaatse ja manuaalse juhtimisega akude säästude võrdlus erinevate aku mahutavuste juures aastal 2022.

Joonis 35 toob välja teoreetilised säästud, mis 2022. aastal oleksid saavutatavad TT-de elektrienergia tarbimisel nii automaatse kui manuaalse juhtimise korral. Säästud varieeruvad sõltuvalt aku mahutavusest 230 ja 557 euro vahel aastas.

Joonis 36 esitab hüpoteetilise stsenaariumi, kus kõik 2022. aasta TT-d oleksid varustatud nii PV-paneelide kui ka akudega, näidates, kui suures ulatuses oleksid nad igakuiselt suutnud oma tarbimist juhtida.



Joonis 36. Kuine TT-de tarbimise nihutamise võimekus (MWh), automaatse ja manuaalse juhtimise korral

Tabelis 8 on välja toodud TT-de tarbimise nihutamise võimekus (GWh) aastal 2040 eri aku hindade juures. On näha, kuidas aku hinna langus mõjutab TT-de võimet oma energiatarbimist juhtida. Tabelis on esitatud neli erinevat kasvumudelit – logistiline kasv, Gompertzi kasv, Richardsi kasv ja Bassi difusioonimudel – mis kõik prognoosivad, kui palju energiat TT-d saavad juhtida sõltuvalt aku hinnast.

Tabel 8: Tootvate tarbijate tarbimise nihutamise võimekus (GWh) aastal 2040 eri aku hindade juures. Igal TT-l on 5kWh mahutavuse aku.

Aku hind	Logistiline kasv	Gompertzi kasv	Richardsi kasv	Bass Diffusion
1000	41.5	106.7	88.7	75.1
2000	33.5	86.2	71.7	60.7
4000	19.8	50.9	42.3	35.8
5000	14.6	37.5	31.2	26.4
6000	11.4	29.3	24.4	20.6

On selgelt näha, et mida madalam on aku hind, seda suurem on juhitava energia hulk. Näiteks kui aku hind on 1000 eurot, ulatub logistilise kasvumudeli järgi juhitava energia hulk 41.5 GWh-ni, samas kui aku hinnaga 6000 eurot on see vaid 11.4 GWh. See trend peegeldub ühtlaselt kõigis kasvumudelites.

10.2 Aktiivsed tarbijad: tarbimise juhtimine

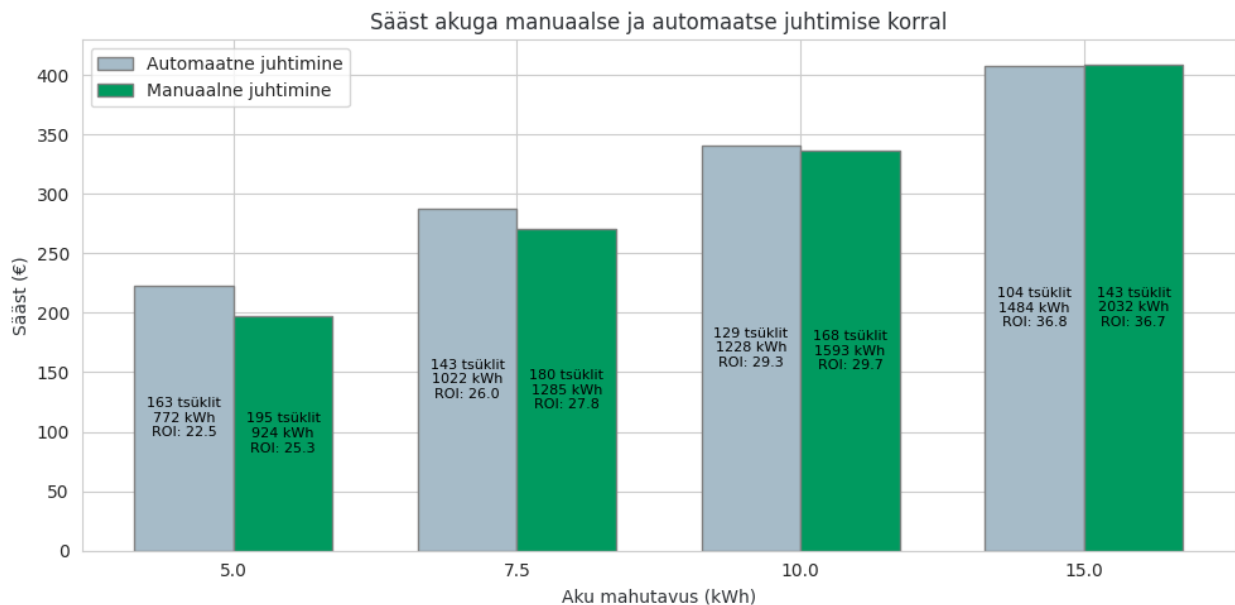
Aktiivsed tarbijad (AT) Eestis, erinevalt tootvatest tarbijatest (TT), ei tooda ise elektrit. Nende võimalus elektritarbimist juhtida põhineb tarbimise vähendamisel või akutehnoloogia kasutamisel. Elektriandmed, mis kirjeldavad Eesti asustatud elamute keskmist tarbimisprofiili, saime Statistikaameti klasterdatud elektriandmete andmestikust. Need andmed käsitlevad kõiki kasutuses olevaid elektri tarbimiskohti, mis võivad hõlmata väiketööstusi, kuid jätavad välja suured tööstuskompleksid.

Erinevate simulatsioonide käigus vaatlesime, kuidas aktiivsed tarbijad saavad oma tarbimist juhtida kasutades akusid. Eesmärk oli optimeerida elektri ostmist soodsatel hetkedel ja kasutada või müüa see elekter kõrge hinnaga perioodidel. Samasugune tingimus, mis kehtib TT-dele, kehtib ka AT-dele: aku kasutamine on majanduslikult mõistlik ainult siis, kui müüdava kWh hind ületab aku mahtuvuse, tsükliite arvu ja maksumuse põhjal arvutatud kWh omahinna.

Aku spetsifikatsioonid ja juhtimisstrateegia:

- Aku laadimis- ja tühjenemiskiirus: 3 kWh
- Aku eluiga: 6500 tsüklit
- Võrgutasud: 0.08 €/kWh ostes, müües 0 €/kWh

Joonisel 37 on esitatud 2022. aasta andmed, mis illustreerivad automaatse ja manuaalse tarbimisjuhtimise mõju. On näha, et automaatsel juhtimisel kasutatakse akut vähem, kuid saavutatakse suuremad säästud võrreldes manuaalse juhtimisega. Sellegipoolest on mõlemal juhtimisviisil akude tasuvusperiood üle 20 aasta, aastased säästud jäävad vahemikku 200 kuni 400 eurot, olenevalt aku mahutavusest.



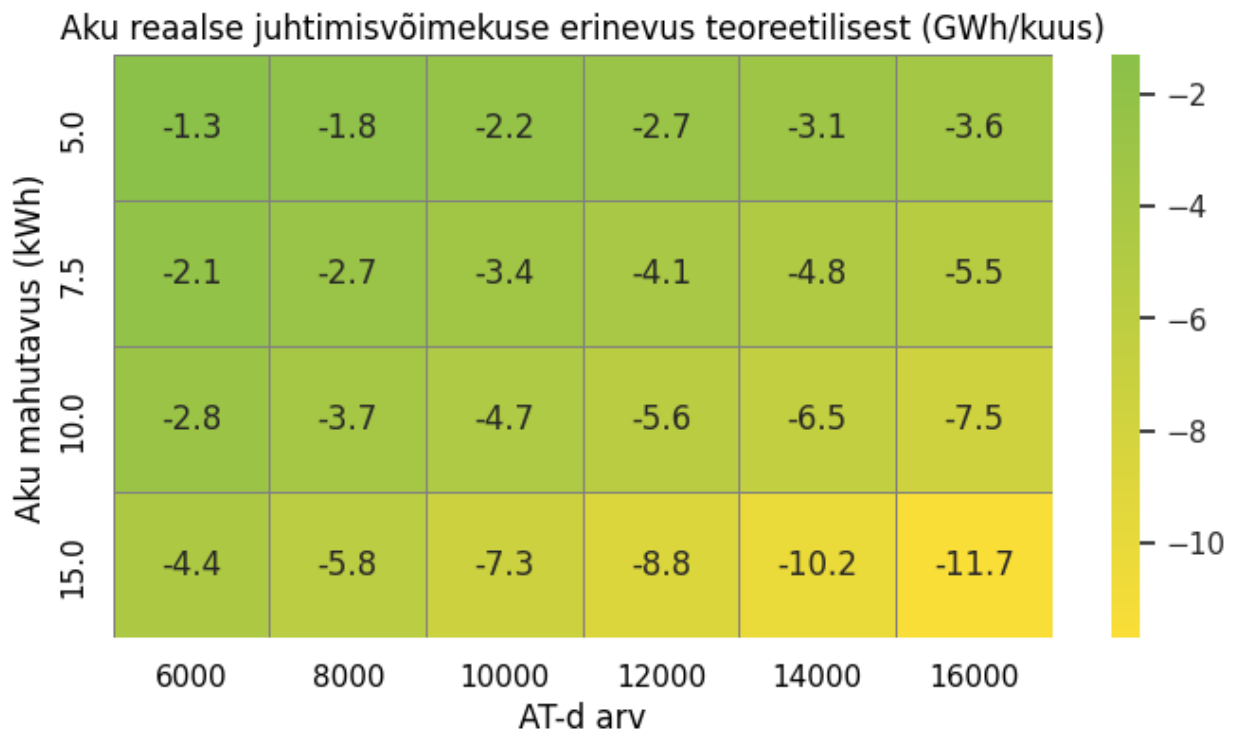
Joonis 37. Automaatse ja manuaalse juhtimisega akude säästude võrdlus erinevate aku mahutavuste juures aastal 2022.

Tabelis 9 on toodud eri mahutavusega akude potentsiaal koos tarbimist juhtida, väljendatuna GWh-des. Võrdluses Tabelis 7 esitatud tarbimistippude silumisvõimekusega on näha, et reaalne tarbimisjuhtimise võimekus jääb märkimisväärselt väiksemaks. Joonis 38 näitab, kuidas reaalne ja teoreetiline tarbimisjuhtimisvõime erinevad sõltuvalt aku mahutavusest. Suuremate akude puhul suureneb erinevus

märgatavalt, mis viitab aku üledimensioneerimisele. Enamik akudest ei kasuta oma täit mahtuvust ära, mis tähendab, et tarbijad peaksid valima optimaalse mahutuvusega akud, et vältida liigseid kulusid ja ressursi raiskamist.

Tabel 9: Tarbimise juhtimise võimekus (GWh kuus) aktiivsete tarbijate ja erineva mahtuvusega akude põhjal manuaalse juhtimisega.

Aku (kWh)/AT-d	6000	8000	10000	12000	14000	16000
5	0.5	0.6	0.8	0.9	1.1	1.2
7.5	0.6	0.9	1.1	1.3	1.5	1.7
10	0.8	1.1	1.3	1.6	1.9	2.1
15	1	1.4	1.7	2	2.4	2.7

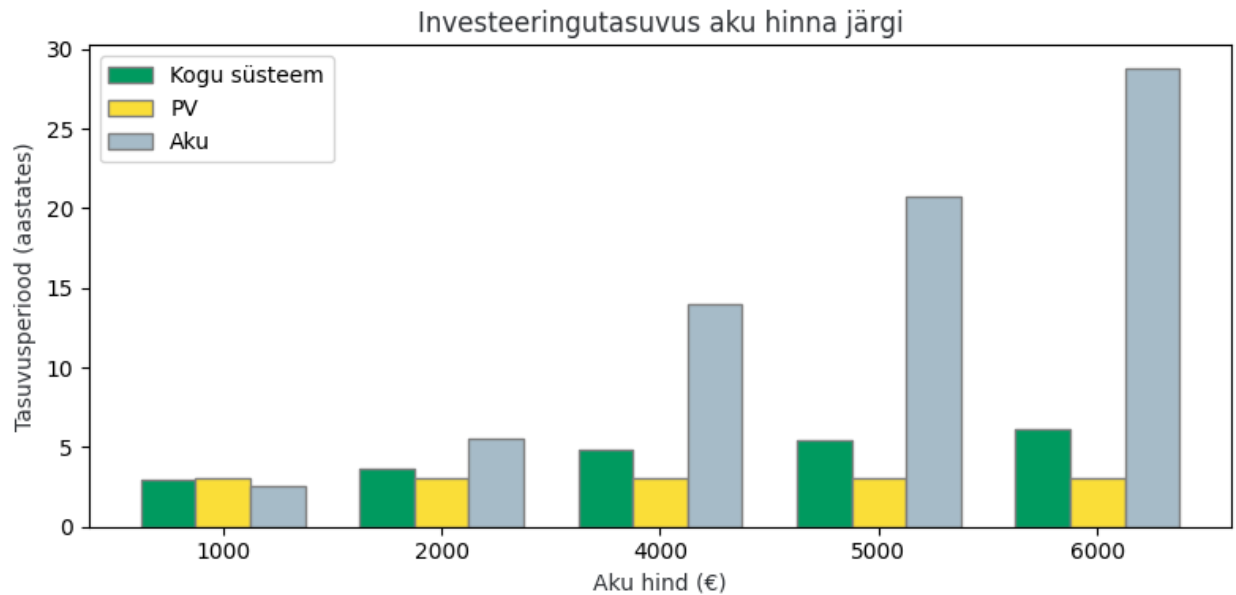


Joonis 38. Aku reaalse juhtimisvõimekuse erinevus teoreetilisest

11. Aku hinna mõju

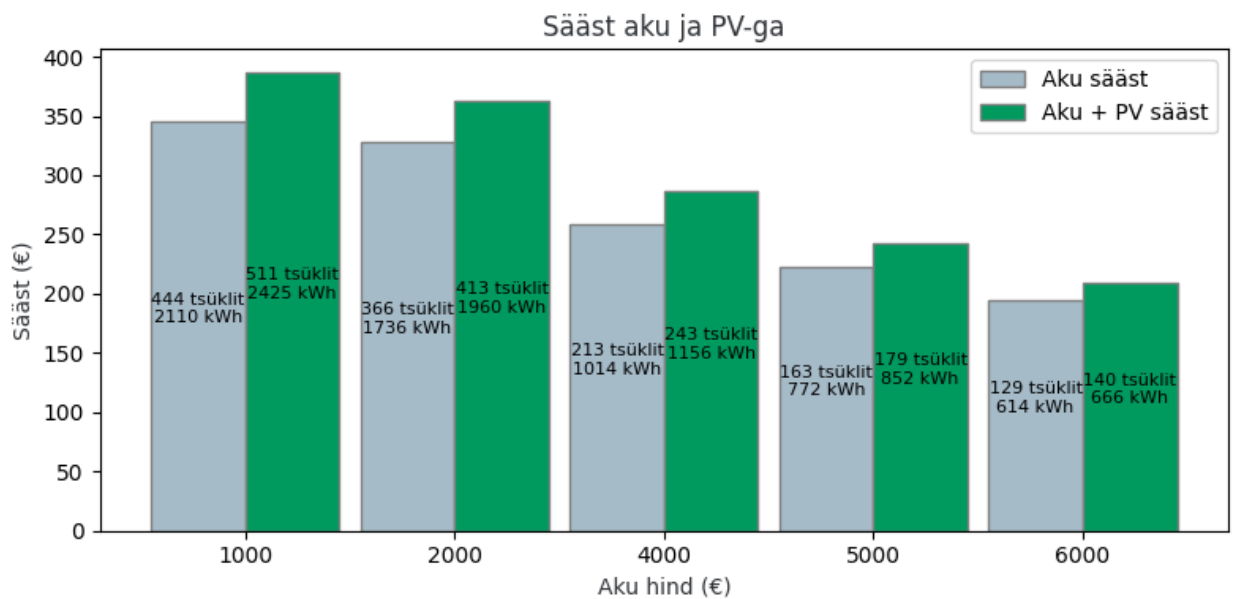
Selles peatükis uurime, kuidas erinevad akude hinnad mõjutavad aktiivsete tarbijate ja tootvate tarbijate käitumist energia tarbimisel ja haldamisel. Keskkel kohal on 5 kWh akud, mille tsüklite arv on 6500 ja

laadimis- ning tühjenemiskiirus 3 kWh. Analüüsi fookus on eriti suunatud sellele, kuidas aku hind mõjutab selle kasutust, majanduslikku tasuvust ja lõppkasutaja saavutatavaid sääste. Lisaks vaatleme ka süsteeme, kus lisaks akule kasutatakse 5 kWh suurust PV-paneeli.



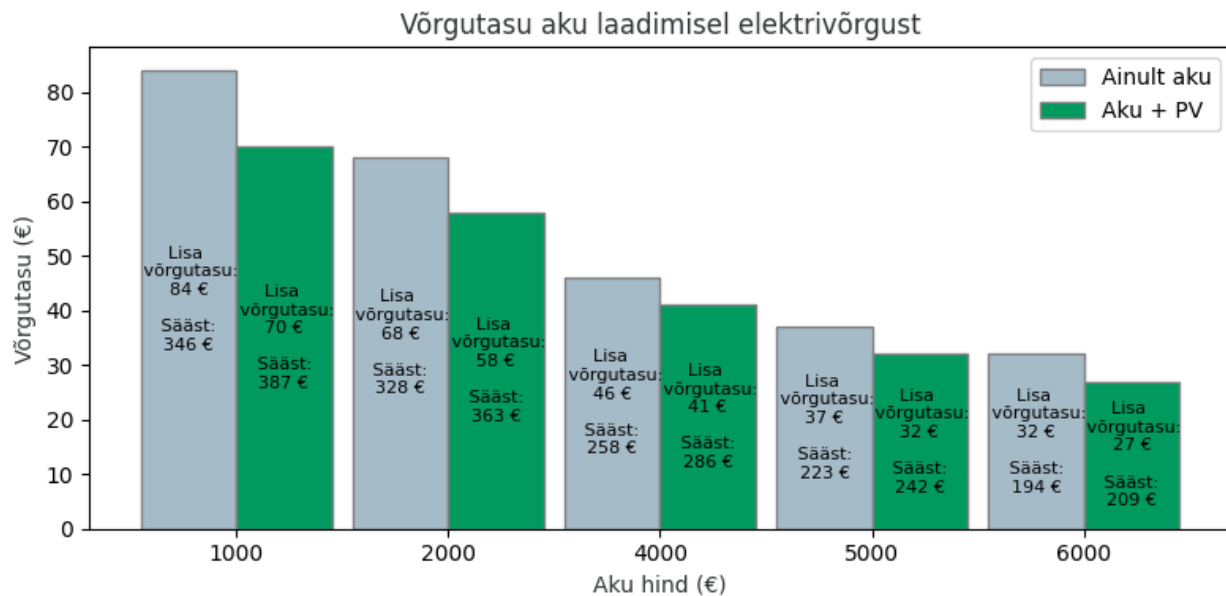
Joonis 39. Sääst akuga ja sääst aku ja PV-ga erinevate aku hindade juures. Tulpadel aastas tehtud tsüklite arv ja mitu kWh energiat on akusse salvestatud.

Jooniselt 40 on näha, et kui aku hind tõuseb, väheneb selle kasutus ning vastavalt ka saadavad säästud. Sama trend jätkub nii akuga süsteemides kui ka süsteemides, kus aku on kombineeritud PV-paneelidega. Süsteemid, kus on nii aku kui ka PV on säästnud ja aku leiab suuremat kasutust. Seda seetõttu, et PV-paneelide toodetud energiaülejääk salvestatakse akusse, mis hiljem, kõrgete elektrihindade ajal, kasutatakse ise või müüakse elektrivõrku. Sama analüüs on tehtud ka juhul, kui võrgutasu oleks nii ostes ja müües 0 €. Selle leiab lisast L.4.



Joonis 40. Sääst akuga ja sääst aku ja PV-ga erinevate aku hindade juures. Tulpapel aastas tehtud tsüklite arv ja mitu kWh energiat on akusse salvestatud.

Jooniselt 41 on näha, kuidas akusse salvestatava energia maht ja võrgutasud omavahel seostuvad. Aku hinna langus võimaldab sagedasemat akukasutust, mis tähendab rohkem võrgust elektri ostmist aku laadimiseks madala hinnaga hetkedel. Madalam aku hind võimaldab suuremat paindlikkust laadimisel, mis suurendab võrgutasusid, kuid pakub ka suuremaid kokkuhoiu võimalusi, eriti kui aku on integreeritud PV-süsteemiga.



Joonis 41. Võrgutasud aku laadimisel elektrivõrgust ja summaarne sääst.

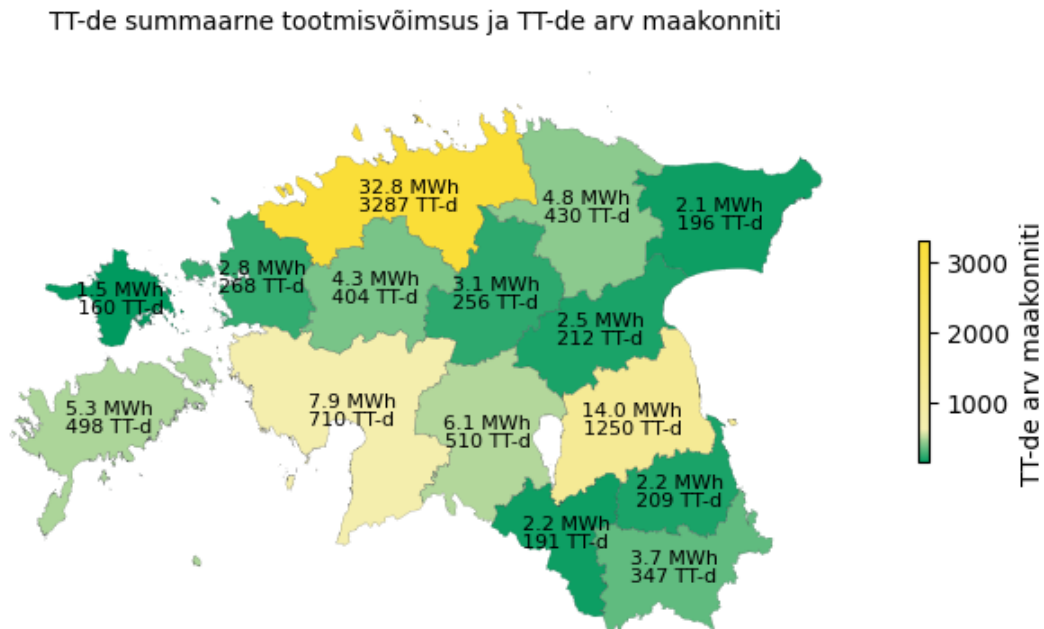
12. TT-de energia tootmise maakondlik profiil Eestis

Eesti maakondade TT-de energia tootmise maakondlik jaotus on esitatud joonistel 42 ja 43 ning tabelis 10. Need andmed annavad ülevaate tootmisvõimekusest ja TT-de arvust erinevates maakondades, tuues välja nii kogutootmisvõimekuse kui ka nende osakaalu maakonna elanikest.

Harju maakond paistab silma suurima tootvate tarbijate arvu ja tootmisvõimekusega. Kokku on seal 3287 TT-d, kelle kumulatiivne tootmisvõimekus ulatub 32.8 MWh-ni. Hoolimata suurest arvust ja tootmisvõimekusest, moodustavad TT-d Harju maakonnas vaid 0.5% kogu elanikkonnast, mis on üllatavalt madal võrreldes väiksema elanike arvuga maakondadega.

Hiiu maakond eristub kõrgeima TT-de osakaaluga, mis on 1.6% kogu elanikkonnast, kuigi tootmisvõimekus ja TT-de arv on märkimisväärselt väiksemad kui Harjumaal. Hiiu maakonna 160 TT-d genereerivad kokku 1.5 MWh, mis näitab kõrget proportsionaalset aktiivsust võrreldes elanike arvuga.

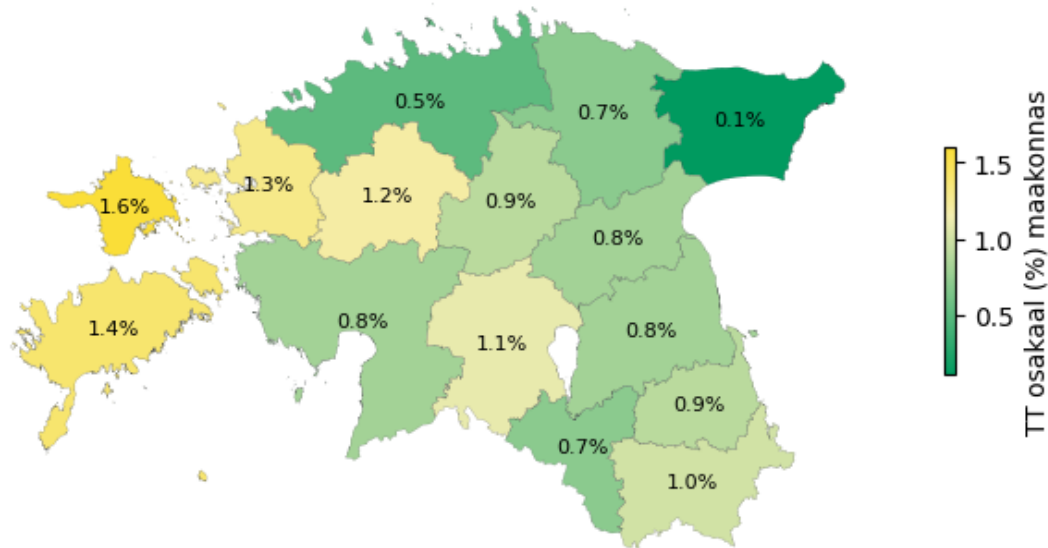
Joonis 42 illustreerib TT-de summaarset tootmisvõimekust (MWh) ja TT-de arvu eri maakondades, näidates selgelt, kuidas Harju maakond domineerib nii tootmisvõimekuse kui ka TT-de arvu poolest.



Joonis 42. TT-de summaarne tootmisvõimsus (MWh) ja TT-de arv eri maakondades.

Joonis 43 kujutab TT-de osakaalu protsentides maakonna elanike arvust, mis aitab mõista TT-de levikut ja mõju kohalikul tasandil.

TT-de osakaal maakonnasi



Joonis 43. TT-de osakaal maakonnas (%).

Tabelis 10 on esitatud ülevaade, kus on kombineeritud TT-de arv, liitumisvõimsus, elanike arv, TT-de osakaal elanikkonnast, aastane tootmine võrku ja aastane tarbimine võrgust. Enamikes maakondades on TT-de osakaal alla 1% elanikkonnast, välja arvatud mõnes väiksemas maakonnas nagu Hiiu, Lääne, ja Saare, kus see näitaja ületab 1%. Ehk arengupotentsiaali taastuenergia kasutuselevõttus on olemas igas maakonnas.

Tabel 10: TT-de summaarne tootmisvõimsus (MWh), osakaal elanikes (%), aastane tootmine võrku (GWh) ja aastane tarbimine võrgust (GWh)

Maakond	TT-de arv	Liitumisvõimsus (MWh)	Elanike_arv	TT-de osakaal (%)	Aasta tootmine (GWh)	Aasta tarbimine (GWh)
Harju	3287	32.8	640935	0.5	21.5	234.3
Hiiu	160	1.5	9758	1.6	1	11.4
Ida-Viru	196	2.1	131775	0.1	1.3	14
Järva	256	3.1	29818	0.9	1.7	18.2
Jõgeva	212	2.5	27902	0.8	1.4	15.1
Lääne	268	2.8	20827	1.3	1.8	19.1
Lääne-Viru	430	4.8	58792	0.7	2.8	30.6
Pärnu	710	7.9	87765	0.8	4.6	50.6
Põlva	209	2.2	24369	0.9	1.4	14.9
Rapla	404	4.3	33976	1.2	2.6	28.8

Saare	498	5.3	34549	1.4	3.3	35.5
Tartu	1250	14	159932	0.8	8.2	89.1
Valga	191	2.2	27926	0.7	1.2	13.6
Viljandi	510	6.1	45587	1.1	3.3	36.4
Võru	347	3.7	35006	1	2.3	24.7

Kokkuvõtvalt on näha, kuidas TT-de arv ja tootmisvõimekus varieeruvad maakonniti. Harju maakond on selge liider tootmisvõimekuse ja TT-de arvu poolest, kuid Hiiu ja teiste väiksemate maakondade kõrgem TT-de osakaal elanikkonna seas peegeldab aktiivset kohalikku osalemist taastuenergia kasutamisel.

Kokkuvõte

Eesti energiaturg on viimastel aastatel läbinud olulisi muutusi, peamiselt tänu taastuvenergia, eriti päikeseenergia, kasvavale osakaalule. Eleringi andmetel on päikeseenergia osatähtsus energiatootmises jõudsalt kasvanud, mis on kaasa toonud elektritootjate profiili mitmekesistumise alates suurtest põlevkivienergia tootjatest kuni väiksemahuliste päikesepaneelide kasutajateni.

Tootvad Tarbijad (TT)

2022 aasta seisuga oli Eestis registreeritud 8922 tootvat tarbijat, kes kokku tootsid võrku 60,93 GWh elektrienergia. Võrreldes 2021. aastaga, kui TT-d tarbisid 872 GWh, vähenes nende tarbimine 2022. aastal 665 GWh-ni. Selline tarbimise langus viitab uute päikeseпаркide rajamisele, kus on oluline rõhk on elektrienergia võrku müümisel ja omatarve on marginaalne. TT-d tarbivad keskmiselt 8% Eesti kogutarbimisest.

TT-de seas on levinuimad 5-10 kWh võimsusega päikesepaneelid, kuid märkimisväärne arv tarbijaid kasutab ka 10-15 kWh ja suurema võimsusega päikeseparke. Selline võimsuste jaotus näitab, et tootvad tarbijad panustavad oluliselt päikeseenergia sektori kasvu, kuid nende panus kogu energiatootmisesse jääb siiski tagasihoidlikuks. Tootvad tarbijad moodustavad alla 1% Eesti kogutoodangust, kuid nende osakaal päikeseenergia toodangust on umbes 12%.

Kuigi tootvad tarbijad panustavad märkimisväärselt päikeseenergia sektorisse ja omavad olulist osa energiatarbimisest, on nende mõju elektriturule üldiselt piiratud, kuid tõusuteel. TT-de suurenev arv ja võimekus omatarbimiseks viitavad sellele, et tulevikus võivad nad mängida suuremat rolli nii elektrienergia nõudluse stabiliseerimises kui ka energiavarustuse kindluses. Nende rolli tugevdamine nõuab aga jätkuvaid investeeringuid tehnoloogiasse ja infrastruktuuri, eriti seoses energiasalvestuslahendustega, mis aitaksid ühtlustada päikeseenergia varustust ja nõudlust.

Aktiivsed tarbijad (AT)

Eesti energiaturul on aktiivsete tarbijate (AT) arv aastatel 2021 ja 2022 vastavalt olnud 7078 ja 3320, mis moodustavad vastavalt 0.9% ja 0.4% kogu tarbimispunktidest. Vähenemine aktiivsete tarbijate arvus võib osutada muutustele turutingimustes või hinnatundlikkuse muudatustes. Aktiivsete tarbijate elektritarbimine moodustas 2022. aastal vaid 0.6% kogu riigi elektritarbimisest, ja nende tootmine oli veelgi väiksem, moodustades vaid 0.005% kogu elektritootmisest.

Meie meetodika kohaselt näitavad aktiivsed tarbijad küll hinnatundlikkust, kohandades oma tarbimist vastavalt elektrihindade kõikumistele, kuid see ei tähenda veel võimekust nihutada oma elektritarbimist ajaliselt. See viitab sellele, et kuigi aktiivsed tarbijad reageerivad hinnasignaalidele, ei pruugi neil olla piisavalt ressursse või tehnoloogiat, et oma tarbimist efektiivselt juhtida ja seeläbi elektrisüsteemi stabiilsusele või energiahindade alandamisele oluliselt kaasa aidata.

Kuigi aktiivsete tarbijate osakaal ja mõju Eesti elektriturul on hetkel suhteliselt väike, on nende käitumismuster oluline energiajuhtimise ja turudünaamika mõistmiseks. Nende väike osakaal tootmises ja tarbimises näitab, et laiemate ja süsteemsete muutuste saavutamiseks on vajalik suurem teadlikkus, paremad juhtimisvahendid ja tehnoloogilised uuendused. Energiasalvestustehnoloogiate ja nutikate

võrgulahenduste arendamine võib tulevikus võimaldada aktiivsetel tarbijatel oma tarbimist efektiivsemalt nihutada, aidates kaasa nii tarbimistippude silumisele kui ka energiasüsteemi üldisele tõhususele.

Kokkuvõttes on aktiivsete tarbijate praegune roll Eesti elektriturul piiratud, kuid nende potentsiaal süsteemi paindlikkuse ja efektiivsuse tõstmiseks on oluline.

Prognoosid Aastaks 2040

Töötati välja neli prognoosimudelit, mis prognoosivad TT-de arvu ja nende mõju Eesti elektriturule aastal 2040. Need prognoosid kajastavad tootvate tarbijate potentsiaalset kasvu ja nende mõju energia tootmisele ja tarbimisele, esitades erinevaid stsenaariume:

1. **Logistiline kasvumudel** ennustab 17102 tootvat tarbijat, tootmismahuks 111 GWh ja tarbimiseks 1219 GWh. See mudel näitab konservatiivsemat kasvutrendi.
2. **Bassi difusioonimudel** ennustab oluliselt suuremat kasvu, 30989 tootvat tarbijat, tootmise maht 287 GWh ja tarbimine 3135 GWh. See mudel peegeldab uute tehnoloogiate kiiremat omaksvõttu ja laiemat levikut.
3. **Richardsi kasvumudel** pakub prognoosiks 36587 tootvat tarbijat, tootmismahuks 238 GWh ja tarbimiseks 2607 GWh. See variant kajastab paindlikumat lähenemist kasvutrendidele.
4. **Gompertzi kasvumudel** on kõige optimistlikum, ennustades 43994 tootvat tarbijat, 202 GWh tootmist ja 2208 GWh tarbimist. See stsenaarium eeldab alguses aeglasemat, kuid seejärel kiirenevat kasvu.

Iga mudel illustreerib erinevaid tulevikustsenaariume, sõltuvalt eeldatavatest muutustest tehnoloogia levikus, turutingimustes ja poliitilises toetuses. Tootvate tarbijate arvu kasv mõjutab oluliselt nii tootmis- kui tarbimismustreid, suurendades energiaressursside hajutatust ja võib aidata kaasa üleminekule jätkusuutlikumale energiasüsteemile.

Tarbimistippude silumine akude ja päikeseenergiaga

Tarbimistippude silumine on oluline aspekt energiasüsteemi stabiilsuse tagamiseks ning energiahindade volatiilsuse vähendamiseks. Viimaste aastate trendid näitavad, et tarbimistippude maht on märkimisväärselt kasvanud: 2020. aastal oli tippude maht 75374 MWh, mis 2023. aastaks kasvas 105697 MWh-ni.

Päikeseenergia (PV) tootmine on samuti ajas kasvanud, kuid selle praegune suutlikkus katta tarbimistippe on piiratud. Päikesepaneelid suudavad teoreetiliselt katta umbes 63% tarbimistippudest, mis esinevad peamiselt päeval ajal ja eriti suvekuudel, kui päikesevalgust on rohkem. Seevastu talvekuudel ja vähese päikeseega perioodidel on päikeseenergia panus tipukoormuse maandamisel väga piiratud.

Tootvate tarbijate (TT) praegune võimekus siluda tarbimistippe on veelgi piiratum, moodustades alla 8% tipptarbimise mahust. See osutab vajadusele laiendada silumisvõimalusi, et tulla toime suurenevate koormustippudega, eriti madala päikeseenergia tootmise perioodidel.

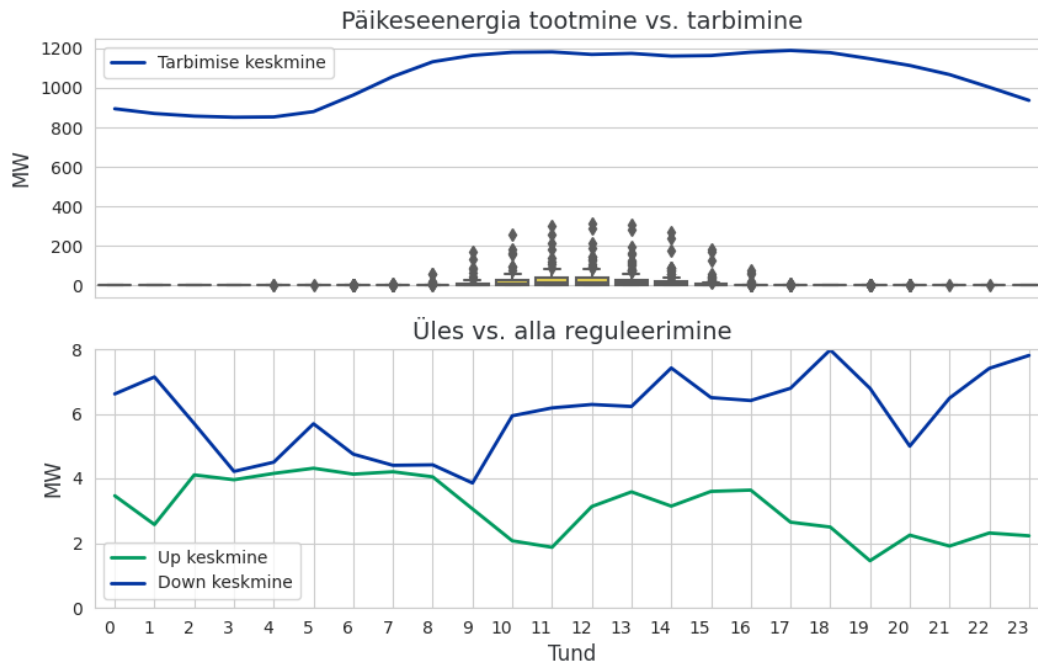
Tarbimistippude efektiivseks silumiseks on hädavajalik kasutada akusid ja muid energiasalvestus-tehnoloogiaid. Akutehnoloogia võimaldab salvestada energiat kõrge tootmise hetkedel, et seda kasutada

madalama tootmise või kõrge nõudluse perioodidel. See on eriti kriitiline talvekuudel ja teistel vähese päikesevalgusega aegadel.

Aku hinna mõju tarbimise juhtimisele

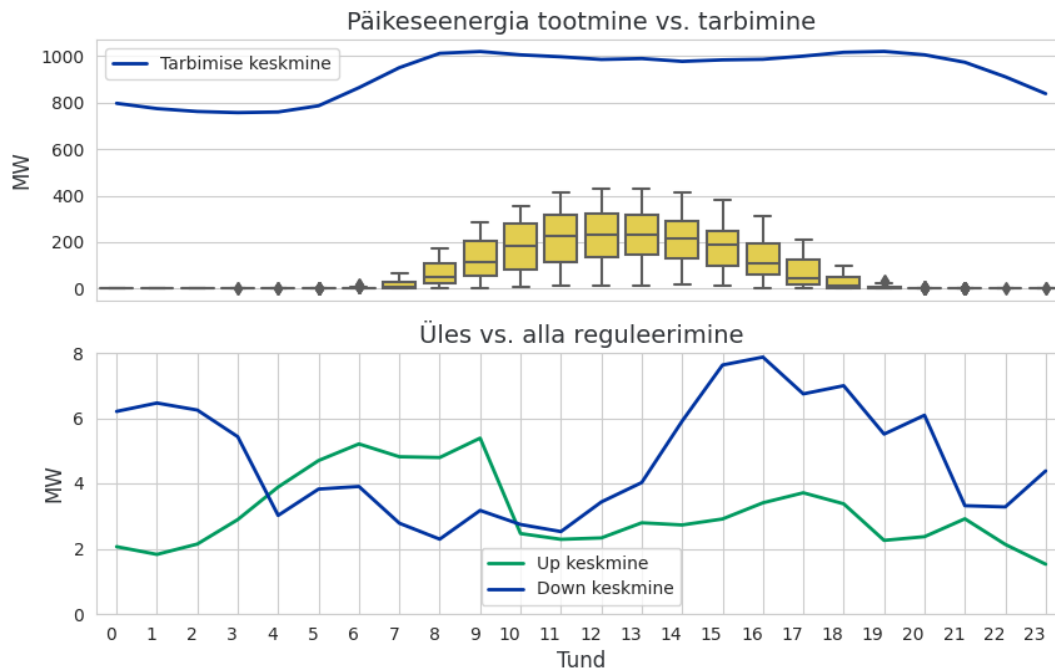
Ilmneb, et aku hind on kriitiline tegur, mis mõjutab nii aku kasutust, investeeringu tasuvust kui ka lõppkasutajate saavutatavaid sääste. Odavamad energiasalvestuslahendused võivad märkimisväärselt suurendada aktiivsete ja tootvate tarbijate võimet juhtida oma tarbimist, võimendades seeläbi nende panust elektrisüsteemi stabiilsusesse.

L.1 Talvekuude tarbimise ja PV tootmise dünaamika



L.1: Ülemine - talvekuude tarbimise ja PV tootmise dünaamikat; alumine - sageduse haldamiseks tehtud üles- ja allareguleerimiste keskmised mahud.

L.2 Kevade ja sügiskuude tarbimise ja PV tootmise dünaamika



L.2: Ülemine - kevade ja sügiskuude tarbimise ja PV tootmise dünaamikat; alumine - sageduse haldamiseks tehtud üles- ja allareguleerimiste keskmised mahud.

L.3 Aku juhtimise simulatsiooni mudel

Aku juhtimismudeli sisendid

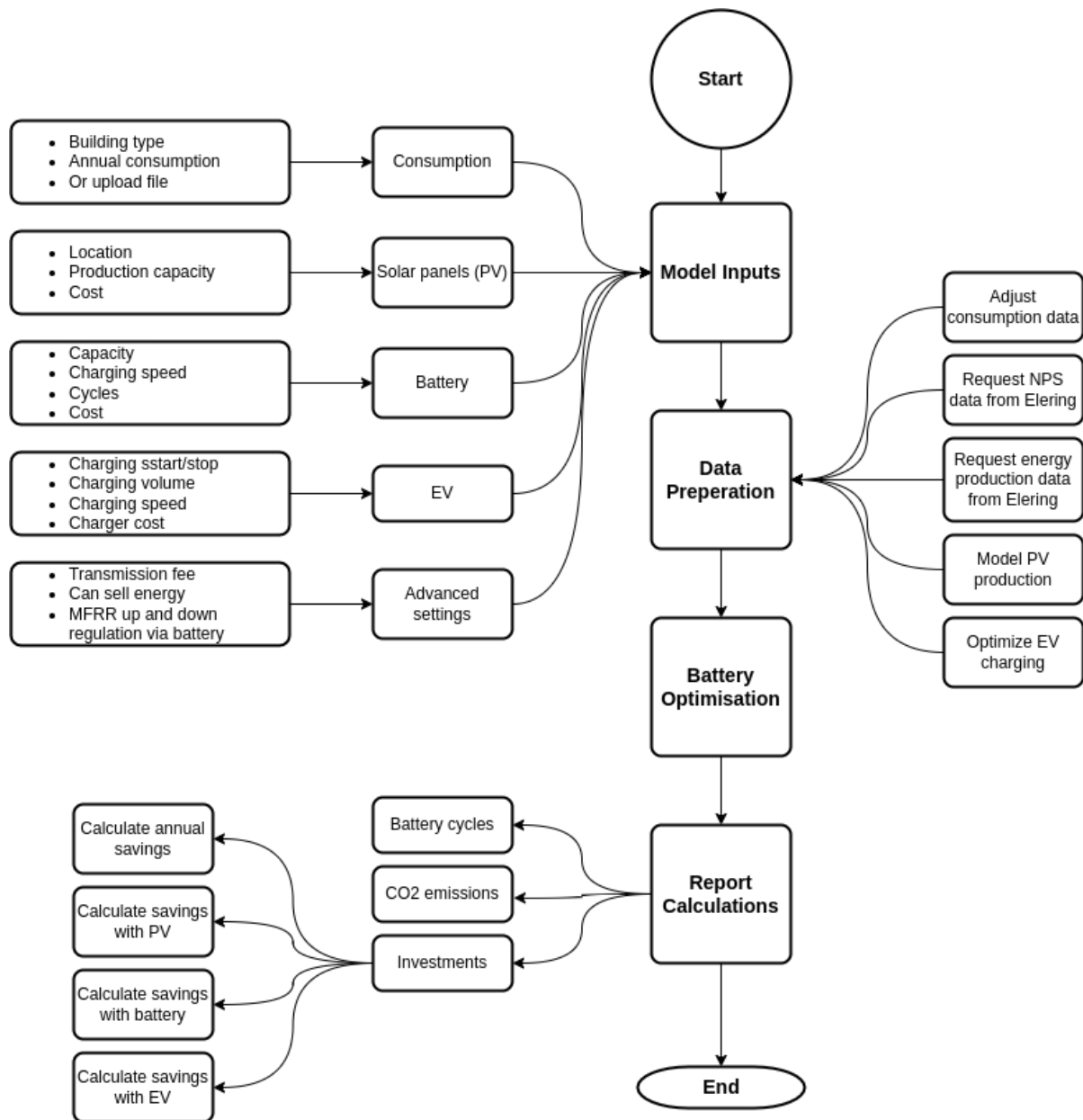
- **Tarbimine:** Statistikaameti klasterdatud andmestikust TT-de keksmine tarbimisprofiil ja aastaringsest kasutuses olevate hoonete keskmine tarbimisprofiil.
- **Päikesepaneelid (PV):** paneelide maksimaalse võimsuse ning maksumus, et hinnata tootmist ja investeringute tasuvust.
- **Aku:** aku mahutavus, laadimiskiirus, tsüklite arv ja maksumus.
- **Elektrisõiduk (EV):** süsteemi on integreeritud kodulaadija. läbiviidud simulatsioonides seda ei kasutatud.
- **Muud parameetrid:** võrgutasud, avalike laadimispunktide elektrienergia hind, elektri müügi võimalikkus võrku.

Andmete ettevalmistamine

- NPS andmete ja energia tootmise päringud Eleringist vaadeldava perioodi kohta.
- PV tootmise modelleerimine asukoha ja ilmaprognooside põhjal vaadeldava perioodi jaoks.

Aku optimeerimine

- Mudel optimeerib aku kasutust, arvutades, millal energiat salvestada ja millal kasutada/müüa, et saavutada suurim sääst.
- Mudel arvutab strateegia iga päev iseseisvalt, tuginedes järgmise päeva NPS elektrihindadele.

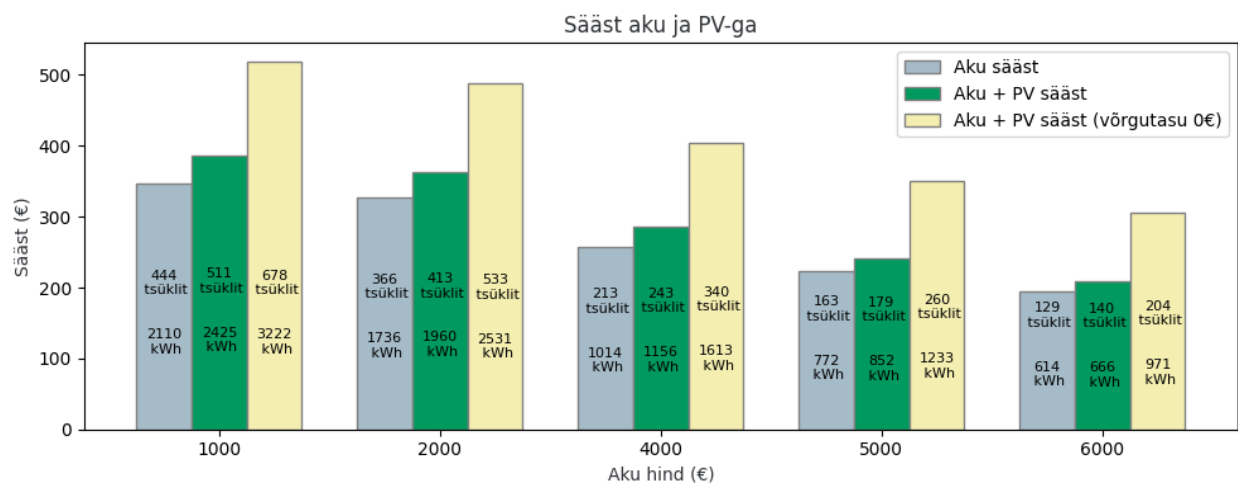


L.3: Aku kasutuse optimeerimis protsessi loogika

L.4 Aku hinna mõju ja võrgutasud

Võrgutasude elimineerimine võimaldab tarbijatel aktiivsemalt ja paindlikumalt hallata oma energiavarusid, kuna energia ostmine võrgust madala hinnaga hetkedel ja selle salvestamine akusse ei too kaasa lisakulusid. Samuti ei kaasne kulutusi energia müümisel võrku kõrgema nõudluse ja hinnaga perioodidel, mis muudab akusüsteemide kasutamise majanduslikult atraktiivsemaks.

- Akude kasutamise suurenemine võrgutasude puudumisel on märkimisväärne, kuna energiat on võimalik ladustada ja kasutada ilma lisakuludeta, suurendades süsteemi tõhusust.
- Energiatarbimise efektiivsem juhtimine ja optimeerimine tähendab suuremaid sääste tarbijatele. Suuremad säästud on saavutatavad tänu sellele, et energiat saab koguda soodsatel hetkedel ja kasutada või müüa, kui see on kõige kasulikum.



L.4: Sääst akuga, sääst aku ja PV-ga ja sääst aku ja PV-ga ilma võrgutasudeta, erinevate aku hindade juures. Tulpadel aastas tehtud tsüklite arv ja mitu kWh energiat on akusse salvestatud.