EESTI MAAÜLIKOOL
Metsanduse ja inseneeria instituut

Marius Pihlak

SALVESTUSSEADMETE MÕJU ELAMU ENERGIAVARUSTUSELE

THE IMPACT OF STORAGE DEVICES ON RESIDENTIAL ENERGY SUPPLY

Magistritöö
Energiakasutuse õppekava

Juhendajad: professor Andres Annuk, *PhD*

Tartu 2024

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51006		Magistritöö lühikokkuvõte	
Autor: Marius Pihlak		Õppekava: Energiakasutus	
Pealkiri: Salvestusseadmete mõju elamu energiavarustusele			
Lehekülgi: 61	Jooniseid: 14	Tabeleid: 4	Lisasid: 3
Osakond / Õppetool: Energiakasutuse õppetool ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: 4. Loodusteadused ja tehnika 4.17. Energeetikaalased uuringud T140 Energeetika Juhendajad: professor Andres Annuk, *PhD* Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2024			

Eesti suurendas vahesammuna kliimaneutraalsuse suunas oma 2030. a kliimaeesmärki, kohustudes vähendama heitkoguseid nimetatud aastaks vähemalt 55 % (seni plaanitud 40 % asemel) [7]. Päikeseenergia on üheks stohhastilise elektrienergia liigiks, mis on saadud küll kliimaneutraalselt taastuvenergiaallikatest, kuid varustuskindluse seisukohast pole tegu jätkusuutliku ja turunõudlust stabiilselt rahuldava lahendusega. Päikeseenergia optimaalseks kasutamiseks on eelduslikult otstarbekaim viis kasutada akupankasid.

Euroopa Komisjon on hinnanud, et 2030. aastaks on Euroopa Liidu liikmesriikides vaja 94 GW ulatuses elektrienergia salvestusvõimsusi, millest enamik tuleb ehitada [6]. Üheks arvestatavaks võimaluseks on kaasata selle eesmärgi täitmisele kodumajapidamistes kasutatavaid energia salvestusvõimsusi. See aga eeldab energia salvestusseadmete majanduslikku tasuvust. Käesoleva töö eesmärk on analüüsida kehtivaid toetusmeetmeid arvestades energia salvestusseadmete kasutamise majanduslikku tasuvust keskmise kodumajapidamise näitel ja leida vastus küsimusele, kas tänastes oludes on keskmisele majapidamisele mõistlik soetada päikeseenergia salvestusseadmed.

Antud töö raames uuriti modelleerimistarkvaraga Homer Grid hoone elektrivarustuse stabiilsuse saavutamiseks akupanga lisamist hoonele energiavarustusele, eelkõige selle majanduslikku tasuvust. Akupanga lisamine aitaks ka lahendada elektrivõrgu stabiilsuse probleeme lühiajaliste voolu katkestuste näol.

Tasuvuskalkulatsiooni teostamiseks sisestati Homer Gridi 2023 aasta reaalne eramu elektrienergia tarbimise andmed. Uuritava projekti referentselueaks valiti akupanga keskmisele elueale vastavalt kümme aastat. Modelleerimiseks teostati neli simulatsiooni: tarbimine ainult võrgust, tarbimine võrgust + PV paneelid, tarbimine võrgust + akupank ning tarbimine võrgust + PV paneelid + akupank. Töös esitatud arvestuste alusel ei olnud akupanga paigaldamine tänaste toetusmeetmete raames majanduslikult tasuv üheski nimetatud simulatsioonis. Seega, kui vaadelda ainul majanduslikku aspekti ja välja jätta nn maailma päästmine, kliimaneutraalsus jms, siis ei tasu akupank ennast kümne aastaga ära. Siit järeldub, kui riik soovib kodumajapidamisi kaasata kliimaneutraalsuse eesmärkide saavutamisse, tuleks senisest läbimõeldumalt kavandada vastavas osas maksu- või toetusmeetmeid.

Märksõnad: kliimaneutraalsus, päikeseenergia, tasuvus, BYD akupank, Homer Grid

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51006		Abstract of Master's Thesis	
Author: Marius Pihlak		Curriculum: Energy Application Engineering	
Title: The Impact of Storage Devices on Residential Energy Supply			
Pages: 61	Figures: 14	Tables: 4	Appendixes: 3

Department / Chair: Chair of Energy Application Engineering
Field of research and (CERC S) code: 4. Natural Sciences and Engineering
4.17. Energetic Research
T140 Energy research
Supervisors: professor Andres Annuk, *PhD*
Place and date: Tartu 2024

As an intermediate step towards climate neutrality, Estonia has increased its 2030 climate target, committing to reduce emissions by at least 55% by that year (instead of the previously planned 40%) [7]. Solar energy is one type of intermittent electrical energy that is obtained from climate-neutral renewable energy sources, but from the perspective of supply security, it is not a sustainable solution that can consistently meet market demand. The most effective method to optimally use solar energy is presumably battery banks.

The European Commission has estimated that by 2030, EU member states will need 94 GW of electrical energy storage capacity, most of which will need to be built [6]. One viable option to achieve this goal is to involve household energy storage capacities. However, this requires the economic feasibility of energy storage devices. This study aims to analyze the economic feasibility of using energy storage devices in an average household, considering the current support measures, and to answer the question of whether it is reasonable for an average household to acquire solar energy storage devices under today's conditions.

In this study, the software Homer Grid was used to investigate the addition of a battery bank to a building to achieve stability in the building's electricity supply, particularly its economic feasibility. Adding a battery bank would also help solve the stability problems of the electrical grid in the event of short-term power outages.

To perform the cost-benefit calculation, real household electricity data for 2023 was entered into Homer Grid. The project's lifespan under investigation was chosen to correspond to the average lifespan of a battery bank, which is ten years. Four simulations were carried out for modeling: consumption only from the grid, consumption from the grid + PV panels, consumption from the grid + battery bank, and consumption from the grid + PV panels + battery bank. According to the calculations presented in the study, installing a battery bank was not economically feasible in any of the mentioned simulations under the current support measures. Therefore, a battery bank does not pay off within ten years if we only consider the economic aspect and exclude factors like saving the world, climate neutrality, etc. This implies that if the state wishes to involve households in achieving climate neutrality goals, more thoughtful planning of tax or support measures in this area are necessary.

Keywords: climate neutrality, solar energy, feasibility, BYD battery storage, Homer Grid

SISUKORD

TÄHISED JA LÜHENDID 7

SISSEJUHATUS 8

1. SALVESTUSSEADMETE MÕJU KLIIMANEUTRAALSELE JA ELEKTRIVARUSTUSKINDLUSELE 10

1.1 Globaalse kliimaneutraalsuse mõju 10

1.2. Eesti panus kliimaneutraalsuse saavutamisel 11

2. ELEKTRIENERGIA SALVESTUSSEADMED 13

2.1. Kodutarbimises kasutatavad elektrokeemilised salvestusseadmed 13

2.1.1. Akude olulised näitajad 14

2.1.2. Pliiakud 15

2.1.3. Liitiumioonakud 16

2.1.4. Nikkelkaadmium (Ni-Cd) akud 22

2.1.5. Naatriumioon (Na-ioon) akud 22

2.2. Kodutarbimises kasutatavad optimaalsed elektrokeemilised salvestusseadmed 23

2.2.1 Finantseerimis võimalused 26

3. ELEKTRIENERGIA VARUSTUSKINDLUS 28

3.1. Varustuskindlus 28

3.2. Elektrivõrk ja jaotusvõrk 30

3.3. Katkestused 31

4. SALVESTUSSEADME MÕJU ELAMU ELEKTRIVARUSTUSELE, KASUTADES HOMER GRID TARKVARA 33

4.1. Töös kasutatud näite lähteandmed 33

4.2. Töös kasutatud näite optimeerimisvahend Homer Grid. 36

4.2.1. Simulatsioon 37

4.2.2. Optimeerimine 37

4.2.3. Tundlikkusanalüüs 37

4.3. Töös kasutatud näitele sobiv akupank. 38

4.3.1. Simulatsiooni modelleerimine 38

4.3.2 Maksimaalse laadimisvõimsuse arvutus 44

4.3.3 Maksimaalse tühjenemisvõimsuse arvutus 45

KOKKUVÕTE 47

KASUTATUD KIRJANDUS 49

LISAD 53

Lisa 1. Kostal Plenticore plus 10 tooteleht 54

Lisa 2. BYD akupanga tooteleht 59

Lisa 3. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta 61

TÄHISED JA LÜHENDID

DoD – aku tühjenemissügavus
LAB – pliiaku
LCO – liitium-koobaltoksiid aku
LFP – liitium-raudfosfaat aku
LIB – liitiumioonaku
LMO – liitium-mangaandioksiid aku
LTO – liitiumtitaan aku
NCA – liitium nikkel koobalt alumiinium aku
PHS – pump hüdro-akumulatsioonijaam
PV – päikesepaneelidega elektrienergia süsteem
REKK 2030 – Eesti riiklik energia ja kliimakava aastani 2030

SISSEJUHATUS

2015. a detsembris sõlmitud Pariisi kokkuleppe artikli 2 lõike 1 punkti a kohaselt on kokkuleppe peamiseks ja ühtlasi ainsaks mõõdetavaks eesmärgiks hoida ülemaailmse keskmise temperatuuri tõusu tuntavalt allpool 2 °C juures võrreldes tööstusrevolutsioonieelse tasemega ning püüdes piirata temperatuuri tõusu 1,5 kraadini võrreldes tööstusrevolutsioonieelse tasemega [3].

Vabariigi Valitsuse 10. augustil 2023. a istungi protokollilise otsusega kiideti heaks „Eesti riiklik energia- ja kliimakava aastani 2030 ajakohastatud versiooni kavandi esitamine Euroopa Komisjonile" (edaspidi *REKK 2030*). REKK 2030 on teatis, mis on koostatud täitmaks Euroopa Liidu energialiidu ja kliimameetmete juhtimise määruse (EL) 2018/1999 artikli 3 lõikes 1 sätestatud nõuet iga kümne aasta järel Euroopa Komisjonile esitada riiklik energia ja kliimakava [5].

Euroopa Komisjon on hinnanud, et 2030. aastaks on Euroopa Liidu liikmesriikides vaja 94 GW ulatuses elektrienergia salvestusvõimsusi, millest enamik tuleb ehitada [6]. Kodune akudega elektri salvestamine on nt Kesk-Euroopas suhteliselt levinud lahendus koos PV paneelidega. Sama tendentsi võib seoses energiahindade tõusuga täheldada ka Eestis. [10] Käesoleva töö eesmärk on analüüsida kehtivaid riiklikke toetusmeetmeid arvestavalt energia salvestusseadmete kasutamise majanduslikku tasuvust keskmise kodumajapidamise näitel.

Käesolev töö ei pretendeeri Vabariigi Valitsuse ega Euroopa Komisjoni eelnimetatud eesmärkide saavutamise kõikehõlmavale hindamisele, vaid leiab vastus küsimusele, kas Eesti keskmisel majapidamisel tasub kehtivaid toetusmeetmeid arvestades majanduslikult panustada nende eesmärkide täitmisse ja kui tasub, kas see on ühtlasi elektri jaotusvõrgu huvidest lähtuvalt mõistlik.

Arvestades, et keskmine majapidamine asub tiheasustatud alal, on majapidamise panust kliimaneutraalsuse saavutamiseks arvestatud päikeseenergia kasutamisena. Päikeseenergia

optimaalseks kasutamiseks on eelduslikult otstarbekaim viis kasutada akupankasid. Nii antakse käesolevas töös ülevaade enimlevinud elektrisalvestusseadmetest, võrreldes nende füüsikalis-keemilisi omadusi, tuvastamaks optimaalseim salvestusseade kodumajapidamise jaoks. Järgnevalt analüüsitakse elektrisüsteemi käitamise seisukohast salvestusseadmete mõju olulisust, tuues välja aktuaalsed kriitilised probleemid ning esitatakse arvutusliku näite pinnalt keskmise eramajapidamise majandusliku huvi põhjendatus panustada kehtivaid toetusmeetmeid arvestades läbi elektrienergia salvestusseadmete elektrisüsteemi opereerimisse.

Antud töö raames uuriti modelleerimistarkvaraga Homer Grid hoone elektrivarustuse stabiilsuse saavutamiseks akupanga lisamist hoonele, eelkõige majanduslikku tasuvust. Projekti elueaks valiti akupanga keskmisele elueale vastavalt kümme aastat. Modelleerimiseks teostati neli simulatsiooni: tarbimine ainult võrgust, tarbimine võrgust + päikesepaneelid, tarbimine võrgust + akupank ning tarbimine võrgust + päikesepaneelid + akupank. Töös leitakse vastus küsimusele, kas ja millised toodud simulatsioonide alusel toimunud rahalised arvestused on majanduslikult tasuvad, jättes kõrvale keskkonnakaitselised aspektid.

1. SALVESTUSSEADMETE MÕJU KLIIMANEUTRAALSELE JA ELEKTRIVARUSTUSKINDLUSELE

1.1 Globaalse kliimaneutraalsuse mõju

Kliimamuutuste põhjused on nii looduslikud kui inimtekkelised. Kliima muutumist põhjustavad paljud erinevad tegurid: maailmamere ja atmosfääriringluse koosmõju, elusorganismide mõju atmosfäärile, Maa orbiidi tsüklilised muutused ajas, päikese aktiivsuse muutlikkus jne [1].

Kivisüsi, nafta, maagaas ning teised süsinikupõhised kütused annavad majanduse arengule tugeva tõuke, kuid nende põletamisel eraldub olulisel määral heitgaase. Kliimamuutuste kontekstis on kõige enam räägitud süsihappegaasist ehk CO_2, süsinikdioksiidist, kuna see on Maa atmosfääris veeauru järel kõige enam levinud kasvuhoonegaas. Süsihappegaas on ka kõige olulisem inimtegevuse tagajärjel tekkinud kasvuhoonegaas. Süsihappegaasi kontsentratsioon on küll tõusnud ja langenud juba miljoneid aastaid, kuid Maa ajaloos ei ole teada ühtegi teist nii äkilise soojenemise perioodi. Enamik teadlasi on ka seisukohal, et tänaste enneolematult kiiretes kliimamuutustes on inimesel oluliselt suurem roll kui mistahes looduslikel põhjustel. Muutuste peamine ajend ongi heitgaaside paiskamine atmosfääri – lisaks CO_2-le on märkimisväärse mõjuga ka metaan (CH_4), dilämmastikoksiid (N_2O) ning fluoreeritud gaasid (F-gaasid). Kõiki kliimamuutuseid tekitavaid gaase kokku nimetatakse kasvuhoonegaasideks. Kasvuhoonegaaside mõju atmosfäärile nimetatakse omakorda kasvuhooneefektiks.[1] Kasvuhooneefekt on looduslik ilming, mis on hädavajalik maakera elustikule. Kui soojus kiirguks maapinnalt takistuseta tagasi kosmosesse, siis maakera keskmine temperatuur oleks –18 °C olemasoleva +15 °C asemel. Kogu maakera oleks siis kaetud jääga ja eluks kõlbmatu [2].

Kuna kasvuhoonegaaside ulatuslikuma mõju aluseks oli 18. sajandi lõpus ja 19. sajandil toimunud tööstusrevolutsioon, siis on kliimamuutuste neutraliseerimiseks loodud õiguslikud allikad võtnud nn nullpunktiks kliima seisukorra enne tööstusrevolutsiooni. 2015. a detsembris sõlmitud Pariisi kokkuleppe artikli 2 lõike 1 punkti a kohaselt on kokkuleppe

peamiseks ja ühtlasi ainsaks mõõdetavaks eesmärgiks hoida ülemaailmse keskmise temperatuuri tõusu tuntavalt allpool 2 °C juures võrreldes tööstusrevolutsioonieelse tasemega ning püüdes piirata temperatuuri tõusu 1,5 kraadini võrreldes tööstusrevolutsioonieelse tasemega. Seejuures tunnistades, et see vähendaks märkimisväärselt kliimamuutustega seotud riske ja mõjusid. Tegu on esimese ülemaailmse kokkuleppega, mis on sõlmitud eesmärgiga vähendada inimtekkelise kasvuohoonegaaside mõju atmosfäärile. Eesti ratifitseeris Pariisi kokkuleppe 2016. aastal [3].

Pariisi kokkuleppe olulisuse võib jaotada kolmeks. Esiteks märgiline ülemaailmne tähendus, mis kaasneb esimesele kliimakaitsmise leppele. Teiseks konkreetse mõõdiku seadmine temperatuuri aktsepteeritava tõusu piirsummana ning kolmandaks kohustus liikmesriikidel astuda selle eesmärgi saavutamiseks konkreetseid samme nii siseriiklikult kui arenguriike aidates (nt artikli 4 lg-d 2 ja 5).

1.2. Eesti panus kliimaneutraalsuse saavutamisel

Euroopa Liit ja Eesti on seadnud sihiks saavutada kliimaneutraalne majandus aastaks 2050. Nimetatud eesmärgiks võttis Euroopa Komisjon 2019. a detsembris vastu Euroopa roheline kokkuleppe. Tegu on komisjoni poliitikaalgatuste paketiga, mis aitab Euroopa Liidul minna üle rohelisele majandusele, mille lõppeesmärk on kliimaneutraalsuse saavutamine 2050. aastaks. [4]

Eestile on kombeks olla teistest usinam. Nii on ka kliimaneutraalsuse saavutamisega. REKK 2030 on teatis, mis on koostatud täitmaks Euroopa Liidu energialiidu ja kliimameetmete juhtimise määruse (EL) 2018/1999 artikli 3 lõikes 1 sätestatud nõuet iga 10 aasta järel Euroopa Komisjonile esitada riiklik energia ja kliimakava [5]. REKK 2030 kohaselt suurendas Eesti vahesammuna kliimaneutraalsuse suunas oma 2030. a kliimaeesmärki, kohustudes vähendama heitkoguseid nimetatud aastaks vähemalt 55 % (seni plaanitud 40 % asemel) võrreldes 1990. aastaga [6]. Seni on Euroopa Liit vähendanud kasvuhoonegaaside heitkoguseid 31 %. Energiamajanduse korralduse seaduse kohaselt peab aastaks 2030 elektrienergia summaarsest lõpptarbimisest moodustama taastuvenergia 100 %. Seega põlevkivist elektrienergia tootmine väheneb järkjärgult samal ajal tagades teatud ulatuses juhitavate tootmisvõimsuste olemasolu.

Põlevkivi kasutamise vähendamisel on oluline roll nii taastuvenergia kasutuselevõtmisel kui ka salvestustehnoloogiate arendustel. Vabariigi Valitsuse 2023–2027. a tegevusprogrammi kohaselt on kavandatud pöörata tähelepanu taastuvenergeetikaga proportsioonis salvestusvõimsuste rajamisele [6].

2. ELEKTRIENERGIA SALVESTUSSEADMED

2.1. Kodutarbimises kasutatavad elektrokeemilised salvestusseadmed

Euroopa Komisjon on hinnanud, et 2030. aastaks on Euroopa Liidu liikmesriikides vaja 94 GW ulatuses elektrienergia salvestusvõimsusi, millest enamik tuleb ehitada. Samas tuleb nii sellesse kui ka mis tahes teise elektrienergia salvestusvajaduse prognoosi suhtuda ettevaatlikult, kuna salvestusvajaduse tegelik ulatus sõltub väga erinevatest asjaoludest ja teguritest, sh fossiilsete tootmisvõimsuste sulgemise tegelikust ajagraafikust, salvestushinna alanemisest ning selle võrdlusest näiteks uute ülekandeliinide hinnaga [7].

Üheks võimalikuks viisiks elektrienergia salvestamiseks on mehaaniline energiasalvestus. Näiteks hürdo-akumulatsioonijaama (PHS) tööpõhimõtteks on pumbata vett kõrgemal asuvasse reservuaari, kus energia taaskasutamiseks lastakse vesi läbi hüdroturbiini alumisse veehoidlasse tagasi [8]. Hetkel on Energiasalv Pakri OÜ poolt arendatav 500MW PHS Paldiskisse. Elektrienergia salvestuse valdkonnas moodustavad terve maailma salvestusvõimsusest hüdro-akumulatsioonijaamad 97 % [28]. Teisteks mehaanilisteks salvestamisvõimalusteks on ka suruõhk- ja hooratasenergiasalvestid. Kuna eelnimetatud lahendused ei ole levinud eramute energiasalvestus viisidena, keskendun käesolevas töös elektrokeemilistele salvestitele [9].

Kodune akudega elektri salvestamine on nt Kesk-Euroopas suhteliselt levinud lahendus koos päikesepaneelidega. Sama tendentsi võib seoses energiahindade tõusuga täheldada ka Eestis. Elektriautode võimaliku levikuga tulevikus on võimalik ka elektriautode akusid kasutada elektri salvestina, mis on ühendatud elektrivõrguga [9].

Akud on elektrokeemilised seadmed, mis muudavad keemilise energia elektrienergiaks. Akud koosnevad mitmest elemendist, millest igaühel on kolm põhikomponenti: kaks elektroodi, anood ja katood, ning neid eraldav elektrolüüt. Akud jagunevad laias laastus kaheks: primaarsed ja sekundaarsed. Primaarakud on ette nähtud ühekordselt kasutatavateks

akudeks, kuna pärast tarbimist ei saa neid uuesti laadida. Neid nimetatakse ka patareideks. Teised akud seevastu on mõeldud laadimiseks. [10]

Sekundaarsed akud liigitatakse sõltuvalt aku materjalist plii-happe - (LAB), liitiumioon - (Li-), nikkelkaadmiumi- (Ni-Cd), naatriumväävli- (NaS), naatriumioon- (Na-ioon) ja muud arendusjärgus elektrienergia salvestid [10].

2.1.1. Akude olulised näitajad

Aku mahtuvuseks nimetatakse tema energia salvestusvõimet. Seda mõõdetakse kilovatt-tundides (kWh) või ka ampertundides (Ah) ja näitab, kui suurt kogust elektrienergiat aku salvestada suudab. Näiteks kui eramu energiavajadus on umbes 1 kW tunnis, siis kestaks 10 kWh mahutavusega aku umbes 10 tundi. Enamike eramute energiavajaduseks ongi sobiv 10 kWh mahutavusega aku [11].

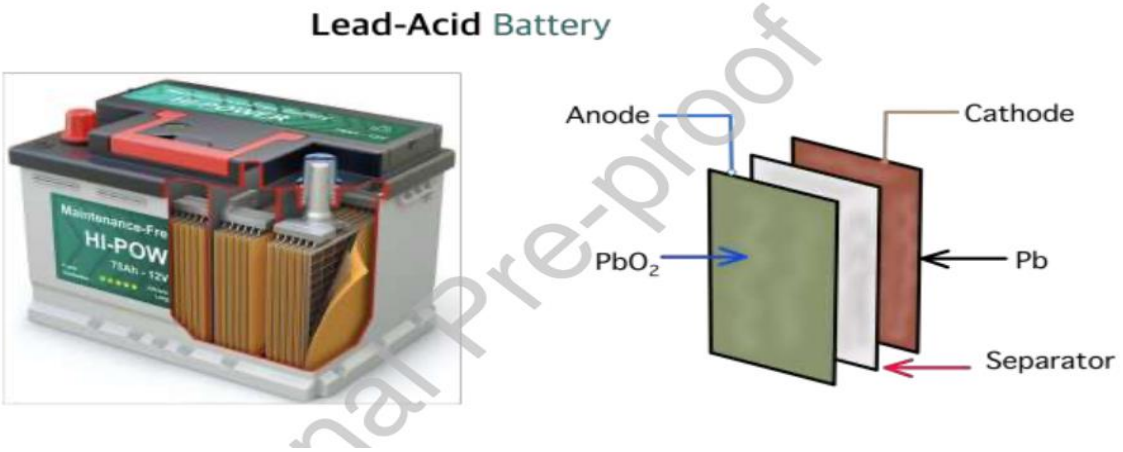
Aku väljundvõimsus näitab, kui palju ja milliseid seadmeid aku samaaegselt elektritoitega varustada suudab ehk see on maksimaalne võimsus, mida aku on võimeline korraga välja andma ja mõõdetakse kilovattides (kW) [11]. Täna turul pakutavatest akudest enamikud on kuni 5 kW väljundvõimsusega. Tegu on olulise faktoriga, eriti kui samaaegselt on vaja toita mitmeid suure võimsusega elektriseadmeid.

Aku laadimistsükli efektiivsus näitab, kui palju elektrit on kasutamiseks saadaval pärast aku täislaadimist. Tegu on energiaringe kasuteguriga. Inverteri kasutamisel ja akusse salvestamisel läheb alati mingi osa energiast kaduma. Mida suurem on see protsendimäär, seda vähem elektrienergiat läheb salvestamise käigus kaduma. Pliiakudel on see enamasti 80–85 %, liitium-ioonakudel umbes 90–95 %. Kasulikum on kindlasti valida aku kõrgema laadimistsükli efektiivsusega. [11]

Aku tühjenemissügavus (lühend DoD, i.k *Depth of Discharge*) määrab akupanga mahu laadismistsüklite vahel. Kui aku tühjenemissügavus on 95–100 % (nagu näiteks liitium-ioon-akude puhul) tähendab see seda, et aku võib peaaegu täiesti tühjaks laadida, ilma et sellel oleks oluliselt negatiivne mõju aku elueale ja efektiivsusele. Pliiakusid ei soovitata alla 50 % tühjaks laadida [11].

2.1.2. Pliiakud

Pliiaku (Lead Acid battery - LAB) on kõige populaarsem ja vanim elektrokeemiline energiasalvesti (leiutatud 1859. aastal). 19. sajandi lõpupoole kasutati pliiakusid elektriautode toiteks, aga ka ooterežiimi akusid, et anda hädatoide elektrijaamade ja muude kriitiliste rajatiste olulistele lisaseadmetele. Pliiaku (joonis 2.2) koosneb kahest elektroodist, mis on sukeldatud elektrolüüti, mis koosneb 37 % väävelhappest ja 63 % veest. Mõlemad elektroodid on eraldatud poorse separaatoriga, mis väldib elektroodide kokku puutumist. [13] Tühjendustsükli ajal katab pliisulfaat mõlemad elektroodid ja elektrolüüt redutseeritakse veeks. Laadimise ajal naasevad mõlemad elektroodid algolekusse.



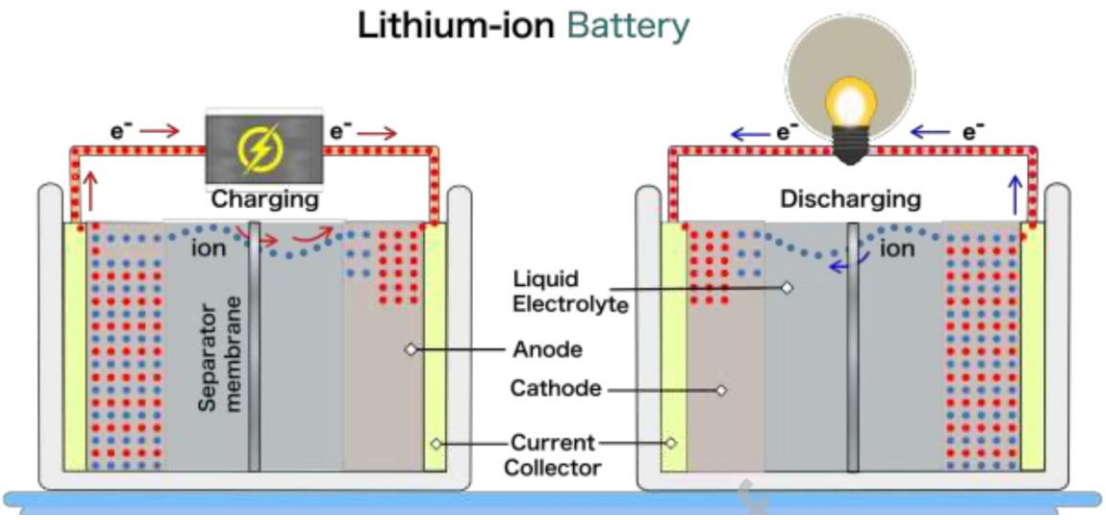
Joonis 2.2. Plii-happeaku põhikomponendid. See koosneb käsnpliist valmistatud anoodist, pliioksiidist valmistatud katoodist ja elektrolüüdist, mis koosneb 37 % väävelhappest ja 63 % veest [10].

Pliiakusid on võimalik kasutada nii lühiajalistes (sekundid) kui ka pikaajalistes protsessides (≥8h). Pliiakud võib jagada kahte rühma: uputatud pliiakud (*FLA*) ning ventiilreguleeritavad pliiakud (*VRLA*). Pliiakud on võimelised reageerima ja saavutama täisvõimsust millisekundite jooksul. Keskmise pliiaku kogukasutegur jääb tavatingimustel vahemikku 75 % kuni 85 % ning elueaks loetakse pliiakudel viis aastat või 250 kuni 1000 laadimistsüklit. Pliiakudel on aga teatud miinuseid, mis takistavad nende kasutamist näiteks tänapäeva elektriautodes: suhteliselt suur mass, mis tavaliselt on suurem kui sisepõlemismootoril ning vastuvõetava massi korral täislaadimisega saavutatav liigväike sõidukaugus (kuni 100 km). Puuduseks on samuti ka võimalik laiaulatuslik mõju

keskkonnale [13]. Tavaliselt kaotab pliiaku isetühjenemise tagajärjel ööpäeva jooksul 0,5–1 % oma laengust. Selle kompenseerimiseks kasutatakse energeetika seadmeis pidevat juurdelaadimisrežiimi [14].

2.1.3. Liitiumioonakud

Liitiumioonakud koosnevad katoodina liitiummetalloksiidist, anoodina grafiitsest süsinikust ja elektrolüüdina anorgaanilisest lahustunud liitiumisoolast. Liitiumioonide liikumisel anoodi ja katoodi vahel tekib elektrivool. Laadimistsükli ajal migreeruvad liitiumi katioonid elektrolüüdi kaudu süsinikanoodile. Need ühinevad väliste elektronidega ja ladestuvad liitiumiaatomitena süsinikukihtide vahele (joonis 2.3). Tühjendusprotsessi ajal on see protsess vastupidine. [15]

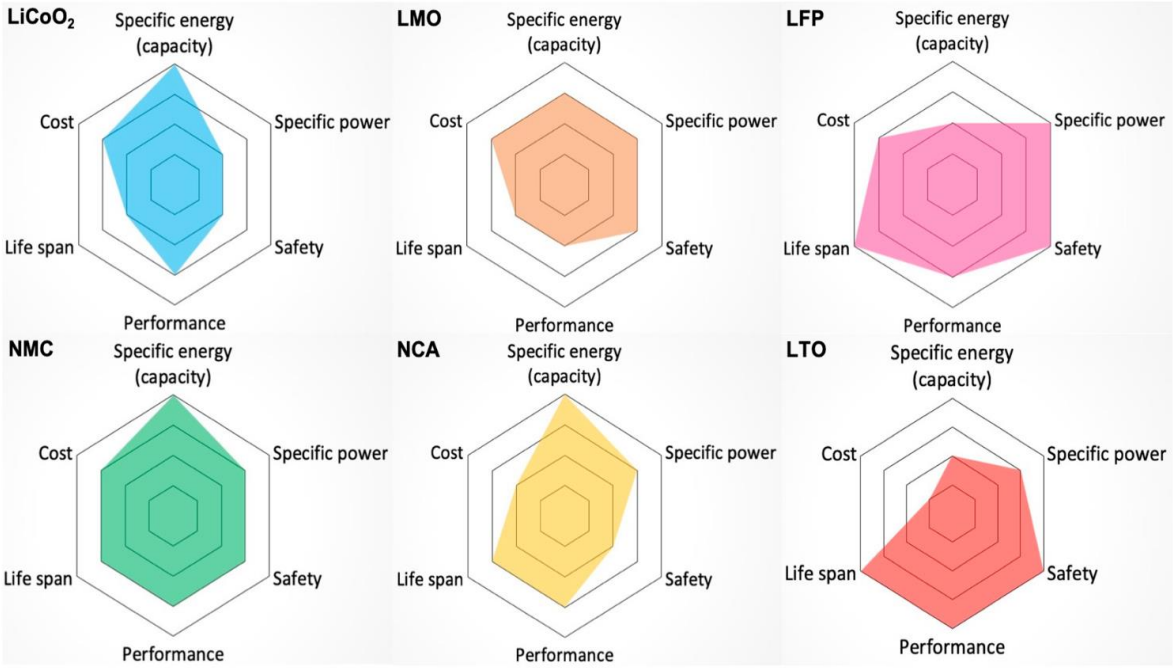


Joonis 2.3. Liitiumioonaku põhikomponendid ja tööpõhimõte [10].

Liitiumioonakud ehk LIB on täna Eestis ainuke akutehnoloogia, mis on finantseeritav pankade poolt. On juba kasutusele võetud päikeseelektri väiketootjate poolt ning selles suunas liiguvad ka suuremate päikeseparkide arendajad. Samuti kaalub Elektrilevi võrgulaienduse asendusena liitiumioonakusid kasutama hakata Hiiumaal. Lätis ja Leedus paigaldavad akupankasid riiklikud ülekandevõrguettevõtted eesmärgiga pakkuda süsteemiteenuseid eelkõige pärast desünkroniseerimist [9].

Liitiumioon on saanud nime selle aktiivsete materjalide järgi. Näiteks liitiumkoobaltoksiidil, mis on üks levinumaid liitium-ioone, on keemilised sümbolid LiCoO2 ja lühend LCO. Lihtsuse huvides saab selle akut nimetada ka lühidalt liitiumkoobalt. Koobalt on peamine aktiivne materjal, mis annab sellele akule iseloomulikud tunnused. Teistele liitiumioonide keemilisele koostisele on antud sarnased lühinimed [16]. Liitium-ioonakude tehniliste andmete võrdlus on leitav joonisel 2.6.

Praegu on kasutusel katoodmaterjalid peamiselt siirdemetallioksiidid nagu LiCoO2, LiFePO4, LiMn2O4. Igal materjalil on oma tugevused ja nõrkused (joonis 2.4). Elektroodide materjalide hindamiseks kasutatakse viiemõõtmelisi indikaatoreid, sealhulgas tsükli eluiga, keskmine tööpinge, praktiline gravimeetriline võimsus, ohutus ja maksumus, mis aitavad leida nende õigeid rakendusi [17].



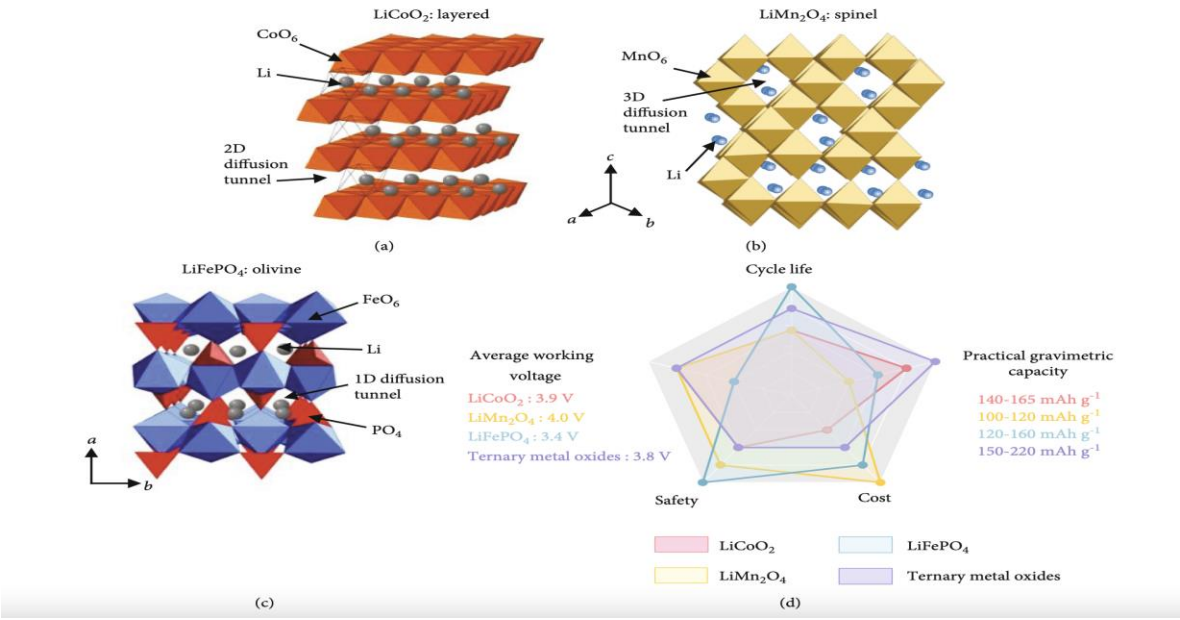
Joonis 2.4. Eri tüüpi liitiumioonakude võrdlused järgmistest vaatenurkadest: *specific energy (capacity)* - erienergia (võimsus), *specific power* - erivõimsus, *safety* - ohutus, *performance* - jõudlus, *life span* - eluiga ja *cost* - maksumus (välimine kuusnurk on kõige soovitavam) [19].

2.1.3.1. Kihiline $LiCoO_2$ ehk LCO

Kihiline $LiCoO_2$ ehk LCO on liitiumkoobaltoksiidi tüüp, mida kasutatakse liitium-ioonakude katoodmaterjalina. LCO (joonis 2.5 (a)) on laialdaselt kasutusel erinevates elektriseadmetes, sealhulgas nutitelefonides, sülearvutites ja muudes kaasaskantavates seadmetes [29].

$LiCoO_2$ akud on tuntud oma suure energiatiheduse poolest, mis tähendab, et nad suudavad salvestada palju energiat väikese mahuga. Akud on suure jõudlusega ja tagavad pinge hea stabiilsuse, mistõttu need sobivad hästi seadmetesse, kus on oluline saavutada ühe laadimisega pikk töö kasutusaeg ja hea võimsus. Samas on oluline märkida, et LCO akud võivad olla tuleohtlikumad kui mõned teised liitium-ioonakude tüübid ning nende kasutamine nõuab täiendavaid ohutusmeetmeid ja järelevalvet.

Kuigi LCO akud on endiselt kasutusel, on teadlased ja tööstus otsinud alternatiive, mis oleksid ohutumad ja keskkonnasõbralikumad. Mõnes rakenduses on hakatud kasutama $LiMn_2O_4$ (liitiummangaandioksiid) ja $LiFePO_4$ (liitiumraudfosfaat) akusid, mis on tuntud oma ohutuse ja keskkonnasõbralikkuse poolest [18].



Joonis 2.5. Erinevad katoodmaterjalid. (a) $LiCoO_2$, (b) $LiMn_2O_4$, (c) $LiFeO_4$ ja (d) katoodimaterjalide „radari" kokkuvõtlik diagramm [29].

2.1.3.2. $LiMn_2O_4$ ehk LMO

Liitiummangaandioksiidi praktiline erimahtuvus on umbes 120 mAh g-1 (teoreetiline erimahtuvus, 148 mAh g-1), suhteliselt kõrge keskmine tööpinge (4,0 V) ja hea „*Rate capability*“ – mis võimaldab akul või patareil kiiresti vastata muutuvatele energianõudmistele ilma olulise jõudluse languseta. Hea laadimis/tühjenemis võimsus tuleneb LMO kuubilisest spinellstruktuurist (kristallstruktuur), kus kolmemõõtmelised (3D) MnO_2 ja Mn moodustavad difusioonitunneli Li ioonide transpordiks (joonis 2.5 (b)), see parandab ioonide voolu elektroodil mille tulemusel on väiksem sisetakistus ja seega ka parem voolujuhtivus. Spinellstruktuuri eeliseks on täiendavalt kõrge termiline stabiilsus ja suurem ohutus, kiired laadimis- ja tühjenemistsüklid võivad põhjustada pöördumatu struktuurimuutuse ja võimsuse vähenemise [17].

$LiMn_2O_4$ omadused ja eelised hõlmavad järgmist:
1) ohutus – $LiMn_2O_4$ akud on üldiselt turvalisemad kui mõned muud liitium-ioonakud, kuna nendega katoodmaterjal ei sisalda koobaltit või niklit, mis võivad olla seotud ohutusprobleemidega;
2) keskkonnasõbralikkus – need akud ei sisalda mürgiseid raskemetalle ega ohtlikke ühendeid, mis võivad olla keskkonnale kahjulikud;
3) stabiilsus – LMO akud pakuvad head tsüklilist stabiilsust ja pikka eluiga, mis võimaldab neid korduvalt laadida ja tühjendada ilma märkimisväärse jõudluse languseta. [18]

Enamik LMO akusid segatakse liitium-nikkel-mangaankoobalt oksiidiga (NMC), et parandada spetsiifilist energiat ja pikendada aku eluiga. See kombinatsioon toob igas süsteemis esile parima ning LMO (NMC) valitakse enamiku elektrisõidukite jaoks nagu Nissan Leaf, Chevy Volt ja BMW i3. Aku LMO-osa, mis võib olla umbes 30 protsenti, annab kiirendusel suure voolutugevuse; NMC osa annab pika sõiduulatuse [17].

2.1.3.3. LiFePO4 ehk LFP

Inglise keeles „*Lithium Iron Phosphate*" ehk liitiumraudfosfaat (joonis 2.5 (c)). See on tüüpiline liitiumioonaku keemiline ühend, mis erineb teistest liitiumioonakudest, nagu liitium-ioon (Li-ion) või liitium-polümeer (LiPo) selle poolest, et kasutab positiivse

elektroodina raudfosfaati. LFP on tuntud oma madala hinna ja kõrge stabiilsuse poolest. LFP praktiline erimaht on umbes 120–160 mAh g-1 (teoreetiline erimaht, 170 mAh g-1) ja pingeplatvorm 3,4 V [22].

LFP akudel on mitmeid omadusi, mis neid teistest liitiumioonakudest eristavad:

- ohutus: $LiFePO_4$ akud on stabiilsed ja vähem tundlikud ülekuumenemisele või lühisele võrreldes mõnede teiste liitiumioonakudega, see muudab need ohutumaks kasutamiseks;
- pikem eluiga: LFP akudel on pikem tsükliline eluiga võrreldes paljude teiste liitiumioonakudega, see tähendab, et neid saab laadida ja tühjendada rohkem kordi enne, kui nende jõudlus hakkab märkimisväärselt langema;
- suurem tühjenemiskiirus: LFP akud saavad anda kõrgemat voolutihedust kui mõned teised liitiumioonakud, mistõttu sobivad need hästi rakendustesse, kus on vaja suurt võimsust lühikese aja jooksul.

LFP akusid kasutatakse erinevates rakendustes, sealhulgas päikesepaneelide ja tuulegeneraatorite energiasalvestussüsteemides, elektrisõidukites, paatides ja muudes kohtades, kus vajatakse suure jõudlusega ja pikaealist akut. [20]

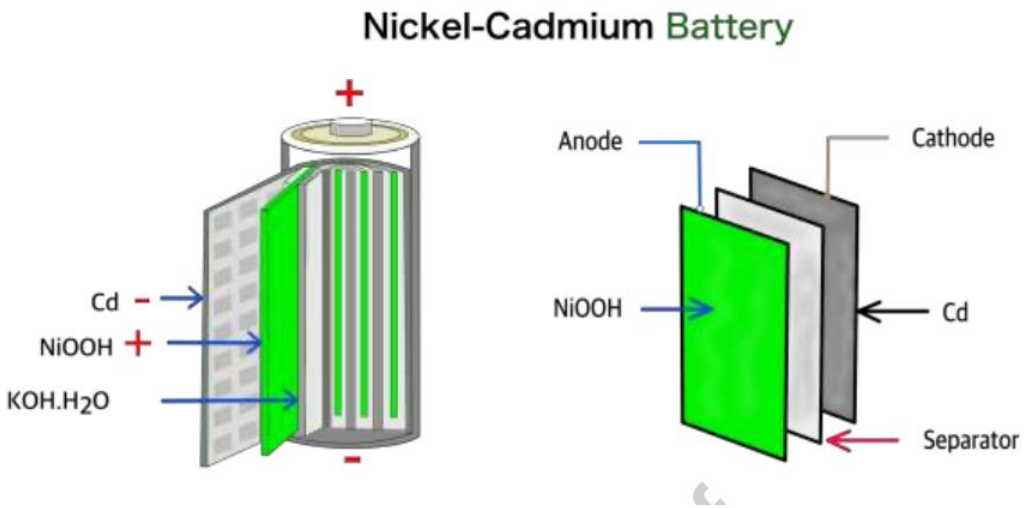
Lithium - ion summary table

	Lithium Cobalt Oxide: LiCoO2 cathode (~60% Co), graphite anode Short form: **LCO** or Li-cobalt. Since 1991	**Lithium Manganese Oxide:** LiMn2O4 cathode. graphite anode Short form: **LMO** or Li-manganese (spinel structure) Since 1996	**Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide:** LiNiMnCoO2. cathode, graphite anode Short form: **NMC** (NCM, CMN, CNM, MNC, MCN similar with different metal combinations) Since 2008	**Lithium Iron Phosphate:** LiFePO4 cathode, graphite anode Short form: **LFP** or Li-phosphate Since 1996	**Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide:** LiNiCoAlO2 cathode (~9% Co), graphite anode Short form: **NCA** or Li-aluminum. Since 1999	**Lithium Titanate:** Cathode can be lithium manganese oxide or NMC; Li2TiO3 (titanate) anode Short form: **LTO** or Li-titanate Commercially available since about 2008.
Voltages	3.60V nominal; typical operating range 3.0–4.2V/cell	3.70V (3.80V) nominal; typical operating range 3.0–4.2V/cell	3.60V, 3.70V nominal; typical operating range 3.0–4.2V/cell, or higher	3.20, 3.30V nominal; typical operating range 2.5–3.65V/cell	3.60V nominal; typical operating range 3.0–4.2V/cell	2.40V nominal; typical operating range 1.8–2.85V/cell
typical operating range	3.60V nominal; typical operating range 3.0–4.2V/cell	100–150Wh/kg	150–220Wh/kg	90–120Wh/kg	200-260Wh/kg; 300Wh/kg predictable	50–80Wh/kg
Charge (C-rate)	3.60V nominal; typical operating range 3.0–4.2V/cell	0.7–1C typical, 3C maximum, charges to 4.20V (most cells)	0.7–1C, charges to 4.20V, some go to 4.30V; 3h charge typical. Charge current above 1C shortens battery life.	1C typical, charges to 3.65V; 3h charge time typical	0.7C, charges to 4.20V (most cells), 3h charge typical, fast charge possible with some cells	1C typical; 5C maximum, charges to 2.85V
Discharge (C-rate)	1C; 2.50V cut off. Discharge current above 1C shortens battery life.	1C; 10C possible with some cells, 30C pulse (5s), 2.50V cut-off	1C; 2C possible on some cells; 2.50V cut-off	1C, 25C on some cells; 40A pulse (2s); 2.50V cut-off (lower that 2V causes damage)	1C typical; 3.00V cut-off; high discharge rate shortens battery life	10C possible, 30C 5s pulse; 1.80V cut-off on LCO/LTO
Cycle life	500–1000, related to depth of discharge, load, temperature	300–700 (related to depth of discharge, temperature)	1000–2000 (related to depth of discharge, temperature)	2000 and higher (related to depth of discharge, temperature)	500 (related to depth of discharge, temperature)	3,000–7,000
Thermal runaway	150°C (302°F). Full charge promotes thermal runaway	250°C (482°F) typical. High charge promotes thermal runaway	210°C (410°F) typical. High charge promotes thermal runaway	270°C (518°F) Very safe battery even if fully charged	150°C (302°F) typical, High charge promotes thermal runaway	One of safest Li-ion batteries
Cost			~$420 per kWh[1]	~$580 per kWh[1]	~$350 per kWh[1]	~$1,005 per kWh[1]
Applications	Mobile phones, tablets, laptops, cameras	Power tools, medical devices, electric powertrains	E-bikes, medical devices, EVs, industrial	Portable and stationary needing high load currents and endurance	Medical devices, industrial, electric powertrain (Tesla)	UPS, electric powertrain (Mitsubishi i-MiEV, Honda Fit EV), solar-powered street lighting
Comments 2019	Very high specific energy, limited specific power. Cobalt is expensive. Serves as Energy Cell. Market share has stabilized. Early version; no longer relevant.	High power but less capacity; safer than Li-cobalt; commonly mixed with NMC to improve performance. Less relevant now; limited growth potential.	Provides high capacity and high power. Serves as Hybrid Cell. Favorite chemistry for many uses; market share is increasing. Leading system; dominant cathode chemistry.	Very flat voltage discharge curve but low capacity. One of safest Li-ions. Used for special markets. Elevated self-discharge. Used primarily for energy storage, moderate growth.	Shares similarities with Li-cobalt. Serves as Energy Cell. Mainly used by Panasonic and Tesla; growth potential	Long life, fast charge, wide temperature range but low specific energy and expensive. Among safest Li-ion batteries. Ability to ultra-fast charge; high cost limits to special application

Joonis 2.6. Liitiumakude tehniliste andmete võrdlus [16].

2.1.4. Nikkelkaadmium (Ni-Cd) akud

Nikkelkaadmium aku, mille leiutas 1899. aastal rootslane Waldemar Jungner ning on üks küpsemaid ja laialdasemalt kasutatavaid akutehnoloogiaid. Ni-Cd akusid kasutatakse laialdaselt elektrienergia rakendustes, kuna neil on pikem elutsükkel kui pliiakudel [23].



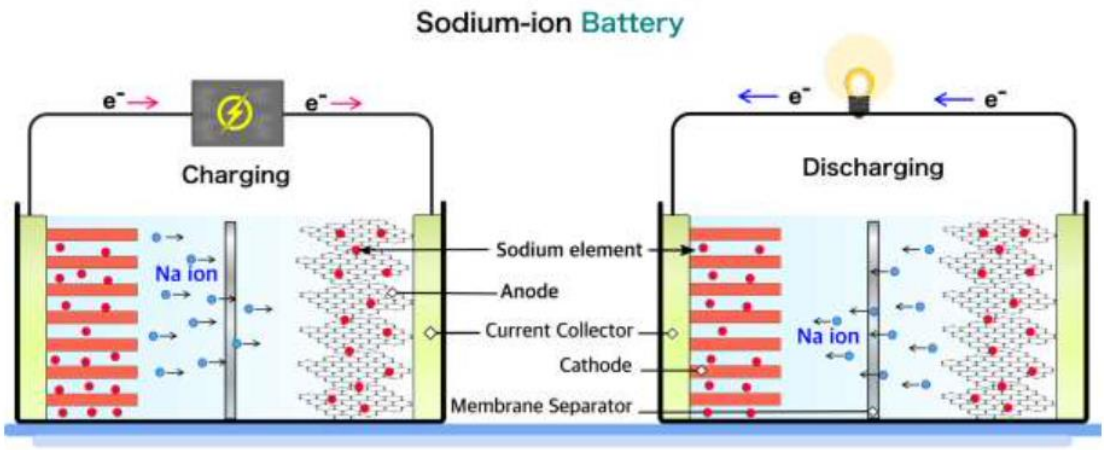
Joonis 2.7. Nikkel-kaadmium aku põhikomponendid. Koosneb anoodina käsnjast nikkelhüdroksiidist, katoodina kaadmiumist ja elektrolüüdina kaaliumhüdroksiidist [10].

Ni-Cd aku positiivne elektrood (joonis 2.7) on käsnjas niklioksühüdroksiid, negatiivne elektrood on metalliline kaadmium ja elektrolüüt on kaaliumhüdroksiid. Mõlemad elektroodid on eraldatud nailonjaguriga, mis takistab otsest laengu ülekandmist elektroodide vahel [13]. Tühjendustsükli ajal reageerib positiivsel plaadil olev niklioksühüdroksiid veega, moodustades nikkelhüdroksiidi, samas kui negatiivse plaadi kaadmium reageerib et toota kaadmiumhüdroksiidi [15]. Kogu protsess on laadimisfaasis vastupidine.

2.1.5. Naatriumioon (Na-ioon) akud

Lähiajal võivad liitium-ioonakudele tugevat konkurentsi pakkuda ja neid asendada naatrium-ioonakud kuna Liitium ioonakude toormaterjali nõudluse ja ohutusprobleemide tõttu otsivad teadlased alternatiivset materjali, mis suudaks salvestada ja eraldada energiat

sarnaselt liitiumiga. Paljude saadaolevate anoodikandidaatide hulgas on teadlaste huvi äratanud naatriumi (Na) baasil valmistatud anoodid.



Joonis 2.8. Naatriumioonaku tööpõhimõte. Laadimistsükli ajal ekstraheeritakse katoodilt naatriumiioonid ja surutakse anoodi. Tühjendustsükli ajal on see protsess vastupidine [10].

Kuna naatriumi on ohtralt ja see on odav, on naatriumioonakude tehnoloogial potentsiaal ületada liitiumioonakude piirangud ja pakkuda odavat alternatiivi, mis on tooraine tarnimise riskide suhtes vähem tundlik [10].

Toimimine on sarnane liitiumioonakude omaga. Laadimisprotsessi ajal ekstraheeritakse katoodilt naatriumiioonid ja sisestatakse anoodi (joonis 2.8) ning tühjendusprotsessi puhul toimub vastupidine protsess [10]. Sarnaselt liitiumioonakudele on leitud, et naatriumioonakud sobivad ka statsionaarsete toiteallikatena taastuvenergia, näiteks tuule- ja päikeseenergia jaoks [24].

2.2. Kodutarbimises kasutatavad optimaalsed elektrokeemilised salvestusseadmed

Energiateekaart (2022) eeldab väikeakude võimsuseks 2030. a 500MW, süsinikuneutraalse elektrituru uuringus veelgi suuremas mahus. Energiatalgud.ee kohaselt on toetuste maht ca 200 mln € kokku kuni 2030. a, kui toetada kõiki väikeakusid (500MW) määraga 40 %, mis on ka tänastes korterelamute päikesepaneelide toetusmeetmetes (koos PV paneelide

paigaldamisega) kasutatav toetuse määr. Otsetoetusi jagatakse ettevõtetele taaste- ja vastupidavusrahastu (RRF) salvestuse pilootprogrammis. Analüüsi koostajate hinnangul võib vähendada riigi toetust ainult päikesepaneelide paigaldamise korral (s.t kui ei kasutata salvestusseadmeid) ning motiveerida sellega salvestusseadmete paigaldamist [9].

Salvestusseadmed on mõeldud ainult omatarbe elektri katmiseks, mitte müügiks. Kodutarbijatele on oluline, et energiasalvetusseade oleks paigaldatav nende enda koju. Peamisteks kriteeriumiteks lõpptarbijatele on salvestusseadme maksumus ja suurus, seetõttu ei ole enamus tarbijatel võimalik ehitada hüdroakumulatsioonijaama eeskätt selle suuruse ning geograafiliste vajaduste tõttu. Salvesti peab võimaldama tarbida energiat kohe, kui seda on vaja ning tagama vähemalt 6-tunnise sõltumatu elektritarbimise. Teiseks väga oluliseks teguriks on kindlasti salvestusseadme maksumus, mis arvutatakse välja võimsuse kilovatti kohta [20].

Kindlasti üheks väga oluliseks teguriks on ohutus. Kui vaadata joonist 2.4, siis vastavad ohutuse kriteeriumitele LTO ja LFP. Valiku tegemiseks peab teadma akude soovitud kasutusviisi: kui on vaja ainult akuvarundust aeg-ajalt (näiteks varustus väljalülitatud toite korral), võib LFP olla sobiv valik madalama hinna tõttu. Kui aga vajatakse akut, mis peab vastu pidevale laadimisele ja tühjenemisele, võib LTO olla parem valik. Samuti on oluline laadimiskiirus, kui on vajalik kiire laadimine ja tühjendamine, siis LTO tehnoloogia sobib paremini, kuna see talub kõrgemaid laadimis- ja tühjenemiskiirusi. Seega kui eelarve on piiratud ja pidev vajadus akuvarunduse järele pole väga suur, on LFP parim valik. Tabelis 1 on välja toodud erinevate akutüüpide võrdlus koos selgitustega.

Tabel 1. Üldkasutatavate laetavate akude omadused [21]

Spetsifikatsioon	Plii-happe	NiCd	NiMH	Li-ion[1] Koobalt	Mangaan	Fosfaat
Erienergia (Wh/kg)	30-50	45-80	60-120	150-250	100-150	90-120
Sisemine takistus	Väga madal	Väga madal	Madal	Keskmine	Madal	Väga madal
Eluiga tsüklites [2] (80%DoD)	200-300	1,000[3]	300-500[3]	500-1,000	500-1,000	1,000-2,000
Laadimise aeg [4]	8-16h	1-2h	2-4h	2-4h	1-2h	1-2h
Ülelaadimise taluvus (*overcharge tolerance*)	Kõrge	Keskmine	Madal	Madal Järellaadimist ei rakendata (*no trickle charge*)		
Isetühjenemine/kuus	5%	20%[5]	30%[5]	<5%		
Akuelemendi nimipinge	2 V	1.2 V[6]	1.2 V[6]	3.6 V[7]	3.7 V[7]	3.2-3.3 V
Laadimise katkemispinge (v/*cell*)	2.40 V	Täislaadimise tuvastamine pinge spetsiifilise mustriga		4.2 V tavaline Mõned jõuavad kõrgema pingeni		3.60 V
Tühjenemise katkestuspinge (v/*cell*, 1C)	1.75 V	1.00 V		2.50-3.00 V		2.50 V
Tippkoormuse vool Parim tulemus	5C[8] 0.2C	20C 1C	5C 0.5C	2C <1C	>30C <10C	>30C <10C
Laadimis temp.	-20 kuni 50°C	0 kuni 45°C		0 kuni 45°C[9]		
Tühjendus temp.	-20 kuni 50°C	-20 kuni 65°C		-20 kuni 60°C		
Hooldus	3-6 kuud[10]	Pidevalt kasutuses olev aku täielik tühjendamine 90 päeva jäerl		Hooldusvaba		
Ohutusnõuded	Termiliselt stabiilne	Termiliselt stabiilne, kaitstud sulariga.		Kohustuslik kaitseahel[11]		
Tehnoloogia vanus	Hilistest 1800	1950	1990	1991	1996	1999
Toksilisus	Väga kõrge	Väga kõrge	Madal	Madal		
Kuloniline efektiivsus[12]	~90%	~70% aeglane laadimine ~90% kiirlaadimine		99%		
Kulu	Madal	Keskmine		Kõrge[13]		

Arvud põhinevad kaubanduslike akude keskmistel hinnangutel avaldamise ajal (21.10.2021). Eriakud, mille nimiväärtus on keskmisest kõrgem, ei ole tabelis kajastatud.

Tabel 1 seletus:

1. Kombineerides koobalti, nikli, mangaani ja alumiiniumi, tõuseb energiatihedus kuni 250Wh/kg.

2. Tsükli eluiga põhineb tühjendussügavusel (DoD). Madal DoD pikendab tsükli eluiga.

3. Tsükli eluiga põhineb aku korrapärasel hooldusel, et vältida mäluefekti.

4. Ülikiire laadimisega akud on loodud spetsiaalseks otstarbeks.
5. Isetühjenemine on suurim kohe pärast laadimist. NiCd kaotab esimese 24 tunni jooksul 10 %, seejärel väheneb see 10 % iga 30 päeva järel. Kõrge temperatuur ja vanus suurendavad iseeneslikku tühjendust.
6. 1,25V on traditsiooniline; 1,20V on levinum.
7. Tootjad võivad madala sisetakistuse tõttu pinget kõrgemaks hinnata (turundus).
8. Võimaldab anda tugevaid vooluimpulsse; vajab aega taastumiseks.
9. Ärge laadige liitiumiooni miinuskraadide juures.
10. Hooldus võib sulfatsiooni vältimiseks toimuda tasandus- või lisalaadimise* vormis.
11. Kaitseahel katkestab vooluringi pingel alla umbes 2,20 V ja üle 4,30 V enamikul liitiumioon akudel; liitium-raudfosfaadi jaoks kehtivad erinevad pingeseaded.
12. Kulontõhusus on kiirema laadimise korral suurem (osaliselt isetühjenemise vea tõttu).
13. Liitiumioon akul võib olla madalam tsükli hind kui pliiakul.
* Täieliku laetuse säilitamiseks ja pliiakude sulfatateerimise vältimiseks rakendatakse kasutuses või ladustatud akulele lisalaadimist. [30]

2.2.1 Finantseerimis võimalused

Suuremad pangad pakuvad erilaene antud toodetele, nt Swedbanki „Päikesepaneelide laenu" saab kasutada ka salvestusseadmete soetamiseks kuni kaks aastat on intress null ja hiljem 4,9 % aastas. Samuti oli võimalus toetust saada Ettevõtluse ja Innovatsiooni Sihtasutuselt, kes pakkus aastatel 2022–2023 „Väikeelamute rekonstrueerimistoetust". Taotluse sai esitada kuni 30.06.2023.

Töö kirjutamise hetkel avatakse 23 aprillil 2024 uus „Väikeelamute rekonstrueerimistoetus", kus makstakse akupanga soetamiseks fikseeritud summaga toetust. Toetus moodustab 30 % ühikuhinnast ja suurim toetatav nimimahtuvus on akul 20 kWh. Akupanga soetamisel on see 642 eurot ühe kilovati kohta. Toetuse eesmärgiks on suurem energiatõhusus ja toetuse saamiseks kõige olulisem tingimus elamu energiatõhususklassi parendamine [22].

Käesoleva töö punktides 1.1 ja 1.2 nimetatud kliimaneutraalsuse eesmärgid on seni soodustanud eelkõige juhitamatu elektrienergia kasutusele võtmist läbi erinevate riiklike toetusmeetmete ja tehnoloogia hinna taskukohastumisele. Näiteks salvestusseadme

soetamist toetati majandus- ja kommunikatsiooniministri 5. aprilli 2012. a määruse nr 27 „Rohelise investeerimisskeemi „Väikeelamute rekonstrueerimise toetus" kasutamise tingimused ja kord" alusel, tõsi, seda vaid võrguga mitteühendatud salvestusseadmete soetamisel ning majandus- ja infotehnoloogiaministri 30. mai 2023. a määruse nr 30 „Ettevõtja varustuskindluse toetuse tingimused ja kord" alusel. Üldiselt on salvestusseadmete soetamise toetamine olnud seni riigi toetuse seisukohast vaeslapse rollis võrreldes elektripaigaldise muude osiste soetamise toetamisega. Siiski REKK 2030 lubab „pilve tagant päikest", märkides: „Vabariigi Valitsuse 2023 –2027. a tegevusprogrammi kohaselt on kavandatud pöörata tähelepanu taastuvenergeetikaga proportsioonis salvestusvõimsuste rajamisele." [6]

3. ELEKTRIENERGIA VARUSTUSKINDLUS

3.1. Varustuskindlus

Elektri varustuskindlus on elektrisüsteemi võime tagada tarbijate soove arvestav elektrienergiaga varustatus. Elektrituruseaduse § 3 punkti 8[4] kohaselt on energiasalvestus üks elektripaigaldise osa, kus salvestatakse energiat. Sama paragrahvi punkt 9 sätestab, et elektripaigaldis on elektrienergia tootmiseks, edastamiseks, muundamiseks, salvestamiseks, mõõtmiseks, müügiks või tarbimiseks kasutatavate seadmete, juhtide ja tarvikute paigaldatud talitluslik kogum. [38]

Varustuskindluse seisukohast jaotub elektritootmine kaheks: juhitavaks ja juhitamatuks (katkendlikud tootmisvõimsused, mis sõltuvad ilmastikust). Kui juhitav tootmine saadakse peaasjalikult fossiilkütustest, siis juhitamatu elektrienergia on kliimaneutraalselt taastuvenergiaallikatest (nt tuul, päike) saadav energia. Elekrienergia salvestusseade (edaspidi käesolevas alapunktis *salvestusseade*) võimaldab juhtida n.n juhitamatut elektrivõimsust, kuna võimaldab talletada juhitamatu energia ja seda kasutada/juhtida vastavalt turunõudlusele. Selliselt on salvestusseade juhitava elektrienergia kõrval üheks vahendiks tasakaalustada juhitamatuid võimsusi. Juhitamatu võimsuse tasakaalustamine on vajalik aga kindlustamaks tarbijatele vajalikku elektripinget. Seda põhjusel, et kui juhitavat võimsust saab vastavalt tarbimisnõudlusele muuta, siis juhitamatuid tootmisvõimsusi ei ole salvestusseadmeta ega juhitava elektritootmise abita võimalik vastavalt tarbimisnõudlusele reguleerida.

Salvestusseadmetest problemaatilisem on olukord lühiajalise salvestuse osas, mis võimaldab talletada maksimaalselt kuue tunni jagu elektrit, enamasti akupangad (nt päikeseenergia salvestamine päikeselisel ajal ja selle tarbimine pilvisel ajal või öösel), sest selliste salvestite soetamine on proportsionaalselt kallim. Riik ei ole seadnud tingimusi päikeseparkide juurde salvestite rajamiseks ega ole seda olulisel määral ka toetanud [29]. Laiema probleemina märgib riigikontrolör, et kuigi Kliimaministeerium on ette valmistamas seadusemuudatusi

ning koostamas analüüse, ei ole siiski paika pandud ei salvestuse ega tarbimise juhtimise eesmärke. Kuna nii tarbimise juhtimine kui ka salvestus on meetmed, millega leevendada tootmisvõimsuste piisavuse probleemi, tuleb Riigikontrolli hinnangul Kliimaministeeriumil otsustada, millises mahus soovitakse salvestust ja tarbimise juhtimist arendada ning milliseid muudatusi tuleb selleks muu hulgas teha õigusaktides, elektrivõrgus või toetustes [29].

Elektrisüsteemi opereerimiseks on vaja hoida elektrisüsteemis kindlat võimsust, millest enamik peaks olema juhitav võimsus. Juhitavate elektrijaamade kõrval kasvab hajutatud tootmise, tarbimise juhtimise ja kohaliku salvestuse tähtsus, mis aitavad digitaliseerimise kaudu tagada hajutatud paindlikkust. Tähtsaks muutuvad erinevad turuplatvormid, mis võimaldavad vabaturul tegutsevatel teenusepakkujatel paindlikkusteenuseid pakkuda. Elektri turuplatvormid muutuvad seega järjest olulisemaks elektrisüsteemi toimimise osaks ja nende kriitilisus elektrisüsteemi toimimisel kasvab [30].

Sarnast mõttekäiku toetab ka REKK 2030:“ *Suurenev juhitamatute taastuvate võimsuste osakaal elektrisüsteemis muudab oluliseks neid võimsusi tasakaalustada tarbimise juhtimise, salvestuse ja juhitavate võimsustega*.” [6].

Salvestusseadmete mõju ning juhitava ja juhtimatu võimsuste tänase tasakaalu osas on kriitikat avaldanud riigikontrolör, märkides ülevaates Riigikogule: „*Ettevõtjatel on küll huvi arendada elektri salvestamise võimalusi, kuid riik peab otsustama, kas edendada salvestusvõimsuste turule tulekut ja kuidas seda teha. Salvestusturu arengu peamiseks takistuseks on elektrisüsteemi arendamise puudulik visioon ehk ei ole selge, kui suurel hulgal salvestusvõimsusi ja milleks – näiteks sageduse juhtimiseks või taastuvelektri tasakaalustamiseks – riik kasutada soovib*.” [29]. Majandus- ja Kommunikatsiooniministeeriumi tellitud analüüsi [9] kohaselt takistab salvestusturu arengut peamiselt see, et elektrisüsteemi arendamise strateegiline visioon on puudulik. Pole selge, kui suurel hulgal salvestusvõimsusi ja milleks – näiteks sageduse juhtimiseks või taastuvelektri tasakaalustamiseks – kasutada soovitakse [29].

Samuti on analüüsi kohaselt probleemiks olnud regulatiivsed takistused, sealhulgas võrgutasude arvestuse alused. Majandus- ja Kommunikatsiooniministeeriumi (nüüdse Kliimaministeeriumi) sõnul on aga plaan õigusakte muuta nii, et võrgutasu arvutamisel ei käsitletaks salvestust samadel alustel kui nii-öelda tavalisi tootmisvõimsusi. Üks võimalus

on näiteks see, et salvestuse korral ei peaks maksma kogu võrgust ostetava elektri eest võrgutasu, vaid ainult ostetava ning müüdava elektri vahe eest. [29]

Eelnevast nähtub, et elektri varustuskindlus Eestis on liikumas juhitamatu elektri osalaalu suurenemisele, mida peab tasakaalustama juhitav elektritootmine koostoimes salvestusseadmetega (nii pika kui lühikese salvestusajaga). Seni on riik peaasjalikult keskendunud juhitamatu elektrienergia populariseerimisele, kuid erinevates uuringutes ja arengudokumentides, nt REKK 2030-s ollakse valmis suunamuutuseks salvestusseadmete osatähtsuse suurendamisel.

3.2. Elektrivõrk ja jaotusvõrk

Elektrivõrk on ehitiste ja seadmete kogum elektrienergia jaotamiseks ja ülekandmiseks, see koosneb elektriliinidest ja alajaamadest.

Elektri põhivõrk koosneb 5135 km elektri õhu- ja kaabelliinidest ja 156 alajaamast (01.01.2023 seisuga). Eesti elektrisüsteemi kui terviku toimimise eest vastutab süsteemihaldur Elering AS. Ühtlasi on Elering AS ka põhivõrguettevõtja, kes pakub kõrgepingevõrgu (110–330 kV) ülekandeteenuseid. [31]

Elering AS-le kuuluvate kõrgepingevõrgu seadmetest algab jaotusvõrk (0,4–110 kV), mille kaudu toimetavad võrguettevõtjad elektrienergia tarbija liitumispunktini. Kui Elering AS haldab elektri ja gaasi ülekandevõrke, milles liiguvad suured energiakogused, siis lõpptarbijateni jõuab elekter ja gaas ligi 60 erineva jaotusvõrgu vahendusel [31].

Jaotusvõrgu põhiülesandeks on korraldada klientide liitumist elektrivõrguga ning nendele elektrivarustuse tagamist. Eesti suurim jaotusvõrk kuulub Elektrilevi OÜ-le (edaspidi *Elektrilevi*), kes katab 95 % Eestist elektrivõrguga. Elektrilevil on üle 533 000 elektrivõrguteenuse kliendi. Elektrivarustuse tagamiseks peavad nad hooldama ja uuendama 63 000 kilomeetrit elektriliine ning 25 300 alajaama. Nende võrgupiirkonda ei kuulu suurematest aladest vaid Narva ja selle ümbrus, kus võrguteenust pakub teine jaotusvõrguettevõte (erakapitalifond BaltCap). [31]

Jaotusvõrgud seovad traditsioonilisi tava tarbijaid üha rohkem võrku ilmuvate hajatootjatega ja uute kasutajatega, nt pistikühendusega elektriautod. Jaotusvõrgud ei ole ajalooliselt projekteeritud integreerima suurt hulka taastuvenergiaallikail põhinevaid tootmisüksusi – hajatootjaid, mis on oma olemuselt suures osas vahelduva iseloomuga, ennekõike elektrituulikud ja päikesepaneelid. Jaotusvõrgud peavad olema võimelised liitma võrguga hajatootjate sh mikrotootjad, aga ka uute üksuste nagu elektriautode laadimisjaamad. Kui eelnevalt mainitud liitumiste maht ületab teatava lävendi, vajab jaotusvõrk ulatuslikke tehnilisi muudatusi käidu korralduses ning talituse juhtimises. Hajatootmise areng koos elektrivarustuse kvaliteedi parendamise ja säilitamise vajadusega nõuab uudse tehnoloogia (kauglugemine, andurid, salvestus, IT seadmed) integreerimist olemasolevasse taristusse. Seeläbi on ka jaotusvõrgud tarkvõrkude arendamise eesliinil. [32]

3.3. Katkestused

Elektrikatkestused saab jaotada kaheks: riketest tingitud katkestused ehk rikkelised katkestused ning plaaniliste elektrivõrgu tööde jaoks vajalikud katkestused ehk plaanilised katkestused. Plaanilised katkestused on vajalikud elektrivõrgu hooldus- ja uuendamistöödeks, liinide ajutiseks lahti ühendamiseks suurte veoste korral jms [33]. Rikke korral katkeb elekter ootamatult ning selle põhjused võivad olla erinevad, näiteks elektriliini katkemine, alajaama rike vms [33].

Jaotusvõrgu varustuskindlust ja nende probleeme uuris oma magistritöös 2016 a. Anni Tampere, kes leidis, et jaotusvõrgu kõrge rikkelisus on tingitud aastate pikkusest alarahastusest. Elektri varustuskindlust mõõdetakse peamiselt riketest tingitud toitekatkestuse kestvuse (SAIDI), katkestuse sageduselt kliendi kohta aastas (SAIFI) ning rikete keskmise kestvuse (CAIDI) indeksite alusel [34].

Jaotusvõrgud on paljasjuhtmete suure osakaalu tõttu ilmastikuoludest sõltuvad, Euroopa riikide keskmine SAIDI on 150 minutit, millega võrreldes on Eesti jaotusvõrgu 3 aasta keskmine väga madal. s.o 322 minutit. Statistilisel võrdlusel ilmneb, et riikide varustuskindluse taseme peamine määraja on kaabelliinide osakaal elektrivõrgus [34].

Majandus - ja kommunikatsiooniministri 6. aprilli 2005. a määrusega nr 42 „Võrguteenuste kvaliteedinõuded ja võrgutasude vähendamise tingimused kvaliteedinõuete rikkumise korral" on paika pandud katkestuste kestus ja hüvitiste määrad [35]. Selle järgi võib jaotusvõrgus ühe tarbimiskoha riketest põhjustatud katkestuste kestus olla aastas kuni 50 tundi. Elektrilevi kogemuste kohaselt on elektrivõrgu neli kõige suuremat looduslikku vaenlast: tugev tuul, ladestuv lumi, jäide ja äike [36].

Kuigi Elektrilevi on tänaseks 71 % oma võrgust muutunud ilmastikukindlaks, seda maakaabli näol või on vahetatud vana õhuliin uuema õhukaabelliini vastu, mis talub ka liinile langenud väiksemaid puid ja oksi, mis ongi katkestuse sagedaseim põhjus. Sagedaseim elektrikatkestuste põhjustaja on endiselt tugev tuul ja tormituuled, mil tuule kiirus on 21 m/s ja enam. Lisaks võivad tugeva tuulega kaasneda pingehäired, pinge kõikumisena või lühiajaliste katkestustena. Talvel on peamiseks rikete põhjuseks tugev lumesadu. Lumi ladestub puuokstele, mille tulemusel muutuvad puud ja oksad nii raskeks, et vajuvad liinidele. Märg lumi võib ladestuda ka elektrimastide isolaatorite vahele, mille tagajärjel võib isolaatoris tekkida lühis. Talvel, kui metsas ja põldudel on lumekate paks, on liinidele ligipääs keerulisem, mis tähendab, et taastamistööd võtavad oluliselt kauem aega. Talvel on veel rikke põhjustaja jäide, mis tekib kui sajab vihma ja temperatuur on 0 kraadi lähedal.

Jäide muudab liinidele ja puudele kogunenud lume märjaks ja seega eriti raskeks. Miinuskraadid omakorda külmutavad märja lume või puuoksad liinijuhtme külge kinni. Mille tulemusena hakkab jää aeglaselt elektriliini maapinna poole painutama. Lõpuks võivad kogunenud raskuse all puruneda nii mastid kui ka elektriliinid. Lisaks tuultele, jäitele ja lumesajule on Elektrilevi välja toonud ka katkestused seoses äikesega. Välgu laeng võib ulatuda kuni 200 000 amprini ning sellega kaasneb suur purustusjõud. Samuti võib äikesega kaasnev pinge tekitada võrgus pinge kõikumisi. Äikesetormiga kaasnevad sageli ohtlikud ilmastikunähtused, nt tuuleiilid ehk äikesepagid ning rahe. [36]

4. SALVESTUSSEADME MÕJU ELAMU ELEKTRIVARUSTUSELE, KASUTADES HOMER GRID TARKVARA

4.1. Töös kasutatud näite lähteandmed

Töös on kasutatud näitena eramaja, mis asub Harjumaal, Rae vallas, Patika külas. Puitkarkassiga kahekorruseline maja, üldpind 156 m2, milles elavad kaks inimest. Majal on esimesel korrusel vesipõrandaküte ja teisel korrusel radiaatorid. Küttesüsteemiks on Thermali maasoojuspump. Lisaks on maja katusele installeeritud 34 Jinko päikesepaneeli kogu võimsusega 11,73 kW. Inverteriks on 10kW Kostal Planticore 10 plus, tegu on hübriidinverteriga kuhu saab ühendada kõrgepingeakud. Inverteri tehnilised andmed on leitavad lisast 1 [42].

Tarbimisandmetest analüüsitakse 2023 aasta tunnipõhiseid andmed, kokku 8760 rida, andmed on leitavad Elektrilevi iseteeninduses. Eramu tarbis võrgust 7616 kWh. PV paneelide kogutoodang oli 11203kWh millest läks võrku 8905kWh, ülejäänud tarbiti kohapeal ära. Eramu kogu tarbimine oli seega 9914 kWh. 2023 aasta tunnipõhised elektrihinnad on leitud NordPool Eesti kodulehelt [37]. Elektrienergia teenusepakkujaks on 220 Energia OÜ. Valitud pakett on “220 Börsihind”, millel on 1 EUR kuutasu.

Päikesepaneelide 2023. a toodangust on lisatud algandmetest ainult tunnipõhiselt võrku müüdud elektrienergia. Üldistest andmetest 2023 aasta ilmastiku kohta on võetud aluseks tunnipõhised temperatuuriandmed, lähim mõõtepunkt oli Harku ilmajaam [27]. Temperatuuri andmeid kasutab HOMER Grid päikese paneelide temperatuuri koefitsiendi arvutustes. Koefitsient näitab kui tugevalt sõltub PV väljundvõimsus paneelide pinnatemperatuurist. See on negatiivne arv, sest temperatuuri tõustes väheneb väljundvõimsus.

Elektriarve kujundamiseks lisati andmed võrguteenuse pakkujalt (Elektrilevi AS) – kWh põhiselt: elektri edastamine päev, elektriedastamine öö, taastuvenergiatasu, elektriaktsiis.

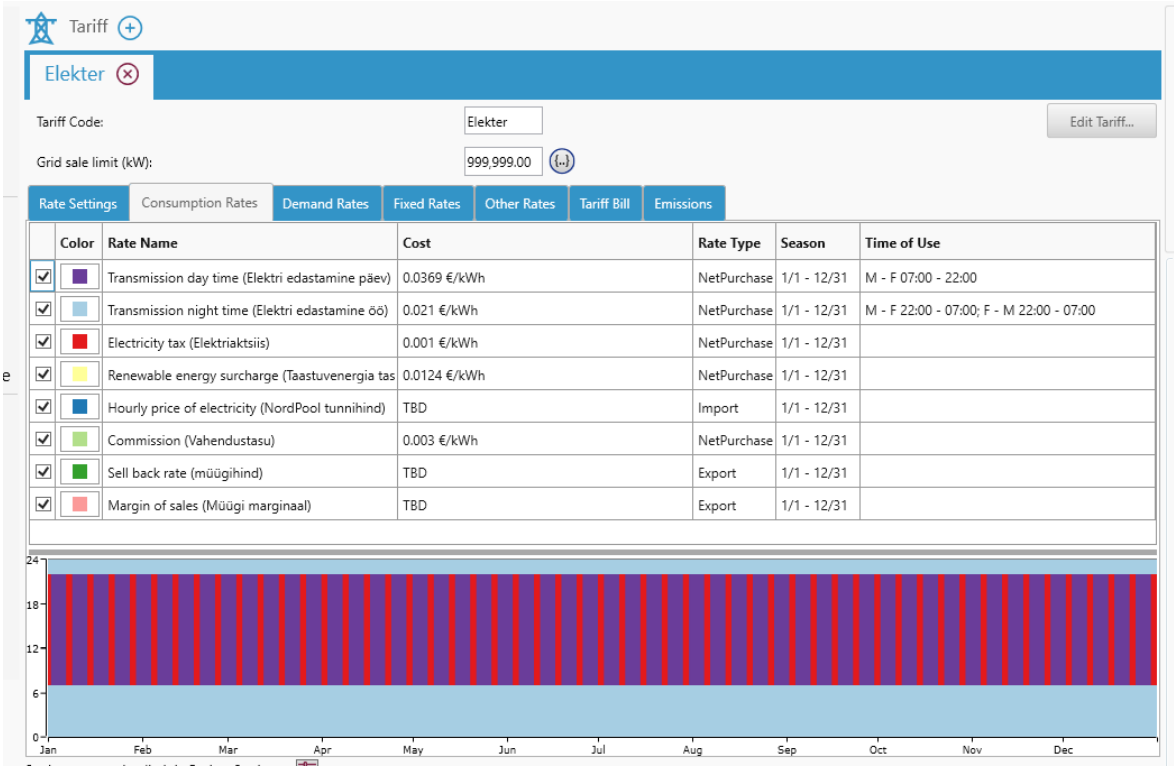
Fikseeritud tasud: elektripaketi kuutasu, peakaitsme tasu, maksustatava osa käibemaks 20 %. Arveks vajaminevad andmed on kokku võetud tabelis 2.

Tabel 2. Homer Gridi mudeli koostamiseks vajalikud konstantsed suurused.

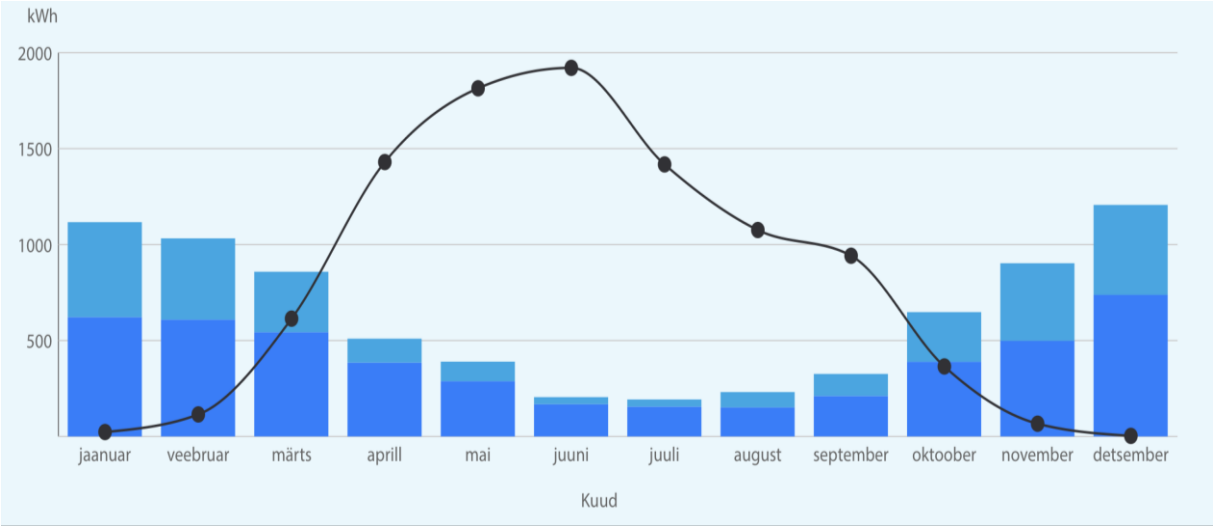
	Hind km-ta	Hind km-ga
Võrguteenus päev	0,0369 EUR/kWh	0,04428 EUR/kWh
Võrguteenus öö	0,021 EUR/kWh	0,0252 EUR/kWh
Peakaitsme tasu (20A)	16,45 EUR/kuu	19,74 EUR/kuu
Taastuvenergiatasu	0,0113 EUR/kWh	0,01356 EUR/kWh
Elektriaktsiis	0,001 EUR/kWh	0,0012 EUR/kWh
Paketi „Börsihind“ kuutasu	0,833 EUR/kuu	1 EUR/kuu

Kuna on tegu börsihinda jälgiva paketiga, siis tulevad lisaks elektrienergia müüja nn vahendustasu: tarbimisepõhine elektrihind Nordpool + 0,3 s/kWh km-ga, elektrienergia tootmise hind on Nordpool – 0,8 s/kWh (km-ta).

Kuu elektrienergia tarbimistasu arvutamiseks on Homer Grid`i vaja sisestada kõik muutuvad kui ka muutumatud (nt, kuutasu ja käibemaks) andmed. Oluline on jälgida, et andmed saaksid õigele teenusele. Tarbitud elektrtienergia tunnipõhised 2023 aasta hindade arvestuseks tuli andmed laadida „*IMPORT*“ poolele. Kuna PV toodangu hind on sama mis börsihind, kuid tuleb maha lahutada energia ettevõtte vahendustasu ja see tuleb sisestada „*EXPORT*“ poolele. Lisaks on täpsema arve jaoks vaja sisestada ka kellaajad. Näiteks võrguteenus päev ja öö. Öö võrgutariif kehtib ka nädalavahetustel ja pühadel. Pühade ja tähtpäevade seaduse järgi oli 2023 aastal oli Eesti Vabariigis 12 riikliku püha [39]. Joonisel 4.2 on näha, kuidas see on kõik kuvatud modelleerimstarkvaras.



Joonis 4.2. Arve kujundamine HOMER`i modelleerimistarkvaraga.



Joonis 4.3. Päikesepargi tootmisgraafik (must joon) ja tarbimine 2023 aastal [26].

Joonisel 4.3 on välja toodud päikesepargi tootmisgraafik vs tarbimine ehk siis eramu praegune olukord. Homer Grid`i simulatsiooni eesmärgiks on välja selgitada eramu akupanga tasuvus.

4.2. Töös kasutatud näite optimeerimisvahend Homer Grid.

HOMER Grid on põhiliselt majanduslik optimeerimisvahend, mis uurib investeeringu hajutatust, „*Behind-the-meter*“ – n.n „mõõturi taga“ kus mõõdik registreerib hoonesse siseneva ja sealt väljuva energia koguse. HOMER Grid teeb arvutusi iga süsteemikonfiguratsiooni jaoks, mida soovitakse uurida. Ühtlasi määrab HOMER Grid, kas konfiguratsioon on teostatav (s.t kas süsteem vastab määratud tingimustele, et tagada soovitud elektrinõudlust) ja hindab süsteemi paigaldamise ja käitamise kulud projekti eluea jooksul. Lahenduse kulude arvestamisel võetakse arvesse nii kogukulusid kapitalile, käitamisele ja hooldusele kui ka generaatori kütusekulu ja ka näiteks laenuintresse. Ehk siis HOMER Gridi kasutajad saavad luua oma tariifistruktuure. [25] Joonisel 4.4 on näidatud andmete sisestamise vaade.

HOMER Grid modelleerib nii tavapäraseid kui ka taastuvenergial põhinevaid tehnoloogiaid. Energiatootjatest saab andmeid sisestada:

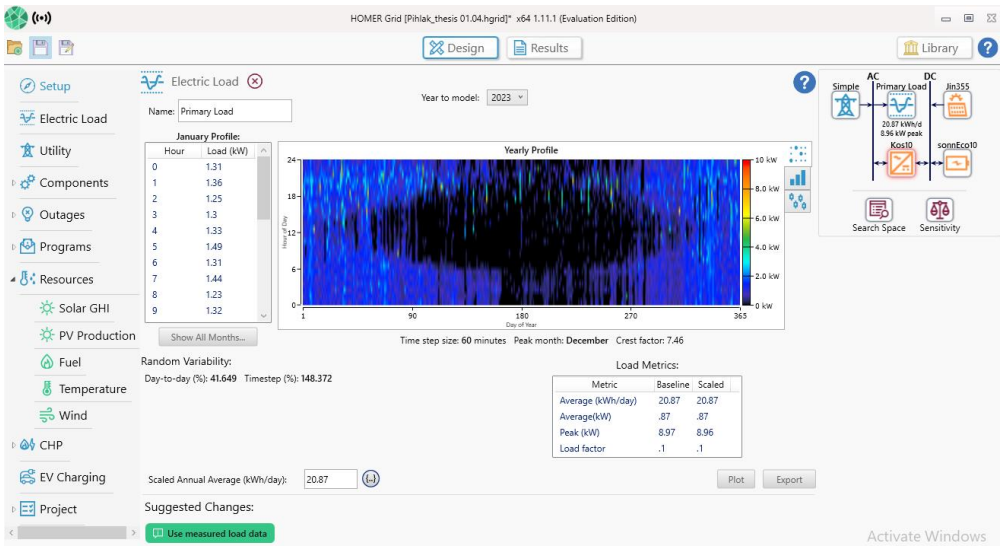
a) päikesepaneel (PV);

b) generaator: diisel, maagaas, bensiin, alternatiivsed ja kohandatud kütused, sh kütuste kooskasutuse olukorras;

c) elektrivõrguühendus;

d) kütuseelement.

Salvestitena saab kasutada aga hooratast, kohandatavaid- ja vooluakusid. Tulemusi saab vaadelda kolmes vaates: kokkuvõte, tabelid või graafikud. [25]



Joonis 4.4. Homer Grid modelleerimise vaade.

HOMER Gridiga tõhusaks töötamiseks on vaja mõista selle kolme põhivõimekust: simulatsiooni, optimeerimise- ja tundlikkusanalüüsi olemust ja nende omavahelist mõju. HOMER Grid simuleerib energiasüsteeme, näitab kulude optimeerimise teel optimeeritud süsteemikonfiguratsioone ning pakub tundlikkusanalüüse.

4.2.1. Simulatsioon

HOMER Grid simuleerib süsteemi toimimist, tehes energiabilansi arvutusi iga aasta kindlal ajahetkel (intervall). Iga ajahetke jaoks võrdleb HOMER Grid elektri- ja termilist nõudlust ning arvutab süsteemi iga komponendi jaoks energiavoo. Süsteemide puhul, mis sisaldavad akusid või kütusekäitusega generaatoreid, otsustab HOMER Grid ka igal ajahetkel, millal käitada generaatoreid ja kas laadida või tühjendada akusid [25].

4.2.2. Optimeerimine

Optimeerimisetapp järgneb kõikidele simulatsioonidele. HOMER Gridil on kaks optimeerimisalgoritmi. Algupärane võrguotsingu algoritm simuleerib kõiki teostatavaid süsteemikonfiguratsioone, mis on määratletud "*Size your own*" komponendi suuruse valikute poolt. HOMER Optimizer kasutab oma loodud tuletisvaba algoritmi, et otsida kõige odavamat lahendust. Seejärel kuvab HOMER Grid konfiguratsioonide loendi, mis on sorteeritud netohetkeväärtuse järgi, mida saab kasutada süsteemi kavandamise võimaluste võrdlemiseks [25].

4.2.3. Tundlikkusanalüüs

See on valikuline samm, mis võimaldab modelleerida muutujate mõju, mis pole kasutaja kontrolli all, näiteks tuulekiirus ja kütusekulud, ning näha, kuidas optimaalne süsteem nende variatsioonidega toimib. Näiteks kui kütuse hind määratletakse tundlikkuse muutujana, simuleerib HOMER Grid süsteemi konfiguratsioone kasutaja poolt määratud erinevate kütusehindadega [25].

4.3. Töös kasutatud näitele sobiv akupank.

Nagu selgus käesoleva töö punktis 2.2, siis parim hinna-kvaliteedi suhe on LFP akudel. Samuti on need hetkel müüdavaimad akulahendused eramutesse. Antud näite puhul seab piiri Kostal´i hübriidinverter millega saab ühendada ainult kindlate tootjate kõrgepinge akusi. Inverteriga ühilduvad näiteks: LG, Varta, BYD ja Plyontech i tooted. Aku lisamiseks on vaja soetada Kostalist aku aktiveerimiskseks kood.

Antud töös kasutab autor BYD HVS 10,24 kWh akupanka. See on Hiinas toodetud kõrgepinge Li-ion (LFP) aku salvestussüsteem, milles on juhtmoodul juba sees. Akusüsteem on mõeldud eelkõige elamutele ja töötab fotogalvaanilise süsteemiga. Seda saab kasutada võrgusisestes, võrguvälistes ja varurežiimides ühilduvate inverteritega [40]. BYD akul on garanteeritud läbilaskevõime minimaalselt 30,82MWh, ja 10 aasta pärast garanteeritakse aku mahtuvust vähemalt 60 % algsest [41]. Hind koos paigalduse ja aktiviseerimiskoodiga on 8120 eurot (hind sisaldab käibemaksu). See koosneb neljast 2,56kWh jadamisi ühendatud akumoodulist, ühe mooduli nimipinge 102,4 V ja nelja oma on kokku 409V ja laadimisvool 25A, tühjenemisvool 25A, aku tühjenemissügavus (SOC) 20 %, aku efektiivsus 96 %. BYD akupanga tooteleht on leitav lisa 2 [43].

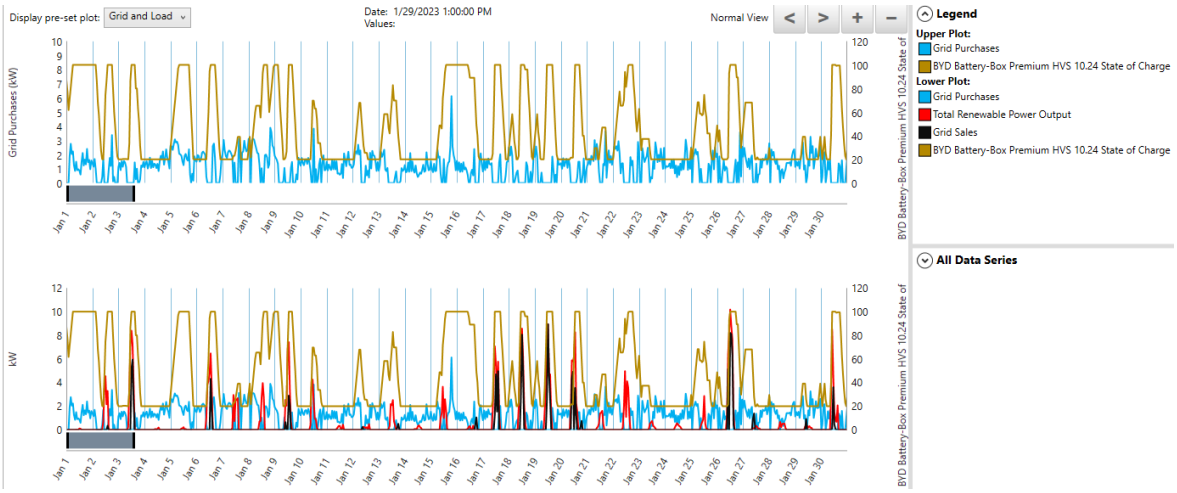
4.3.1. Simulatsiooni modelleerimine

Uuritava projekti elueaks on valitud kümme aastat – see on tingitud akupanga elueast. Pikema eluea valimiseks peab arvestama aku asenduskulusid. PV paneelide elueaks on 20 aastat ja inverteril 15 aastat.

Andmete sisestamise ajal valis autor võrdluseks neli võimalikku lahendust:
A) kui kogu tarbimine on lihtsalt võrgust;
B) tarbimine võrgust lisaks maja katusel PV paneelidest;
C) elamul 10,24kWh akupank ja laadimine võrgust;
D) eramu katusel PV park + 10,24kwh akupank + võrk;

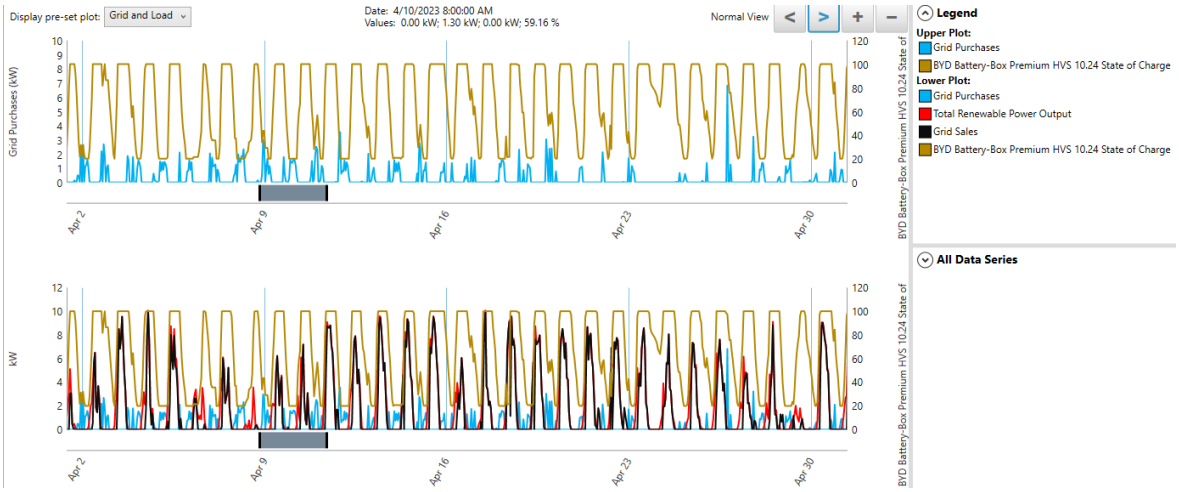
Kogu aasta graafiliselt kuvamisel on tulemused liiga kokku surutud ja halvasti loetavad. Parema võrdlusemomendi tekitamiseks vaatleme lähemalt aastas 4 kuud: jaanuar, aprill, juuli, oktoober. Vastavalt joonised 4.5– 4.8.

Joonistel 4.5–4.8 ülemisel graafikul on modelleeritud variant A ja C ehk siis tarbimine ja laadimine võrgust. Ühes aastas „jookseb“ HOMER Gridi arvutuse kohaselt akust läbi 1370kWh see on 167 täistsüklit. See tähendab, et aku ei kasuta ära enda täielikku potentsiaali, sest 20 % tühjenemissügavusega on aku võimeline endast läbi laskma 30820kWh elektrienergiat. Pärast kümmet aastat on antud akulahendus toonud eramule kogukulu summas 19442 eurot, see tähendab, et aasta keskmine kulu antud lahendusel on 1942 eurot, mis on akuta lahendusest 442 eurot rohkem. Seega majanduslikust küljest antud lahendus ennast ära ei tasu.



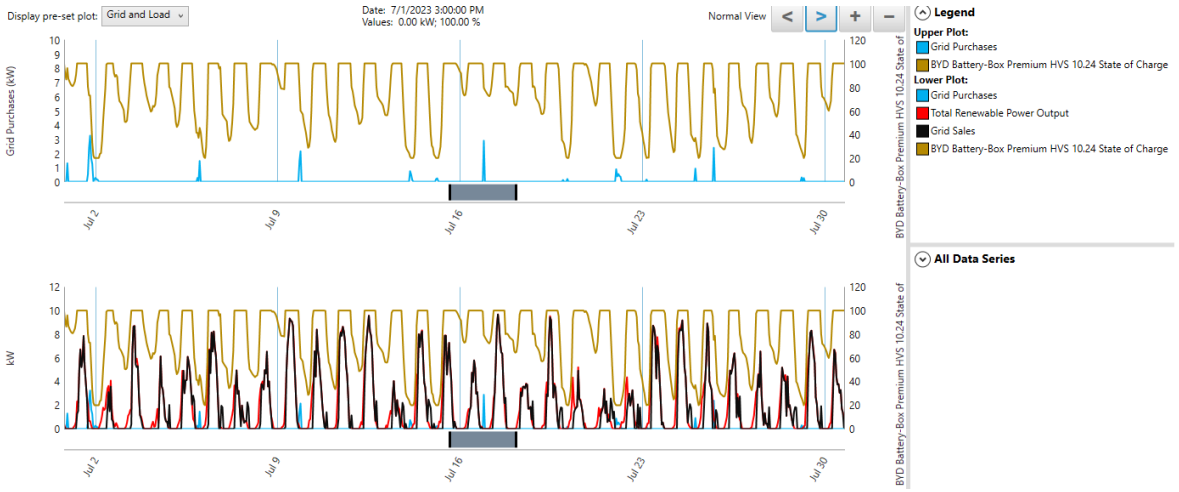
Joonis 4.5. Jaanuar 2023

Joonistel 4.5– 4.8 alumisel graafikul on näha variandid B ja D, kus lisaks võrgule on juurde lisatud PV paneelid ja ka aku lahendus. Päikesepaneelide kümneaastane kulu on 15189 eurot, millest esialgne finantseering 8940 eurot ning puudujääva elektrienergia ostuks kulub kümne aasta peale 6249 eurot (see sisaldab siis ka võrgutasusid jms). Homer Gridi arvutuste kohaselt sisestatud andmete põhjal PV park ennast kümne aastaga ära ei tasu.



Joonis 4.6. Aprill 2023

Variandi D puhul (PV park + akupank) saab jällegi komistuskiviks akupanga suur esialgne investeering (kokku koos PV pargiga 22441 eurot). Samas kasutatakse PV pargi abil akut edulisemalt ära. Aastane käive on 2359 kWh ehk siis kümne aasta peale kasutatakse aku garanteeritud potentsiaalist 76,5 %. Seega antud lahendi puhul on aku kasutamise igati õigustatud. Kuid kui lähtuda ainult majanduslikust vaatest, siis see ei tasu ära.



Joonis 4.7. Juuli 2023

Variandi D (võrk + PV + aku) puhul on juulis võrgust ostetud energia ainult 35 kWh, võrku müüdi elektrit vähem (salvestuseta variandi puhul 1317 kWh ja salvestusega variandil 1194 kWh), sest salvestusseadmed suurendasid päikeseenergia otsekasutust.

Joonis 4.8. Oktoober 2023

Simulatsiooni tulemused on kokkuvõtvalt ära näidatud tabelis 3a ja 3b. Tegu on ühtse tervikliku tabeliga, kuid kuna tabel oli liiga lai, siis andmete paremaks kuvamiseks poolitas autor tabeli.

Tabel 3a. Tulemused

Architecture					Cost				System	Project Economics		
				Imported PV-MPPT (kW)	NPC (€)	LCOE (€/kWh)	Operating cost (€/yr)	CAPEX (€)	Ren Frac (%)	Simple Payback (yr)	Utility Bill Savings (€/yr)	Net Present Utility Bill Savings (€)
					€11,662	€0.197	€1,500	€0.00	0		€0	€0
				10.0	€15,189	€0.118	€696.13	€9,776	56.8		€803.55	€6,249
					€19,442	€0.320	€1,352	€8,926	0		€147.45	€1,147
				10.0	€22,441	€0.191	€583.66	€17,902	61.3		€916.03	€7,124

Tabel 3b. Tulemused

	10,24 kWh			Elekter		
Energy Charge Savings (€/yr)	Annual Throughput (kWh/yr)	Nominal Capacity (kWh)	Accessible Capacity (kWh)	Energy Cost (€)	Energy Purchased (kWh)	Energy Sold (kWh)
€0				€1,500	7,616	0
€803.55				€696.13	7,136	8,905
€147.45	1,370	10.2	8.19	€1,352	7,894	186
€916.03	2,359	10.2	8.19	€583.66	5,853	7,511

Järgneb tabelit 3a ja 3b tulpade seletus:

NPC (*net present cost or life-cycle cost*) – komponendi puhaskulu (või elutsükli maksumus), see on kõikide kulude summa, mis on seotud komponendi paigaldamise ja kasutamisega projekti eluea jooksul, millest on lahutatud kõigi projekti eluea jooksul teenitud tulude nüüdis väärtus. HOMER Grid arvutab süsteemi iga komponendi ja süsteemi kui terviku netokulu. NPC on HOMER Gridi peamine majanduslik toodang [25].

LCOE (*levelized cost of energy*) – tasandatud energiakulu (COE), süsteemi toodetud kasuliku elektrienergia keskmine kulu kWh kohta. COE arvutamiseks jagatakse

elektrienergia tootmise aastapõhised kulud kogu teenindatud elektrikoormusega [25], kasutades järgmist võrrandit :

$$COE = \frac{C_{\text{ann},tot}}{E_{\text{served}}} \tag{4.1}$$

kus,

$C_{ann,tot}$ = aastapõhine kogukulu (€/aastas)

E_{served} = kogu teenindatud elektrikoormus (kWh/aastas)

TOLTAL ANNULIZED COST – aastapõhine kogukulu (€/aastas) on kogu praeguse netokulu aastapõhine väärtus. HOMER Grid arvutab aastapõhise kogukulu [25], kasutades järgmist võrrandit:

$$C_{ann,\,tot} = \mathrm{CRF}(i, R_{proj}) \cdot C_{NPC,\,tot} \tag{4.2}$$

kus,

$C_{NPC,tot}$ = kogu praegune kulu (€)

i = intressimäär, mis arvestab inflatsiooni mõju (%)

R_{proj} = projekti kestus (aasta)

$CRF(\ )$ = kapitali taastamise tegur

OPERATING COST – tegevuskulu on kõigi kulude ja tulude aastapõhine väärtus. Siia alla ei kuulu algkapital. [35] On leitud valemiga (4.3):

$$C_{operating} = C_{ann,\,tot} - C_{ann,\,cap} \tag{4.3}$$

kus,

$C_{ann,cap}$ = aastapõhine kapitalikulu kokku (€/aastas)

$C_{ann,tot}$ = aastapõhine kogukulu (€/aaastas)

CAPEX – valitud komponendi kogumaksumus projekti alguses (€).

Ren Frac – taastuvenergia fraktsioon s.o taastuvenergia osakaal kogu tarnitud energiast.

Simple Payback – tasuvusaeg on aastate arv. Tasuvus näitab, kui kaua kulub aega investeerimiskulude katmiseks praeguse süsteemi ja baassüsteemi vahel.

Utility bill savings – kommunaalmaksete kokkuhoid (€/aastas).

Net present utility bill savings – kogu projekti vältel kommunaalmaksete kokkuhoid (€).

Energy charge savings – energiatasu kokkuhoid (€/aastas).

Energy Production – energia tootmine (kWh/aastas).

Annual throughput (kWh/yr) aku – salvestamise läbilaskevõime on energiakogus, mis ringleb läbi salvestuspanga ühe aasta jooksul. Läbilaskevõime on määratletud kui salvestuspanga energiataseme muutus, mida mõõdetakse pärast laadimiskadusid ja enne kadude tühjendamist. Seda väärtust kasutatakse akupanga eluea arvutamiseks.

Nominal capacity (kWh) aku – nimivõimsus (kwh).

Accessible capacity (kW) aku – ligipääsetav võimsus (kwh).

Energy cost (EUR) – energiahind aastas (€).

Energy purchased (kWh) – ostetud e. imporditud energia (kWh).

Energy sold (kWh) – müüdud e. exporditud energia (kWh). [25]

Simulatsioonis selgus, et elektri salvestamine akudesse ei ole majanduslikult otstarbekas, just tänu suurele alginvesteeringule. Vaadeldud eramu PV park on täies ulatuses tasutud ehk investeering varaseamalt tehtud. Kui voolukõikumiste vältimiseks on ikkagi akusid vaja, siis teostatakse järgnevalt uus modulatsioon, milles võetakse PV pargi hinnaks pool tema esialgsest investeeringust ning akulahenduse hinnast võtame maha käesoleval aastal käiku läinud toetuse, s.o 642 eurot iga salvestatava kWh kohta. BYD kõrgepinge 10,24kWh akupaki hind on 8216. Uus hind on seega: 8126 – (10,24 x 642 x 30%) = 6154 EUR.

Tabel 4a. Tulemused

	Architecture				Cost				System	Project Economics			
					NPC (€)	LCOE (€/kWh)	Operating cost (€/yr)	CAPEX (€)	Ren Frac (%)	Simple Payback (yr)	Utility Bill Savings (€/yr)	Net Present Utility Bill Savings (€)	Energy Charge Savings (€/yr)
					€8,782	€0.0668	€451.05	€5,274	57.8	6.3	€833.76	€6,484	€833.76
					€11,662	€0.197	€1,500	€0.00	0		€0	€0	€0
					€13,830	€0.113	€308.84	€11,428	61.3	9.7	€985.97	€7,668	€985.97
					€17,407	€0.282	€1,344	€6,954	0		€165.47	€1,287	€165.47

Tabel 4b. Tulemused

BYD 10,24 kWh			Elekter		
Annual Throughput (kWh/yr)	Nominal Capacity (kWh)	Accessible Capacity (kWh)	Energy Cost (€)	Energy Purchased (kWh)	Energy Sold (kWh)
			€665.93	7,127	9,287
			€1,500	7,616	0
2,429	10.2	8.19	€513.71	6,110	8,158
1,368	10.2	8.19	€1,334	8,026	318

Tabelites 4a ja 4b on näha, et uus hinnastamine mõjus tasuvusele positiivselt. Nüüd on soodsaim lahendus Variant B (PV+ võrk), tasuvusaeg 6,3 aastat. Variandi D (PV + võrk +

salvestus) tasuvusaeg on 9,7 aastat. Ülejäänud muud andmed jäid samaks, kuna muudetud sai ainult esialgse investeeringu hinda.

4.3.2 Maksimaalse laadimisvõimsuse arvutus.

Igal ajaetapil arvutab HOMER maksimaalse võimsuse, selleks kehtestatakse salvesti maksimaalsele laadimisvõimsusele kolm eraldi piirangut. Esimene piirang tuleneb kineetilisest salvestusmudelist (lühend - kbm), see on nn. kahe paagiga süsteemi maksimaalne võimsus mida saab absorbeerida. See on lahendatud valemiga 4.4: [25]

$$P_{batt,cmax,kbm} = \frac{-kcQ_{max} + kQ_1 e^{-k\Delta t} + Qkc(1-e^{-k\Delta t})}{1-e^{-k\Delta t} + c(k\Delta t - 1 + e^{-k\Delta t})} \tag{4.4}$$

kus:

Q_1 = salvestuskomponendis olev energia (kWh) ajasammu alguses

Q = energia koguhulk (kWh) salvestuskomponendis ajasammu alguses

Q_{max} = akupanga koguvõimsus (kWh)

c = salvestusmahu suhe (ühikuta)

k = salvestuskiiruse konstant (h-1)

Δt = sammu pikkus (h)

Teine piirang on seotud salvestuskomponendi maksimaalse laadimismääraga (mcr). Sellele maksimaalsele laadimiskiirusele vastav salvestuslaengu võimsus on leitav valemi 4.5 järgi: [25]

$$P_{batt,cmax,mcr} = \frac{(1-e^{-\alpha_c \Delta t})(Q_{max}-Q)}{\Delta t} \tag{4.5}$$

kus:

α_c on salvesti maksimaalne laadimiskiirus (A/Ah)

Q_{max} on salvesti koguvõimsus (kWh)

Kolmas piirang on seotud salvestuskomponendi maksimaalse laadimisvooluga Sellele maksimaalsele laadimisvoolule vastab salvesti maksimaalne laadimisvõimsus (batt,cmax). [25] Leitakse võrrandi 4.6 abil:

$$P_{batt,cmax,mcc} = \frac{N_{batt}\, I_{nom}\, V_{nom}}{1000} \tag{4.6}$$

kus:

N_{batt} = patareide arv akupangas

I_{max} = salvestusruumi maksimaalne laadimisvool [A]

V_{nom} = salvesti nimipinge [V]

Maksimaalne salvestusvõimsus määratakse valemi 4.7 järgi:

$$P_{batt,cmax} = \frac{(P_{batt,cmax,kbm}, P_{batt,cmax,mcr}, P_{batt,cmax,mcc})}{\eta_{batt,c}} \tag{4.7}$$

kus,

$\eta_{batt,c}$ on salvestuse efektiivsus (%). [25]

See arvutus näitab kui palju aku suudab vastu võtta, näiteks kas akupank suudab salvestada kogu saadaoleva taastuvenergia ülejäägi või kui palju puudu jäävat energiat peaks näiteks generaator juurde tootma. Maksimaalne laadimisvõimsus varieerub ühest ajaetapist teise vastavalt selle laetuse astmele ning hiljutisele laadimise ja tühjenemise ajaloole [25].

4.3.3 Maksimaalse tühjenemisvõimsuse arvutus

Igas ajaetapis arvutab HOMER maksimaalse võimsuse, millega salvesti saab tühjendada. Siin kasutab Homer samuti kineetilise salvestimudelit. Maksimaalne tühjenemisvõimsus varieerub ühest ajaetapist teise vastavalt salvesti laetuse olekule ning hiljutisele laadimis- ja tühjenemise ajaloole. Kineetilise salvestusmudeli tühjenemisvõimsuse (batt,dmax,kbm) leidmiseks saab kasusada järgmist valemit: [25]

$$P_{batt,dmax,kbm} = \frac{kQ_1 e^{-k\Delta t} + Qkc(1-e^{-k\Delta t})}{1-e^{-k\Delta t} + c(k\Delta t - 1 + e^{-k\Delta t})} \tag{4.8}$$

kus:

Q_1 = salvestusruumis olev energia (kWh) ajasammu alguses

Q = salvestusruumis oleva energia koguhulk (kWh) ajasammu alguses

c = salvestusmahu suhe (ühikuta)

k = salvestuskiiruse konstant (h-1)

Δt = sammu h pikkus

HOMER eeldab, et tühjenduskaod tekivad pärast seda, kui energia väljub kineetilisest salvestusmudelist, seega arvutatakse akupanga maksimaalne tühjenemisvõimsus valemi 4.9 abil:

$$P_{batt,dmax} = \eta_{batt,d}\, P_{batt,dmax,kbm} \tag{4.9}$$

kus,

$\eta_{batt,d}$ on salvesti tühjenemise efektiivsus. [25]

See on maksimaalne võimsus, millega salvesti saab teatud aja jooksul tühjeneda. See on oluline suurus, eriti kui on samaaegselt vaja toita suure võimsusega elektriseadmeid.

KOKKUVÕTE

Euroopa Liit ja Eesti on seadnud sihiks saavutada kliimaneutraalne majandus aastaks 2050 [4]. REKK 2030 kohaselt suurendas Eesti vahesammuna kliimaneutraalsuse suunas oma 2030. a kliimaeesmärki, kohustudes vähendama heitkoguseid nimetatud aastaks vähemalt 55 % (seni plaanitud 40 % asemel) võrreldes 1990. aastaga [6].

Elektrienergia varustuskindluse seisukohast on päikeseenergia üheks stohhastiliseks elektrienergia liigiks, mis on saadud küll kliimaneutraalsest taastuvenergiaallikatest, kuid varustuskindluse seisukohast pole tegu jätkusuutliku ja turunõudlust stabiilselt rahuldava lahendusega. Seevastu salvestusseade võimaldab juhtida nn stohhastilist elektrivõimsust, kuna võimaldab talletada juhitamatut energiat ja seda kasutada/juhtida vastavalt turunõudlusele. Selliselt on jaotusvõrgu huvides võimalikult laialdane salvestusseadmete kasutamine mis iganes stohastilise elektrienergia varustuse valdkonnas.

Põlevkivi kasutamise vähendamisel on oluline roll nii taastuvenergia kasutuselevõtmisel kui ka salvestustehnoloogiate arendustel. Elektrienergia salvetustehnoloogiate olulised kasutajad võiksid olla ka kodumajapidamised, kus kasutatakse või kavatsetakse kasutada päikeseenergiat.

Käesoleva töö aktuaalsust näitab ühtlasi asjaolu, et Vabariigi Valitsuse 2023–2027. a tegevusprogrammi kohaselt on kavandatud pöörata tähelepanu taastuvenergeetikaga proportsioonis salvestusvõimsuste rajamisele [6]. Tänaseni on salvestusseadmed olnud riikliku poliitika mõistes vaeslapse rollis, kuna Eesti kliimaneutraalsuse eesmärgid on seni soodustanud eelkõige taastuva elektrienergia kasutusele võtmist läbi erinevate riiklike toetusmeetmete. Ühtlasi ei ole seatud tingimusi päikeseparkide juurde salvestite rajamiseks ega ole seda olulisel määral ka riiklikult toetatud [9].

Kuna käesoleva töö eesmärk on leida vastus küsimusele, kas keskmisel majapidamisel tasub kehtivaid toetusmeetmeid arvestades majanduslikult panustada nende eesmärkide täitmisse, on töös võrreldud erinevaid aku liike nende keemilis-füüsikaliste ning majandusliku tasuvuse ja eesmärgi seisukohast. Kodutarbijatele on oluline, et elektrienergia

salvestusseade oleks kompakne ja taskukohane. Kui taskukohasust saab mõjutada riiklike toetusmeetmete, maksupoliitikaga ja pankadest turutingimustel pakutavate laenudega, siis muus osas tuleb lähtuda akude kasutusviisist. Eesti keskmist majapidamist arvestades on tänaste tehnoloogiliste võimaluste juures mõistlikum lahendus LFP või LTO aku.

Päikeseenergia optimaalseks kasutamiseks on eelduslikult otstarbekaim viis kasutada akupankasid. Käesoleva töö praktilise väärtusena saab esile tuua elulistel näitajatel põhinevat eramaja akupanga modelleerimist neljas erinevas simulatsioonis: tarbimine ainult võrgust, tarbimine võrgust ja päikesepaneelidest, tarbimine võrgust ja akupangast ning tarbimine võrgust, päikesepaneelidest ja akupangast.

Tasuvuskalkulatsiooni teostamiseks sisestati Homer Gridi 2023. aasta reaalsed eramu elektrienergia tarbimise andmed, mis sisaldasid nii muutumatuid kui muutuvaid tasusid (muutumatud: elektripaketi kuutasu, ampritasu, käibemaks; muutuvad: elektriedastamine öö, aktsiis, NordPool 2023 aasta tunnipõhised elektrienergia börsihinnad). Kuna töös toodud näide eramu on varustatud ka 11,7 kW päikesepaneelidega, siis sisestati ka tunnipõhised andmed toodangu kohta.

Töös esitatud arvestuste alusel ei olnud akupanga paigaldamine tänaste toetusmeetmete raames majanduslikult tasuv üheski nimetatud simulatsioonis. Seega, kui vaadelda ainult majanduslikku aspekti ja välja jätta nn maailma päästmine, kliimaneutraalsus jms, siis ei tasu akupank ennast kümne aastaga ära. Eelnevast järeldub, et kui riik soovib kodumajapidamisi kaasata kliimaneutraalsuse eesmärkide saavutamisele, tuleks senisest läbimõeldumalt kavandada vastavas osas maksu- või toetusmeetmeid.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Kliimaministeerium. (s.a). Kliimamuutused/põhjus. [veebilehtl] https://kliimaministeerium.ee/rohereform-kliima/kliimamuutused#pohjus (25.12.2023)
2. Kliimaministeeriumi. (s.a). Kliimamuutused/efekt. [veebileht] https://kliimaministeerium.ee/rohereform-kliima/kliimamuutused#efekt (25.12.2023)
3. Pariisi kokkuleppe ratifitseerimise seadus. (vastu võetud, 26.10.2016, viimati jõustunud 02.11.2016). – *Riigi Teataja* https://www.riigiteataja.ee/akt/201112016002 (23.01.2024).
4. Euroopa Ülemkogu. (s.a). Euroopa roheline kokkulepe. [veebileht] https://www.consilium.europa.eu/et/policies/green-deal/#what (25.12.2023)
5. Euroopa komisjon. (s.a). Energia- ja kliimakava. [veebileht] https://energy.ec.europa.eu/index_en (25.12.2023)
6. Eesti riiklik energia- ja kliimakava aastani 2030 ajakohastatud versioon. REKK 2030 ajakohastatud versioon. [veebileht] https://view.officeapps.live .com/op/view.asp x?src=htt ps%3A%2F %2Fkliimaministeerium.ee%2Fsites%2Fde fault%2Ffiles%2Fdoc uments%2F202308%2FEesti%2520riikliku%2520energia%2520ja%2520kliimakava%2520aastani%25202030%2520ajakohastamise%2520versiooni%2520kavand_0_0.docx&wdOrigin=BROWSELINK (12.02.2024).
7. Rohetiiger. Energia teekaart. [veebileht] https://rohetiiger.ee/wp-content/uploads /2021/12 /Energia-teekaart-17122021.pdf (08.12.2024)
8. **Mongrid, K., Viswanathan, V., Balducci, P., Alam, J., Fotedar, V., Koritarov, V., Hadjerioua, B.** (2019). Energy Storage Technology and Cost Characterization Report. [veebileht] https://energystorage.pnnl.gov/pdf/PNNL-28866.pdf (11.11.2023)
9. **Grünvald, O., Kask, Ü., Link, S.** Lõpparuanne. FinantsAkadeemia OÜ. (2022). Analüüs ja ettepanekud energia salvestus turu käivitamise kohta. https://energiatalgud.ee/sites/default/files/2023-01/LÕPPARUANNESALVESTUS.pdf (08.12.2024).
10. **Mitali, J., Dhinakaran, S., Mohamad, A.** (2022). Energy storage systems: A review. - Energy Storage and Saving. Nr. 1. lk. 166-216. [e-ajakiri] https://www.sciencedirect.com /science/article/pii/S277268352200022X?via%3Dihub (18.11.2023).
11. Roofit Solar Energy OÜ. (s.a). Päikeseenergia salvestamine. [veebileht] https://roofit.solar/et/paikesepaneelide-akud-paikeseenergia-salvestamine/ (23.11.2023)
12. **May, G., Davidson, A., Monahov, B.** 2018. Lead batteries for utility energy storage: A review, J. Energy Storage, 15 lk. 145-157

13. Energiatalgud. Pliiaku. [veebileht] https://energiatalgud.ee/moisted/pliiaku (23.11.2023)
14. **Risthein, E.** (2007). Sissejuhatus energiatehnikasse. Tallinna Tehnikaülikooli elektriajamite ja jõuelektroonika instituut. Tallinn. [on-line] Elektrotehnika_1EU.indd (energiatalgud.ee) (11.12.2023).
15. **Akinyele, D. O., Rayudu R. K.** 2014. Review of energy storage technologies for sustainable power networks - Sustainable Energy Technologies and Assessments. Nr.8. [e-ajakiri] ScienceDirect lk 74-91. (11.11.2023).
16. Cadex Electronics Inc. 2023. BU-205:Types of lithium-ion. [veebileht] https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion (14.02.2024)
17. **Xin Shen, Xue-Qiang Zhang, Fei-Ding, Jia-Qi Huang, Rui Xu, Xiang Chen, Chong yan, Fang -Yuan Su, Cheng-Meng Chen, Xingijang Liu, Qiang Zhang.** 2021. Advanced electrode materials in lithium batteries. Retrospect and prospect – Energy Material Advances. Nr. 4. [e-ajakiri] https://www.researchgate.net/publication/348629720_Advanced_Electrode_Materials in_Lithium_Batteries_Retrospect_and_Prospect (04. 11. 2023).
18. CHATGPT. 2023. [on-line] www.chatgpt.com (05.11)
19. **Yu Miao, P. Hynan, A. von Jouanne, A. Yokochi.** 2019. Current li-ion battery technologies in electric vehicles and opportunities for advancements – Energies. [e-ajakiri] https://www.researchgate.net/publication/331904470_Current_LiIon_Battery_Technologies_in_Electric_Vehicles_and_Opportunities_for_Advancements (05.11.23).
20. **Tabo, A.** 2022. Kodutarbijate elektrisalvestite tasuvus ja mõju elektrisüsteemi koormusgraafikule. Bakalaureusetöö: TalTech Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut. Tallinn. lk 16-17.
21. Cadex Electronics Inc. 2023. BU-107:Comparison table of secondary batteries. [veebileht] https://batteryuniversity.com/article/bu-107-comparison-table-of-secondary-batteries (26.12.2023)
22. Ettevõtluse ja Innovatsiooni sihtasutus. (s.a). 2023. [veebileht] https://kredex.ee/et/majaduueks (24.04.2024)
23. Wikipedia. 2024. History of the battery. [on-line] https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_battery (01.04.2024).
24. **Duan bin, Fei Wang, Gedamu, A., Liumin Suo, Yonggang Wang, Chunseng Wang.** 2018. Progress in aqueous rechargeable sodium-ion batteries - Advanced Energy Materials. Nr. 8. [e-ajakiri] https://www.researchgate.net/publication/323702650_Progress_in_Aqueous_Rechargeable_Sodium-Ion_Batteries (12.12.2023).
25. UL LLC. 2022. HomerGrid manual. [veebileht] https://support.ul-renewables.com/homer-manual-grid/index.html (09.04.2024)
26. Elektrilevi OÜ. (s.a). Tarbimisajalugu. [veebileht] https://www.elektrilevi.ee/et/eteenindus/tarbimisajalugu (13.02.2024)

27. Keskkonnaagentuur. (s.a). Ajaloolised ilmaandmed. [veebileht] https://www.ilmateenistus.ee/kliima/ajaloolised-ilmaandmed/ (13.02.2024)
28. The Australian National University. Global Greenfield Pumped Hydro Energy Storage Atlas. [veebileht] https://re100.eng.anu.edu.au/global/ (14.12.2023)
29. Riigikontrolli ülevaade Riigikogule. (06.11.2023). Eesti elektrisüsteemi valikud. Millised on Eesti elektrisüsteemi järgmise kümnendi suundumused ja väljakutsed? Riigikontrolli ülevaade Riigikogule. Tallinn.
30. Energiatalgud. 2022. Avaleht. [veebileht] https://energiatalgud.ee/ (25.12.2023)
31. Elering AS. (s.a). Ettevõtte tutvustus. [veebileht] https://www.elering.ee/luhiulevaade-eleringist (16.03.2024)
32. Elektrilevi OÜ. (s.a). Elektrivõrgu klientide elektripaigaldiste ühe ja kahepoolse toite mõju analüüs varustuskindlusele. https://www.elektrilevi.ee/-/doc/8644141/ettevottest/tutvustus/failid/Elektrivorgu_klientide_elektripaigaldiste_yhe_ja_kahepoolse_toite_moju_analyys_varustuskindlusele.pdf (12.02.2024).
33. Elektrilevi OÜ. (s.a). Abiinfo. [veebileht] https://www.elektrilevi.ee/abiinfo/katkestuste-kysimused (12.02.2024)
34. **Tampere, A. (**2016). Jaotusvõrgu varustuskindluse probleemid ja nende lahendamine. Magistritöö. TalTech. Elektroenergeetika instituut. Tallinn. lk 3, 58.
35. Majandus- ja kommunikatsiooniministri 6. aprilli 2005. a määruse nr 42 „Võrguteenuste kvaliteedinõuded ja võrgutasude vähendamise tingimused kvaliteedinõuete rikkumise korral" muutmine. (vastu võetud, 11.06.2014, viimati jõustunud 16.06.2014). – *Riigi Teataja* https://www.riigiteataja.ee/akt/113062014012 (18.01.2024).
36. Elektrilevi OÜ. (s.a). Katkestused. [veebileht] https://www.elektrilevi.ee/et/katkestused/rikkelised-katkestused (08.04.2024)
37. Elering AS. (s.a). NordPoolSpot elektribörsi EE (Eesti) piirkonna tunni hinnad. [on-line] https://dashboard.elering.ee/et/nps/price?interval=minute&period=years&start=2022-12-31T22:00:00.000Z&end=2023-12-31T21:59:59.999Z&show=table (20.02.2024).
38. Elektrituruseadus. (vastu võetud, 11.02.2003, viimati jõustunud 12.05.2024). – *Riigi Teataja* https://www.riigiteataja.ee/akt/102052024004 (16.05.2024).
39. Pühade ja tähtpäevade seadus. (vastu võetud, 27.01.1998, viimati jõustunud 30.12.2022). – *Riigi Teataja* https://www.riigiteataja.ee/akt/109032011007 (17.03.2024).
40. BYD Company Ltd. (s.a). Paigaldusjuhend. [veebileht] https://site.bydbatterybox.com/uploads/downloads/Battery-Box Premium HVS&HVM Operating Manual - V1.3-5f6872079759b.pdf (20.04.2024)
41. BYD Company Ltd. (s.a). Garantii tingimused. [veebileht] https://www.bydbatterybox.com/uploads/downloads/BYD%20Battery-Box%20Premium%20HVS&HVM%20Limited%20Warranty-Europe-EN%20V1.2-61a729716cbb5.pdf (20.04.2024)

42. Kostal Solar Electric GmbH (s.a). Datasheet. [veebileht] https://www.kostal-solar-electric.com/en-gb/products/hybrid-inverter/plenticore-plus/ (28.04.2024)

43. BYD Company Ltd. (s.a). Datasheet. [veebileht] https://www.bydbatterybox.com/downloads (20.04.2024)

LISAD

Lisa 1. Kostal Plenticore plus 10 tooteleht

SOLAR ELECTRIC

KOSTAL

PLENTICORE plus

Hybrid inverter - G2 3.0–10 kW

Data sheet

Lisa 1 järg

PLENTICORE plus G2: The new standard – versatile and smart

All-in-one

- PV hybrid inverter with battery input with optional activation code [1, 2]
- Compatibility with various high-voltage batteries [2]
- 3 MPP trackers suited to the layout of almost all roofs
- Extended MPP range – perfect for repowering

Smart connected

- Smart Communication Board: control interfaces integrated as standard
- Future-proof: new functions via software update
- Display, data logger and system monitoring
- Free Solar Portal for monitoring the PV system
- 2 x LAN, WiFi, 4 x digital switching outputs for self-consumption control or event reporting, „SG Ready“ compatible, Evaluation of external overvoltage protection modules
- Modbus/SunSpec (TCP) for Smart Home integration

Smart performance

- Fast, self-learning shadow management – adapts individually to the installation site
- Dynamic active power control and 24-hour home-consumption measurement [2]
- Self-learning generation and consumption forecast – for optimum self-consumption [2]
- Low conversion losses due to DC coupling and high-voltage battery
- Prepared for additional battery charge via AC energy sources [2]

Easy to install

- Simple device configuration using commissioning wizard via display or smartphone
- Safe installation due to clearly arranged, separate terminal compartment with Push-In terminals and protected power electronics
- Compatible with RCD type A
- Auto Update: Always at the cutting edge of technology

PLENTICORE plus G2: compact and rapidly deployable

56,3 cm

23,3 cm

40,5 cm

[1] Activation code battery available at: shop.kostal-solar-electric.com
[2] Compatible energy meter required (see document Released energy meters in the download area for the product)

Lisa 1 järg

Technical data PLENTICORE plus G2

	PLENTICORE plus G2		3.0	4.2	5.5	7.0	8.5	10
	Power class		3.0	4.2	5.5	7.0	8.5	10
Input side (DC)	Max. PV power (cos φ = 1)	kWp	4.5	6.3	8.25	10.5	12.75	15
	Max. PV power per DC input	kWp	6.5					
	Nominal DC power	kW	3.09	4.33	5.67	7.22	8.76	10.31
	Rated input voltage ($U_{DC,r}$)	V	570					
	Start-up input voltage ($U_{DCstart}$)	V	150					
	Max. system voltage (U_{DCmax})	V	1000					
	MPP range at rated output (U_{MPPmin}) 3)	V	180	180	225	290	345	405
	MPP range at rated output (U_{MPPmax}) 3)	V	720	720	720	720	720	720
	Working voltage range ($U_{DCworkmin}$ - $U_{DCworkmax}$) 4)	V	120...900					
	Max. input current (I_{DCmax}) per DC input	A	13					
	Max. PV short-circuit current (I_{SC_PV}) per DC input	A	16.25					
	Number of DC inputs		3					
	Number of combined DC inputs (PV or battery)		1					
	Number of independent MPP trackers		3					
	DC 3 – battery input optional							
	Min. working voltage for battery input ($U_{DCworkbatmin}$)	V	120					
	Max. working voltage for battery input ($U_{DCworkbatmax}$)	V	650					
	Max. charging current/discharging current at battery input	A	13/13					
Output side (AC)	Rated power, cos φ = 1 ($P_{AC,r}$)	kW	3.0	4.2	5.5	7.0	8.5	10
	Apparent output power ($S_{AC,Norm}$, $S_{AC,max}$)	kVA	3.0/3.0	4.2/4.2	5.5/5.5	7.0/7.0	8.5/8.5	10/10
	Min. output voltage (U_{ACmin})	V	320					
	Max. output voltage (U_{ACmax})	V	500					
	Rated output current ($I_{AC,r}$)	A	4.33	6.06	7.94	10.10	12.27	14.43
	Max. output current (I_{ACmax})	A	4.81	6.74	8.82	11.23	13.63	16.04
	Short-circuit current (peak/RMS)	A	6.8/4.8	9.5/6.7	12.5/8.8	15.9/11.2	19.3/13.6	22.8/16.1
	Grid connection		3N~, 230/400 V, 50 Hz					
	Rated frequency (f_r)	Hz	50					
	Min/max grid frequency (f_{min}/f_{max})	Hz	47/53					
	Setting range of the power factor (cos $\varphi_{AC,r}$)		0.8 … 1					
	Power factor for rated power (cos $\varphi_{AC,r}$)		1					
	Max. THD	%	3					
	Standby	W	7.9					
η	Max. efficiency	%	97.1	97.1	97.1	97.2	97.2	97.2
	European efficiency	%	95.3	95.5	96.2	96.5	96.5	96.5
	MPP adjustment efficiency	%	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9

Lisa 1 järg

	PLENTICORE plus G2		3.0	4.2	5.5	7.0	8.5	10
System data	Topology: Without galvanic isolation – transformerless		yes					
	Protection class according to IEC 60529		IP 65					
	Protective class according to IEC 62103		I					
	Overvoltage category according to IEC 60664-1, input side (PV generator)		II					
	Overvoltage category according to IEC 60664-1, output side (grid connection)		III					
	Degree of contamination		4					
	Environmental category (outdoor installation)		yes					
	Environmental category (indoor installation)		yes					
	UV resistance		yes					
	AC cable diameter (min-max)	mm	8...17					
	AC cable cross-section (min-max)	mm^2	1.5...6			2.5...6		4...6
	DC cable cross-section (PV/BAT) (min-max)	mm^2	2.5...6 / 4...6					
	Max. fuse protection on output side		B16/C16					B25/C25
	Internal operator protection according to EN 62109-2 (compatible with RCD type A from FW 01.14)		yes					
	Independent disconnection device according to VDE 0126-1-1		yes					
	Height/width/depth	mm (in)	563/405/233 (22.17/15.94/9.17)					
	Weight	kg (lb)	19.6 (43.21)			21.6 (46,62)		
	Cooling principle – regulated fans		yes					
	Max. air throughput	m^3/h	184					
	Noise emission (typical)	dB(A)	39					
	Ambient temperature	°C (°F)	-20…60 (-4...140)					
	Max. installation altitude above sea level	m (ft)	2000 (6562)					
	Relative humidity	%	4…100					
	Connection technology, DC side		SUNCLIX plug					
	Connection technology, AC side		Spring-type terminal strip					
	Connection technology, interfaces		Push-In terminal					
Interfaces	Ethernet LAN (RJ45) / WiFi (IEEE 802.11b/g/n 2.4GHz)		2 / yes					
	Connection of energy meter for collecting energy data (Modbus RTU)		1					
	Digital inputs		Ripple control receiver or external battery control, CEI, OVP monitoring					
	Digital outputs		4 (24 V, 100 mA)					
	Webserver (user interface)		yes					
	Warranty (Smart Warranty / Smart Warranty plus [1])	Years	10 (5 + 5)					
	Directives/Certification		CE, GS, CEI 0-21, C10/11, EN 62109-1, EN 62109-2, EN 60529, EN 50438[2], EN 50549-1[2], NAVEEA, G98, G99, EIFS2018, IEC 61727, IEC 62116, RD 1699, RD 647, RFG, TF3.3.1, TOR Erzeuger, UNE 206006, UNE 206007-1, VDE 0126-1-1, VDE-AR-N 4105, VJV2018					

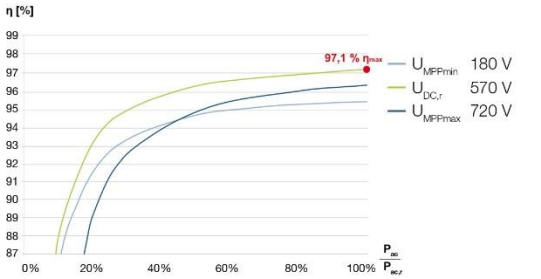
Subject to technical changes. Errors excepted. You can find current information at www.kostal-solar-electric.com. Manufacturer: KOSTAL Industrie Elektrik GmbH, Hagen, Germany

[1] Activate your free warranty (Smart Warranty) now in the KOSTAL Solar online shop (shop.kostal-solar-electric.com). This does not affect your statutory warranty. You will find more information about the service and warranty conditions in the download area for your product.
[2] Does not apply to all national annexes
[3] MPP range at rated output: Outside the MPP range, MPP control takes place below the nominal power. Based on full occupancy of all MPP trackers.
[4] Working voltage range: No feed-in takes place outside the working voltage range.

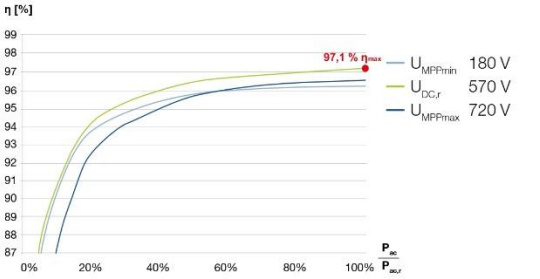
Lisa 1 järg

PLENTICORE plus G2 available in 6 power classes

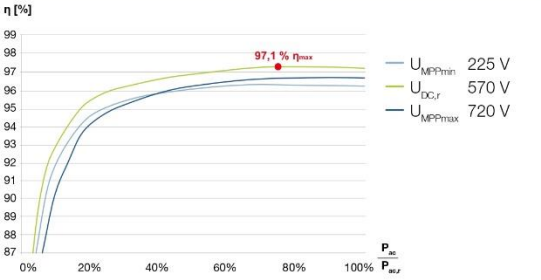
PLENTICORE plus 3.0 G2



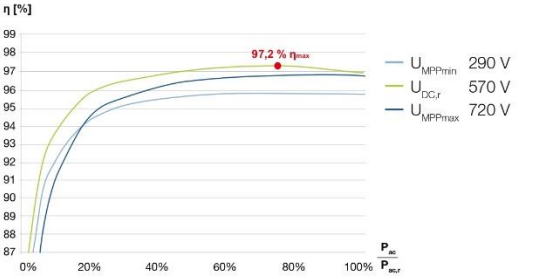
PLENTICORE plus 4.2 G2



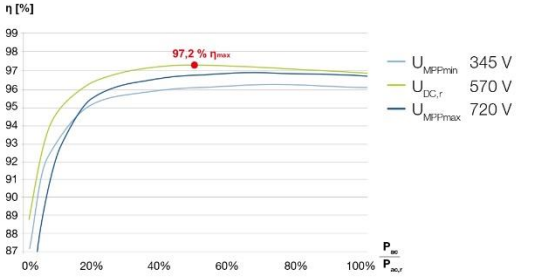
PLENTICORE plus 5.5 G2



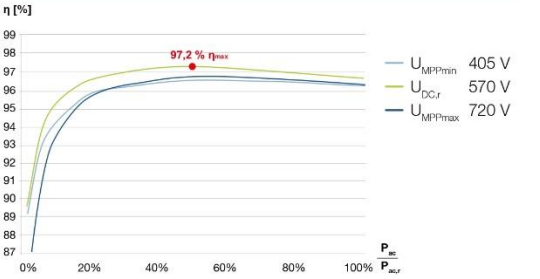
PLENTICORE plus 7.0 G2



PLENTICORE plus 8.5 G2



PLENTICORE plus 10 G2



Services for our products

FAQs:
kostal-solar-electric.com/Service_Support

Product registration, KOSTAL Smart Warranty, warranty extension, battery activation code or purchase of accessories: shop.kostal-solar-electric.com

Get in touch: service-solar@kostal.com

Lisa 2. BYD akupanga tooteleht

BATTERY-BOX PREMIUM HVS / HVM

- Capable of High-Powered Emergency-Backup and Off-Grid Functionality
- Highest Efficiency Thanks to a Real High-Voltage Serial Connection
- The Patented Modular Plug Design Requires no Internal Wiring and Allows for Maximum Flexibility and Ease of Use
- Cobalt Free Lithium Iron Phosphate (LFP) Battery: Maximum Safety, Life Cycle, and Power
- Compatible with Leading 1 and 3 Phase High Voltage Battery Inverters
- Two Distinct Modules to Cover the Complete Range of System Sizes
- Highest Safety Standards like VDE 2510-50

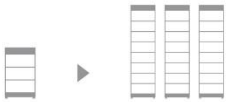
BATTERY-BOX PREMIUM HVS

One Battery-Box Premium HVS is composed of 2 to 5 HVS battery modules that are serially connected to achieve a usable capacity of 5.1 to 12.8 kWh.
Additionally, direct parallel connection of up to 3 identical Battery-Box Premium HVS allows a maximum capacity of 38.4 kWh.
Ability to scale by adding HVS modules or parallel HVS stacks at anytime.

HVS 5.1 — 3 x HVS 12.8

BATTERY-BOX PREMIUM HVM

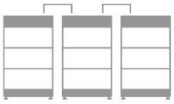
One Battery-Box Premium HVM is composed of 3 to 8 HVM battery modules that are serially connected to achieve a usable capacity of 8.1 to 22.1 kWh.
Additionally, direct parallel connection of up to 3 identical Battery-Box Premium HVM allows a maximum capacity of 66.2 kWh.
Ability to scale by adding HVM modules or parallel HVM stacks at anytime.



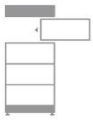
HVM 8.3 — 3 x HVM 22.1

FLEXIBLE, EFFICIENT, SIMPLE

Internal Plug Connection
No Additional Wiring Required



5.1 - 66.2 kWh
Tailored Sizing for Each Application



Extend Anytime
Easily Adapts to New Requirements

High Power
Power for Every Application

BATTERY BOX

Lisa 2 järg

TECHNICAL PARAMETERS **PREMIUM HVS / HVM**

	HVS 5.1	HVS 7.7	HVS 10.2	HVS 12.8
Battery Module	HVS (2.56 kWh, 102.4 V, 38 kg)			
Number of Modules	2	3	4	5
Usable Energy [1]	5.12 kWh	7.68 kWh	10.24 kWh	12.8 kWh
Max Output Current [2]	25 A	25 A	25 A	25 A
Nominal Voltage	204 V	307 V	409 V	512 V
Operating Voltage	160~240 V	240~360 V	320~480 V	400~600 V
Dimensions (H/W/D)	712x585x298 mm	945x585x298 mm	1178x585x298 mm	1411x585x298 mm
Weight	91 kg	129 kg	167 kg	205 kg

	HVM 8.3	HVM 11.0	HVM 13.8	HVM 16.6	HVM 19.3	HVM 22.1
Battery Module	HVM (2.76 kWh, 51.2 V, 38 kg)					
Number of Modules	3	4	5	6	7	8
Usable Energy [1]	8.28 kWh	11.04 kWh	13.80 kWh	16.56 kWh	19.32 kWh	22.08 kWh
Max Output Current [2]	50 A	50 A	50 A	50 A	50 A	50 A
Nominal Voltage	153 V	204 V	256 V	307 V	358 V	409 V
Operating Voltage	120~180 V	160~240 V	200~300 V	240~360 V	280~420 V	320~480 V
Dimensions (H/W/D)	945 x 585 x 298 mm	1178 x 585 x 298 mm	1411 x 585 x 298 mm	1644 x 585 x 298 mm	1877 x 585 x 298 mm	2110 x 585 x 298 mm
Weight	129 kg	167 kg	205 kg	243 kg	281 kg	319 kg

	HVS & HVM
Operating Temperature	-10 °C to +50°C
Battery Cell Technology	Lithium Iron Phosphate (cobalt-free)
Communication	CAN/RS485
Enclosure Protection Rating	IP55
Round-trip Efficiency	≥96%
Certification	VDE2510-50 / IEC62619 / CEC / CE / UN38.3
Applications	ON Grid / ON Grid + Backup / OFF Grid
Warranty [3]	10 years
Compatible Inverters	Refer to BYD Battery-Box Premium Inverter Compatible List and Minimum Configuration List

[1] DC Usable Energy, Test conditions: 100% DOD, 0.2C charge & discharge at + 25 °C. System Usable Energy may vary with different inverter brands
[2] Charge/discharge derating will occur between -10 °C and +5 °C
[3] Conditions apply. Refer to BYD Battery-Box Premium Limited Warranty Letter.

BYD Company Limited
www.byd.com/energy
Global Sales: batteryboxgrp@byd.com
Global Service: bboxservice@byd.com

Battery-Box EU Service Partner
EFT-Systems GmbH
www.eft-systems.de
info@eft-systems.de

Battery-Box AU Service Partner
Alps Power Pty Ltd
www.alpspower.com.au
leol@alpspower.com.au

Battery-Box US Service Partner
EFT-Systems GmbH
www.eft-systems.de/us
USservice@eft-systems.de

V1.0

BATTERY BOX

Lisa 3. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Marius Pihlak, sünniaeg 02.02.1980,

1) annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö

Salvestusseadmete mõju elamu energiavarustusele ,

(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja on Andres Annuk,

(*juhendaja nimi*)

salvestamiseks säilitamise eesmärgil, digiarhiivi DSpace lisamiseks ja veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2) olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3) kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor Marius Pihlak (digitaalselt allkirjastatud)

(*allkiri*)

Tartu, 31.05.2024

(*kuupäev*)

Juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

Andres Annuk (digitaalselt allkirjastatud) 31.05.2024

(*juhendaja nimi ja allkiri*) (*kuupäev*)