



EESTI MAAÜLIKOOL
Tehnikainstituut

Tõnu Heinmets

**ELEKTRIENERGIA SALVESTUSTEHNOLLOOGIATE
HETKESEIS**

THE CURRENT STATE OF ELECTRICAL ENERGY STORAGE
TECHNOLOGIES

Bakalaureusetöö
Tehnika ja Tehnoloogia õppekava

Juhendaja: professor Andres Annuk, *PhD*

Tartu 2019

Eesti Maaülikool		Bakalaureusetöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Tõnu Heinmets		Õppekava: Tehnika ja tehnoloogia	
Pealkiri: Elektrienergia salvestustehnoloogiate hetkeseis			
Lehekülgi: 40	Jooniseid: 13	Tabeleid: 8	Lisasid: 8
<p>Osakond / Õppetool: Energiakasutuse õppetool</p> <p>ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: 4. Loodusteadused ja tehnika, 4.17.</p> <p>Energeetikaalased uuringud; T140 Energeetika.</p> <p>Juhendaja(d): professor Andres Annuk, <i>PhD</i></p> <p>Kaitsmiskoht ja -aasta: Eesti Maaülikool, 2019</p>			
<p>Elektrienergia tarbimise, taastuvenergiaallikate kasutamise ja elektriautode tootmise tõusev trend on peamised põhjused, mis on teinud elektrienergia salvestustehnoloogiate kasutamise ja arendustöö oluliseks teemaks ühiskonnas. Antud bakalaureusetöö eesmärk on selgitada välja elektrienergia salvestustehnoloogiate hetkeseis.</p> <p>Töösükli kestvuse järgi on jaotatud elektrienergia salvestustehnoloogiad kolme gruppi: lühiajalise, pikaajalise ja ülipikaajalise töösükliga salvestustehnoloogiad. Lühiajalise töösükliga salvestitest on kirjeldatud hooratas-energiasalvestit ja ülikondensaatorit. Kui enamuse hooratas-energiasalvesteid leiab kasutust lühiajalise autonoomse toiteallikana, siis ettevõtte Amber Kinetics on arendanud mudeli M32, mida on võimalik neljatunnise tühjenemisajaga rakendada ka pikaajalise töösükli perioodiga kasutuseesmärkidel. Ülikondensaatori kõige potentsiaalsem arendus lähiajal on kombinatsioon mõne elektrokeemilise elektrienergia salvestustehnoloogiaga. Pikajaline töösükkel on peamiselt elektrokeemilistel elektrienergia salvestustehnoloogiatel, millest on populaarseimad pliiakud ja liitiumioonakud. Ülipikaajalise töösükliga elektrienergia salvestustehnoloogiatest leiab enim kasutust pumphüdroakumulatsioonijaam.</p>			
Märksõnad: elektrienergia salvestus, mehaaniline elektrienergia salvestus, elektrokeemiline elektrienergia salvestus, elektrostaatiline elektrienergia salvestus			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Bachelor's Thesis	
Author: Tõnu Heinmets		Curriculum: Engineering	
Title: The Current State of Electrical Energy Storage Technologies			
Pages: 40	Figures: 13	Tables: 8	Appendixes: 8
Department / Chair: Chair of Energy Engineering Field of research and (CERC S) code: 4. Natural Sciences and Engineering; 4.17. Energetic Research; T140 Energy research Supervisors: professor Andres Annuk, <i>PhD</i> Place and date: Estonian University of Life Sciences, 2019			
<p>The rising trend of electrical energy consuming, renewable energy usage and electric vehicle production are the main reasons why electrical energy storage technologies have become an important issue in our society. The aim of this thesis is to find out the current state of electrical energy storage technologies.</p> <p>According to the duration of the operating cycle, energy storage technologies are categorised into three: short term, daily term, and long term. Flywheel storage and ultracapacitor are the main short term operating cycle systems. As most flywheel energy storage systems are used as short term uninterruptible power source, the manufacturer Amber Kinetics has developed model M32 that has 4 hour discharge duration, which can also be applied as daily term storage system. The most promising development of ultracapacitor is its combination with electrochemical electrical energy storage. Electrochemical electrical energy storages are used mainly as daily term operating cycle systems, the main being lead-acid and lithium-ion battery storages. The most common long term operating cycle storage technology is pump hydroelectric energy storage.</p>			
Keywords: electrical energy storage, mechanical energy storage, electrochemical energy storage, electrostatic energy storage			

SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	6
1. ELEKTRIENERGIA TARBIMINE.....	7
1.1. Elektrienergia tarbimise kasv	7
1.2. Elektriautod	8
2. ELEKTRIENERGIA SALVESTUSTEHNOLLOOGIATE KASUTAMINE	10
2.1. Elektrienergia salvestustehnoloogiate kasutamise eesmärgid	10
2.2. Elektrienergia muundamisel fossiilkütuseid kasutatav energiasüsteem.....	11
2.3. Elektrienergia muundamisel taastuenergiaallikaid kasutatav energiasüsteem.....	12
2.4. Elektrienergia lõpptarbija	13
3. ELEKTRIENERGIA SALVESTUSTEHNOLLOOGIAD.....	14
3.1. Põhilised elektrienergia salvestustehnoloogiate liigid.....	14
3.2. Mehaaniline energia salvestus	16
3.2.1. Pumphüdroakumulatsioonijaam	16
3.2.2. Suruõhk-energiasalvestus	17
3.2.3. Hooratas-energiasalvestus	18
3.3. Elektrostaatiline elektrienergia salvestus.....	19
3.3.1. Ülikondensaatorid.....	19
3.4. Elektrokeemiline elektrienergia salvestus	20
3.4.1. Liitiumioonaku	20
3.4.2. Pliiaku.....	22
4. ELEKTRIENERGIA SALVESTITE HETKESEIS.....	23
4.1. Pumphüdroakumulatsioonijaamade hetkeseis.....	23
4.2. Suruõhk-energiasalvestuse hetkeseis ja arendatud adiabaatiline suruõhk- energiasalvestus	24
4.3. Hooratas-energiasalvesti hetkeseis	27

4.4. Ülikondensaatorite hetkeseis	29
4.5. Elektrokeemiliste elektrienergia salvestustehnoloogiate mahtuvuslik osatähtsus maailmaturul	30
4.5.1. Liitiumioonakude hetkeseis	31
4.5.2. Pliiakude hetkeseis	33
KOKKUVÕTE	34
KASUTATUD KIRJANDUS	36
LISAD	41
Lisa 1. Enerdata Energy Statistical Yearbook 2018 andmetes kajastatud riigid	42
Lisa 2. Suruõhu mahutite skeem maapõuest Huntorfis Saksamaal	43
Lisa 3. Suruõhu mahutite skeem maapõuest McIntoschis Ameerika Ühendriikides ..	44
Lisa 4. ALACAES suruõhu mahuti põhimõtteline lõige tunnelis	45
Lisa 5. Skeleton Technologies ja Maxwell Technologies Inc. superkondensaatorite .	46
spetsifikatsioonid	46
Lisa 6. Pliiaku salvestisüsteemi võimalikud nimiväärtused tänapäeval.	47
Lisa 7. Ultra patarei (<i>Ultra Battery</i>) ehitus.....	48
Lisa 8. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta.....	49

SISSEJUHATUS

Elektrienergia kasutamine on saanud meie ühiskonna igapäevaelu lahutamatuks osaks. Lisaks koduses majapidamises valgustuse ja lõpptarbija elektroonikaseadmetele on lisandumas uued elektrienergia salvestamisel põhinevad väljakutsed. Samal ajal elektrienergia tarbimise kasvuga seavad süsinikdioksiidi vähendamise eesmärgid meile piiranguid. 2015. aastal võtsid Pariisi kliimakonverentsil COP12 195 riiki vastu õigusliku kokkuleppe kliimasoojenemise takistamiseks.

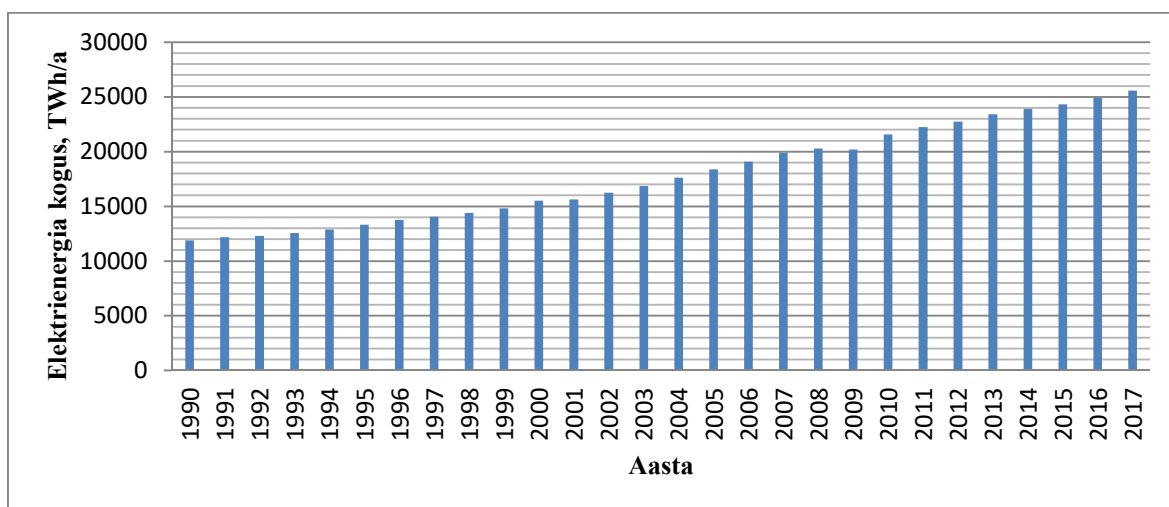
Siiani põhiliselt fossiilkütustel põhinev elektrienergia muundamine pole jätkusuutlik ja kasvav trend on minna üle taastuenergiaallikate kasutamisele. Elektrienergia muundamissüsteemides on tarbija kõikuva koormuse tõttu salvestite kasutamine vajalik, kuid tuule- ja päikeseenergiast elektrienergia muundamise ebastabiilne eripära seab energiasalvestusele veel suurema rolli. Heitgaaside vähendamine on jõudnud ühtlasi ka autotööstusesse, kus müüdi 2017. aasta seisuga 1,2 miljonit elektriautot. Võrdluseks võib tuua, et 2010. aastal veel elektriautode kaubanduslikku müüki ei olnud. Taastuenergiaallikate kasutamisele üle minemine, elektriautode tootmise kasv ja lõpptarbija elektrooniliste seadmete areng on mõned paljudest valdkondadest, mis stimuleerivad elektrienergia salvestite kasutamist ja tehnoloogilist arengut.

Antud bakalaureusetöö eesmärgiks on uurida kasutusel olevaid elektrienergia salvestustehnoloogiaid ja tuua välja potentsiaalsed tehnoloogilised arendused. Teoreetilise uurimustöö käigus on piirdutud mehaaniliste, elektrostaatiliste ja elektrokeemiliste elektrienergia salvestustehnoloogiate uurimisega. Töö esimeses pooles kirjeldatakse elektrienergia tarbimise trende ja salvestite rakendusvaldkondi. Töö teises pooles selgitatakse elektrienergia salvestustehnoloogiate tööpõhimõtteid ja tuuakse välja kirjeldatud tehnoloogiatel põhinevate salvestite kasutamine tänapäeval ning potentsiaalsed tehnoloogilised arendused.

1. ELEKTRIENERGIA TARBIMINE

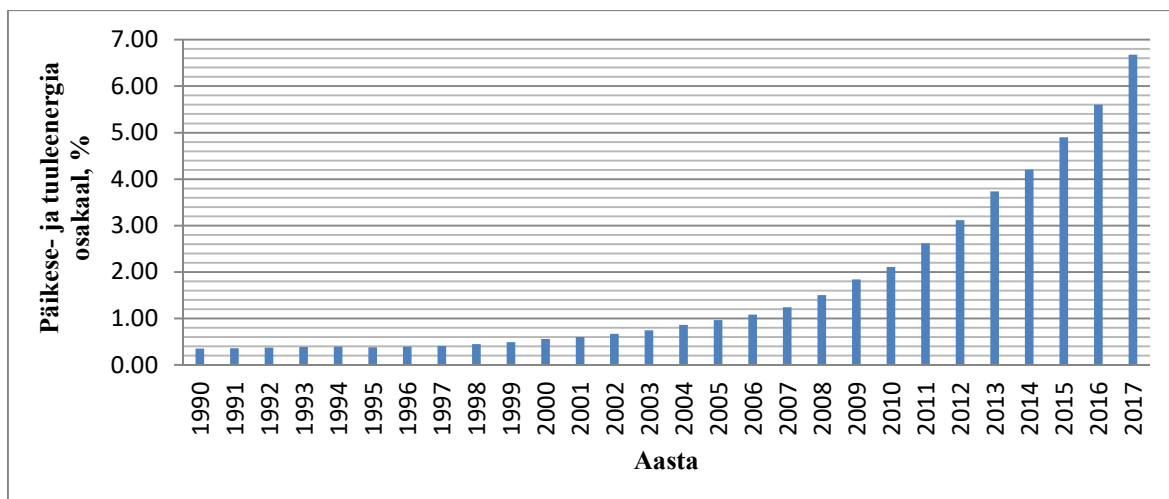
1.1. Elektrienergia tarbimise kasv

Jooniselt 1.1 näeme, et statistiliste andmete põhjal on alates aastast 1990 olnud aastane muundatud elektrienergia lineaarselt kasvava trendiga. Selle põhjal võib väita, et elektrienergiat tarbitakse järjest rohkem, mis suurendab ka vajadust elektrienergia salvestustehnoloogiate kasutamisele ja uute tehnoloogiate välja töötamisele.



Joonis 1.1. Muundatud elektrienergia kogus aastatel 1990-2017. Joonisel on kujutatud iga aasta kohta summarne muundatud elektrienergia, mis hõlmab nii era- kui avalikus sektoris tegutsevate ettevõtete statistikat. Lisas 1 on toodud riigid, millel statistika põhineb. [1]

Ligikaudu 75% elektrienergiast oli 2017. aastal saadud fossiilsetest kütustest [1]. 2015 aastal toimus Pariisis kliimakonverents COP12, kus 195 riiki võtsid vastu õigusliku kokkuleppe globaalse kliima soojenemise takistamiseks [2]. Elektrienergia salvestustehnoloogiatel on oluline roll heitgaaside vähendamisel. Elektrienergia salvestamine võimaldab ajaliselt nihutada elektrienergia tarbimise perioodi ja seega on võimalik taastuvenergiallikaid optimaalsemalt ära kasutada. Kõige enam arenevad tuule- ja päikeseenergiast elektri tootmistehnoloogiad, kus energia muundamine on ebastabiilne ja elektrienergia salvestustehnoloogiate olemasolu süsteemis möödapääsmatu. [3]



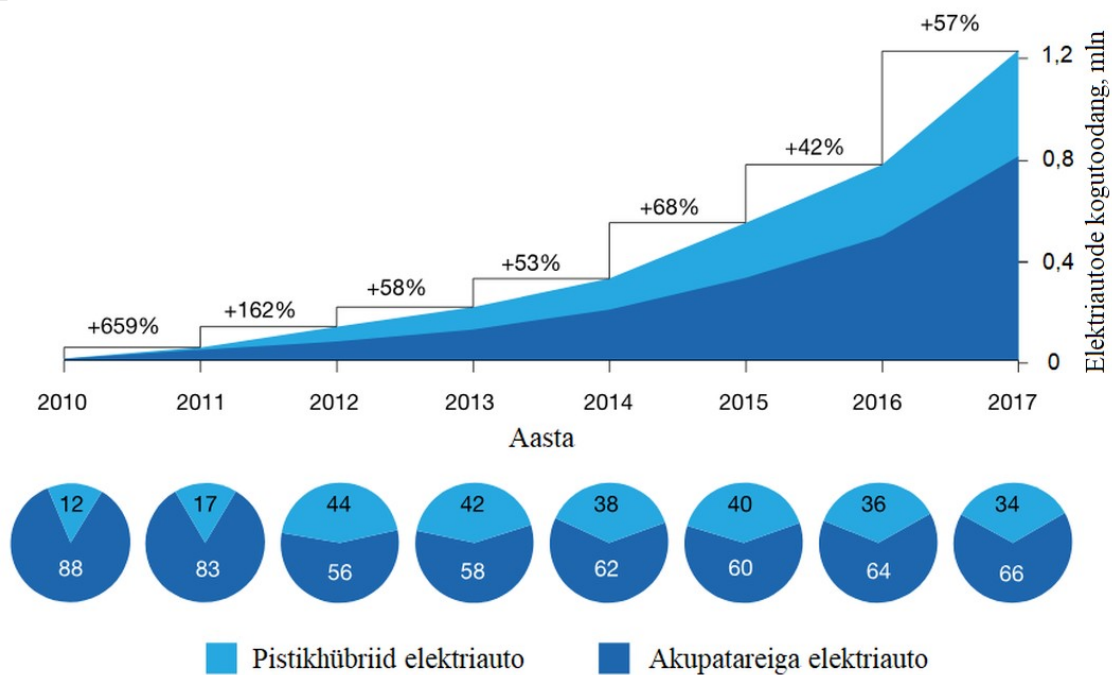
Joonis 1.2. Päikese- ja tuuleenergiast elektrienergia muundamise osakaal kogu muundatud elektrienergiast aastatel 1990-2017. Lisas 1 on toodud riigid, mille statistika põhineb. [1]

Elektrienergia muundamine päikese- ja tuuleenergiast on viimasel aastakümnel kasvanud märkimisväärselt. Jooniselt 1.2 näeme, et aastal 2000 oli päikese- ja tuuleenergiast saadud elektrienergia kogu muundatud elektrienergiast 0,56 %, siis aastaks 2017 on päikese- ja tuuleenergia kasutamise osakaal kasvanud 6,68 %-le [1]. Taastuvenergiaallikate kiire areng stimuleerib ka elektrienergia salvestustehnoloogiate arengut [4].

1.2. Elektriautod

Aastal 2014 oli OECD riikides transpordivahendite kasutamisest tingitud heitgaaside hulk 20,5% kogu inimese poolt tekitatud süsinikdioksiidi emissioonist [5]. Elektriautodel on oluline roll kliima soojenemise pidurdamisel. Ideaalis võiks elektriautod olla peaaegu heitgaaside vabad, kui elektriauto aku laadimiseks kasutatud elektrienergia saadakse taastuvenergiaallikatest. Tänapäeval muundatakse enamus elektrienergiat siiski fossiilsetest kütustest ja elektriautode kasutamine ei tähenda hetigaasivaba transporti. [6]

Kaks enim toodetud elektriautot on pistikhübriid ja akupatareiga elektriauto. Pistikhübriid elektriautodel kasutatakse lisaks elektrienergia salvestitele ka vedelkütust, kuid akupatareiga elektriauto töötab täielikult salvestatud elektrienergia baasil. [7]



Joonis 1.3. Pistikhübrid ja akupatareiga elektriautode kogutoodang aastatel 2010-2017.

[8]

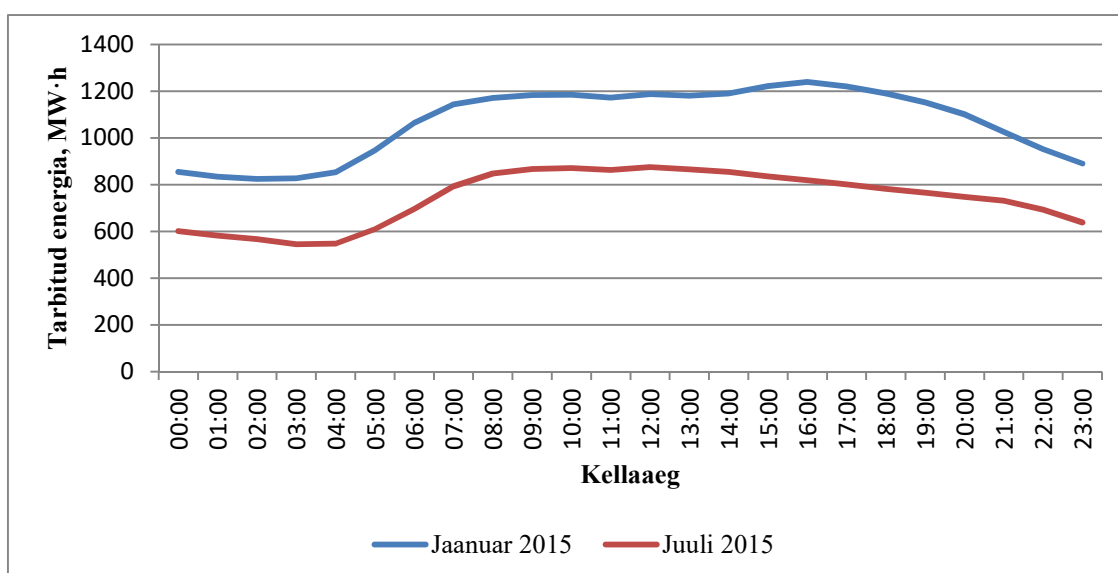
2010 aastal tutvustati esimest kaubanduslikult kättesaadavat pistikhübrid ja akupatareiga elektriautot, milleks olid vastavalt Nissan LEAF ja Chevy Volt. Peale edukaid müüginumbreid hakati Ameerika Ühendriikides looma üleriigilist elektriautode laadimisvõrgustikku ja ka teised suuremad autotootjad alustasid elektriautode arendamisega. [9] Joonisel 1.3 olevalt diagrammilt näeme, et aastatel 2010-2017 on elektriautode kogutoodang aasta-aastalt märgatavalt kasvanud. Kui enne 2010. aastat elektriautode kaubanduslik müük puudus, siis 2017. aastal toodeti juba ligikaudu 1,2 miljonit elektriautot.

Elektriautodes kasutatavad elektrienergia salvestustehnoloogiad on elektrokeemilised elektrienergia salvestid, superkondensaator ja ülikõrge kiirusega hooratas-energiasalvestus. Elektriautod esitavad elektrienergia salvestamisele mitmeid nõudeid: kõrge erienergia (W·h/kg), kõrge erivõimsus (W/kg), kõrge kasutegur, madal hooldusvajadus ja hind ning keskkonnasõbralikkus ja ohutus. [10]

2. ELEKTRIENERGIA SALVESTUSTEHNOLLOOGIATE KASUTAMINE

2.1. Elektrienergia salvestustehnoloogiate kasutamise eesmärgid

Elektrienergia kasutamise eripära on, et seda saab tarbida samal ajal, kui seda muundatakse. Tarbimise koormus on aga kõikuv ja tarbijale stabiilse energiavarustuse tagamiseks on vaja elektri muunadamise süsteemi vastavalt adapteerida. [11] Joonisel 2.1 on näha Eesti keskmised talvise ja suvise kuu elektrienergia tarbimiskõverad, mis iseloomustavad ööpäeva ringset koormuse kõikumist ja aastaegadest sõltuvat tarbimisnõudlust.



Joonis 2.1. Jaanuari ja juuli keskmised ööpäevased elektrienergia koormuskõverad aastal 2015 Eestis. [12]

Taastuenergiaallikate integreerimine võrguga muudab lisaks kõikuvale tarbimiskoormusele ka elektrienergia muunadamise ebastabiilsemaks. Päikese- ja tuuleenergiast elektrienergia saamine sõltub otseselt kontrollimatutest ilmastikuoludest, millega peab elektrisüsteemi konstrueerimisel arvestama. [11]

Elektrienergia muundamissüsteemides on peamiteks elektrienergia salvesti eesmärkideks koormuse ühtlustamine ja koormuse järgmine. Koormuse ühtlustamise põhimõte seisneb energiasalvesti laadimisel tiputarbimise välisel ajal ning salvestatud elektrienergia kasutamisel tiputarbimise ajal koormuse vähendamiseks. Koormuse järgimisel liigselt

muundatud energia salvestatakse ja kui koormus ületab energia muundamissüsteemi väljundvõimsuse, kasutatakse salvestit täiendava toitenä. [13]

Lisaks koormuse ühtlustamisele ja järgimisele, on salvestitel elektrienergia süsteemides ka teisi rakendusi. Kasutamise valdkondade järgi on elektrienergia salvesteid antud töös analüüsitud lõpptarbija elektrienergia kasutamise perspektiivist ning elektrienergia muundamisel fossiilkütuseid ja taastuenergiaallikaid kasutava energiasüsteemi seisukohalt. [14] Tabel 2.1 kirjeldab nendes valdkondades elektrienergia salvestite kasutamise eesmäärke.

Tabel 2.1. Elektrienergia salvestustehnoloogiate kasutamise eesmärgid. [13-15]

Fossiilkütuseid elektrienergia muundamisel kasutatav energiasüsteem	Taastuenergiaallikaid elektrienergia muundamisel kasutatav energiasüsteem	Elektrienergia lõpptarbija
1. Koormuse ühtlustamine 2. Koormuse järgimine 3. Pinge ja sageduse kvaliteet 4. Süsteemi stabiliseerimine 5. Isoleeritud võrgud 6. Reservtoide elektrivõrgu ohutuse ja kontrolli tagamiseks	1. Autonoomne süsteem (<i>Off-grid</i>) 2. Integreerimine elektrivõrguga (<i>On-grid</i>)	1. Katkematu toiteallikas (<i>Uninterruptible power source, UPS</i>) 2. Elektriautod 3. Mobiilsed elektroonilised seadmed

2.2. Elektrienergia muundamisel fossiilkütuseid kasutatav energiasüsteem

Elektrienergia muundamisel fossiilkütuseid kasutava energiasüsteemi seisukohalt on koormuse järgimine oluline tarbija kõikuva koormuse tõttu, mis toimib samal põhimõttel, kui koormuse ühtlustamine, kuid on lühiajalisem (minutitest tundideni). Koormuse ühtlustamine on pikaajalisem energia salvestamine, kus madala koormusega perioodidel muundatud energia salvestatakse elektrienergia salvestitesse ja tipukoormusega perioodil kasutatakse salvesteid lisatoitenä. Öisel ajal, kui tarbimiskoormus on madalam, kui energia muundamisseadmete väljundvõimsus (vt joonis 2.1), on võimalik liigset energiat salvestada ja tipukoormusega perioodidel lisaks generaatorite väljundvõimsusele salvestatud energiat kasutada. Energiasüsteemides peab vastalt kasvavale energiatarbimisele tõstma elektrienergia muundamisseadmete võimsust, mida on võimalik koormuse ühtlustamist kasutades edasi lükata. [14]

Sageduse kvaliteeti kontrollitakse generaatorite väljundvõimsuse reguleerimisega. Sageduse kvaliteedi tagamiseks on oluline salvesti kiire reaktsiooniaeg ja suur erivõimsus

(W/kg). Pinge kvaliteedi tagamiseks on võimalik kõrge koormusega liinilõigu lõppu paigutada elektrienergia salvesti, et siluda pingelange ja –tõuse. [14]

Süsteemi stabiliseerimiseks toimivad salvestid puhverseadmetena. Kui elektrivõrgu liinides tekib ülekoormus on võrgu ettevõttel vaja teha kiirelt ümberlülitus, et vältida kahjusid ja tagada tarbijale elektrivarustus. Sellisel juhul võivad suure energiamahtuvusega (MW·h) salvestuskeskused liini punktides leevendada rikkekahju ja võimaldavad ümberlülitusteks või rikke likvideerimiseks vajaliku aja. [14]

Väiksema väljundvõimsusega isoleeritud elektrienergia muundamissüsteemides, nagu näiteks saartel, peavad energiasüsteemid vastama tarbija kõikuvale nõudlusele stabiilse elektrienergia varustamisel. Isoleeritud süsteemides on võimalik koormuse ühtlustamiseks kasutada väiksema energiamahtuvusega salvesteid, mis laiendab sobiva tehnoloogia valikuvõimalusi. [14]

Elektrikatkestuste ja elektriijaama rikete korral on võimalik varutoiteallikana kasutada elektrienergia salvesteid, et tagada ohutus ja kontroll. [14]

2.3. Elektrienergia muundamisel taastuenergiaallikaid kasutav energiasüsteem

Tuulegeneraatorite ja päikesepaneelide puhul mõjutavad elektrienergia muundamist muutuvad ilmastikuolud. Sobivates oludes on võimalik kasulik energia muundada elektrienergiaks ja salvestada elektrienergia salvestitesse ning vastavalt tarbimiskoormusele seda hiljem kasutada. [14] Autonoomse süsteemi puhul on oluline tagada ka pinge ja sageduse kvaliteet, mis ebastabiilse energiasüsteemi väljundvõimsuse puhul võimendatud [16].

Integreerimisel elektrivõrguga on oluline tagada stabiilne energiavarustus, pinge ja sageduse kvaliteet. Ülearust salvestatud ja potentsiaalselt muundatavat elektrienergiat võib ka tiputarbimise ajal, kui hind on kõrge, võrku müüa. [16]

2.4. Elektrienergia lõpptarbija

Lõpptarbija seisukohalt on hoonetes oluline omada varutoiteallikat, et elektrikatkestustel oleks võimalik kasutada sprinklersüsteeme, turva- ja ohtutustehnikat. Katkematu toiteallikas võimaldab asendada hädaolukordadeks paigaldatud generaatorid. Kui kasutatakse elektrivõrgu pinget ja sageduse kõikumistele tundlikke seadmeid, on võimalik katkematud toiteallikad rakendada ka lühiajalise salvestina, kaitstes seadmeid võimalike rikete eest. [14]

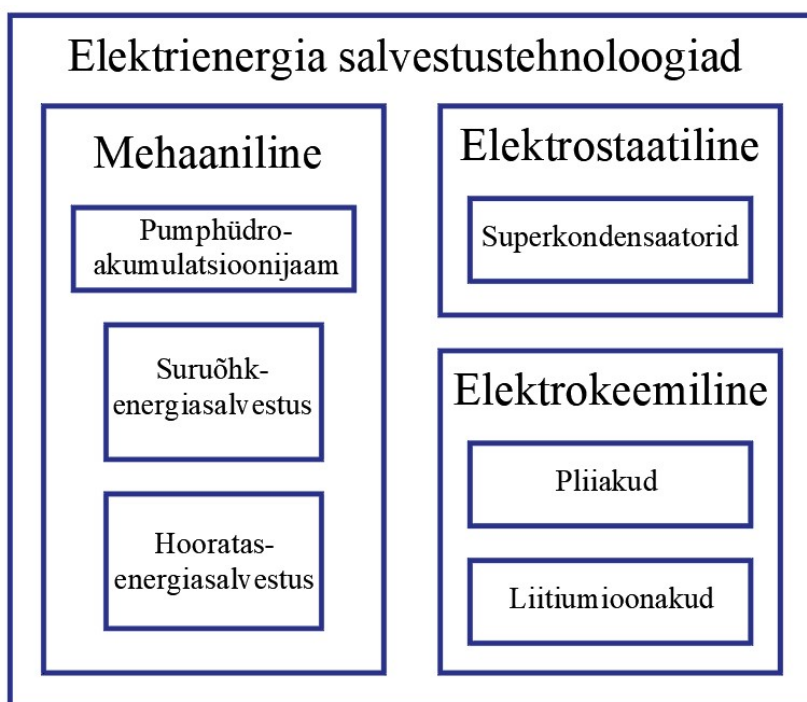
Lisaks on elektriautode populaarsuse kasv loonud uued standardid elektrokeemilisele akupatareile. Autoakudeks on arendatud kõrge suutlikkusega elektrokeemilised elektrienergia salvestid. Elektriautode akud võivad tulevikus osaleda ka tarbijate kodude energiasüsteemides. [14]

Tarbijate kaasaskantavatel elektroonilistel seadmetel on oluline energia tarbimise perioodi nihutamine ja seadme kasutamine autonoomselt kohtades, kus ligipääs elektrivõrgule puudub. Selliste seadmete akudel on peamiselt oluline suur erienergia, et tagada mobiilse seadme võimalikult pikk kasutusperiood kerge salvesti kaalu juures. [15]

3. ELEKTRIENERGIA SALVESTUSTEHNOLOOGIAD

3.1. Põhilised elektrienergia salvestustehnoloogiate liigid

Elektrienergiat on võimalik salvestada muundades see mõnda teist liiki energiaks. Tavapäraselt kasutatakse muundatud energiana mehaanilist-, elektrokeemilist-, keemilist-, elektromagneetilist-, elektrostaatilist- või soojusenergiat. [14] Joonisel 3.1 on kujutatud antud töös käsitletavat elektrienergia salvestustehnoloogiate liigitus, milleks on mehaaniline, elektrostaatiline ja elektrokeemiline elektrienergia salvestus ja valitud tehnoloogiatest kirjeldatud alamliigid.



Joonis 3.1. Antud töös kirjeldatavad elektrienergia salvestustehnoloogiad. [13]

Elektrienergia salvestustehnoloogia valikul peab lähtuma salvesti kasutuseesmärgist. Elektrienergia salvestid on võimalik töötsükli kestvuse järgi jaotada lühiajalisteks, pikaajalisteks ja ülipikaajalisteks salvestiteks [13]. Hetkel sellist universaalset salvestustehnoloogiat, mis kataks kõik salvesti töötsükli kestvused, pole.

Tabel 3.1. Salvestite jaotamine ja rakendusvaldkonnad töötükli kestuvse järgi. [13, 17]

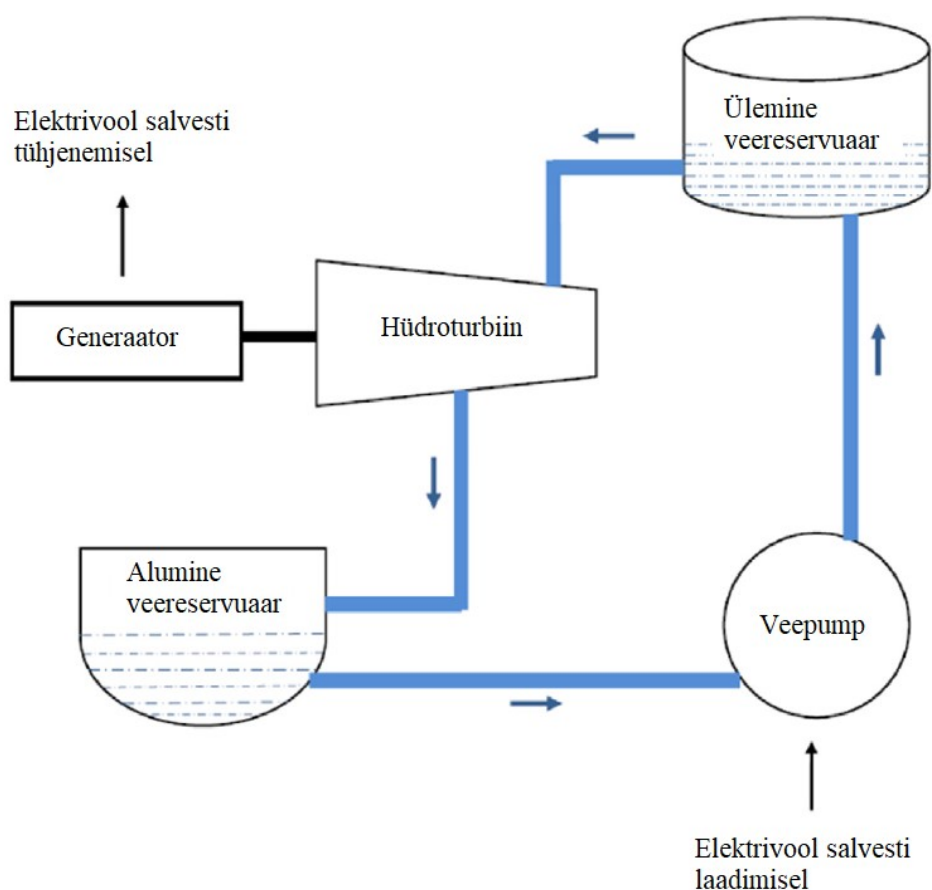
Salvesti töötükli kestvus	Kirjeldus ja sobivad salvestustehnoloogiad	Rakendusvaldkond
Lühiajaline salvestus (<i>Short-term storage</i>)	Täis laadimise ja koormuse all tühjenemise protsess kestab sekunditest kuni mõne minutini. Oluline on kõrge erivõimsus ja kiire reaktsiooni aeg. Suure erivõimsuse poolest sobivad lühiajalisteks salvestiteks superkondensaator ja hooratas-energiasalvesti.	Pinge ja sageduse kvaliteedi tõstmine elektrisüsteemide stabiliseerimine, elektri-autod, katkematu toiteallikas
Pikaajaline salvestus (<i>Daily storage</i>)	Energia salvestamisel kestab täislaadimise ja koormuse all tühjenemise protsess mõnest minutist kuni tundideni. Sobivad on mehaaniline ja elektrokeemiline elektrienergia salvestustehnoloogia.	Koormuse järgimine, süsteemi stabiliseerimine, katkematu toiteallikas, elektri-autod, lõpptarbija elektroonilised seadmed.
Ülipikaajaline salvestus (<i>Long-term storage</i>)	Salvestusaeg võib kesta nädalatest kuni mitme kuuni. Sobivad suuremahulised mehaanilised elektrienergia salvestustehnoloogiad nagu näiteks pumphüdroakumulatsioonijaamad (PHAJ) ja suruõhk-elektrienergia salvestus. Ülipikaajaliseks salvestuseks võivad sobida ka mõned elektrokeemilised salvestustehnoloogiad.	Koormuse ühtlustamine, isoleeritud võrgud, taastuenergiaallikate integreerimine elektrivõrguga, reservtoide elektrivõrgu ohutuse ja kontrolli tagamiseks.

Tabelis 3.1 on kirjeldatud kõigi kolme töötükli kestuvse olemust ja millistes rakendusvaldkondades vastavate omadustega salvestustehnoloogiaid võiks kasutada. Kirjelduses on toodud ka välja millised salvestustehnoloogiad võiks olla sobivad vastavale töötükli perioodile. Töös kirjeldatud elektrienergia salvestustehnoloogiast võib lühiajalisteks salvestiteks pidada superkondensaatoreid ja hooratas-energiasalvesteid, pikaajalisteks salvestiteks sobib kõige paremini elektrokeemiline akupatarei ja pikaajalise töötükliga kasutatakse peamiselt pumphüdroakumulatsioonijaama ja suruõhk-energiasalvestust.

3.2. Mehaaniline energia salvestus

3.2.1. Pumphüdroakumulatsioonijaam

PHAJ on tehnoloogiliselt küps ja ühiskonnas aksepteeritud elektrienergia salvestustehnoloogia [18]. PHAJ on kasutusel olnud juba pikka aega ja esimesed PHAJd olid kasutusel juba 1890. aastal Šveitsis ja Itaalias. PHAJ hõlmab 2017. aasta seisuga endast ligikaudu 96% kogu maailmas installeeritud elektrienergia salvestite energiamahutuvusest. [17]



Joonis 3.1. PHAJi tööpõhimõtet selgitav skeem. [18]

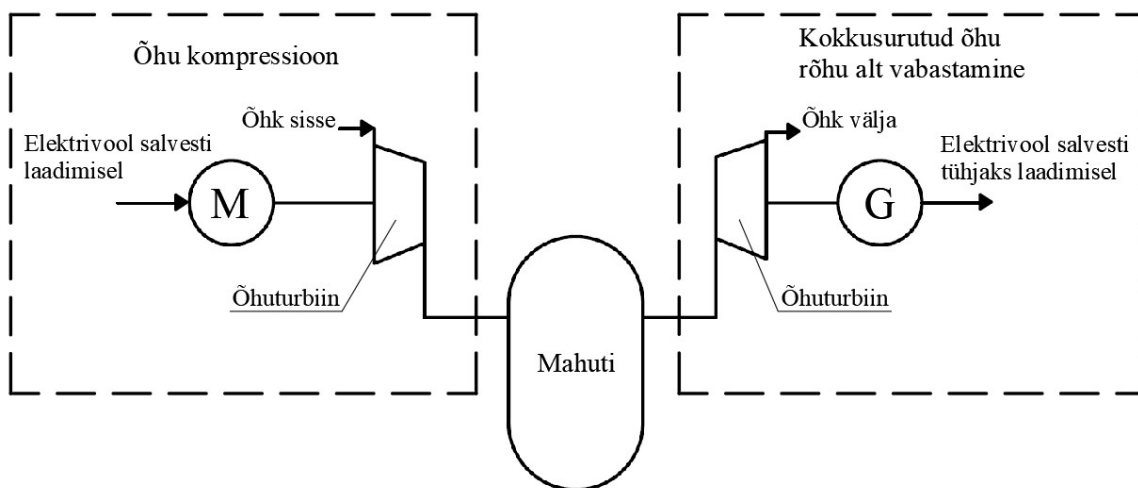
PHAJi salvestustehnoloogia kujutab endas kahel tasandil olevat veereservuaari. Väikese tarbimisega perioodidel pumbatakse vesi madalamal tasapinnal olevast vee reservuaarist kõrgemal tasapinnal olevasse hoidlasse, mille käigus laetakse vee reservuaar potentsiaalse energiaga. Tiputarbimise ajal lastakse veel voolata tagasi madalamale tasapinnale, mis paneb potentsiaalse energia toimet liikuma hüdroturbiinide võllid. Hüdroturbiinid käitavad

nende völliidega mehaaniliselt ühendatud generaatorid, mille kaudu toodetakse võrku elektrienergia. [14]

PHAJ on oma olemuselt taaskasutatav ja jätkusuutlik salvestustehnoloogia, mis võimaldab tagada võrgu stabiilsust ja ühendada võrguga taastuenergiaallikatel põhinevaid energiasüsteeme. [18]

3.2.2. Suruõhk-energiasalvestus

Nagu PHAJ toimib ka suruõhk-energiasalvestus mehaanilise potentsiaalse energia salvestamise põhimõttel ja kasutatakse samuti pikaajalise töötssükli kestvusega rakendusvaldkondades. Joonisel 3.2 on toodud suruõhk-energiasalvesti tehnoloogia tööpõhimõtet selgitav skeem. Suruõhk-energiasalvestus toimib kompressoritega õhu kokkusurumisel (õhu kompressioon) mahutisse. Mahutid võivad olla spetsiaalselt ehitatud õhukindlad kambrid või olemasolevad looduslikud gaasitihedad ruumid, milleks kasutatakse ära näiteks vanu soolakaevandusi. Õhu surve alt vabastamine käitab õhuturbiini, mis on völli kaudu mehaaniliselt ühendatud generaatoriga ja toodab potentsiaalsest energiast elektrienergia. Suruõhk-energiasalvestuse tehnoloogia miinuseks on madal kasutegur, mis on 42-55 % vahemikus. [13]

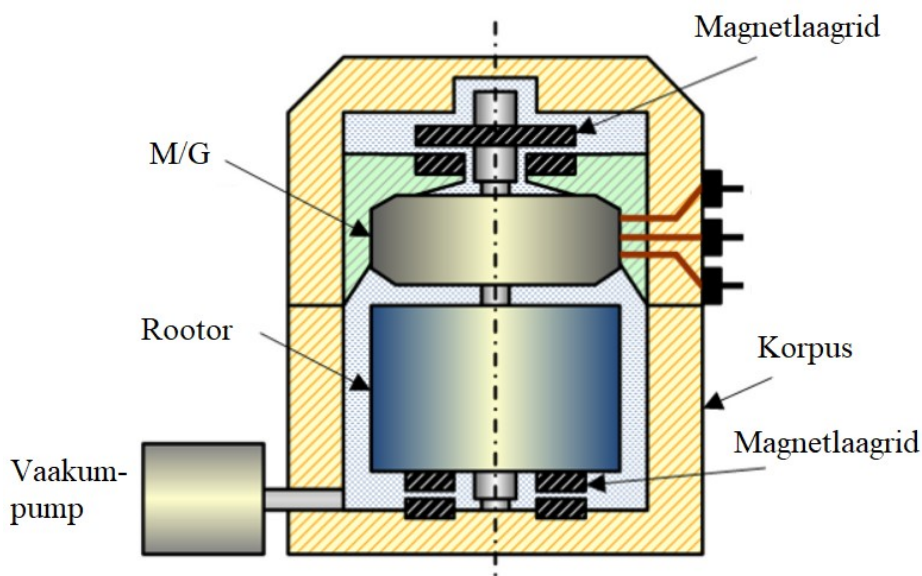


Joonis 3.2. Suruõhk-energiasalvestuse tööpõhimõtet selgitav skeem. M-elektrimootor, G-generaator. [19]

Suruõhk-energiasalvesti peamised kasutusvaldkonnad on koormuse ühtlusatmine, taastuenergiaallikate integreerimine elektrivõrku, reservtoide, reaktiivenergia tasakaalustamine, sageduse reguleerimine ja süsteemi taaskäivituse eesmärgil energiasalvestus. [20]

3.2.3. Hooratas-energiasalvestus

Hooratas-energiasalvestus põhineb pöörleva keha põhimõttel, mis salvestab elektrienergia muundades selle mehaaniliseks energiaks. Energia hooratas-energiasalvestis on salvestatud pöörleva kineetilise energiana. Salvesti laetakse elektrivõrgust või muust elektrienergia allikast ja täislaadimise ajal hooratta pöörlemiskiirus kasvab. Tühjaks laadimisel koormuse all kiirus kahaneb ja kineetiline energia muundatakse tagasi elektrienergiaks. Energia kantakse üle elektrilisest mehaaniliseks ja vastupidi elektrimootor-generaatori vahendusel. [21]



Joonis 3.3. Hooratas-energiasalvesti ehitus. M/G- mootor-generaator. [22]

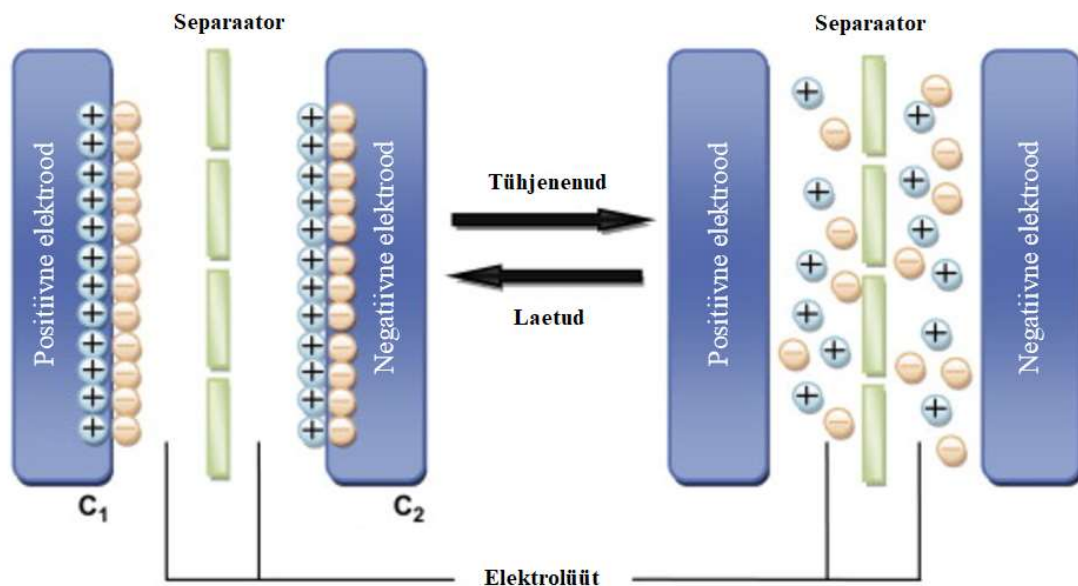
Joonisel 3.3 on kujutatud hooratas-energiasalvesti ehitus. Kui aeglase rootori kiirusega võib kasutada ka mehaanilisi laagreid, siis ülikiired hooratas-energiasalvestid kasutavad magnetlaagreid (või kombinatsiooni neist kahest) ja vaakumkeskkonda, mis muudavad hõõrde- ja õhutakistuse peaaegu olematuks. [23]

Hooratas-energiasalvesti on suure erivõimsusega salvesti. Neid rakendatakse peamiselt valdkondades, kus on vaja lühiajalist suurt võimsust - nagu pinge ja sageduse kvaliteedi tõstmine. Hooratas-energiasalvestit on võimalik kasutada katkematu toiteallikana ja elektriautodes kiirendamisel või muudel suurt võimsust nõudvatel lühiajalistel olukordadel. [24]

3.3. Elektrostaatiline elektrienergia salvestus

3.3.1. Ülikondensaatorid

Ülikondensaator ehk superkondensaator on elektrostaatiline elektrienergia salvestustehnoloogia, mis töötab elektilaengu salvestamise põhimõttel [13]. Joonisel 3.4 on kujutatud superkondensaatori tööpõhimõtet selgitav skeem.



Joonis 3.4. Superkondensaatori laetud ja tühjenenud olukorra struktuuriline skeem. [25]

Elektrilaeng salvestatakse suure pindalaga süsinikust elektrodide kihtidele, mis on paigutatud elektrolüütilisse keskkonda. Elektrodide ja elektrolüüdi pindmistel kihtidel tekib elektriline kaksikkiht. [26]

Elektriline kaksikkiht tekib superkondensaatoris, kui elektrod ehk elektriline juht on paigutatud elektrolüütilisse keskkonda, mille elektrijuhtivus põhineb ionide vabal liikumisel. Kui positiivse laenguga elektrodile ehk katoodile juhitakse positiivne laeng ja

negatiivse laenguga elektrodile ehk anoodile juhitakse negatiivne laeng, toimub spontaanne laengute ümberpaigutumine elektroodi pinnal elektrolüüdi piirkihis elektroodi suunal. Kaks elektriliselt laetud pinda, mis on eraldatud molekulaarsete dimensioonidega, töötavad kondensaatorina ja salvestavad elektrilaengu. [26]

Superkondensaator erineb teistest elektrienergiasalvestitest kuna elektrienergia salvestatakse elektrimahtuvusena, mille ühikuks on farad (F). Energiamahtuvusega on elektrimahtuvus seotud järgmise valemiga:

$$E = \frac{0,5 \cdot C \cdot U^2}{3600}$$

kus E on energiamahtuvus W·h;

C – elektrimahtuvus F;

U – laadimispinge V. [27]

Superkondensaatori energiamahtuvus oleneb võimalikust laadimispingest. Enamik superkondensaatoreid toodetakse nimipingega 2,5-2,7 V. Pinge väärtused 2,8 V ja rohkem on võimalikud, kuid vähendavad oluliselt tööiga. [28]

Superkondensaatori põhilised omadused on suur erivõimsus, kasutegur ja pikk tööiga. Sobivad rakendamiseks valdkondades, kus on nõutud suurt lühiajalist võimsust. Superkondensaatoreid kasutatakse peamiselt lisatoiteallikana elektriautodes käivitusel ja kiirendusel suurte võimsuste tagamiseks, taaslaadides regeneratiivsel pidurdusel. Superkondensaatoreid on võimalik kasutada ka katkematu toiteallikana ja tarbija elektroonilistes seadmetes. [29]

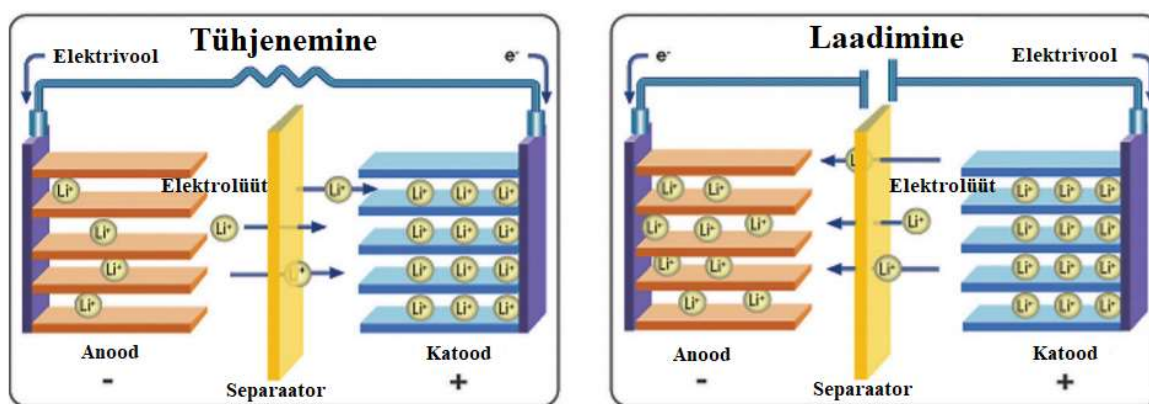
3.4. Elektrokeemiline elektrienergia salvestus

3.4.1. Liitiumioonaku

Liitiumioonaku põhikomponendid on elektrolüüt, separaator, anoodi ja katoodi materjal. Katoodi ja anoodi materjalid aitavad liitiumi ioonidel osaleda energia laadimise ja tühjenemise protsessis. Katoodi materjal on liitiumi ja mõne muu metalli segu. Anoodi materjalidena kasutatakse enamasti grafiiti ja amorfset süsinikku. Teoreetiliselt on grafiidi erimahtuvus (372 mAh/g) madalam, kui amorfse süsiniku erimahtuvus (900 mAh/g). Kuid enamasti on anoodi materjaliks grafiit, sest amorfse süsiniku kasutamine vähendab

liitiumioonaku tööga. Elektrolüüdiks on liitiumi orgaanilised või polümeersed soolad. Polümeersoolad on elektrolüüdina liitiumioonakudes turvalisemad, kui vedelad orgaanilised soolad, kuid vähendavad energia ülekannet. Seetõttu kasutatakse enamasti elektrolüütina orgaanilisi soolalahuseid, mis võivad olla plahvatusohtlikud, kui aku töötab üle lubatud temperatuuri, või toimub üle laadimine. Sellistes olukordades tekivad liitiumile dendriidid, mis põhjustab anoodi ja katoodi vahel lühise. [30]

Dendriidid on väikesed oksakujulised struktuurid, mis tekivad liitiumi elektrodidele. Need struktuurid võivad rikkuda elemendi korpuse või langetada liitiumi potentsiaali. Sellised protsessid kahandavad aku tööiga ja võivad põhjustada plahvatusi. [31]



Joonis 3.10. Liitiumioonaku struktuuriline ehitus. Joonisel on kujutatud laadimise ja tühjenemise protsess. [32]

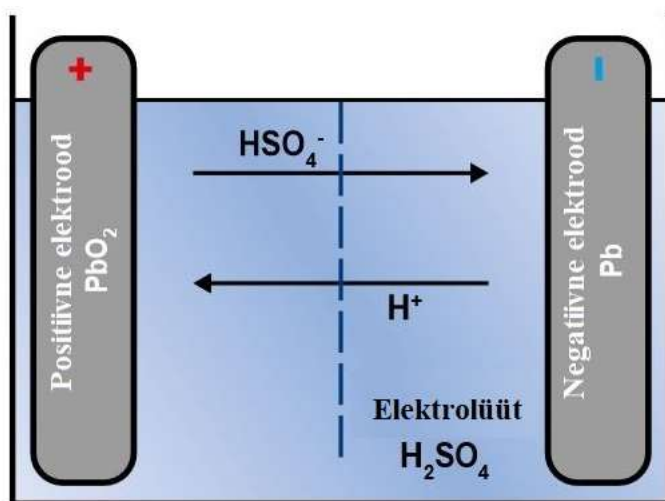
Joonisel 3.10 on kujutatud liitiumioonaku struktuuriline ehitus ja tööpõhimõte. Katoodi materjal on lamellilise struktuuriga ja liitiumioonid saavad liikuda katoodilt anoodile ja tagasi, andes aku klemmidele pinget või koormust. Laadimise protsessis liitium katoodil ioniseerub, mille käigus liitiumi ioonid katoodil annavad ära elektrone ja liiguvad elektrolüüdiga anoodile, kus ioonid tasakaalustuvad. Tühjenemise käigus toimub vastupidine protsess, kus liitiumioonid liiguvad anoodilt tagasi katoodile. [30]

Liitiumioonakul on palju kasulikke omadusi - nagu suur erienergia, pikk tööiga, kiire laadimine ja tühjaks laadimine protsess. Kuna viimasel ajal on tähelepanu suunatud kõrge energiamahutavuse ja erivõimsusega elektrokeemilistele akudele, siis on liitiumioonakude tehnoloogia arendamine aktuaalne valdkond. Liitiumioonaku turvalisuse probleemide lahendamisel arendatakse tahkete polümeersoolade kasutamist elektrolüüdina. [30]

3.4.2. Pliiaku

Pliiakud on lihtsad toota, pika tööeaga, kõrge väljundpingega ja on üks odavamaid elektrokeemilisi elektrienergia salvestustehnoloogiaid. Negatiivsest küljest on neil madal erienergia ja suur kaal. Vaatamata suhteliselt küpsele tehnoloogiale on pliiakude kasutamisel võrguelekttri rakendustes vähe kogemust. Peamiselt toodetakse kahte eritüüpi pliiakusid: avatud ja suletud pliiakud. [17]

Avatud pliiaku on pika tööeaga, kuid vajab pidevat hooldamist. Neis kasutatakse elektrolüüdina vedelat väävelhapet, mille sisse on paigutatud akuelemendid. Igas akuelemendis on positiivne elektrood, mille materjal on pliidioksiid (PbO_2) ja negatiivne elektrood, mille materjal on plii (Pb) ja mõne teise metalli ühend. Negatiivse elektroodi pind on võimalikult suur ja poorne, et suurendada kontaktpinda. Elektroodide eraldamiseks kasutatakse separaatorit, mis on piisavalt poorne, et lihtsustada happe liikumist. Tühjenemisel toimub elektrokeemiline reaktsioon, mille käigus elektroodidel tekib pliiisulfaat (PbSO_4). Selle tulemusel sulfaadi kontsentratsioon elektrolüüdis kahaneb ja elektrolüüdi lahusesse jääb peamiselt vesi. Kui akut laadida välisest vooluallikast, siis toimub tühjenemisele vastupidine protsess põhjustades elektroodide algoleku taastumise ja ka happe sisalduse elektrolüüdis. Laadimise käigus kaotab avatud süsteemiga pliiaku regulaarselt vett, mis on põhjustatud aurustumisest. Vee kadu elektrolüüdis nõuab asendamist ja sellest ka aku hooldusvajadus. Mittesobiva elektrolüüdi konsistentsi taseme juures võib aku jäävalt kahjustuda. [17]



Joonis 3.8. Pliiaku tööpõhimõte. [17]

Suletud pliiaaku on traditsiooniliste avatud pliiakude edasiarendus, mis on disainitud vältimaks vee kadu elektrolüüdist. Neis on elektrolüüt immutatud klaaskiudmaterjali või geeli kujul, eraldades elektroode. Suletud süsteemis reguleerib ventiil akuelemendi maksimaalset ülerõhku, avanedes ainult siis, kui rõhk ületab 100 millibari (mb). Säilitades sisemise rõhu, soodustab rõhuventiil ka hapniku ja vesiniku ühinemist veeks. Suletud pliiaakud on enamasti kallimad kui avatud süsteemiga pliiaakud, kuid nende eeliseks on ligi 10 aastane tööiga ilma hooldusvajaduseta. [17]

Erinevaid pliiaaku tehnoloogiaid on võimalik kasutada peaaegu kõigis rakendustesvaldkondades, välja arvatud tarbija elektroonsed kaasaskantavad seadmed, kus on oluline kõrge erienergia.

4. ELEKTRIENERGIA SALVESTITE HETKESEIS

4.1. Pumphüdroakumulatsioonijaamade hetkeseis

Traditsiooniline PHAJ on küps elektrienergia salvestustehnoloogia, millel on pikaajaline kasutuskogemus. Hinna, struktuuri ja kasuteguri osas tulevikus suuri tehnoloogilisi arendusi prognoositakse ei ole. Samal ajal esitatakse PHAJdele järjest enam nõudeid keskkonna säästmise suhtes, mis tähendab tulevikus lisainvesteeringuid. [17]

Tabel 4.1. PHAJi suurimad töös olevad istallatsioonid hetkel maailmas [33, 34].

PHAJ	Riik	Valmimisaasta	Maksimaalne võimsus, MW
Fengning	Hiina	2021	3600
Bath County	Ameerika Ühendriigid	1985	3003
Guangdong	Hiina	2000	2400
Huizhou	Hiina	2008	2400
Paldiski	Eesti	-	500

Suurim hüdroenergial põhinev salvesti on hetkel Ameerika Ühendriikides Bath County PHAJ, mille maksimaalne võimsus on 3003 MW. See läks töösse 1985. aastal ja oli riigi üks väljapaistvamaid tehnoloogilisi saavutusi. Jaam koosneb kahest suurest vee reservuaarist, millest üks asub 385 meetrit kõrgemal. Bath County PHAJ peamine kasutuseesmärk on koormuse ühtlustamine. [34] Bath Countyle järgnevad suuruselt Guangdong (2400 MW) ja Huizhou (2400 MW) PHAJd Hiinas ning mõlema rakenduseesmärk on samuti koormuse ühtlustamine. [33]

2021. aastal valmib Fengning Manchu autonoomses maakonnas Hebei Provintsis Hiinas 3600 MW maksimaalse võimsusega PHAJ, millest saab suurim maailmas. PHAJ ühendatakse kahe 500 kV nimipingega elektriliinide kaudu Hebei Provintsi elektrivõrku ja kasutuseesmärgid võrguelekttri süsteemis saavad olema sageduse reguleerimine, pinge reguleerimine, reservtoide ning koormuse ühtlustamine. Fengningu PHAJi arendustöö sai alguse 1996. aastal ja ametlik luba ehituseks anti alles 2012. aastal. [35]

Eestis planeeritakse 500 MW energiamahuvusega PHAJ ehitada Paldiskisse, mille ehitusluba loodetakse kätte saada 2020. aasta alguses. Detailplaneerigu kohaselt rajatakse 575 meetri sügavusele maapõue mahutid kuhu suunatakse tiputarbimise ajal läbi hüdroturbiinide merevesi ja saadakse seeläbi elektrienergia. PHAJ rajamisega soovitakse soodustada taastuvenergiaallikate integreerimist elektrivõrguga. [36]

Kuna PHAJ nõuab suuri looduslikke ümberehitusi, on neid mõistlik rajada asukohtadesse, kus on juba vajalikud eeldused olemas nagu veekogud ja mägised alad. 2013. aastal presenteerisid Richard Madlener ja Jan Specht tehnilis-majandusliku analüüsi võimalikust PHAJi konstrueerimisest maa-alusetesse kivisöe kaevandamise tagajärjel tekkinud kambritesse Ruhris Saksamaal [37]. Olemasolevate maa-aluste kambrite kasutamine võib PHAJ rajamisel keskkonna säästmise aspektist olla tõhusam.

4.2. Suruõhk-energiasalvestuse hetkeseis ja arendatud adiabaatiline suruõhk-energiasalvestus

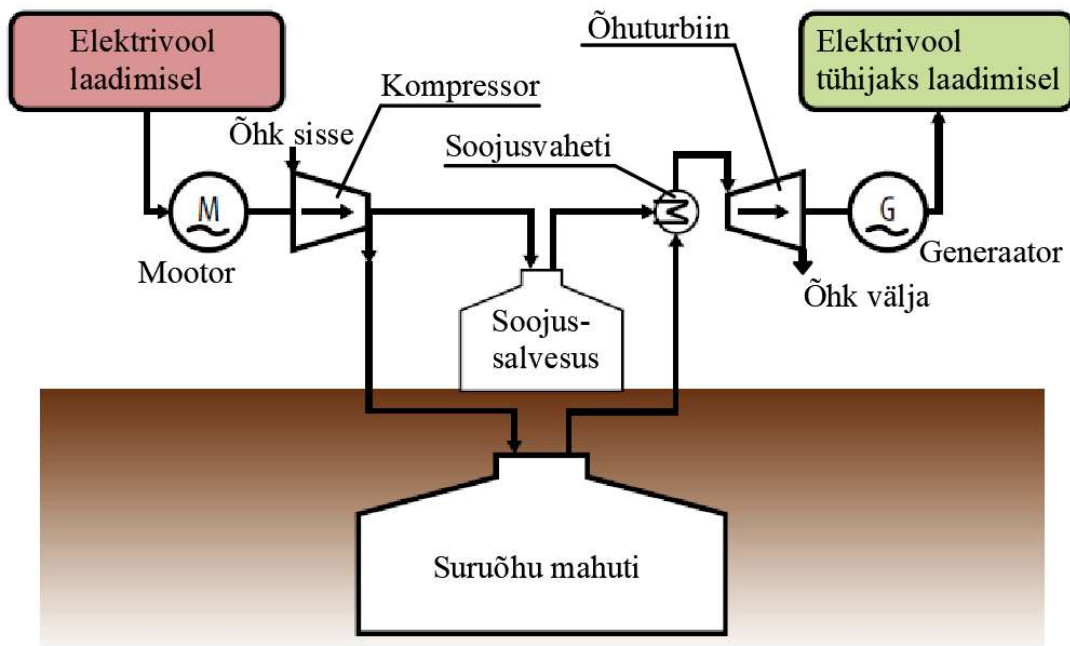
Suruõhk-energiasalvestusi süsteemide rajamine on majanduslikult atraktiivsem kohtadesse, kus on geoloogilised eeldused mahuti ehitamiseks. Sobivad on asukohad, kus on mahutitena võimalik ära kasutada poorseid kivimeid maapõues, tühjaks kaevandatud soolakambreid või muid õhukindlaid ruume. [17]

Tabel 4.2. Huntorfi ja McIntoshi võrguga integreeritud suruõhk-energiasalvesti süsteemid. [17]

Asukoht	Valmimisaasta	Maksimaalne võimsus, MW
Huntorf, Saksamaa	1978	290
McIntosh, Alabama, Ameerika Ühendriigid	1991	110

Tabelis 4.2. on toodud kaks suurimat võrguga integreeritud suruõhk-energiasalvesti installatsiooni, millest üks on Huntorfis Saksamaal ja teine McIntoshis Ameerika Ühendriikides. Huntorfi salvesti oli esimene suruõhk-energiasalvesti projekt maailmas. Suruõhu mahutid on komplekteeritud kahest reservuaarist, mille kogu ruumala on ligikaudu 310000 m³ ja salvesti maksimaalne võimsus 290 MW. Mõlemad suruõhu mahutid asuvad ligi 650 m sügavusel maapõues, mis tagavad sisemise rõhu tasakaalu kuni mitmeks kuuks. Lisas 2 joonisel 1 on kujutatud Huntorfi suruõhu mahuti lõige maapõues. Huntorf energiasalvesti on ühendatud Põhja-Saksamaa elektrivõrku, mille peamised kasutuseesmärgid on lühiajalised elektrivõrgu kvaliteedi tagamise rakendused ja tiputarbimise leevendamine PHAJa reservina. Taastuenergiaallikate integreerimised elektrivõrguga on samuti lisanud Huntorfi salvestussüsteemile rakendust. [38] McIntoschi suruõhk-energiasalvesti on ainuke suure maksimaalse võimsusega (110 MW) suruõhul põhinev energia salvesti Ameerika Ühendriikides ja Huntorfi järel suuruselt teine maailmas. McIntoschi suruõhu mahuti on soolakamber, mis on kaevandatud 459 m sügavusele ja ruumalaga 560000 m³. Lisas 3 joonisel 1 on kujutatud McIntoschi suruõhu mahuti lõige maapõues. [39]

Kuna õhu kokku surumisel tõuseb õhu temperatuur, tuleb eelnevalt soojus eemaldada. Traditsiooniline suruõhk-energiasalvesti töötab oma olemuselt diabaatilise protsessina paisates õhu kokkusurumisel eemaldunud soojuse keskkonda ja salvesti mahalaadimisel vaja minev soojus tuleb ise juurde toota, milleks põletatakse kütuseid. Traditsioonilise diabaatilise suruõhk-energiasalvestuse edasiarendus on arendatud-adiabaatiline suruõhk-energiasalvestus. Arendatud adiabaatilise salvestuse puhul salvestatakse kompressoriga õhu kokkusurumisel eemaldunud soojus ja tühjaks laadimise protsessi käigus kasutatakse läbi soojusvaheti salvestatud soojust, tõstes kogu töötsükli kasutegurit. Selline arendus on ka keskkonnasõbralikum kuna õhu surve alt vabastamise käigus ei tekitata heitgaase, kuid lisanduvad investeerimiskulud. [40] Joonisel 4.1 on toodud arendatud adiabaatilise suruõhk-energiasalvestuse tööpõhimõtet selgitav skeem.



Joonis 4.1. Arendatud adiabaatilise suruõhk-energiasalvesti tööpõhimõtet selgitav skeem. [17]

2016. aastal Šveitsi eraettevõtte ALACAES viis ellu esimese arendatud adiabaatilise suruõhk-energiasalvesti pilootprojekti maailmas, mis asub Šveitsi alpides. Antud salvestussüsteemi kogu töötsükli kasutegur on kuni 72 % ja täielikult heitgaaside vaba. Suruõhu mahutina kasutati vana transpordi tunnelit. Tunnelisse mahuti väljaehitamisel suleti mõlemad otsad betoonist valatud „troppidega“ ja moodustati 120 m pikkune ning 5 m diameetriga ruum, mille energiamahuvuseks oli 1 MW·h. Lisas 4 joonisel 1 on toodud ALACAES suruõhu mahuti põhimõtteline lõige tunnelis. Pliootprojektiga tõestati tehnoloogia toimimist ja arendatud adiaabilisel suruõhk-energiasalvestuse tehnoloogial on tulevikupotentsiaali. [41]

Arendatud adiabaatiline lahendus on suruõhk-energiasalvesti tulevik, kuid nagu PHAJ nõuab salvesti ehitamine looduslikke eeldusi. Suruõhu kujul energiasalvestamisel on ajaloos vähe projekte, kuid kaks suurimat installatsiooni on töös juba aastast 1978 ja 1991. Arendatud adiabaatiline lahendus lisab suruõhk-energiasalvestamise tehnoloogiale ka tähtsa lisandväärtuse muutes töötsükli heitgaaside vabaks.

4.3. Hooratas-energiasalvesti hetkeseis

Hooratas-energiasalvestuse tehnoloogiat kasutatakse katkematu toiteallikana ja autotööstuses ning võrguelekttris lühiajalistel energiasalvestus eesmärkidel. Kaubanduslikult kättesaadavate toodete rakenduseesmärk on hetkel enamasti lühiajaline katkematu toiteallikas, mida kasutatakse, kui on tegemist tundlike andmehaldus-, telekommunikatsiooni-, meditsiini- ja tööstusseadmetega. Tabelis 4.3 on toodud mõned hooratas-energiasalvestite tootjate poolt pakutavate salvestite spetsifikatsioone.

Tabel 4.3. Hooratas-energiasalvesti mõned kaubanduslikult kättesaadavad tooted, nende omadused ja kasutuseesmärgid. [42-45]

Tootja	Mudel	Maksimaalne võimsus, kW	Tühjenemise aeg	Kasutuseesmärk
GE Industrial Solutions	TLE Series Flywheel	60-800	≥13s	Katkematu toiteallikas
	SG Series Flywheel	54-540	≥17s	Katkematu toiteallikas
Vycon Energy	VDC XXT	450	≥13s	Katkematu toiteallikas
Active Power	XT275	250	25s	Katkematu toiteallikas
Beacon Power	-	≥160	30s	Sageduse reguleerimine, pinge tasakaalustamine, taastuenergiaallikate integreerimine elektrivõrguga, reservetoide

GE Industrial Solutions pakub kuni kuuest moodulist koosnevat lühiajalise katkematu toiteallika hooratas-energiasalvesti süsteeme. Olenevalt moodullaendusest on TLE Series hooratta puhul võimalik paigaldada süsteem maksimaalse võimsusega vahemikus 60-800 kW ja SG series mudeliga on võimalik komplekteerida süsteem maksimaalse võimsusega vahemikus 54-540 kW. Salvestisüsteeme on võimalik olenevalt valitud moodullahendusest kasutada täisvõimsusel 13 sekundit või rohkem. [42]

Vycon Energy kõige võimsam hooratas-energiasalvesti mudel on VDC XXT, mille maksimaalseks võimsuseks on 450 kW. VDC XXT on mõeldud kasutamiseks lühiajalise katkematu toiteallikana. [44]

Active Power toodab katkematu toiteallika eesmärgil kasutatavat mudelit XT275, mille maksimaalseks võimsuseks on 250 kW. Paralleelselt on võimalik tööle ühendada kuni 7 XT275 salvestit, mis annaks süsteemi maksimaalseks võimsuseks 1750 kW. [45]

Beacon Power pakub võimalust komplekteerida hooratas-energiasalvestuse installatsioone maksimaalse võimsusega 160 kW-st kuni kümnete megavattideni, kasutades moodullahendust. Moodullahendus võimaldab paigaldada täpselt vajalikus ulatuses võimsusega salvestuskompleksi. Beacon Poweri kaks suurimat hooratas-energiasalvestuse installatsiooni on mõlemad maksimaalse võimsusega 20 MW, mis läksid töösse 2011. ja 2013. aastal vastavalt Stephentownis New Yorgis ja Hazleis Pennsylvanias. Mõlemad salvestus-kompleksid on ehitatud võrgu sageduse reguleerimiseks. [43]

2018. aasta märtsis testiti Hawaii Campelli tööstuspargis tootja Amber Kinetics hooratas-energiasalvesti mudelit M32 (maksimaalne võimsus 8kW, maksimaalne energiamahuvus 32kW·h). See pilootprojekt oli esimene kaubanduslik kasutus Amber Kineticsi uuele spetsiaalselt võrguelekttri rakendusteks arendatud salvestustehnoloogiale. Tabelis 4.4 on toodud mudeli M32 spetsifikatsioonid. Amber Kinetics on arendanud peale seda projekti võimaluse installeerida mitmeid M32 salvesteid paralleeltööle, millega saab salvestuskompleksi energiamahuvuse viia vastavusse suurte elektrivõrkude vajadustega. Labori keskkonnas on demonstreeritud M32e võimet ühendada paralleelselt tööle 32 salvestit (kogu energiamahuvusega 1024 kW·h). 2018. aasta oktoobris saavutas Amber Kinetics kaubandusliku valmiduse M32 tootele, mis on mõeldud võrguelekttri rakenduseesmärkideks. Neljatunnine tühjenemisaeg lisab osaliselt ka pikaajalise töötssükli perioodiga rakendusvõimalusi – nagu näiteks koormuse järgimine, elektrisüsteemi stabiliseerimine jne. [46]

Tabel 4.4. Amber Kinetics võrguelekttri rakendusteks arendatud hooratas-energiasalvesti mudel M32 spetsifikatsioonid. [47]

Tootja	Amber Kinetics
Mudel	M32
Maksimaalne võimsus	8 kW
Energiamahuvus	32 kW·h
Tühjenemise kestvus	4 tundi
Kasutegur	86%
Päevane töötssükli limiit	Limiiti pole
Tööiga	30 aastat

Hooratas-energiasalvestit on võimalik kasutada lisaks katkematule toiteallikale ka võrguelekttri kvaliteedi parandamiseks. Beacon Poweri poolt pakutav lahendus võimaldab ehitada suuri moodullahendusega salvestuskomplekse. Amber Kineticsi poolt 2018. aastal

arendatud mudel M32 laiendab hooratas-energialvestuse rakendusvaldkondadesse ka pikaajalise töötükli perioodiga kasutuseesmärgid.

4.4. Ülikondensaatorite hetkeseis

Tänaasel päeval toodavad enamik elektroonika ettevõtteid ülikondensaatoreid. Ühed suurimad tootjad on Maxwell, Murata ja Tecate Group. Hetkel leiavad need rakendust peamiselt autotööstuses, hübriidsõidukites, võrguelekttri kvaliteedi tagamises, ühistranspordi sõidukites ja hübriidrongides. [48]

2009. aastal asutati Eestis ettevõtte Skeleton Technologies, mis tegeleb samuti ülikondensaatorite arendamise ja tootmisega [49]. Skeleton Technologies toodab tööstuslikke ülikondensaatoreid seerianimega SkelCap, mille erinevad mudelid on elektrimahtuvusega 500-3200 F ja nimipingega 2,85 V. Mudelil SCA3200 on maksimaalne võimsus 18,5 kW ja energiamahuvus 3,6 W·h. Lisas 5. tabelis 5.1 on toodud SkelCap mudelite spetsifikatsioonid.[50]

2019. aasta jaanuaris tegi Maxwell kaubanduslikult kättesaadavaks 3400 F elektrimahtuvusega ja 3 V nimipingega ülikondensaatori [51]. Mudel BCAP3400 on mõeldud vastu pidama ka kõrge vibratsiooniga töökeskkondades ja omab 30 kW/kg erivõimsust ning 4,25 W·h energiamahuvust, mis on kõige võimsam ja suurima energiamahuvusega Maxwelli ülikondensaator. Lisas 5 tabelis 5.2 on toodud BCAP3400 spetsifikatsioonid. Tüüpilised rakendusvaldkonnad on BCAP3400-l hübriidtranspordivahendite toiteallikas, katkematu toiteallikas, väiksemates elektrivõrkudes elektrikvaliteedi tõstmise ja seal hulgas ka taastuenergiaallikate integreerimine. [27] Maxwell tootekataloogis on ülikondensaatori mudelid Standard Series elektrimahtuvusega 1-2000 F, XP Series elektrimahtuvusega 3-50 F ja DuraBlue elektrimahtuvusega 3000-3400 F ülikondensaatorid [52]. 2019. aasta alguses ostis Tesla, Inc. Maxwell Technologies, Inc. ettevõtte [53] ja eeldatavasti hakkavad tulevikus Maxwelli salvestustehnoloogiad leidma rakendust Tesla autotööstuses.

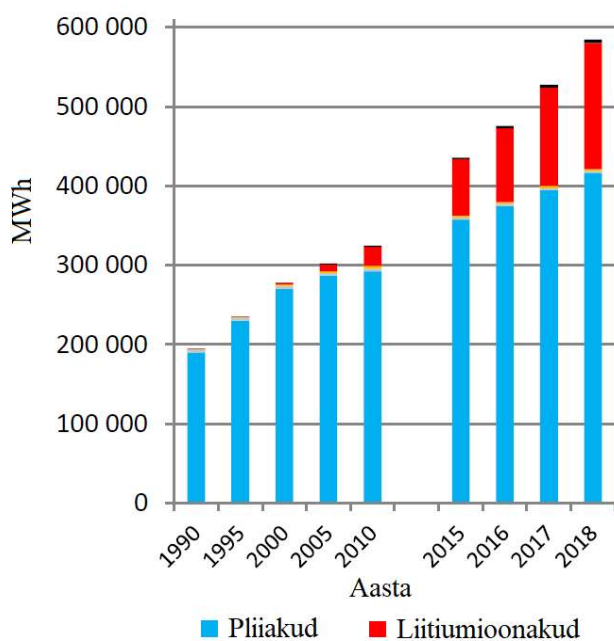
Võrguelekttris testitakse suure võimsusega ülikondensaatori süsteeme Jaapanis. Süsteemid, maksimaalse võimsusega, 4 MW on installeritud avalikult kasutatavatesse hoonetesse, et tasakaalustada võrguelekttri lühiajalistest koormuse kõikumistest tekkivaid probleeme. Lisaks rakendatakse neid tagavara generaatorite startermootorite käitamiseks

voolukatkestustel, et tagada energiavarustus, kuni võrgu ümberlülitus on stabiliseerunud. [28]

Kuigi prognoositakse, et tulevikus arendatakse iseseisvad ülikondensaatorpatarei tehnoloogiad, siis lähiajal on arendustöö keskendunud elektrokeemiliste tehnoloogiate kombineerimisele ülikondensaatoritega. Ülikondensaatorid on ideaalne lahendus, kui on vaja lühiajalist suurt võimsust, kuid elektrokeemilised elektrienergia salvestid on paremad, kui on vaja tagada energiavarustus pikemaks perioodiks. Kombineerides need kaks saadakse hübriidpatarei, mis rahuldab mõlemad vajadused ja vähendab lühiajalist tipukoormust patareile. Selliseid tehnoloogiaid on tänapäeval arendatud pliiakudest. [28]

4.5. Elektrokeemiliste elektrienergia salvestustehnoloogiate mahtvuslik osatähtsus maailmaturul

Liitiumioon akupatareid on muutunud domineerivaks elektrokeemiliseks elektrienergia salvestustehnoloogiaks suurematel turgudel, nagu mobiilsed elektroonilised seadmed, autotööstus ja võrguelekttri energiasüsteemid. Teised elektrokeemilised akupatarei tehnoloogiad on arengult konkurentsist kõrvale jäänud nagu näiteks nikkel-metallhüdriid (NiMH), nikkelkaadium (NiCd) ja pliiakud. [54]



Joonis 4.2. Elektrokeemiliste elektrienergia salvestite müük mahtvuslikult aastatel 1990 – 2018 [54].

Joonisel 4.2 on toodud elektrokeemiliste elektrienergia salvestite toomise mahu kasv aastatel 1990 – 2018. Aastatel 2015-2018 on liitiumioonakude müük suurenenud ligikaudu 24 % võrra aastas, mis oli 2018. aastal mahtvuslikult üle 148000 MW·h. Võrdluseks nikkel-metallhüdriid akusid müüdi samal aastal mahtvuslikult alla 10000 MW·h ja nikkelkaadium akusid alla 1000 MW·h. [55]

Antud andmete põhjal võib otsustada, et kõige olulisemad elektrokeemilised akupatarei tehnoloogiad maailmaturul on pliiaku ja liitiumioonaku. Pliiaku on enim toodetud elektrokeemiline elektrienergia salvestustehnoloogia - toodetud ülekaalukalt kõige rohkem ja 2018. aasta seisuga omab mahtvuslikult üle 70 % turuosast [54]. Liitiumioonakude kiire tehnoloogiline areng võib seda tulevikus muuta.

4.5.1. Liitiumioonakude hetkeseis

Lõpptarbija elektroonikas kasutatakse peamiselt LCO (LiCoO_2) katoodi materjali. Suure erienergia tõttu kasutatakse seda mobiiltelefonides, sülearvutites ja digitaalsetes kaamerates. Puuduseks on LCO katoodi materjaliga liitiumioonakudel lühike tööiga, madal soojuslik stabiilsus ja ülekoormamisel võimekuslangus, mis on põhjustatud dendriitide tekkest liitiumi elektroodile. Tabelist 4.5 on toodud LCO katoodi materjali spetsifikatsioonid. LCO katoodi puudustest tingituna ei ole see sobilik elektriautode akudele. Koobalti limiteeritud ressursid ja kõrged hinnad seavad samuti piirangud laialdasele autoakude tootmisele. [56]

Tabel 4.5. LCO katoodi materjaliga liitiumioonaku spetsifikatsioonid. [56]

Katoodi materjal	Anoodi materjal	Erienergia, W·h/kg	Töotsükli arv tööea jooksul
LiCoO_2	Grafiit	150-200	500-1000

Autoakude tootmisel on võetud kasutusele alternatiivseid katoodi materjale, mille hulka kuuluvad LMO (LiMn_2O_4), NCA ($\text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,15}\text{Al}_{0,05}\text{O}_2$), NMC ($\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$) ja LFP (LiFePO_4). Need liitiumiühendid omavad stabiilsemaid kristallilisi struktuure ja ressursiliselt on neid maapöues rohkem, mis tõstavad laialdase tootmise potentsiaali. Tänapäevaks on LMO, LFP, NCA ja NMC tehnoloogiaid edukalt kasutatud autoakudes elektriautode tootjate poolt, nagu näiteks Tesla, BMW, BYD Chervolet, Mercedes Benz-Daimler, Volkswagen ja Nissan. [57]

Tabel 4.6. Tesla Model 3 ja Renault Zoe elektriautode liitiumioonakude spetsifikatsioonid. [57]

Auto mudel	Ühe töötükliga võimalik läbitav vahemaa, km	Energia-mahtuvus, kW·h	Energia massitihedus W·h/kg	Katood	Anood
Tesla Model 3	350-500	75-100	260	NCA	Si-C
Renault Zoe	400	41	241	NMC	C

Tänapäeval on NCA tehnoloogia leidnud edukat kasutust Tesla elektriautodes. NMC katoodi kasutamisel omab liitiumioonaku sarnaseid töomadusi nagu LCO katoodi puhul, kuid on ülekoormusel stabiilsem ja koobalti osakaalu vähendamisel ühendis vähendab aku maksumust. NMC katoodi on autoakude tööstuses kasutanud edukalt Renault Zoe. [57] Tabelis 4.6 on toodud Tesla Model 3 ja Renault Zoe liitiumioonaku spetsifikatsioonid.

Akupatariiga elektriautode tootmisel on elektrienergia salvestustehnoloogiate arendamisel veel palju ruumi. Hetkel moodustab akupatari Tesla Model 3 hinnast ligikaudu 37%. Kõrge hind ja soov aku suurema erieenergia järele motiveerib autotööstusi otsima paremaid lahendusi. Üks viis paranda liitiumioonaku energiatihedust on asendada anoodi materjal liitiumi metalliga (Li_m). Li_m kasutamine peaks uurimuste kohaselt tõstma ligikaudu 20 % aku erieenergiat, kuid esitab ka uued väljakutsed. Li_m anoodi materjali tõstab oluliselt dendriidide teket ja vedelate elektrolüütidega on lühiseoht vältimatu. See on suunanud tahke elektrolüüdi väljaarendamisele, milleks võiks sobida liitiumi sulfiidid nagu näiteks LPS ($Li_7P_3S_{11}$). Hetkel veel ideaalse lahenduseni pole jõutud. Potentsiaalselt võiks tahke elektrolüüdi kasutamisel olla eeliseid töötamiseks ekstreemsetel temperatuuridel ($<-10^{\circ}C$ ja $>80^{\circ}C$) ja kohtades, kus on väga kõrged ohutusnõuded. [58]

Energiasüsteemides võrguelekttri kvaliteedi tagamisel on liitiumioon akupatari samuti kanda kinnitamas. Suuremahulise akupatari süsteemi ehitamisel paigutatakse akuelemendid moodulitesse, mis omakorda paigaldatakse riulistruktuuris tavapärastesse konteineritesse. Üks konteiner on energia mahtuvusega 1-5 MW·h. Põhilised katoodi materjalid suuremahuliste akupatari süsteemide ehitamisel on NMC ja LFP. Anoodi materjalina kasutatakse enamasti grafiiti. Kõige rohkem meediakajastust sai 2017. aastal Hornsdaleis Lõuna-Austraalias Tesla, Inc. installatsioon, mis oli 129 MW·h energiamahutusega liitiumioonaku-süsteem. [59]

4.5.2. Pliiakude hetkeseis

Põhiline kasutusvaldkond pliiakudel on sise põlemismootoriga auto startermootori, valgustuse, süüte jms toiteallikas. Populaarsed kasutussektorid on veel põhienergiallikana elektriratastel, kahveltõstukitel ja muudel sõidukitel. Statsionaarsed tööstuslikud rakenduseesmärgid on katkematu toiteallikas, telekommunikatsiooni sektoris ja võrguelekttris alternatiivne energiaallikas. [13] Lisas 6 tabelis 1 on toodud EASE (*European Association for Storage of Energy*) väljastatud info kohaselt pliiaku salvestisüsteemi võimalikud spetsifikatsioonid tänapäeval.

Pliiakud on võrreldes teiste elektrokeemiliste elektrienergia salvestustehnoloogiatega madalate investeerimiskuludega, mis on teinud neist laialdaselt kasutatava salvestustehnoloogia. Pliiakusid kasutatakse võrgust isoleeritud ja võrguga intregeeritud elektrienergia süsteemide puhul. [17]

Euroopas on installeritud Aachenis Saksamaal 5 MW maksimaalse võimsusega pliiaku salvestisüsteem M5BAT (*Modular Multi-Megawatt Multi-Technology Medium-Voltage Battery Storage*), mis on kasutuses koormuse ühtlustamiseks, võrguelekttri kvaliteedi parandamiseks ja reservtoitena [60]. Alt Daberis Brandenburgis Saksamaal on installeeritud 2 MW maksimaalse võimsusega pliiaku süsteem sageduse reguleerimiseks [61].

Vaatamata tööstuse pikaajasele kasutuskogemusele on pliiakusid siiski võimalik edasi arendada. Erivõimsust on võimalik tõsta materjalide arendamisega, kuid hetkel on suunatud põhi fookus süsteemide automatiseerimisele ja süsteemihaldusele. [17]

Uued pliiakude kontseptsioonid:

- Superkondensaatorite omaduste lisamine, et tõsta aku võimekust (Ultrapatarei);
- Kõrge erieneergiaga süsiniku välja töötamine, et tõsta akude erieneergia tihedust;
- Väävelhappelahuse töökindluse parendamiseks uute arendatud elektrolüütide kasutamine (Tydrolyte). [62-64]

Superkondensaatori omaduste lisamine pliiakudele kujutab endast andoodi materjali konstrueerimist süsinkust ja pliiist. See kombinatsioon annab akule parema vastupidavuse täies ulatuses laadimisel ja koormuse all tühjenemisel tekkivatel probleemidel. [64] Ultrapatarei ehitus on kujutatud lisas 7 joonisel 1.

KOKKUVÕTE

Bakalaureusetöö eesmärgiks oli selgitada välja elektrienergia salvestustehnoloogiate hetkeolukord ja tuua välja ka potentsiaalsed arendusvõimalused. Salvestustehnoloogiate kasutuseesmärke on vaadeldud elektrienergia muundamisel fossiilkütuseid ja taastuvenergiaallikaid kasutava energiasüsteemi ning elektrienergia lõpptarbija perspektiividest. Töotsükli kestuvse järgi on jaotatud salvestustehnoloogiad kolme gruppi: lühi-, pika- ja ülipikaajalise töötsükliga salvestid. Lühiajaliste salvestite hulka kuuluvad peamiselt ülikondensaator ja hooratas-energiasalvesti. Pikajaliste ja ülipikaajaliste salvestite hulka kuuluvad elektrokeemilised ja mehaanilised salvestustehnoloogiad.

PHAJ on kõige suurema energiamahuvusega, pikaegse kasutuskogemusega ja tehnoloogiliselt küps energia salvestustehnoloogia. Suruõhk-energiasalvesti on samuti suure energiamahuvusega, kuid leiab vähem kasutust. Diabaatilise suruõhk-energiasalvestuse edasiarendus on arendatud adiabaatiline süsteem, millel oli 2016. aastal Šveitsis edukas pilootprojekt. Suure energiamahuvusega mehaaniliste salvestustehnoloogiate väljaehitamine nõuab asukohale looduslikke eeldusi või lisa investeerimiskulusi vastavateks ümberehitusteks, mistõttu on alternatiivsete võimaluste väljaarendamine olnud aktuaalne. Mehaanilistest salvestustehnoloogiatest on hooratas-energiasalvesti enamasti lühiajalise töötsükliga, kuid 2018. aasta oktoobris saavutas ettevõtte Amber Kinetics kaubandusliku valmiduse mudelile M32, mille tühjenemisaeg koormuse all on neli tundi. See saavutus laiendas praktikas hooratas-energiasalvesti tehnoloogia kasutust ka pikaajalise töötsükli perioodiga salvestuseesmärkidele.

Ülikondensaatorid leiavad kasutust peamiselt lühiajalise töötsükliga eesmärkidel autotööstuses, hübriidsõidukites, võrguelekttri kvaliteedi tagamises, ühistranspordi sõidukites ja hübriidrongides. Maxwelli DuraBlue seeria toodetel on hetkel kõige suurem elektrimahtuvus, mis jääb vahemikku 3000-3400 F. Eestis tootab ja arendab ülikondensaatoreid 2009. aastal asutatud ettevõtte Skeleton Technologies. Ülikondensaatori kõige potentsiaalsem arendus lähiajal on kombinatsioon mõne elektrokeemilise salvestustehnoloogiaga. Väljaarendamisel on hübriidpatarei tehnoloogia, kus on kombineeritud elektrokeemilise energiasalvesti ja ülikondensaatori tehnoloogilised omadused.

Elektrokeemilistest elektrienergia salvestustehnoloogiatest on olnud läbi aegade pliiakudel kõige suurem osatähtsus maailmaturul, kuid liitiumioonaku kiire arendustöö võib seda tulevikus muuta. Liitiumioonaku leiab enamasti kasutust lõpptarbija elektroonilistes seadmetes ja akupatareiga elektriautodes, kus on oluline suur erienergia ja mobiilsus. Liitiumioonaku on edukalt kasutust leidnud akupatareiga elektriautodes nagu Tesla Model 3 ja Renault Zoe. Liitiumioonaku negatiivne külg on plahvatusohtlikkus üle lubatud töötemperatuuri töötamisel ja selle parandamiseks käib arendustöö tahkete elektolüütide väljatöötamisel. Pliiakude eelis on suhteliselt väike hind, kuid puuduseks on madal erienergia ja suur kaal. Pliiakud on mobiilses kasutuses startermootori, valgustuse ja süüte toitenä autotööstuses ning elekter-sõidukite põhienergiaallikana. Statsionaarne kasutusvaldkond on peamiselt katkematu toiteallikas. Uued pliiakude kontseptsioonid on superkondensaatori omaduste lisamine (ultrapatarei), erienergia tõstmise süsiniku materjali arendusega ja elektrolüüdi arendamine töökindluse parandamiseks.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Global Statistical Yearbook 2018. (2018). Enerdata. <https://www.enerdata.net/publications/world-energy-statistics-supply-and-demand.html> (26.05.2019).
2. KESKKONNAMINISTEERIUM. (2015). Pariisi kokkulepe. [veebileht] <https://www.envir.ee/et/eesmargid-tegevused/kliima/rahvusvahelised-kokkulepped/pariisi-kokkulepe> (26.05.2019).
3. M.C. Lott, S. Kim, C. Tam, D. Houssin, J. Gagne. (2014). Technology Roadmap: Energy Storage. France: International Energy Agency. <http://energystorage.org/system/files/resources/technologymapenergystorage.pdf> (26.05.2019).
4. D. Azhgaliyeva. (2019). Energy Storage and Renewable Energy Deployment: Empirical Evidence from OECD countries. - *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 3647-3651, February 2019.
5. The World Bank Group. (2014). CO2 emissions from transport (% of total fuel combustion). [veebileht] <https://data.worldbank.org/indicator/en.co2.tran.zs?end=2014&start=1960&view=chart> (26.05.2019).
6. D. Anair, A. Mahmassani. (2012). State of CHARGE: Electric Vehicles' Global Warming Emissions and Fuel-Cost Savings across the United States. Cambridge: UCS Publications.
7. IRENA. (2017). Electric Vehicles: Technology brief. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/publications/2017/Oct/Electricity-storage-and-renewables-costs-and-markets> (26.05.2019).
8. P. Hertzke, N. Müller, S. Schenke, T. Wu. (2018). The global electric-vehicle market is amped up and on the rise. - *Mckinsey & Company*. [e-ajakiri] <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/the-global-electric-vehicle-market-is-amped-up-and-on-the-rise> (26.05.2019).
9. R. Matulka. (2014). The History of the Electric Car. - *U.S. Department of ENERGY*. <https://www.energy.gov/articles/history-electric-car> (26.05.2019)
10. M. Ehsani, Y. Gao, S.E. Gay, A. Emadi. (2005). Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design. United States of America: CRC Press.
11. B. Robyns, B. François, G. Delille, C. Saudemont. (2015). Energy Storage in Electric Power Grids. United States of America: John Wiley & Sons, Inc. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119058724> (26.05.2019).
12. Historical data (until December 2015): Monthly values. (s.a). ENSTO-E. <https://www.entsoe.eu/data/data-portal/> (26.05.2019).

13. **A. Rosin, S. Link, H. Hõimoja, I. Drovtar.** (2015). ENERGIASALVESTID JA - SALVESTUSTEHNOLOOGIAD. Tallinn: TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL.
14. Electrical Energy Storage. (2011). International Electrotechnical Commission. <https://www.iec.ch/whitepaper/energystorage/> (26.05.2019)
15. SubChem Materials Working Group. (2018). Battery Energy Storage. France: SubChem. http://www.suschem.org/files/library/Suschem_energy_storage_final_preview.pdf (26.05.2019).
16. **P. Denholm, T. Mai.** (2019). Timescales of energy storage needed for reducing renewable energy curtailment. - *Renewable Energy: An International Journal*, vol. 130, pp. 388-399, 01.2019.
17. IRENA. (2017). Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/publications/2017/Oct/Electricity-storage-and-renewables-costs-and-markets> (26.05.2019).
18. **S. Rehman, L.M. Al-Hadhrami, M.M. Alam.** (2015). Pumped hydro energy storage system: A technological review. - *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 44, pp. 586-598, April 2015.
19. **A. Rufer.** (2018). Energy Storage Systems and Components. Boca Raton: CRC Press.
20. Energy Storage Association. (s.a). Compressed Air Energy Storage (CAES). [veebileht] <http://energystorage.org/compressed-air-energy-storage-caes> (26.05.2019).
21. **P.W. Parfomak.** (2012). Energy Storage for Power Grids and Electric: Transportation: A Technology Assessment. - *Congressional Research Service*, Tech. Rep. R42455.
22. **M.G. Molina.** (2010). Dynamic Modelling and Control Design of Advanced Energy Storage for Power System Applications. IntechOpen. <https://www.intechopen.com/books/dynamic-modelling/dynamic-modelling-and-control-design-of-advanced-energy-storage-for-power-system-applications> (26.05.2019).
23. **D. Brown, W. Chvala D.** (2005). Flywheel Energy Storage: An Alternative to Batteries For UPS Systems. - *Energy Engineering - ENERG ENG*, vol. 102, pp. 7-26. https://www.researchgate.net/publication/254302656_Flywheel_Energy_Storage_An_Alternative_to_Batteries_For_UPS_Systems (26.05.2019).
24. **M.E. Amiryar, K.R. Pullen.** (2017). A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications. - *Applied Sciences*, vol. 7.
25. **X. Li, B. Wei.** (2013). Supercapacitors based on nanostructured carbon. - *Nano Energy*, vol. 2, pp. 159-173, March 2013.
26. **M. Winter, R.J. Brodd.** (2004). What Are Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors? - *Chem.Rev.*, vol. 104, pp. 4245-4270, 10.01.2004.
27. Maxwell Technologies, Inc. (2019). Maxwell's Highest Power and Energy Cell: 3.0V 3400F ULTRACAPACITOR CELL. - Tech. Rep. 3002330-EN.2.
28. Battery University Group. (2019). BU-209: How does a Supercapacitor Work?. [veebileht] https://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_role_of_the_supercapacitor (26.05.2019).

29. **G. Wang, H. Wang, B. Zhong, L. Zhang, J. Zhang.** (2015). Supercapacitors' Applications. - *Electrochemical Energy*, pp. 479-492.
30. **H. Zhang, X. Li, J. Zhang.** (2018). Redox Flow Batteries: Fundamentals and Applications. United States of America: CRC Press.
31. FORTE. (2016). MIKROSKOOBIVIDEO: Mis toimub aku laadimise ajal selle sisemuses. <https://forte.delfi.ee/news/teadus/mikroskoobivideo-mis-toimub-aku-laadimise-ajal-selle-sisemuses?id=76040903> (26.05.2019).
32. **D. Wieboldt, I. Ruff, M. Hahn.** (2015). *In situ* Raman Analysis of Lithium Ion Batteries. http://tools.thermofisher.com/content/sfs/brochures/AN52676_E%2020215M_In%20Situ%20Lithium%20Ion.pdf (26.05.2019).
33. **Q. Gangliang.** (2017). Briefing material: Renewable Energy Storage. - *World Hydropower Congress*. Addis Ababa, 10.05.2017. <https://www.hydropower.org/sites/default/files/WHC2017-8A-QIAN.pdf> (26.05.2019).
34. **C.A. Grymes.** (s.a). Pumped Storage in Bath County. [veebileht] <http://www.virginiaplaces.org/energy/bathpumped.html> (26.05.2019).
35. **E. Ingram.** (2017). New Chinese pumped-storage hydro plant to be “world’s largest” when complete in 2021. - *Hydro Review*. <https://www.hydroworld.com/articles/2017/09/new-chinese-pumped-storage-hydro-plant-to-be-world-s-largest-when-complete-in-2021.html> (26.05.2019).
36. **A. Riives.** (2018). Paldiski saab teistsorti elektri jaama. - *Postimees*. [e-ajakiri] <https://majandus24.postimees.ee/6139227/paldiski-saab-teistsorti-elektrijaama> (26.05.2019).
37. **R. Madlener and J. Specht.** (2013). An Exploratory Economic Analysis of Underground Pumped-Storage Hydro Power Plants in Abandoned Coal Mines. - *FCN Working Paper*, vol. 2. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2350106 (26.05.2019).
38. **F. Crotonino, K. Mohmeyer, R. Scharf.** (2001). Huntorf CAES: More than 20 Years of Successful Operation. http://www.fze.uni-saarland.de/AKE_Archiv/AKE2003H/AKE2003H_Vortraege/AKE2003H03c_Crotonino_ea_HuntorfCAES_CompressedAirEnergyStorage.pdf (26.05.2019).
39. PowerSouth ENERGY COOPERATIVE. (s.a). Compressed Air Energy Storage: McINTOSH POWER PLANT. <http://www.powersouth.com/wp-content/uploads/2017/07/CAES-Brochure-FINAL.pdf> (26.05.2019).
40. Energy Storage Association. (s.a). Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage (AA-CAES). [veebileht] <http://energystorage.org/advanced-adiabatic-compressed-air-energy-storage-aa-caes> (26.05.2019).
41. ALACAES. (s.a). Pilot Plant. [veebileht] <https://alacaes.com/technology/pilot-plant/> (26.05.2019).

42. GE Industrial Solutions. (2016). Flywheel UPS Systems, 50-1000 kVA: using TLE or SG Series UPS. <https://www.power-solutions.com/wp-content/uploads/2017/02/GE-Flywheel-brochure1587.pdf> (26.05.2019)
43. Beacon Power. (s.a). 20 MW Flywheel Energy Storage Plant. https://www.sandia.gov/ess-ssl/docs/pr_conferences/2014/Thursday/Session7/02_Areseneaux_Jim_20MW_Flywheel_Energy_Storage_Plant_140918.pdf (26.05.2019).
44. VYCON. (s.a). VDC RUNTIMES & SPECIFICATIONS. [veebileht] <https://vyconenergy.com/products/ups/run-times-specs/> (26.05.2019).
45. Active Power. (2017). CleanSource® XT UPS: Single Module Systems. <http://www.activepower.com/en-US/documents/4106/cleansource-xt250-60hz-w> (26.05.2019).
46. **W. Sutherland, Senesky Matthew, W. Kwok, M. Stout, Sanders Seth, E. Chiao, R. Bhat.** (2019). Flywheel Systems for Utility Scale Energy Storage. - *California Energy Commission*, Tech. Rep. CEC-500-2019-012.
47. Amber Kinetics. (s.a). Longer Duration, Lower Cost Energy Storage. [veebileht] <https://amberkinetics.com/products-2/> (26.05.2019).
48. **C. Atwell.** (2018). Supercapacitors: Past, Present, and Future. - *Power Electronics*. <https://www.powelectronics.com/alternative-energy/supercapacitors-past-present-and-future> (26.05.2019).
49. Skeleton Technologies. (2019). About Skeleton Technologies - powering energy savings with ultracapacitors. [veebileht] <https://www.skeletontech.com/about> (26.05.2019).
50. Skeleton Technologies. (2019). DATA SHEET: SkelCap ULTRACAPACITOR. https://www.skeletontech.com/hubfs/Data_sheets/ul_02-SCA-181029-1B-DataSheet-SCA.pdf?hsCtaTracking=9dad2c8b-c8b1-4a0e-acba-913103f71ac2%7C1b0ce536-e940-43b8-b00a-9d371a854c27 (26.05.2019).
51. Maxwell Technologies. (2019). Maxwell Technologies Launches New 3-Volt (3.0V) Platform for Full Range of Market Applications. <http://investors.maxwell.com/investors/news-and-events/press-releases/press-release-details/2019/Maxwell-Technologies-Launches-New-3-Volt-30V-Platform-for-Full-Range-of-Market-Applications/default.aspx> (26.05.2019)
52. Maxwell Technologies. (2019). Cells. [veebileht] <https://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/cells> (26.05.2019).
53. **A. Rathi.** (2019). Tesla bought a battery company, and it's more about cash flow than batteries. - QUARTZ. [e-ajakiri] <https://qz.com/1541864/tesla-bought-maxwell-technologies-for-218-million-but-not-for-its-ultracapacitors/> (26.05.2019).
54. **C. Pillot.** (2019). The Rechargeable Battery Market and Main Trends 2018-2030. - *36th Annual International Battery Seminar & Exhibit*. Avicenne Energy.
55. Roskill. (2019). Lithium-ion Batteries: Outlook to 2028. [veebileht] <https://roskill.com/market-report/lithium-ion-batteries/> (26.05.2019).

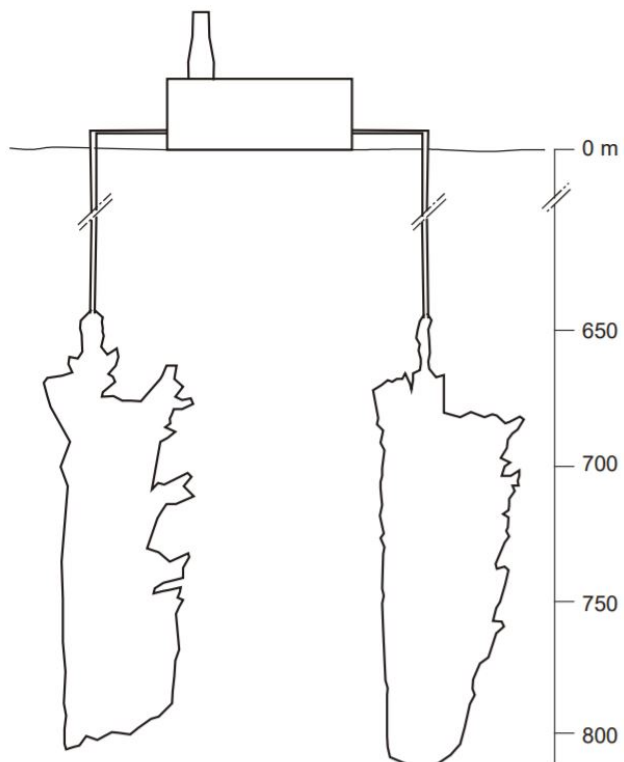
56. Battery University Group. (2019). BU-205: Types of Lithium-ion. [veebileht] https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion (26.05.2019).
57. **Y. Ding, Z.P. Cano, A. Yu, J. Lu, Z. Chen.** (2019). Automotive Li-Ion Batteries: Current Status and Future Perspectives. - *Electrochemical Energy Reviews*, vol. 2, pp. 1-28, 03.01.2019.
58. **A. Ulvestad.** (2018). A Brief Review of Current Lithium Ion Battery Technology and Potential Solid State Battery Technologies. <https://arxiv.org/abs/1803.04317> (26.05.2019).
59. RESEARCHINTERFACES. (2018). Lithium-ion batteries for large-scale grid energy storage. [veebileht] <https://researchinterfaces.com/lithium-ion-batteries-grid-energy-storage/> (26.05.2019).
60. M5BAT. (s.a). M5BAT: a unique hybrid battery storage system. [veebileht] <http://m5bat.de/en-gb/> (26.05.2019).
61. **J. Ayre.** (2015). Belectric's Energy Buffer Unit At The Alt Daber Solar Project Now Approved To Operate In Germany's Grid-Balancing Frequency Response Market. - *CleanTechnica*. [e-ajakiri] <https://cleantechnica.com/2015/05/20/belectrics-energy-buffer-unit-alt-daber-solar-project-now-approved-operate-germanys-grid-balancing-frequency-response-market/> (26.05.2019).
62. European Association for Storage of Energy. (2019). Electrochemical Energy Storage: Lead-Acid Battery. [veebileht] http://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2016/07/EASE_TD_Electrochemical_LeadAcid.pdf (26.05.2019).
63. Tydrolite LLC. (2019). Tydrolite Selected by NAATBatt as a Top Ten Emerging Battery Technology of 2019.
64. CSIROpedia. (s.a). UltraBattery™. [veebileht] <https://csiropedia.csiro.au/ultrabattery/> (26.05.2009).

LISAD

Lisa 1. Enerdata Energy Statistical Yearbook 2018 andmetes kajastatud riigid

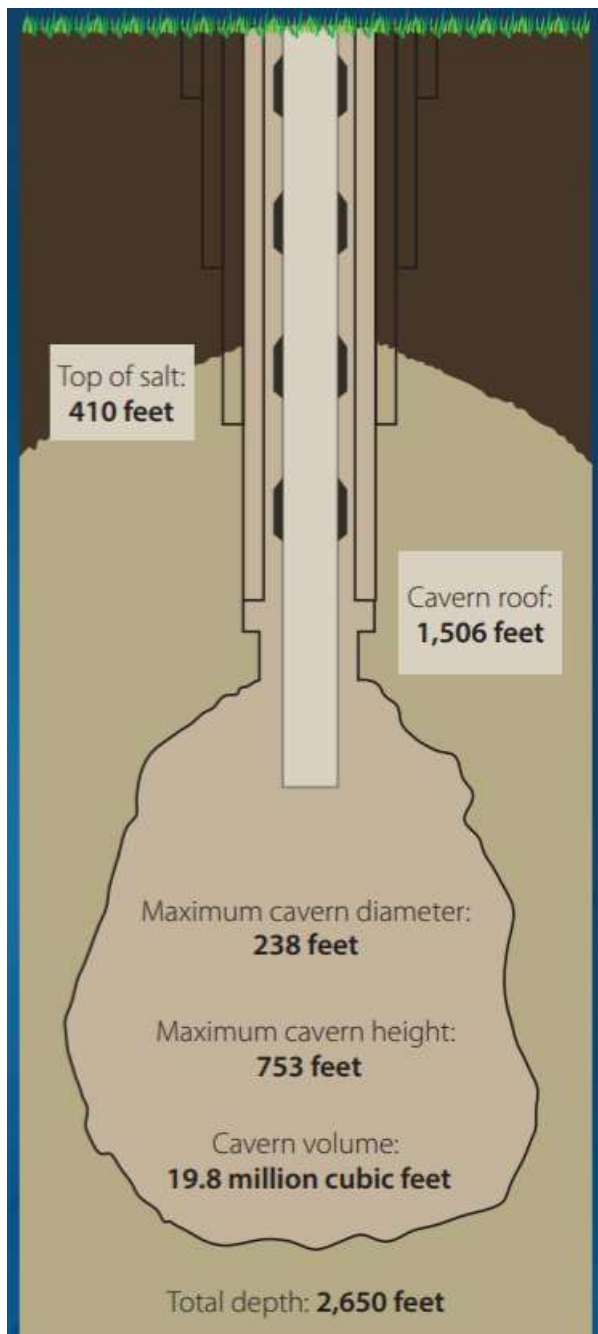
- 1) **OECD riigid:** Ameerika Ühendriigid, Kanada, OECD Euroopa (Austria, Belgia, Tšehhi, Taani, Soome, Prantsusmaa, Saksamaa, Kreeka, Ungari, Iirimaa, Island, Itaalia, Luksemburg, Holland, Norra, Poola, Portugal, Slovakkia, Hispaania, Rootsi, Šveits, Türgi, Suurbritannia), Lõuna-Korea, Jaapan, Austraalia, Uus-Meremaa, Mehhiko.
- 2) **G7 riigid:** Ameerika Ühendriigid, Kanada, Jaapan, Saksamaa, Prantsusmaa, Suurbritannia, Itaalia.
- 3) **BRICS riigid:** Brasiilia, Venemaa, India, Hiina, Lõuna-Aafrika.
- 4) **Euroopa:** Euroopa Liit, Norra, Šveits, Türgi, Island, Bosnia ja Hertsegoviina, Serbia, Montenegro, Põhja-Makedoonia, Albaania.
- 5) **European Liit:** Austria, Belgia, Taani, Soome, Prantsusmaa, Saksamaa, Kreeka, Iirimaa, Itaalia, Luksemburg, Holland, Portugal, Hispaania, Rootsi, Suurbritannia, Horvaatia, Küpros, Tšehhi, Eesti, Ungari, Läti, Leedu, Malta, Poola, Slovakkia, Sloveenia, Bulgaaria, Rumeenia.
- 6) **CIS:** Armeenia, Aserbaidžaan, Valgevene, Gruusia, Kasahstan, Kõrgõzstan, Moldoovia, Usbekistan, Venemaa, Tadžikistan, Türkmenistan, Ukraina.
- 7) **Põhja - Ameerika:** Ameerika Ühendriigid, Kanada.
- 8) **Ladina - Ameerika:** Belize, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, Mehhiko, Nicaragua, Panama, Argentiina, Boliivia, Brasiilia, Tšiili, Kolumbia, Ecuador, Guyana, Paraguay, Peruu, Suriname, Uruguay, Venezuela, Bahama, Barbados, Bermuda, Kuuba, Dominica, Dominikaani Vabariik, Grenada, Haiti, Jamaica, Curaçao, Saint-Martin, Saint Lucia, Saint Vincent ja Grenadiinid, Trinidad.
- 9) **Aasia:** Afganistan, Bangladesh, Bhutan, Brunei, Kambodža, Hong-Kong, India, Indoneesia, Jaapan, Laoa, Macau, Malaisia, Maldivid, Mongoolia, Myanmar, Nepal, Põhja-Korea, Pakistan, Filipiinid, Singapur, Lõuna-Korea, Sri Lanka, Taiwan, Tai, Vietnam.
- 10) **Austraalia:** Austraalia, Fidži Vabariik, Kiribati Vabariik, Uus-Meremaa, Paapua Uus-Guinea, Samoa (Lääne), Saalomoni Saared, Tonga, Vanuatu.
- 11) **Aafrika:** Alžeeria, Egiptus, Liibüa, Marokko, Tuneesia, Angola, Benin, Botswana, Burkina Faso, Burundi, Kamerun, Roheneemesaared, Kesk-Aafrika Vabariik, Tšaad, Komoorid, Kongo, Kongo Demokraatlik Vabariik, Elevandiluurannik, Djibouti, Eritrea, Etioopia, Gabon, Gambia, Ghana, Guinea, Ekvatoriaal-Guinea, Guinea-Bissau, Keenia, Lesotho, Libeeria, Madagaskar, Malawi, Mali, Mauritaania, Mauritius, Mosambiik, Namiibia, Niger, Nigeeria, Rwanda, Sao Tome & Principe, Senegal, Seišellid, Sierra Leone, Somaalia, Lõuna-Aafrika, Sudaan, eSwatini Kuningriik, Tansaania, Togo, Uganda, Sambia, Zimbabwe.
- 12) **Kesk-Ida:** Bahrein, Iraan, Iraak, Iisrael, Jordaania, Kuveit, Liibanon, Omaan, Katar, Saudi Araabia, Süüria, Araabia Ühendemiraadid, Jeemen.

Lisa 2. Suruõhu mahutite skeem maapõuest Huntorfis Saksamaal



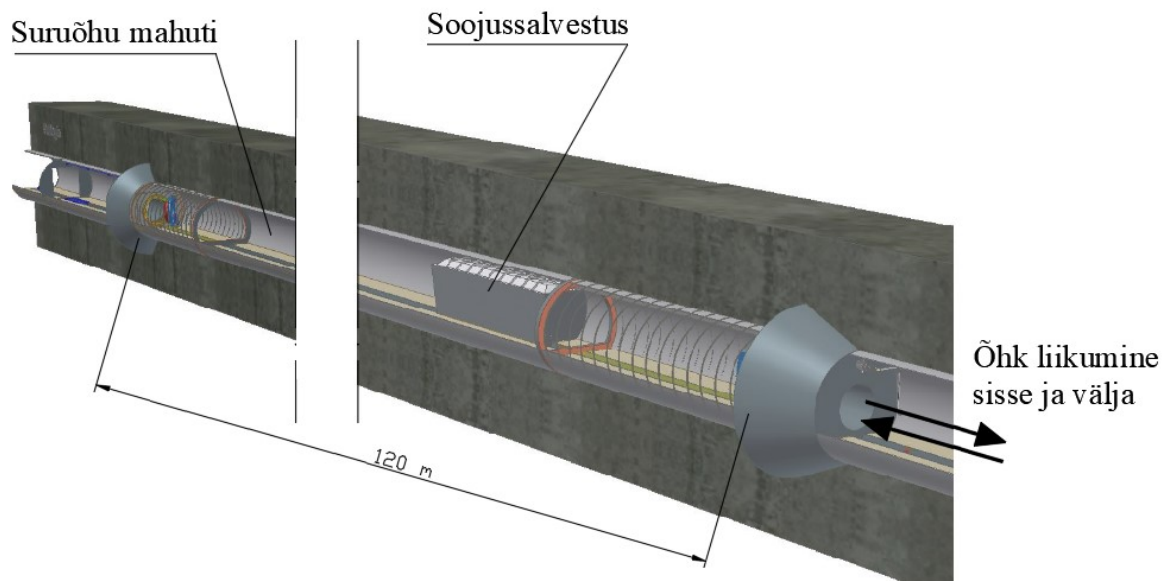
Lisa 2. Joonis 1. Suruõhk-energiasalvesti installatsiooni mahutid maapõues Huntorfis Saksamaal. Joonisel on näha mahutite sügavus, mis on ligi 650 meetrist üle 800 meetri sügavusele. [38]

Lisa 3. Suruõhu mahutite skeem maapõuest McIntoschis Ameerika Ühendriikides



Lisa 3. Joonis 1. Suruõhu mahutite skeem maapõuest McIntoschis Ameerika Ühendriikides. Soola sisse kaevandatud kambri sügavus on 459 meetrit (1506 ft). Kambri ruumala on 560000 m³ (19,8 mln ft³).[39]

Lisa 4. ALACAES suruõhu mahuti põhimõtteline lõige tunnelis



Lisa 4. Joonis 1. ALACAES suruõhu mahuti põhimõtteline lõige tunnelis. [41]

Lisa 5. Skeleton Technologies ja Maxwell Technologies Inc. superkondensaatorite spetsifikatsioonid

Lisa 5. Tabel 1. Skeleton Technologies superkondensaatorite seeria SkelCap mudelite spetsifikatsioonid. [50]

Tootja	Skeleton Technologies				
Toote mudel	SCA0500	SCA0750	SCA1200	SCA1800	SCA3200
Elektrimahtuvus	500 F	750 F	1200 F	1800 F	3200 F
Nimipinge	2,85 V	2,85 V	2,85 V	2,85 V	2,85 V
Ekvivalentne sisetakistus (ESR)	0,7 mΩ	0,6 mΩ	0,29 mΩ	0,27 mΩ	0,18 mΩ
Erivõimsus	80 kW/kg	66 kW/kg	73 kW/kg	46,4 kW/kg	34,6 kW/kg
Erienergia	5,1 W·h/kg	5,8 W·h/kg	5,4 W·h/kg	6,0 W·h/kg	6,8 W·h/kg
Kaal	0,111 kg	0,147 kg	0,253 kg	0,337 kg	0,533 kg
Võimsus	8,8 kW	9,7 kW	18,5 kW	15,6 kW	18,5 kW
Energiamahutvus	0,56 W·h	0,85 W·h	1,35 W·h	2,03 W·h	3,6 W·h

Lisa 5. Tabel 2. Maxwell Technologies Inc. kõige võimsam ja kõige suurema energiamahutusega superkondensaatori spetsifikatsioonid. [27]

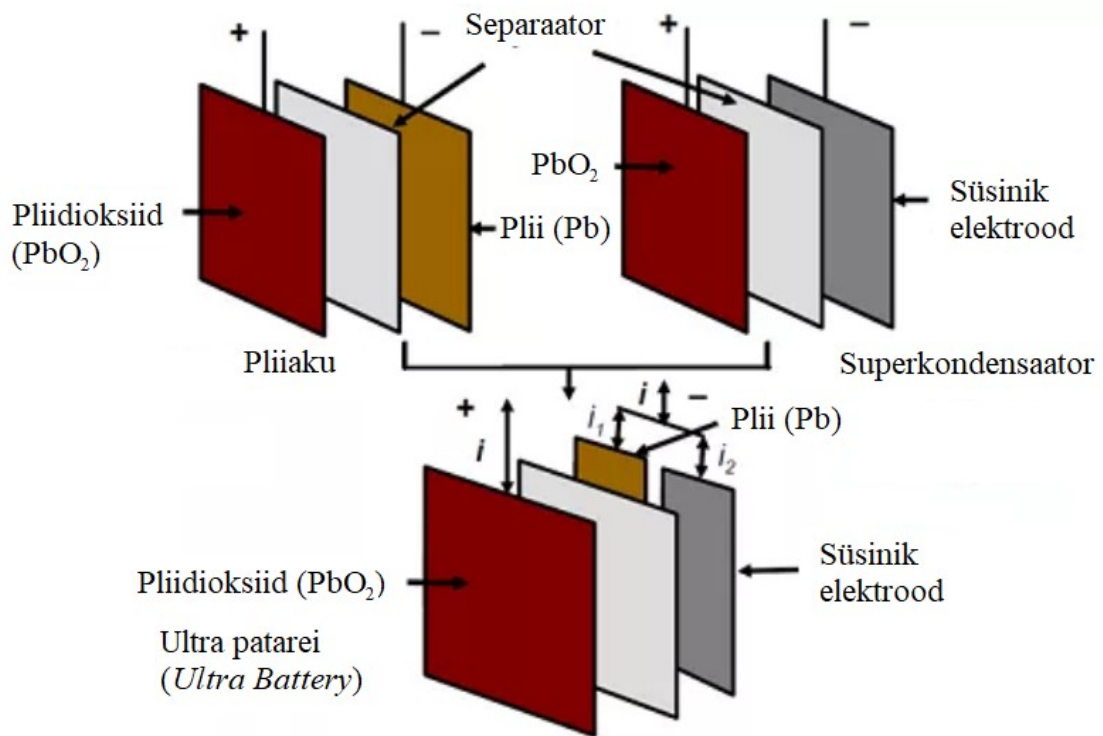
Tootja	Maxwell
Toote mudel	BCAP3400 P300 K04/05
Elektrimahtuvus	3400 F
Nimipinge	3 V
Ekvivalentne sisetakistus (ESR)	0,15 mΩ
Erivõimsus (maksimaalne)	30 kW/kg
Erienergia	8,57 W·h/kg
Kaal	0,496 kg
Võimsus	14,88 kW
Energiamahutvus	4,25 W·h

Lisa 6. Pliiaku salvestisüsteemi võimalikud nimiväärtused tänapäeval.

Lisa 6. Tabel 1. Pliiaku salvestisüsteemi võimalikud nimiväärtused. [62]

Maksimaalne võimsus	kuni 1-2 MW
Energiamahutvus	kuni 10 MW·h
Koormuse all tühjenemise kestvus	kuni 20 tundi
Töotsüklite arv tööea jooksul	500 - 3000 töötsüklit
Reaction time	~ millisekund
Life duration	5 – 15 aastat
Efficiency	75 - 85 %
Energy (power) density	25 - 35 W·h/kg

Lisa 7. Ultra patarei (*Ultra Battery*) ehitus



Lisa 7. Joonis 1. Ultra patarei (*Ultra Battery*) ehitus. [64]

Lisa 8. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Tõnu Heinmets,

(autori nimi)

sünniaeg 10.07.1991.

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö Elektrienergia salvestustehnoloogiate hetkeseis,

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja(d) on Andres Annuk,

(juhendaja(te) nimi)

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. 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 _____
(allkiri)

Tartu, _____
(kuupäev)

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)