



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

AKUPANGAD EESTI ÕIGUSRUUMIS JA
ELEKTRISÜSTEEMIS

BATTERY STORAGES IN ESTONIAN LEGISLATION AND ELECTRICAL SYSTEM

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Tatjana Puškarjova

Üliõpilaskood: 163243

Juhendaja: Elina Rebecka Rikkas

Tallinn, 2017.a.

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” 201.....

Autor:
/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees
/ nimi ja allkiri /

Lõputöö kokkuvõte

<i>Autor:</i> Tatjana Puškarjova	<i>Lõputöö liik:</i> Magistritöö
<i>Töö pealkiri:</i> Akupangad Eesti õigusruumis ja elektrisüsteemis	
<i>Kuupäev:</i> 25.05.2017	71 lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool	
<i>Teaduskond:</i> Inseneriteaduskond	
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut	
<i>Töö juhendaja(d):</i> doktorant Elina Rebecka Rikkas (Prof. Juhan Valtin)	
<i>Töö konsultant (konsultandid):</i> -	
<i>Sisu kirjeldus:</i> <p>Töös on kirjeldatud erinevaid energiasalvestusviise ja tehnoloogiaid. Toodud välja nende tehniline ja majanduslik kasu võrku integreerides. Teadusartiklitele tuginedes on tehtud analüüs ja võrreldud Eesti olukorraga. Analüüsiga on jõutud järeldusele, et hetkel akupangad ei ole veel majanduslikult elujõulised kasutamaks neid madal- ja keskpinge alajaamade tippkoormuse vähendamiseks, kuna nende eluiga on veel liiga lühike ja hinnad kõrged. Kuid see tehnoloogia ja sektor arenevad väga kiiresti ja tulevikus pakuvad erinevaid võimalusi elektrisüsteemide murekohtade lahendamiseks. Euroopa Liidu võtmeisikud on juba teinud samme selleks, et akupankade integreerimisest soodustada, kuid Eesti analüüs näitab, et seaduse poolt vajalik samm on tegemata.</p> <p>Lõputöös on vaadatud Euroopa Liidu poolt Energeetika Direktiivi muudatused ning on koostatud mudel Eesti energiasüsteemi kohta. Kõige reaalsem tulevikustsenaarium on baasstsenaarium, sest, lähtudes põhivõrgu Elering AS tootmispiisavuse aruandest, väheneb põlevkivist toodetava elektri kogus ning suureneb tuuleenergeetika osakaal. Kui Eesti seab enda eesmärgiks saada sõltumatuks Venemaast ja suurendada taastuvenergiaallikatest toodetud elektrit, siis akupankade integreerimine sel juhul aitab tasakaalustada võimsuse kõikumist ja hoida pinget stabiilsust, kui toimuvad häiringud ja kõrvalekalded.</p>	
<i>Märksõnad:</i> akupank, LEAP mudel, energiasalvestamine, ENMAK, Energeetika Direktiiv, Eesti energiasüsteem	

Summary of the Diploma Work

<i>Author:</i> Tatjana Pushkareva	<i>Kind of the work:</i> Master Thesis
<i>Title:</i> Battery storages in Estonian legislation and electrical system	
<i>Date:</i> 25.05.2017	<i>71 pages</i>
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>Faculty:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Tutor(s) of the work:</i> Doctoral Candidate Elina Rebecka Rikkas (Prof. Juhan Valtin)	
<i>Consultant(s):</i> -	
<p><i>Abstract:</i></p> <p>The purpose of this master's thesis is to provide an overview of electrical storages and their technologies. The technical and economical benefits of storages were analysed during this research. According to the results of the scientific analysis conclusions have been made about the situation in Estonia. Currently, batteries are not economically viable for decreasing the peak of middle and low voltage transformer substations, due to their cost and limited lifecycle. However, this technology is quickly improving, and in near future they could develop as an interesting alternative to solve the power system issues. The European Union (EU) has made efforts to integrate storages in the network, in Estonia there is no legislation that regulates them yet.</p> <p>In this thesis the changes of the EU Energy Efficiency Directive have been reviewed and a model has been constructed to describe the energy system of Estonia. It can be concluded that the most likely future scenario is the base scenario, since, according to Transmission System Operator Elering's report about production sufficiency, the amount of electricity produced from oil shale will decrease and wind energy production will increase. If Estonia sets a goal to become independent from the Russian electrical system and increase the electricity production from renewables, the integration of electrical storages will help to balance the fluctuation of power and keep the voltage stable in cases of disturbances and driftages.</p>	
<i>Key words:</i> battery storages, LEAP model, electricity storage, ENMAK, Energy Efficiency Directive, Estonian energy system	

Sisukord

Lõputöö ülesanne.....	6
Eessõna	8
Sissejuhatus.....	9
1. Energiasalvestid ja salvestustehnoloogiad	11
1.1. Mehaaniline energiasalvestus	11
1.1.1 Hüdroakumulatsioonijaam.....	11
1.1.2 Suruõhk – energiasalvestid	12
1.1.3 Hooratas – energiasalvestid.....	13
1.2. Elektrostaatiline ja -magnetiline energiasalvestus	14
1.2.1 Ülikondensaator – energiasalvestid	15
1.2.2 Ülijuhtivad energiasalvestid.....	15
1.3. Keemiline energiasalvestus.....	16
1.3.1 Vesinik – energiasalvestus.....	17
1.3.2 Sünteetilise gaasi salvestid.....	18
1.4. Elektrokeemiline salvestus.....	19
1.4.1 Pliiakud	20
1.4.2 Nikkel-kaadmium (NiCd) akud.....	21
1.4.3 Väävel-naatriumakud (NaS).....	22
1.4.4 Naatrium-nikkelkloriid aku (Na/NiCl ₂).....	23
1.4.5 Liitium-ioonakud (Li-Ion).....	24
1.4.6 Vanaadium – redoks akud (VR).....	26
1.4.7 Polüsulfiid-bromiidakud (PSB).....	27
1.4.8 Tsink-bromiidakud (ZnBR).....	27
2 Elektrisalvestite mõju ja kasu	29
2.1 Salvestite majanduslik kasu	29
2.2 Salvestite tehniline kasu.....	31
2.3 Akupankade mõju jaotusvõrgule	35
3. Euroopa Liidu Energeetika Direktiivi muudatused	38
4. LEAP mudel Eesti Energiasüsteemi jaoks	43
4.1 Baasstsenaarium.....	44
4.1.1 Tulemused	46
4.1.2 Järeldused	50
4.2 Tootmise stsenaarium	51
4.2.1 Tulemused	51
4.2.2 Järeldused	55
4.3 Tarbimise stsenaarium	55
4.3.1 Tulemused	57
4.3.2 Järeldused	62
4.4 Kokkuvõte.....	63
Lõputöö kokkuvõte	65
Lisa 1. Jooniste ja tabelite nimekiri.....	70

Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema:	Akupangad Eesti õigusruumis ja elektrisüsteemis
Üliõpilane:	Tatjana Puškarjova, 163243
Eriala:	Elektroenergeetika
Lõputöö liik:	Magistritöö
Lõputöö juhendaja:	Elina Rebecka Rikkas (Prof. Juhan Valtin)
Lõputöö esitamise tähtaeg:	25.05.2017

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppetooli juhataja (allkiri)

Teema põhjendus:

Taastuvenergia allikad muutuvad aina populaarsemaks, kuid elektrivõrk muutub ebastabiilsemaks. Üheks võimalikuks lahenduseks on akupankade installeerimine, et elektrivõrk oleks bilansis. Antud teema on aktuaalne ja oluline sellepärast, et iga aastaga riik seab eesmärgiks tõsta taastuvatest energiaallikatest toodetud elektrienergia osakaalu, mis võib tulevikus viia akupankade integreerimiseni ja seeläbi nende arvu suurenemiseni Eesti võrgus.

Töö eesmärk:

Töö eesmärgiks on uurida tulevikus akupankade võimalikku olemasolu Eesti õigusruumis ja elektrisüsteemis.

Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- Millised tehnilised nõuded akupankadele võiksid olla kirjeldatud Eesti seaduses?
- Kas akupankade integreerimine võrku aitab Eestis Euroopa Liidu poolt seatud eesmärkide saavutamisel?
- Kas akupankade integreerimine Eesti elektrisüsteemi on vajalik?

Lähteandmed:

Euroopa Liidu Direktiiv (selle viimased muudatuse energeetika valdkonnas), teadusartiklid, teadusraamatud.

Lõputöö konsultandid (vajadusel):

Konsultant nimi (allkiri, kuupäev)

Konsultant nimi (allkiri, kuupäev)

Eessõna

Lõputöö teema oli pakutud doktorandi Elina Rebecka Rikkase poolt. Töö koostamine ning andmete kogumine toimus põhiliselt TTÜ raamatukogus. Andmetega ja konsultatsioonidega aitas lõputöö juhendaja Elina Rebecka Rikkas. LEAP mudeli koostamisega aitasid kursuse kaaslased Roman Ivantsov ja Siim Türk.

Lõputöö koostaja soovib tänada juhendajat ja sõpru, kes aitasid lõpetajat suunata lõputöö koostamisel ning kellelt saadi abi lõputöö keelelistes küsimustes.

Tatjana Puškarjova

Akadeemia tee 7/2, Tallinn

+372 58 506 678

Sissejuhatus

Lõputöö eesmärgiks on uurida akupankade võimalikku kasutust Eesti õigusruumis ja elektrisüsteemis.

Antud teema uurimine on vajalik, kuna taastuvenergiaallikad muutuvad aina populaarsemaks ja seetõttu muutub elektrivõrk ebastabiilsemaks. Üheks võimalikuks lahenduseks on akupankade installeerimine, et elektrivõrk oleks bilansis. Antud teema on aktuaalne ja oluline sellepärast, et iga aastaga riik seab eesmärgiks tõsta taastuvenergiaallikatest toodetud elektrienergia osakaalu, mis võib tulevikus viia akupankade integreerimiseni ja seeläbi nende arvu suurendamiseni Eesti võrgus.

Selles töös antakse ülevaade olemasolevatest energiasalvestite viisidest ja salvestustehnoloogiatest. Eesti elektrivõrgule sobiks elektrokeemiline salvestusviis, teisisõnu akupatareid. Lisaks, on toodud välja akupatareide tüübid, tsüklite eluiga, kasutegur ja salvestite maksumused. Need faktorid mängivad olulist rolli akupanga valimisel ja integreerimisel võrku. Samuti on kirjeldatud salvestite rakendused ja nende tööpõhimõte. Töös on pööratud tähelepanu ka graafilisele poole, mis võimaldab lugejal paremini mõista salvestusviiside kasutusala.

Nii tootja kui tarbija puhul, akupatareide integreerimine peaks tooma mõlemale osapoolle kasumit. Eestis on akupankade teema tõusnud viimaste aastate jooksul aktuaalseks, kuid veel neid võrgus laiaulatuslikult ei kasutata.

Tuginedes teaduslikele artiklitele töös on kirjeldatud salvestite potentsiaalne tehniline ja majanduslik kasu neid võrku integreerides. Energiasalvestite detailsel analüüsil, sealhulgas turuanalüüs, tõstakse esile mitmeid positiivseid aspekte. Peatükis, kus on pööratud tähelepanu salvestite tehnilisele poole, on toodud välja salvestite tähtsamad omadused ja eelised. Seadmete võime salvestada, muuta võrku tõhusamaks ja töökindlamaks, on oluline eelis tuleviku elektrivõrgule. Elektrisalvesteid kasutatakse mitmete elektrivõrguga seotud nõuete tagamiseks ja probleemide lahendamiseks, kuid töös on vaatluse all ainult akupangad.

Järgmise peatüki eesmärk on analüüsida akupankade mõju ja vajadust Eesti jaotusvõrgule. Aluseks on võetud Comillas Pontifical Ülikoolis (Hispaania) tehtud analüüs ja on võrreldud Eesti olukorraga. Lisaks mainitule, töös on ka ülevaade Eesti seadusandlusest ja akupankade vajadusest elektrivõrgus. Töös on kajastatud ka oma ala eksperdi arvamus, kelleks on jaotusvõrgu Elektrilevi OÜ esindaja, hajaenergeetika juht, Ott Antsmaa.

Samas peatükis on kajastatud ka Euroopa Liidu Komitee poolt kehtivad aasta lõpust Energeetika Direktiivi muudatused, nende põhipunkte. Samuti, arutletakse Euroopa Liidu energeetika valdkonna tuleviku eesmärkide ja arenemissuundade üle. Tuuakse välja muudatuste positiivsed küljed ja potentsiaalne majanduslik kasum, kus priorideediks on seejuures tarbijate rahulolu. Samas peatükis on ülevaade ka Eesti arengukava ENMAK eesmärkidest.

Töö viimases peatükis on koostatud LEAP mudeli: baasstsenaarium Eesti energiasüsteemi kohta, mille põhjal koostatakse tarbimise ja tootmise stsenaariumid. Stsenaariumide loomise aluseks on võetud andmeid Eesti Statistikaandmebaasist ajavahemikus 1999.a kuni 2015.a. Samuti on lisatud erinevaid elektri ning põlevkivi tootmise parameetreid nagu elektriline kasutegur, installeeritud võimsus ja tootmistehnoloogia tüüp. Stsenaariumides on arvestatud sisse Energeetika Direktiivi muudatused, ENMAK2030 arengukava ja põhivõrgu Elering AS tootmispiisavuse aruanne. Stsenaariumite tulemusena vaadeldi Euroopa Liidu ja Eesti eesmärkide täitumist ning akupankade vajadust tulevikus. Arvamust on küsitud Eesti põhivõrgu Eleringi AS esindajalt, strateegiajuhi Kalle Kukke käest.

1. Energiasalvestid ja salvestustehnoloogiad

Energiasalvestid mängivad võtmerolli madala süsinikusisaldusega elektrisüsteemi arendamiseks. Tänu energia salvestamise tehnoloogiale muutub võrk paindlikumaks ja tasakaalukamaks. Laadustamise tehnoloogiad omavad mitmeid eelisi, nende hulgas pingestabiilsus, reaktiivvõimsuse tagamine ja süsteemi stabiilsuse suurendamine tervikuna.

Tänapäeval (2017) energiasalvestid moodustavad 5% kogu installeeritud võimsusest Euroopa Liidus (edaspidi *EL*). Enamus neist on mägi-aladel asuvad pumphüdroelektrijaamad (edaspidi *PHAJ*) (Alpid, Püreneed, Šoti mägismaa, Karpaadid). Muude energiasalvestuste viisid ja tehnoloogiad on minimaalsel kasutusel.

Elektrienergia salvestid omavad olulist rolli energiajuhtimises energia kasutuse optimeerimiseks ning elektri tarbimise ja tootmise juhtimiseks. Tootmise ja tarbimise aja juhtimine ja tipukoormuste korvamine on tüüpilised rakendused energia juhtimises.

Soojusenergia salvestite süsteemid võivad aidata energia tasakaalu hoidmist, vähendada tippnõudlust, energiatarbimist, CO₂ heitkoguseid ja kulutusi, ning tõsta energiasüsteemi tõhusust. [1].

Järgmises alamtükkis on vaatluse all elektrienergia erinevad salvestamisviisid andmaks parema ettekujutuse, miks enamus kirjeldatud salvestitest on sobivamad integreerimiseks Eestis elektrivõrku.

1.1. Mehaaniline energiasalvestus

Mehaanilise energiasalvestusviisi hulka kuuluvad: hüdroakumulatsioonijaam (*PHAJ*), suruõhk- (edaspidi *SÕES*) ja hooratas-energiasalvestid. Energiasalvestite valik sõltub võrgu vajadusest. Kuid just ööpäevaseks reguleerimiseks sobivad kõige paremini eelnimetatud viisid. [2]

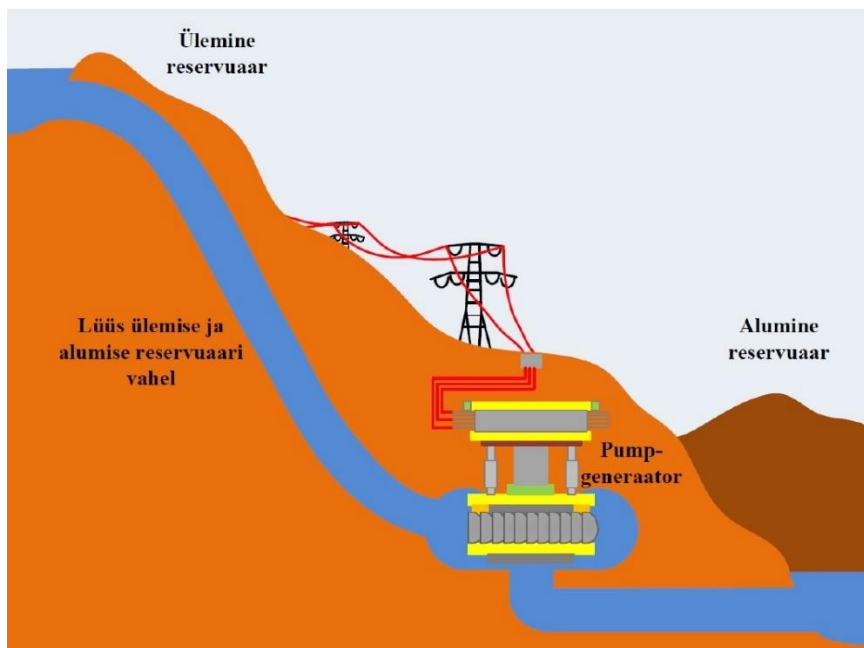
1.1.1 Hüdroakumulatsioonijaam

Hüdroakumulatsioonijaam või pumphüdroelektrijaam (ingl. kl. *Pumped Hydroelectric Energy Storage, PHES*) koos konventsionaalse hüdroelektrijaamaga on kõige enam arenenud ja tänapäeval (2017) kasutuses olev energiasalvestus ja/või tootmise juhtimise viis. Ühtlasi on PHAJ tänapäeval kõige laialdasemalt kasutusel olev suuremahuline energiasalvestusviis.

PHAJ on võimalik kasutada tiputootmiseseadmetena ning elektrisüsteemi kustunust olekust taaskäivitamiseks. PHAJ kogukasutegur (salvestamine ja tühjendamine) jääb vahemikku 70-80%.

Tööpõhimõte on lihtne: energiat salvestatakse potentsiaalse energiana, pumbates selleks vett maapinnast kõrgemal asuvasse reservuaari. Energia taaskasutamiseks tuleb ülemisse reservuaari pumbatud vesi lasta läbi hüdroturbiinide alumisse veehoidlasse tagasi.

Ühikvõimsuse maksumus jääb vahemikku 462 kuni 1538 €/kW, sõltudes paljudest asjaoludest nagu suurus, asukoht ja liitumispunkt elektrivõrguga. [3]



Joonis 1.1 Hüdroakumulatsioonijaam [3]

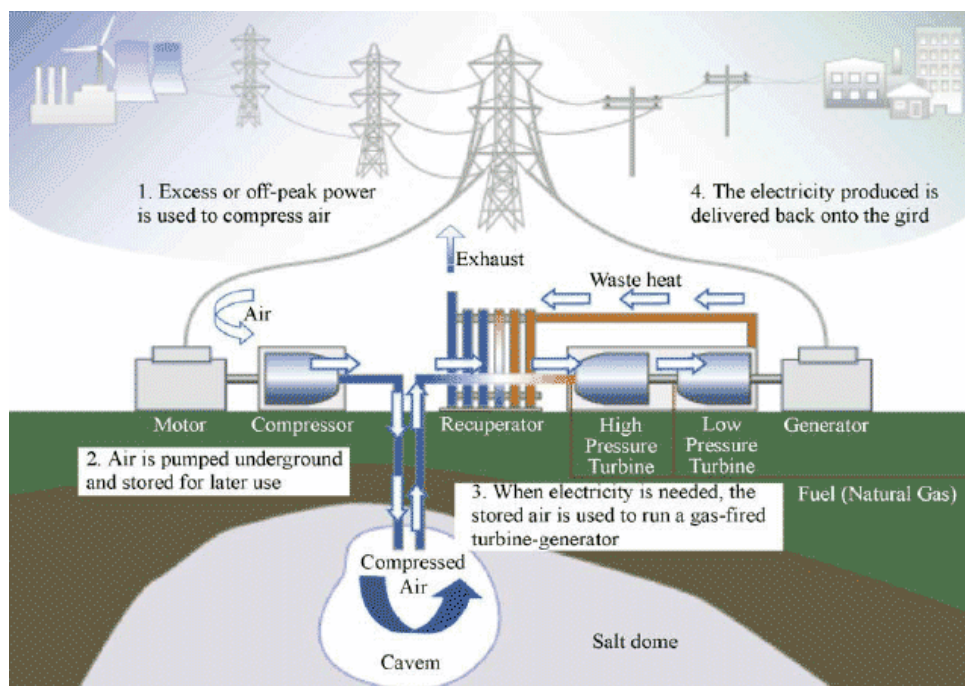
1.1.2 Suruõhk – energiasalvestid

Suruõhkenergiasalvestid (ingl. kl. *Compressed Air Energy Storage, CAES*) on juba kasutusel olnud alates 1970. aastatest. Energiasalvestus toimub õhu mehaanilisel kokkusurumisel kompressoritega, mida suunatakse looduslikku gaasitihedasse maa-alusesse kambris (nt vanad soolakambrid, poorsed kivimid, jne.). Õhu vabastamisel rõhu alt juhitakse see läbi generaatorjamite, mille kaudu suunatakse elekter tagasi võrku. Juhul, kui õhu kokkusurumisel tekkinud soojus salvestatakse, siis mehaaniline protsess oleks teoreetiliselt 100% efektiivne. Tegelikuses on aga kogu tsükli kasutegur, muundamisel tekkivate kadude tõttu, suhteliselt madal, ehk vahemikkus 55-89%.

SÕES on teine ainuke suuremahuline energiasalvesti lisaks PHAJ-le. SÕES-l on suhteliselt kiire reageerimisaeg: seisakust 100% võimsuse saavutamiseks kulub vähem kui kümme minutit.

SÕES-e saab kasutada elektrivõrgule süsteemiteenuste pakkumiseks, näiteks sageduse reguleerimiseks, koormuse järgimiseks ning pinge reguleerimiseks. Seetõttu on SÕES-id muutunud eriti atraktiivseks energiasalvestusmeetodiks tuuleparkidega integreerimiseks. Tänapäevaks on käivitatud mitmeid uuringuid, mille eesmärgiks on välja selgitada SÕES kasutamise perspektiivikus silumaks tuuleparkide muutlikku tootmist.

SÕES maksumus jääb vahemikku 327-346 €/kW. Samas, tuleb arvestada ka hoolduskuludega, mis jäävad orienteeruvalt 2,3-7,7 €/kW vahele. Kulud sõltuvad põhiliselt õhku salvestava reservuaari ehitusest. [3]



Joonis 1.2 SÕES tööpõhimõte [1]¹

1.1.3 Hooratas – energiasalvestid

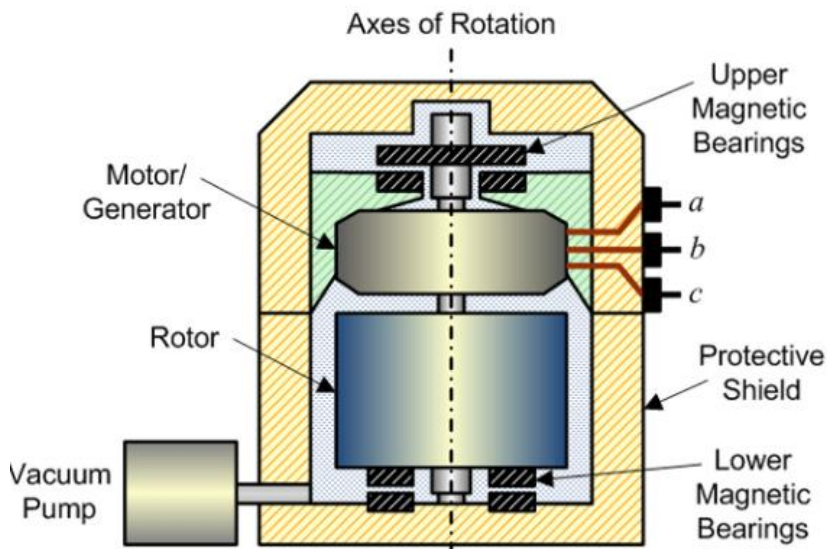
Viimaste aastate arengud jõuelektroonika, kergekaaluliste, kuid tugevate, komposiitmaterjalide ning magnetlaagrite valdkonnas on hooratasenergiasalvestid (ingl. kl. *Flywheel*

¹ Joonis on leitav vaid ingliskeelse selgitusega.

Energy Storage, FES). Need on muutunud üsnagi perspektiivikaks tehnoloogiaks, mida uuritakse ning arendatakse laialdaselt. Hooratasenergiasalvesti kujutab endast süsteemi, mis koosneb kolmest osast: hooratas, mootor/generaator ja muundur.

Elektrit salvestatakse hooratta pöörlevas massis kineetilise energiana (mootorrežiimis) ning muundatakse mehaaniliselt seejärel tagasi elektriks (generaatorrežiimis). Kaasaegsed kiirekäigulised hoorattad erinevad oma eelkäijatest selle poolest, et nad on kergemad ning pöörlemiskiirus on palju suurem. Eeldatav eluiga on orienteeruvalt 20 aastat või kümned tuhanded töötükliid. Kuna salvestusseadmena kasutatakse mehaanilist keha, siis on seadet võimalik korduvalt täis ja tühjaks laadida, ilma et selle omadused halveneksid.

Tänapäeval (2017) jäävad aeglasekäiguliste hooratasenergiasalvestite maksumus vahemikku 154-231 €/kW ning kiirekäiguliste hooratasenergiasalvestitel 19230 €/kW juurde. [3]



Joonis 1.3 Hooratas energiasalvesti tööpõhimõte [1]²

1.2. Elektrostaatiline ja -magnetiline energiasalvestus

Elektrostaatilise ja -magnetilise energiasalvestusviisi hulka kuuluvad: ülikondensaator-energiasalvestid ja ülijuhtivad energiasalvestid.

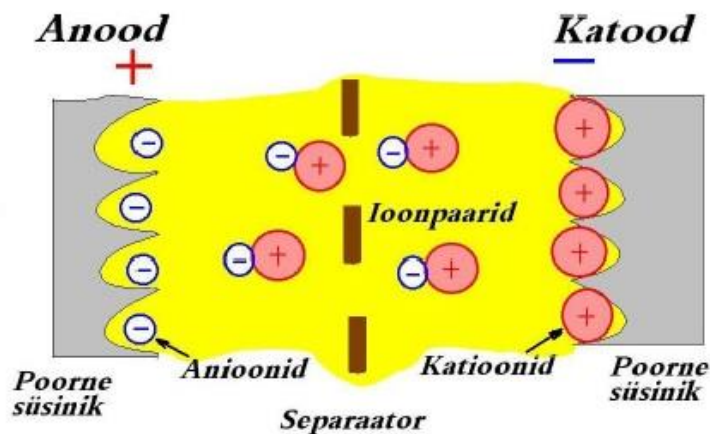
² Joonis on leitav vaid ingliskeelse selgitusega.

1.2.1 Ülikondensaator – energiasalvestid

Kaksikkihtkondensaatorid (ülikondensaatorid, superkondensaatorid, ingl. kl. *Electrical Double-Layer Capacitors, EDLC*³) on valmistatud süsinikust, millel on ülisuur aktiivpind ja millega on võimalik saavutada mahtuvusi, mis ulatuvad faraditest kuni tuhandete faraditeni. Ülikondensaatoreid iseloomustavad kõrged laadimis- ja tühjendamisvoolud, madal hooldusvajadus ning pikk eluiga, mis küündib ligikaudu 1×10^6 tsüklini. Samal ajal on kondensaatoril väikesed lekkevoolud, mis võimaldab energiat salvestada pika aja vältel, mille tagajärjel kasutegur ületab 95%.

Ülikondensaatoreid kasutatakse eelkõige rakendustes, kus on tarvis suuri võimsusi ainult lühikeste ajaperioodide (kuni üks minut), pärast mida võtavad edasise töö üle juba konventsionaalsed seadmed.

Maksumus jääb vahemikku 9969-21538 €/kWh, mistõttu ei ole ülikondensaatorite kasutamine suurtes rakendustes majanduslikult otstarbekas. [3]



Joonis 1.4 Ülikondensaatori energiasalvesti tööpõhimõte [3]⁴

1.2.2 Ülijuhtivad energiasalvestid

Ülijuhtivad energiasalvestid (ingl. kl. *Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES*) koosnevad ülijuhtivast mähisest (poolist), toitesüsteemist ning jahutist ja vaakumseadmest. Vaakumseadmete eesmärgiks on hoida mähist ülimadalatel temperatuuridel.

³ Enim levinud lühend inglise keeles on DLC.

⁴ Joonis on leitav vaid ingliskeelse selgitusega.

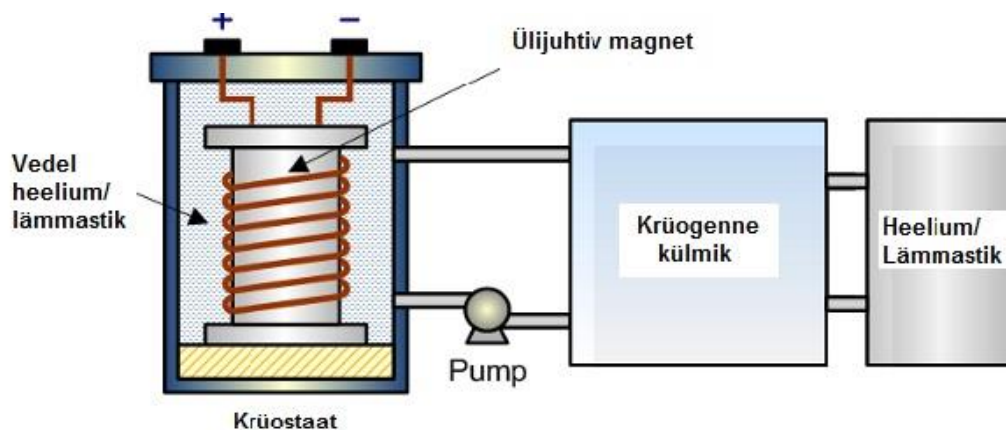
Energia salvestamine toimub magnetväljas, mille tekitab alalisvool pooli mähises. Ülijuhtiva oleku saavutamiseks tuleb juhti hoida seevastu väga madalatel temperatuuridel.

Ülijuhid võib tinglikult jagada kahte kategooriasse: madalatemperatuurilised ülijuhid, mida tuleb jahutada 0 Kelvini kuni 7,2 Kelvini (edaspidi K), ja kõrgetemperatuurilised ülijuhid, mida tuleb hoida vahemikus 10 K ja 150 K. (teisisõnu, $-263,15\text{ °C}$ ja $-123,15\text{ °C}$)

Ülijuhtivate energiasalvestite üldine kasutegur jääb 90% ja 99% vahemikku. Ülijuhtivate salvestite võimsus võib ulatuda kuni 2 MW-ni, kuid peamiseks eeliseks on selle täis- ja tühjaks-laadimiste tsükli kiirused. Seadmed võivad töötada tuhandeid laadimis-tühjenemistsükleid, ilma et mähis degradeeruks selle käigus. Viimane faktor võimaldab neid seadmeid kasutada enam kui 20 aastat vältel.

Tänu suurele ühikvõimsusele ja ülikiirele tühjenemisajale, kasutatakse neid eelkõige tööstuslikult energiakvaliteedi tagamiseks. Need salvestid ei ole väga perspektiivikad pikemaajalisteks tasandamisrakendusteks nagu tippude tasandamine, taastuvenergiaga kombineerimiseks ning koormuste ja võimsuste nihutamisteks, kuna jahutussüsteem on liiga suure energiatarbega.

Maksumus jääb vahemikku 230-392 €/kW. Mahukate teadusuuringute ja materjaliarenduste tõttu eeldatakse, et ülijuhtivate energiasalvestite hinnad langevad tulevikus kuni 30%, mis muudab nende kasutuselevõttu tõenäolisemaks. [3]



Joonis 1.5 Ülijuhtiva energiasalvesti lihtsustatud ehitus [3]

1.3 Keemiline energiasalvestus

Keemilise energiasalvestusviiside hulka kuuluvad: vesinik-energiasalvestid ja sünteetilise gaasi salvestid.

1.3.1 Vesinik – energiasalvestus

Vesinikenergiasalvesti (ingl. kl. *Hydrogen Energy Storage, HES*) on üks hilisemaid tehnoloogiaid energiasalvestite seas, kuid samas on see ka üks kõige perspektiivikamaid ja paljulubavamaid tehnoloogiaid. Energiasalvestina on vesinikusüsteemid üheks põhiliseks sillaks kolme suurima energiasüsteemi sektori vahel: elektri-, soojus- ja transpordisektor. See on ainuke energiasalvestussüsteem, mis võimaldab nii laialdast ühildamist erinevate sektorite vahel. Seetõttu on see muutumas äärmiselt perspektiivikaks tehnoloogiaks, mida on võimalik integreerida laiaulatuslikult arendatavate taastuvenergiaga seotud projektidega.

Vesinikku iseloomustab väga kõrge kütteväärtus: 142 MJ/kg, mis on ca 3 korda kõrgem kui bensiinil. Seetõttu on vesinikku kui energiakandjat põhjalikult uuritud ja arvatakse tulevikus olevat tõsiseks konkurendiks fossiilsetele kütustele. Kirjanduses viidatakse viiele põhilisele meetodile, kuidas vesinikku salvestada: rõhu all kokkusurutult, jahutatult veeldatud olekus, süsinikus füüsilise adsorptsiooni teel, metallhüdriidides ning teistes keemilistes ühendites. Metallhüdriidid ja keemilised ühendid on võimelised salvestama sama mahu juures rohkem vesinikku, kui teised meetodid, kuid tänu kõrgetele protsessitemperatuuridele, mis tekivad salvestamisel ja tühjaks laadimisel, ei ole see väga perspektiivikas energiasüsteemides rakendamiseks. Kasutamaks vesinikku energiasüsteemides, on kõige perspektiivikam salvestusmeetod veeldatud ja rõhu all olev vesinik. Samas, tuleb arvestada sellega, et vedela vesiniku saamiseks tuleb kasutada kallist tehnoloogiat ja seda kõike madalate temperatuuride juures.

Vesinik on oma mitmekülgse tõttu tõsine pretendent saamaks tulevikus põhiliseks energiasalvestuse tehnoloogiaks. Kohe, kui vesiniku tootmine muutub tõhusaks, on seda võimalikult kasutada praktiliselt igaks otstarbeks. Tänapäeval on vesiniku tootmiseks kõige perspektiivikam valik kombineerida elektrolüüsimine taastuvenergiaga.

Elektritootmiskulud elektrolüüsi teel varieeruvad väga laiades piirides, kõige madalamateks hinnanguliselt jäävad 230 €/kW ringi, kuid kõige kallimad 846 €/kW juurde. *ITM Power* (Saksamaa ettevõtte, mis spetsialiseerub integreeritud vesinikusüsteemide tootmisel Suurbritannias) toodab elektrolüüsereid, mis koostöös taastuvenergiaga on nende väitel võimelised tootma vesinikku investeeringukuluga 126 €/kW. Elektrolüüserite hoolduskulud moodustavad 3% kapitalikulust. Kütuseelementide investeeringukulud jäävad vahemikku 500 €/kW ja 8 000 €/kW. Tehnoloogia arengu ja masstootmisesse jõudmisel on oodata hindade langemist. [3]

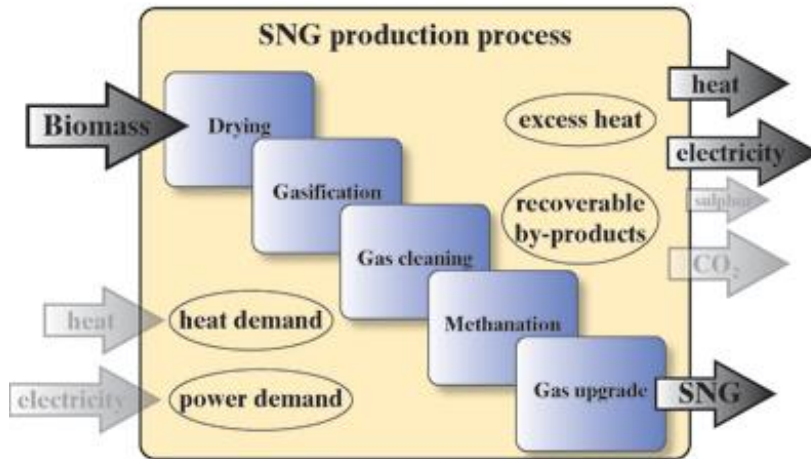


Joonis 1.6 Vesinik – energiasalvesti tööpõhimõte [1]

1.3.2 Sünteetilise gaasi salvestid

Sarnaselt vesinikuga saab ka metaani sünteesimisel elektrit keemilisel kujul salvestada. Peamiseks eeliseks sedalaadi sünteetilise gaasi süsteemidel on olmasoleva gaasivõrgu taristu kasutamine. Puhast vesinikku saab gaasivõrku lisada vaid teatud tingimustel, st kontsentratsioon ei tohi ületada ettenähtud kütteväärtust, et tagada ohutus jmt olulised tingimused. Sünteesitud gaasi puhul kirjeldatud probleemi ei esine. Peamine puudus sünteesitud gaasi süsteemide puhul on suured kogukaod, mis tulenevad elektrolüüsimisest, metaani sünteesist, transpordist ja gaasi kasutamisest elektritootmiseks. Sünteesitud gaasi süsteemide kasutegur on enamasti alla 35%, mis on isegi madalam kui vesinikku otse kasutades. Võrdluseks, vesiniku tootmise kasutegur jääb vahemikku 70-80%, kütuseelementidega vesinikust elektritootmise kasutegur on ligi 50% ning terviktsükli kasutegur on vesiniku puhul 40-45%. [3]

Salvestite kogumaksumus on 1570€/kW kohta. [1]



Joonis 1.7 Sünteetilise gaasi salvesti tootmise protsessi tööpõhimõte [1]⁵

1.4 Elektrokeemiline salvestus

Akupatarei energiasalvesti saab jagada alamrühma:

- pliiakud (Lead-Acid battery, *LA*)
- nikkel- kaadmiumakud (*NiCd*)
- väävel-naatriumakud (*NaS*)
- liitium-ioonakud (*Li-Ion*)
- vanaadium-redoks (*VR*)
- polüsulfiid bromiid akud
- tsink-bromiid akud

Antud töös on vaatluse all just selline salvestusviis, kuna Eestis seda tüüpi salvestid on juba kasutusel. Vastavalt allikale [4] Eesti *off-grid* lahendustes kasutatakse enamasti pliiakud (geelakud), selle kõrge kasuteguri ja madala hinna eelise tõttu. Portali kaudu on kättesaadav 28 Eesti autonoomse lahenduse informatsioon: tarbimine, tootmine, aku temperatuur, laadimis-tühjenemistase, jms. Autori arvates Li-Ioon akud hakkavad tulevikus konkureerima pliiakudega nende eluea eelise tõttu. Võrdluseks, Tabelis 1 on toodud välja akupatareide tehnilised omadused: nende eluiga ja kasutegur.

⁵ Joonis on leitav vaid ingliskeelse selgitusega.

Tabel 1.1 Akupatareide tehnilised omadused

Akupatarei tüüp	Tsükliite eluiga	Kasutegur
Pliiakud	250-1000	75-85%
NiCd	1500-3000	60-70%
NaS	2500-4500	89-89%
Li-Ioon	500-10000	95-98%
Na-NiCl ₂	4500	85-95%
VR	10000	85%
PSB	2000	75%
ZnBr	2000	75-80%

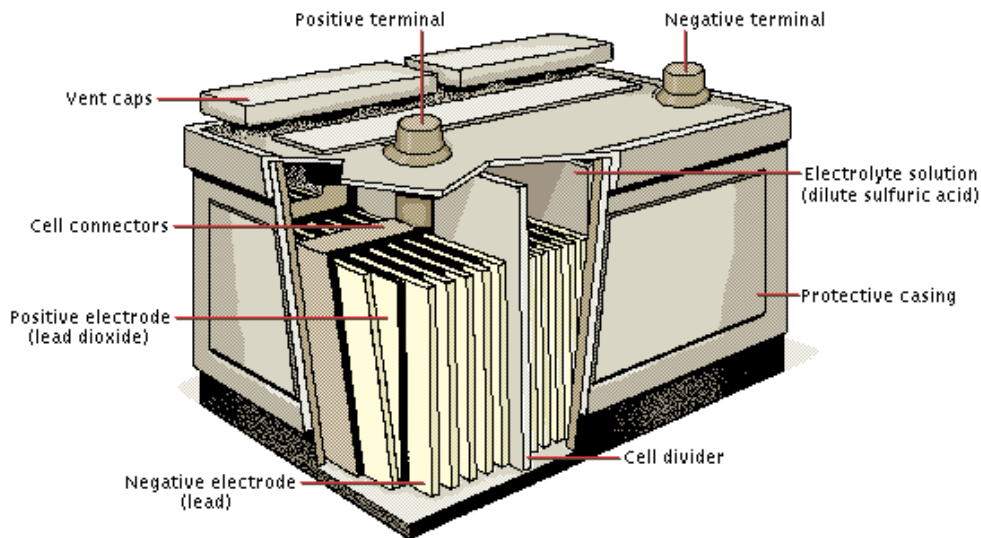
1.4.1 Pliiakud

Kõige populaarsem ning tänapäeval (2017) kõige vanemat tüüpi ja enim kasutust leidnud energiasalvesti. Arendustöö on käinud 140 aastat ning praeguseks on pliiakud muutunud suhteliselt odavaks, pika elueaga, kiire reageerimisajaga ja madala isetühjenemismääruga seadmeteks. Neid akusid on võimalik kasutada nii lühiajalistes kui ka pikemaajalistes protsesides, mis võivad kesta üle 8 tunni. Aku klemmid valmistatakse pliiist, pluss elektroodid pliioksiidist ja miinuselektroodid poorsest pliiist, elektrolyüdina kasutatakse lahjendatud väävelhapet H₂SO₄. Pliiakud on võimelised reageerima ja saavutama täisvõimsust millisekundite jooksul. Keskmise aku kogukasutegur jääb vahemikku 75-85% ning elueaks võib lugeda 5 aastat või 250-1000 laadimis-tühjenemistsükliit.

Pliiakud on leidnud rakendust:

1. Sisepõlemismootoriga autode käivitamiseks vajaliku elektri salvestamine ja starteri abil auto käivitamine (lühiajalisel nõuavad suuremaid võimsusi).
2. Suure tühjenemissügavusega rakendustes või katkematu toiteallikana ja tagavaratoiteallikana seadmetes, mis vajavad pikaaja (kuni mitu tundi) jooksul väikest, kuid stabiilset võimsust.

Salvestite maksumused kuuluvad vahemikku 154-446 €/kW. Pliiakudel on sarnased omadused nagu hooratastelgi, kuid maksavad umbes 33% vähem. [3]



Joonis 1.8 Pliiaku tööpõhimõte [1]⁶

1.4.2 Nikkel-kaadmium (NiCd) akud

Nikkel-kaadmium (*NiCd*) akud olid kuni täiuslikumate tehnoloogiate ilmumiseni põhilised suurte impulssvõimsuste korral kasutatavad akud tänu suuremale erivõimsusele ja erienergiale võrreldes pliiakudega. Nende puuduseks on nn mälu efekt, mis nõuab täpselt laadimise ajastatust: täie mahutavuse saavutamiseks tuleb nad eelnevalt täielikult tühjendada ja seejärel laadida väikese, kuni 10% minimamahutavusele vastava püsivooluga, st nende laadimisvõimsus ja sõidukite puhul ka rekuperatiivenergia vastuvõtuvõime on piiratud. Suure maksumuse ja kaadmiumi mürgisuse tõttu eelistatakse neile viimasel ajal metallhüriid ja liitium-ioonakusid. NiCd aku koosneb positiivsest elektrodist, mis koosneb nikkeloksiid-hüdroksiidist ja negatiivsest elektrodist, mis koosneb metallilisest kaadmiumist. NiCd akude kogukasutegur jääb üldjuhul tavatingimustel vahemikku 60-70%, kuid madalat kasutegurit kompenseerib suhteliselt pikk eluiga (10-15 aastat). „Taskutüüpi“ elektrodidega NiCd akudel on elueaks 1000 laadimis-tühjenemistsüklit ja pulbrist valmistatud elektrodidega akudel kuni 3500 laadimis-tühjenemistsüklit. Sarnaselt pliiakudega on ka NiCd akud võimelised saavutama täisvõimsust millisekundite vältel.

⁶ Joonis on leitav vaid ingliskeelse selgitusega.

Suletud NiCd akud on tavaliselt kasutusel elektroonikaseadmetes, nagu nt kaugjuhtimispuldid, kus on oluliselt väike kaal, kompaktsus ja korduvkasutatavus. Ventileeritud NiCd akud leiavad seevastu kasutust lennuki- ja diiselmootorite starterite toiteallikana, kus on oluline suur energiatihedus massi- ja ruumalaühiku kohta. Viimastel aastatel on hakkanud NiCd akusid üha rohkem kasutama päikseenergia salvestamiseks, kuna nad on vastupidavad kõrgetele temperatuuridele.

NiCd akud on üldiselt kallimad kui pliiakud ja salvestite maksumus jääb 460€/kW juurde. [3]



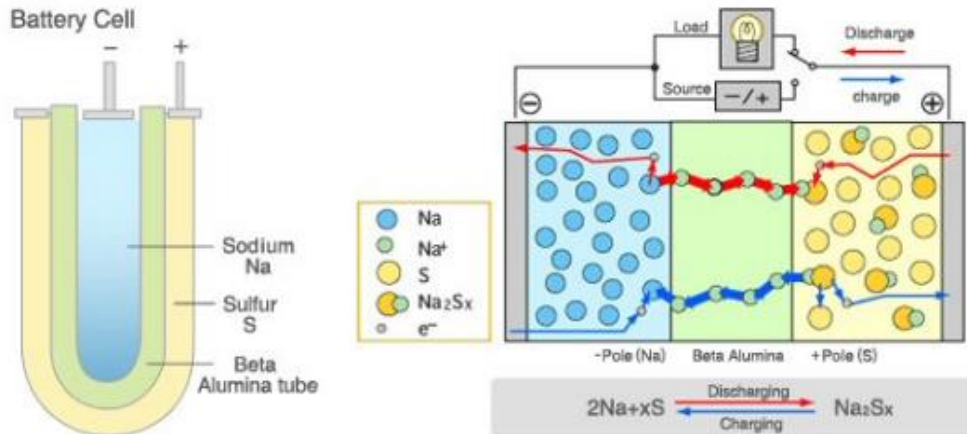
Joonis 1.9 Nikkel-kaadmiumaku tööpõhimõte [1]

1.4.3 Väävel-naatriumakud (NaS)

Väävel-naatriumakude (*NaS*) energiatihedus on kolm korda suurem kui pliiakudel, samuti on neil viis korda pikem eluiga ning väiksem hooldusvajadus. Akud koosnevad silindrilistest elektrokemilistest elementidest, mille negatiivne elektrood koosneb veeldatud naatriumist ja positiivne elektrood veeldatud väävlis. Elektrolüüdina on kasutusel tahke B-alumiiniumoksiid. Tühjenemise käigus liiguvad naatriumi ioonid läbi elektrolüüdi positiivsesse elektroodi, kus nad reageerivad väävliga ning moodustub polüväävel-naatrium. Selleks, et väävel ja naatrium püsiks vedelas olekus ja elektrolüüt oleks piisavalt juhtiv, tuleb akut hoida isoleeritud kestad üle 270°C. Tavaliselt hoitakse akus temperatuuri vahemikus 320-340 °C. Tüüpiline NaS-moodul on võimsusega 50kW ja energiamahutavusega 360kWh või 430kWh. Keskmise täis-tühjaks laadimise tsükkel on kasuteguriga 86-89%.

NaS akud leidsid rakendust elektrivõrkudes ja on väga perspektiivikad energia kvaliteedi tagamiseks ning koormuste juhtimiseks.

Salvestite maksumus on alates 600€. [3]



Joonis 1.10 Väävel-naatriumaku tööõhimõte [1]⁷

1.4.4 Naatrium-nikkelkloriid aku (Na/NiCl₂)

NaNiCl₂ aku on energia salvestussüsteem, mis laeb/tühjeneb elektrilise reaktsiooni toimel positiivse elektroodi, mis koosneb enamasti niklist ja naatriumkloorist, ning negatiivse elektroodi, milleks on enamasti naatrium, vahel. Elektroodid on omavahel eraldatud beeta-alumiiniumoksiidist seinaga, mis juhib naatriumioone ning on isolaator elektronidele. Beeta-alumiiniumoksiid käitub elektrolüüdina ning võimaldab juhtida naatriumioone anoodi ja katoodi rakkude vahel. Patarei temperatuuri hoitakse 270-350 °C vahel, mis hoiab elektroodid vedelas olekus. Iseseisvad küttekehad on osa patarei süsteemist. Akude töötüklite arv ulatub 4500 täis-tühjaks laadimistsüklini, mis aastatesse arvatuna võib ulatuda 15 aastani.

NaNiCl₂ tehnoloogia on tulnud elektriautode turule viimase kümnendi jooksul ning algselt kasutati enamasti seda tehnoloogiat ühistranspordi sektoris. Praeguseks on tehnoloogia kasutusala laienenud statsionaarseteks akudeks, raudtee akudeks, elektriautodeks ja on/off-grid energialahenduste salvestussüsteemideks. Ühe patarei suurus ulatub 4 kWh kuni 25 kWh- ni, mis sobivad paljudele akudele vastavalt nende mahtuvuse vajalikkusest, mõne kWh kuni mitmete MWh seadmetele. Tänu keraamilisele elektrolüüdile puudub patareil

⁷ Joonis on leitav vaid ingliskeelse selgitusega.

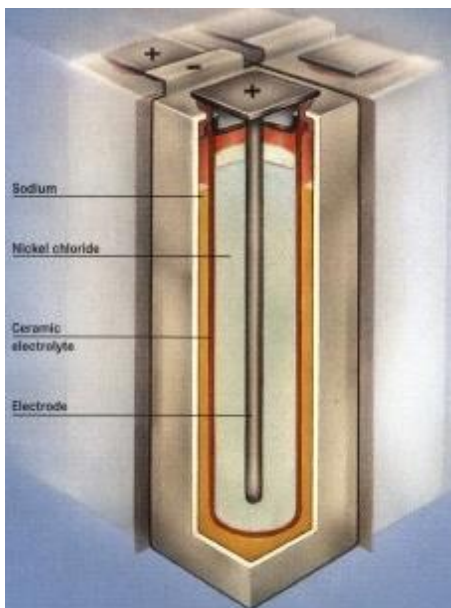
isetühjenemisvõimalus. Olenevalt kasutusest on soojuskadu tasakaalus seadme elektrilise kaoga, mis muutub soojuseks. Üldine kasutegur jääb 80-95% vahele.

Antud tehnoloogia, mida toodeti algul Euroopas ja pärast Ameerikas, võib lugeda alternatiiviks NaS patareile, mida toodetakse ainult Jaapanis. Algselt kasutati tehnoloogiat autode seadmetena, kuid praeguseks on kasutusala laienenud erinevatesse valdkondadesse nagu on/off-grid ja taastuvenergia sektor ning UPS (katkematu elektritoite allikas) seadmetena andmete serveriparkides jne.

Tänu mastaapsusele ja paindlikusele monteerida kokku erinevad seadmeid ja salvestussüsteeme, NaNiCl_2 patareisid rakendatakse paljudes erinevates valdkondades:

- elamu- ja kommertshoonetes – UPS süsteemidena, tippkoormuste korvamine lokaalselt, et vähem tarbida võrgust tulevat elektrit;
- jaotusvõrkudes – tarkvõrgu haldamise toetuseks, tipukoormuste katmiseks;
- taastuvenergia süsteemide optimeerimiseks ja sujuvamaks võrku ühendamiseks;
- ülekandevõrkudes võrgu sageduse hoidmiseks;
- on/off-grid lahendustes. [5]

Salvesti kogumaksumus on 3376 €/kW kohta. [1]



Joonis 1.11 Naatrium-nikkelkloriid aku tööpõhimõte [1]

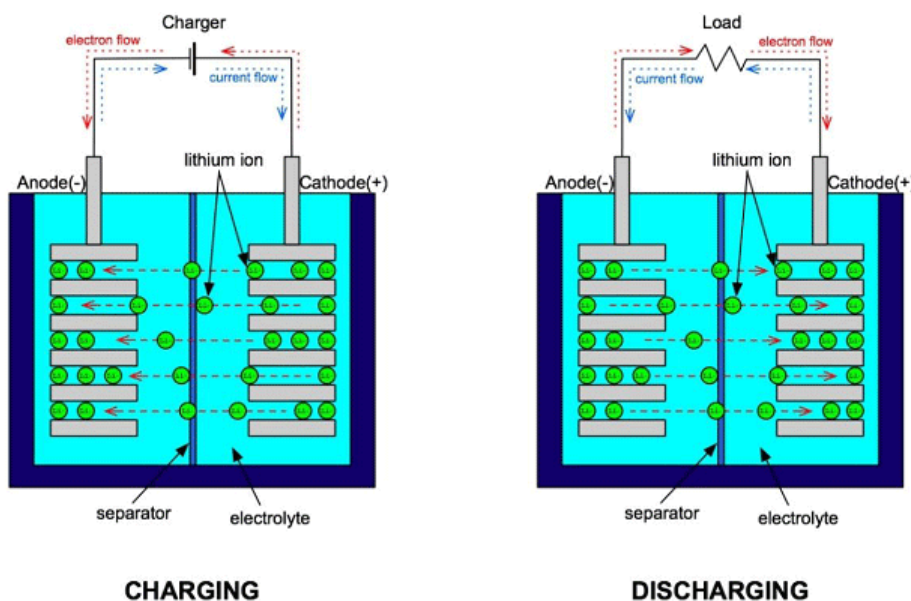
1.4.5 Liitium-ioonakud (Li-Ion)

Liitium-ioonakud on muutunud üheks tähtsamaks salvestustehnoloogiaks portatiivsetes ja mobiilsetes rakendustes ning haaranud 50% kogu portatiivsete seadmete turust. Peamine arengut takistav tegur on akude ehitusest tingitud kõrge hind (üle 550 €/kWh). Liitium-

ioonakude ehitus koosneb kolmest erinevast materjalide kihist. Esimene kiht on tehtud liitiumi ühendist, mis toimib anoodina, teine, ehk katoodi, kiht on tehtud tavaliselt grafiidist. Mõlema kihi vahel on kolmas, erinevatest ühenditest valmistatud eralduskiht, mis sõltuvalt kasutatud ühenditest määrab aku karakteristikud. Kõik kihid on uputatud elektrolüüti, mis laseb ionidel liikuda anoodi ja katoodi vahel.

Antud akudes on kõrge kasutegur, mis jääb vahemikku 95-98%. Salvesti teeb universaalseks ja paindlikuks selle vastupidavus kiirele ja aeglasele tühjendamisele (sekunditest kuni nädalateni). Turul on ligi 5000 töötükliga akusid, kuid on võimalik hankida ka suurema tsükli arvuga akusid. Töötüklite arv sõltub peamiselt elektrodide materjalidest. Akud on varustatud täiendavalt potentsiaalühthlustusahelaga, mis jälgib iga elemendi pinget ning aitab vältida pinget kõrvalkaldeid elementide vahel. Liitium-ioonakud on arenev tehnoloogia ning arendustöö on peamiselt suunatud katoodimaterjali arendamisele.

Antud tüüpi akud leidsid rakendust elektrisõidukites ja suurt erienariat ning erivõimsust nõudvates rakendustes. [3]



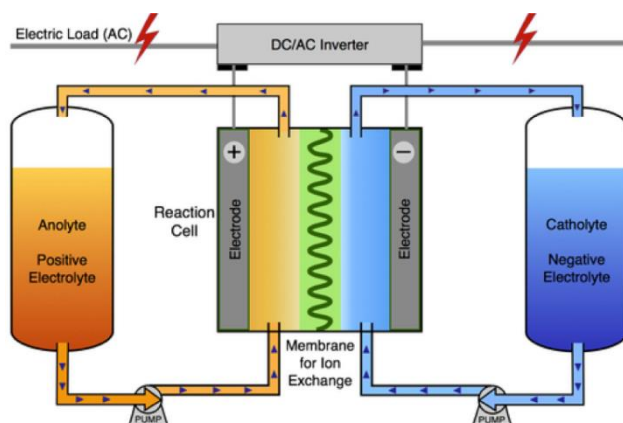
Joonis 1.12 Liitium-ioonakud tööpõhimõte [1]⁸

⁸ Joonis on leitav vaid ingliskeelse selgitusega.

1.4.6 Vanaadium – redoks akud (VR)

Vanaadium-redoks akud (VR) akud koosnevad akuelementidest, elektrolüüdi mahutisüsteemist, juhtimis- ning muundurisüsteemist (ingl.kl. *Power Conversion System, PCS*). Energiasalvestamine toimub elektrodidel kahte erinevat tüüpi vanaadiumioonide omavahelisel reageerimisel väävelhappe elektrolüüdis. Akuelementide arv määrab ära akuseadme võimsuse (kW) ning elektrolüüdi mahuti suurus energiamahutavuse (kWh). Aku tühjenemisel voolavad kaks elektrolüüti erinevatest mahutitest kokku akuelementidesse, kus siis elektrolüüdid vahetavad läbi membraani vesinikioone. Protsess kutsub lahuses esile ise eraldumise, mistõttu muutub vanaadiumi ionide olek ning potentsiaalne energia muundatakse elektriks. Laadimise käigus protsess pöördub. VR akude kasutegur normaaltöitingimustes ulatub kuni 85%-ni. Töötssükli täituses, tuleb välja vahetada ainult akuelementide osa, kuna elektrolüüdil on piiramatu eluiga ja seda on võimalik seetõttu korduvalt uuesti kasutada. VR akude töötssükli arv ulatub 10 000 täis-tühjaks laadimistsüklini, mis aastatesse arvatuna võib ulatuda 7-15 aastani.

Neid tüüpi akusid on võimalik kasutada mitmetes energiasalvestuse rakendustes, nt. nii katkematute toiteallikatena, koormuste silumiseks, tippude lõikamiseks, elektrivõrkudes ja taastuenergia integreerimiseks. VR akudel on kaks erinevat kuluartiklit: üks on seotud võimsusega (kW) ja teine energiamahutavusega (kWh), mis ei ole omavahel seotud. VR akude hind võimsusühiku kohta on alates 1 700 €/kW ning energiamahutavuse kohta jääb sõltuvalt süsteemi disainist vahemikku 230-770 €/kWh. [3]



Joonis 1.13 Vanaadium- redoks aku tööpõhimõte [1]⁹

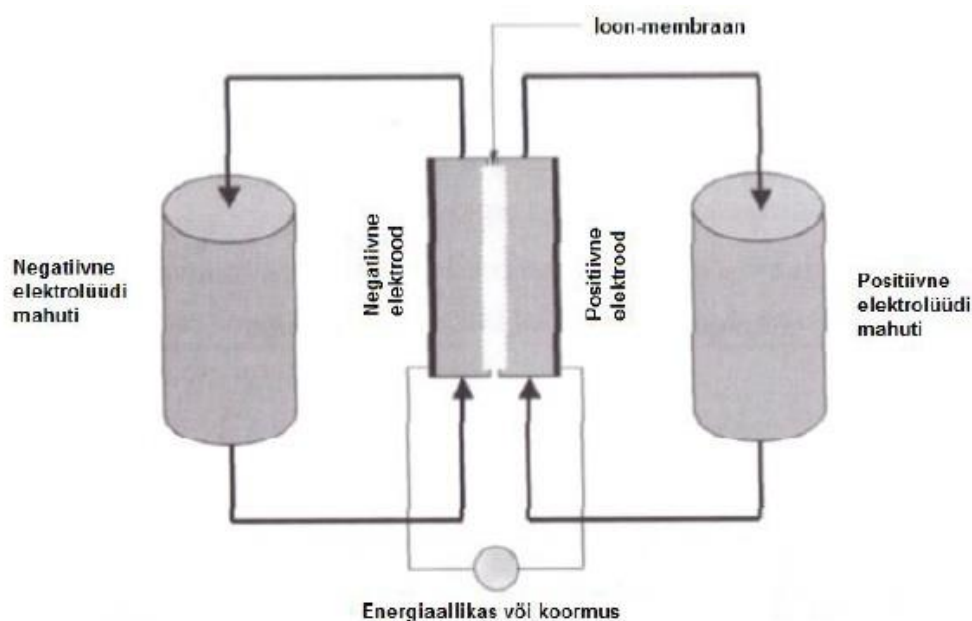
⁹ Joonis on leitav vaid ingliskeelse selgitusega.

1.4.7 Polüsulfiid-bromiidakud (PSB)

Polüsulfiid-bromiidakudes (ingl.kl. *Polysulphide Bromide, PSB*) elektrolüütidena on kasutusel positiivsel poolel naatriumbromiid ja negatiivsel poolel naatrium polüsulfiid. PSB akud töötavad üldjuhul 20°C ja 40°C temperatuurivahemikus, laiem temperatuurivahemik on võimalik saavutada kasutades jahutamiseks täiendavaid soojusvaheteid. Üksikelemendi pinge jääb 1,5V piiresse. PSB akude kasutegur jääb 75% juurde. Elueaks eeldatakse 2 000 tsüklit, kuid sõltub äärmiselt palju rakendusest, mille jaoks akusid kasutatakse. Akude ühikvõimsus ja energiamahutavus ei ole omavahel sõltuvad.

PSB akusid on võimalik kasutada kõikides energiasalvestus rakendustes, k.a. koormuse tasandamiseks, tippude lõikamiseks ning taastuenergiaallikate integreerimiseks.

PSB akude kulu võimsusühiku kohta on 842 €/kW ja energiamahutavuse puhul 142 €/kWh.
[3]



Joonis 1.14 Polüsulfiid-bromiidaku tööpõhimõte [3]

1.4.8 Tsink-bromiidakud (ZnBR)

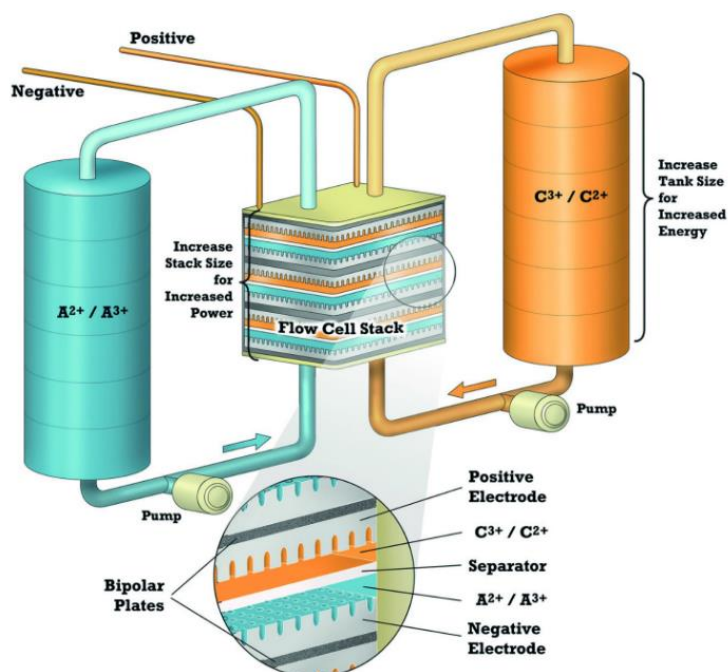
Tsink-bromiidakud Akud (*ZnBr*) töötavad temperatuuri vahemikus 20°C kuni 50°C. Üleliigne soojus tuleb vajadusel täiendava soojusvahetiga eemaldada. Kuna elektrolüüti otseselt protsessi käigus ei kulu, siis teoreetiliselt on selle eluiga määramatu, mis võimaldab seda korduvalt kasutada. Akuelementides kasutatav membraan seevastu degradeerub protsessi käigus, mis limiteeribki elemendi eluea umbes 2 000 laadimise-tühjenemise tsüklile. ZnBr

akut on võimalik ilma igasuguste kahjustavate efektideta täiesti tühjaks laadida, samuti ei esine seda tüüpi akul mälu efekti. Süsteemi kasutegur jääb 75% ja 80% vahemikku. ZnBr akul on kõikidest läbivooluakudest kõige kõrgem energiatihedus ning ühikelemendi pinge on 1.8V.

ZnBr akud valmistatakse üldjuhul 25 kW (energiamahutavusega 50 kWh) moodulitena. Iga moodul koosneb kolmest paralleelselt ühendatud 60-ühikelemendilisest akust.

ZnBr akud on leidnud rakendust nii katkematu toiteallika rakendustes, koormuse juhtimise rakendustes, päikeseelektrijaamades, alajaamades ning ka ülekande- ja jaotusvõrkudes.

Aku maksumus võimsusühiku kohta on umbes 491 €/kW ja energiamahutavuse kohta 307 €/kWh. [3]



Joonis 1.15 Tsink-bromiidaku põhimõte [1]¹⁰

Antud peatükk oli informatiivse sisuga toomaks välja, millised elektrisalvestusviisid eksisteerivad ning millised on nende tehnilised omadused. Lisaks, andmaks lugejale aimu, millised võivad sobida Eesti elektrivõrku. Järgmises peatükis tuuakse täpsemalt välja salvestite majanduslik ja tehniline kasu elektrivõrgule.

¹⁰ Joonis on leitav vaid ingliskeelse selgitusega.

2 Elektrisalvestite mõju ja kasu

Antud peatükis on toodud välja elektrienergia salvestite tehniline ja majanduslik kasu neid võrku integreerides. Majanduslikku kasu all on mõeldud üldist kasu ning ei ole toodud välja põhjalikku finantsanalüüsi (numbrates). Lisaks, on toodud välja salvestite kasu jaotusvõrgule. Tihti kasutatakse väljendit energiasalvestus, kuid selles töös on mõeldud vaid elektrienergia salvestamist.

2.1 Salvestite majanduslik kasu

Energiasalvestamise tehnoloogia omab suurt potentsiaali elektrivõrkude parandamiseks ja võimaldab suurendada installeeritud taastuenergia allikate arvu. Seadmete võime salvestada, parandades võrgu tõhusust ja töökindlust, on oluline eelis tuleviku elektrivõrgule. Tegelikult salvestid ei asenda olemasolevaid komponente elektri ahelas, kuid võimaldavad nendel teha oma tööd tõhusamalt ja madalamate kuludega. Siiski, salvestid tuleb mõistlikult integreerida, kuna liigne ladustamisvõimsus vähendab selle kasutegurit. Seetõttu on tähtis hinnata salvestite vajavat võimsust, et toime tulle taastuenergia allikate muutustega ja süsteemi tagajärjetega. [6]

Energiasalvestite kasumi detailsel analüüsil, sealhulgas turuanalüüs, võivad esile kerkida jägmised aspektid:

- kulude vähendamine või tulu suurendamine, mis on seotud energia arbitraaži suurendamisega (ingl.kl. *Cost reduction or revenue increase of bulk energy arbitrage*):

arbitraaž eeldab elektrienergia ostu madalakoormuste perioodide jooksul, ehk madalate hinnadega akude laadimiseks. Tippkoormustel antud energia müüakse kallima hinnaga ära.

- kulude vältimine või tulu suurendamine põhitootmisvõimsuse arvelt (ingl.kl. *Cost avoid or revenue increase of central generation capacity*):

piirkondades, piiratud elektritootmisvõimalusega, saab salvestid kasutada, et kompenseerida vajaduse:

- a) osta ja paigaldada uue genereerimise ja/või b;
 - b) „rentida“ tootmisvõimsuse elektri hulgimüügiturul.
- kulude vältimine või tulu suurendamine lisateenustest (ingl. kl. *Cost avoid or revenue increase of ancillary services*):

energiasalvestus võib pakkuda mitu lisateenust. Üks neist on piirkondlikku võrgu funktsioneerimise hoidmine, teine, pöörlemise reserv ning kolmas, koormuste juhtimine.

- kulude vältimine või tulude kasv ülekandevõrgu normaalalatluse/ülekoormuse korral (ingl. kl. *Cost avoid or revenue increase for transmission access/congestion*):

energia salvestuse kasutamine võimaldab parandada elektri ülekande- ja jaotussüsteemi tõhusust, suurendades energiaülekanne võimet ja stabiliseerides pinge taset. Ülekandevõrgu normaalalatluse / ülekoormuse liigseid kulusid võib vältida tänu akupanga kasutusele.

- tarbimise nõudluse tasude vähenemine (ingl. kl. *Reduced demand charges*):

tarbimise tasude vähenemine on võimalik siis, kui energiasalvestid kasutatakse tippkoormuse katmiseks.

- töökindlusega seotud finantskadude vähendamine (ingl. kl. *Reduced reliability-related financial losses*):

energia salvestus vähendab rahalised kaod, mis on seotud elektikatkestusega. Antud eelis rakendatakse kommerts ja tööstuse klientidele, kellel elektrikatkestused põhjustavad suuri kahjumeid.

- elektrikvaliteediga seotud finantskadude vähendamine (ingl. kl. *Reduced power quality-related financial losses*):

energia salvestus vähendab rahalised kaod, mis on seotud elektrikvaliteedi anomaaliatega. Elektrikvaliteedi anomaaliad, mis põhjustavad võrgus liigvoolusid, on ohtlikud elektriseadmetele. Antud olukorda saab ära hoida kasutades salvesteid.

- tulu suurendamine taastuvenergiaallikatest (ingl. kl. *Increased revenue from renewable energy sources*):

energia salvestid saab kasutada taastuvenergia allikast toodud elektri salvestamiseks. Energiasalvestid kogutakse, kui tarbimine on väike ja hind on madal ning annakse võrku, kui elektrinõudlus kasvab ja hind on kõrgem.

Loetletud funktsioonid juhivad tähelepanu sellele, et energia salvestid koos jõuelektroonikaga võivad avaldada mõju tulevikku elektrivarustussüsteemile. [7]

2.2 Salvestite tehniline kasu

Energeetika valdkonna kiire areng on tekitanud vajaduse energia salvestite tehnoloogia järele. Kasvav huvi elektrienergia tootmiseks ja tarbimiseks *off-grid* lahenduse põhjal, ilma võrguteenust kasutamata, on üha enam populaarsust koguv trend. Võrku integreeritakse taastuenergia allikad, millega tekivad raskused võrgu stabiilsena hoidmiseks. [2]

Praeguseks (2017) kõige populaarsem salvestusviis on läbi hüdroakumulatsioonijaamade. Mitmed rakendused on olemas energia ladustamiseks jaotusvõrgu tasemel, sealhulgas:

- ülekanne ülekoormatuse leevendus (ingl. kl. *Transmission congestion relief*):

energiasalvestite jaotussüsteemide ühendamise eraldatuna põhivõrgu osast, võimaldab optimeerida üldist võrgu kasutust. Selline optimeerimine annab parema kasutamise võrgu *off-congestion* perioodidel ja leevendab ülekoormust, kui need toimuvad. See kehtib vooludele mõlemas suunas, ka siis, kui jaotusvõrgus on võimsuse ülejääk/defitsiit.

- põhi- ja jaotusvõrgusüsteemi uuenduse edasilükkamine (ingl. kl. *Transmission and distribution upgrade deferral*):

jaotusvõrku ühendatud salvestusseadmed optimeerivad nende võrgu kasutust.

- tippkoormuse korvamine (ingl. kl. *Peak shaving*):

energiasalvestid võivad vähendada nõudlust tipp tundidel genereerimissüsteemidele, tühjendades samal ajal, minimeerides ebaefektiivsete elektriyaamade kasutust.

- energia kulude juhtimine (ingl. kl. *Time of use energy cost management*):

energiasalvestite kasutuselevõtt annab operaatorile võimaluse salvestada energiat madalate hindade juures ning müüa kallimalt.

- pinge toetus (ingl. kl. *Voltage support*):

salvestid annavad võimaluse minimeerida jaotusvõrgu ebastabiilsust kohtades, mis mõjutavad võrgu pingetaset kõige enam.

- erinevate taastuenergiasüsteemide võrku integreerimine (ingl. kl. *Variable renewables grid integration*):

taastuenergiaallikad tekitavad süsteemis kõikumisi, mille tõttu süsteem destabiliseerub. Lühiajalisteks muutusteks võib võrku integreerida energiasalvestussüsteeme, mis taluksid

kõikumisi, vähendades pinge reguleerimise vajadust ja tõstes elektrienergia kvaliteeti. Pikaajalistel muutustel (tunnid) vähendavad salvestustehnoloogiad taastuenergiaallikatest tekitatud kõikumiste mõju.

- erinevate taastuenergiaallikate aja nihke võimalus (ingl. kl. *Variable renewables energy time-shift*):

salvestussüsteemid võimaldavad edasi lükata taastuenergiaallikatest toodetud energia kasutamise madaltarbimise ajal ning kasutada seda tipukoormuste ajal.

Seda tüüpi salvesteid võib kasutada taastuenergiaallikate lähedal või mujal võrgus, kaasa arvatud tarbimise läheduses.

- erinevate taastuenergiaallikate võimsuste muutus (ingl. kl. *Variable renewables capacity firming*):

Koos võimsuse prognoosimisvõimalustega, toetavad salvestussüsteemid erinevate taastuenergiaallikate toomist turule kui stabiilsete ja kindlate energiatootmisallikatena.

- reservvõimsus (ingl. kl. *Reserve capacity*):

Salvestid pakuvad reservi erinevatel võimsuse tasanditel sõltuvalt kasutatavast tehnoloogiast.

- energia kvaliteet (ingl. kl. *Power quality*):

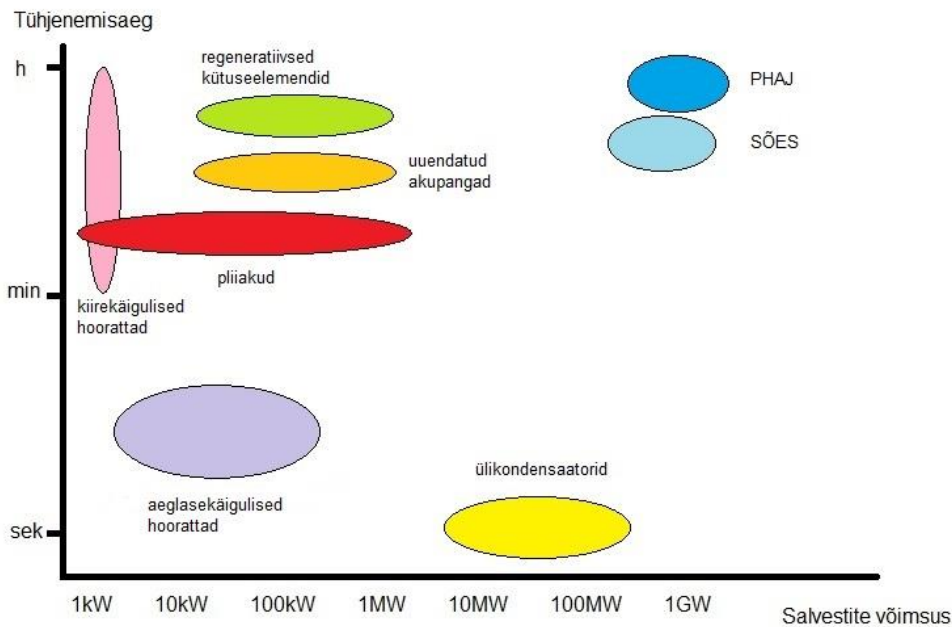
energia tootjate üks peamisi eesmärke on hoida pinge ja sagedus ühtlasena. Energiasalvesti suudab toetada seda, minimeerides lühiajaliste muutuste nagu katkestuste mõju, piirata harmoonikuid ning võimaldab võimsusteguri ja sageduse muutmist.

- Töökindlus (ingl. kl. *Reliability*):

kui võrgus toimub katkestus, mis kestab kauem kui tund, saab salvestit kasutada võrgu normaaltalitluse taastamiseks. [6]

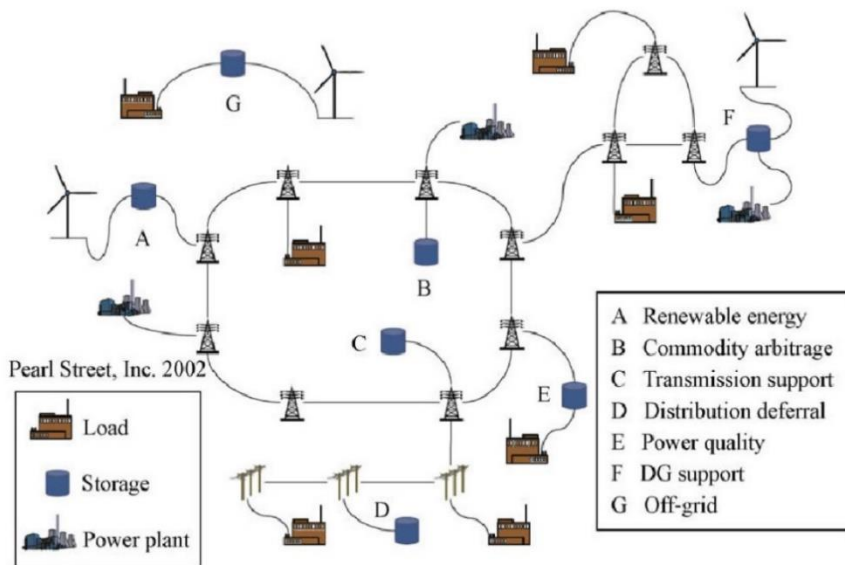
Energiasalvestite valik sõltub võrgu vajadusest. Ööpäevaseks reguleerimiseks sobivad kõige paremini PHAJ ja SÕES, ning lühiajalisteks reguleerimiseks akupangad ja ülikondensaator-energiasalvestid. Allpool oleval joonisel (Joonis 2.1 Erinevate energiasalvestite kasutusala) on toodud välja erinevate energiasalvestite kasutusala sõltuvalt nende võimsusest ning tühjenemisajast.

Elektrisüsteemidele suurema mõju avaldavad energiasalvestid, mis on pikaajalise laadimis- ja tühjendamisperioodiga. Sellised energiasalvestid omavad suuremat võimsust ja võivad avaldada mõju elektrisüsteemi töörežiimile – koormusgraafikuid ühtlustada, juhtida võimsusvoogusid ning olla suur võimsuste reserv. [2]



Joonis 2.1 Erinevate energiasalvestite kasutusala

Traditsiooniliseks elektri ahelaks peetakse viiest liigist koosneva ahelat: kütus/energia allikas, tootmine, ülekandevõrk, jaotusvõrk ja tarbimine. Energia salvesti võib saada kuueks elemendiks selles ahelas, kuna toidab võrku vastavalt vajadusele ning loob turupaindlikust. Energia salvestamise integreerimine uue põlvkonna võrgusüsteemi on näidatud Joonisel 2.2.



Joonis 2.2 Salvestite lai kasutusala (A - taastuenergia allikad, B - energia arbitraaž, C - ülekandevõrgu toetus, D - Uuenduse edasilükkamine, E - Võimsuse kvaliteet, D - DG toetus, F- Off-grid) [7]

EL-s oodatakse aastaks 2030 taastuenergiaallikate laiaulatuslikku paigaldamist, suurendades nende elektritoosmist kuni 50% ulatuses kogu tarbimisest. Selles tulevases raamistikus hakkavad energiasalvestustehnoloogiad mängima võtmerolli. Nende paigaldamine hakkab toimuma mitte ainult põhivõrgus, kuid ka jaotusvõrgus. Energiasalvestite kasutuselevõtu tõenäosuse suurenemise tagab energiahinna kasvav erinevus tippkoormuse ja madaltarbimise vahel. Siiski on tähtis hinnata salvestite võimsust selleks, et olla võimelised juhuslike muutustega toime tulekuks ning omada piisavat kasutegurit. Energiasalvestitel on olemas kõik tingimused, et neid kasutada ja olla oluline osa jaotusvõrgust. Energiasalvestid pakuvad mitmeid võimalusi elektrisüsteemile: ülekanne ülekoormatuse leevendus, põhi- ja jaotusvõrgusüsteemi uuenduse edasilükkamine, tippkoormuse korvamine, energia kulude juhtimine, pinget toetus, erinevate taastuenergia süsteemide võrku integreerimine, erinevate taastuenergiaallikate aja nihke võimalus, erinevate taastuenergiaallikate võimsuste muutus, reservvõimsus ja töökindluse parandamine [6]

Elektrisalvesteid kasutatakse mitmete elektrivõrguga seotud nõuete tagamiseks ja probleemide lahendamiseks, kuid töös on vaatluse all vaid akupangad.

2.3 Akupankade mõju jaotusvõrgule

Antud peatükis autor analüüsib akupankade mõju jaotusvõrkudele. Tundlikkuse analüüsis on võrreldud võrku kolme eri piirkondades (linnas, linna lähedal asuvad alad ja maapiirkonnad), kolme erineva kasvumäära ja kuue erineva aku mahutavuse korral. Mõju hinnatakse RNM (ingl.kl. *Reference Network Models, RNM*) mudeli abil, kus kasvava stsenaariumi jaoks on tehtud vajalikud arvutused. Analüüsist selgub, et linnapiirkondades on võimalik saavutada olulist kokkuvõitu.

Hindamise meetodina kasutatakse RNM mudelit, mis on planeerimise mudel, millega analüüsitakse hinnangulisi kulusid jaotusvõrgu rajamiseks kasutades GPS (ingl.kl. *Global Positioning System*) kordinaadid. RNM mudelis kasutatakse kahte erinevat versiooni: 1) *greenfield* ja 2) *brownfield*. *Greenfield* mudelis hinnatakse jaotusvõrgu rajamist ja *brownfield* mudelis võetakse arvesse jaotusvõrgu laiendamise võimalikkust uute tarbijate ja energia allikate lisandumisel.

Mõlemad RNM mudelid koosnevad neljast erinevast hindamise kriteeriumist:

1. Loogiline kiht, mis koosneb graafikutest, sõlmedest ja harudest, et modelleerida jaotusvõrku.
2. Topograafiline kiht, mis hindab jaotusvõrgu rajamiseks kõige optimaalsemat asukohta.
3. Elektrilisi parameetreid arvesse võttev kiht.
4. Järjepideva ja töökindla varustuse tagamine.

Metoodika

Esimeseks sammuks iga jaotusvõrgu rajamisel on välja selgitada ja hinnata tarbijate asukohad ja DER'id (lokaalne energia allikas) ning kasutada seda informatsiooni *Greenfield* RNM mudelis. Järgmiseks sammuks tuleb välja selgitada stsenaariumid, mida analüüsida kolme eri jaotusvõrgu asukoha, kuue eri mahutavusega akupankade ja kolme eri nõudluse kasvu kohta. Selles faasis on oluline välja selgitada igapäevane tarbimisprofiil, et vähendada maksimaalset võimsust madal- ja keskpinge trafode kohta. Järgmiseks hinnatakse olemasolevate jaotusvõrkudega ühendamist lisanduvate energiaallikate *Brownfield* mudeli põhjal. Viimaseks hinnatakse kulusid kasutades standardiseeritud hindu arvesse võttes.

Stsenaariumites on võetud arvesse kolme erinevat punkti:

- kolm erinevat piirkonda (linn, linna lähedal asuvad alad ja maapiirkonnad)
- kuue erineva mahutavusega akupanka (0, 10, 20, 40, 70, 100 ja 200kWh)

- kolm erinevat aastast nõudluse kasvu (2%, 2,5%, ja 3% kümne aasta vältel)

Tulemused

Tulemuste saamiseks on hinnatud kolme eri piirkonda. Iga piirkonna kohta on hinnatud jaotusvõrgu rajamise ja hoolduse kulusid võrreldes akupankade kasutamisega. Igale stsenaariumile on rakendatud RNM meetodit hindamaks jaotusvõrgu rajamise kulusid madal- ja keskpinge trafo alajaama ning keskpinge liinile. Akupankade kasutamine andis kokkuhoihu investeeringutelt ja hoolduselt võrreldes nende stsenaariumitega kus akupanku ei kasutatud. Eriti märkimisväärse säästu võib saavutada linnas ja linnalähedastel aladel. Kui akupangad on paigaldatud trafo alajaamadesse, siis investeeringud ja sääst on suuremad kui keskpinge võrgus. Sääst kesk- ja madalpinge trafo alajaamades linnas on umbes 20-25% 200kWh akupanga kasutamise korral. [8]

Sama metoodikat saab rakendada Eesti RNM mudeli loomiseks, kuna täpsema tulemuse saavutamiseks on võimalik mudelis kasutada GPS kordinaate. Eesti jaotusvõrgu Elektrilevi OÜ esindaja, hajaenergeetika juhi Ott Antsmaa sõnul „Elektrilevile akupankade integreerimine teema on huvipakkuv, kuid see vajab seadmete integreerimist põhjalikku analüüsi selle osas, millised on võimalikud kasutusvaldkonnad ja milline on nende seadmete tasuvus.“ Samuti elektri põhivõrke haldav Eesti riigile kuuluv ettevõtte Elering AS toetab arenguid, mis aitavad kaasa salvestustehnoloogiate arengule.

Nagu näha, siis akupankade kasutamisega on arvestatud nii Eesti ettevõtetes kui ka ELi ja Eesti arengukavades, kuid seaduses ei ole mingeid muudatusi tehtud. Võrgueeskirjas seisuga 19.05.17, ei ole akupanka tähendust määratud. Autor on kirjutanud enda poolt võimaliku akupanga tähenduse.

„Akupank on eraldiseisev objekt, mis võimaldab salvestada või jaotada elektrienergiat.“

Samuti, peavad olema kirjeldatud ka tehnilised nõuded. Autori ettepanekul need võivad sisaldada järgmisi aspekte:

- nominaalsed mahutavused ja akupanga suurused
- maksimaalne temperatuur
- minimaalne laadimis-tühjenemistsükli arv
- IP kaitseaste (iseloomustab elektriseadme kaitset välismõjude eest)
- ilmingimused, millal neid saab kasutada

Hetkel akupangad ei ole veel majanduslikult (maksumus alates 200-900 €/kWh kohta) elujõulised kasutamaks neid madal- ja kekspinge alajaamade tippkoormuse vähendamiseks, kuna nende eluiga on veel liiga lühike ja hinnad kõrged. Kuid see tehnoloogia ja sektor arenevad väga kiiresti ja tuleviku perspektiivis pakuvad huvitavaid võimalusi elektrisüsteemide murekohtade lahendamiseks. Artiklile tuginedes võib väita, et akupankade kasutamine on kasulikum linnas võrreldes linnalähedaste ja maal asuvate piirkondadega. Juhul kui akupangad on paigutatud kesk- ja madalpinge alajaamadesse, siis on sääst suurem kui kasutada akusid keskpinge võrgus. See tuleneb sellest, kui madalpinge ja keskpinge tarbijate tippkoormus ei kattu ühele ajale.

Järgmises peatükis autor toob välja viimaseid muudatusi EU Energeetika Direktiivis ja mida need muudatused võivad tuua kaasa Eesti elektrivaldkonnas.

3. Euroopa Liidu Energeetika Direktiivi muudatused

Euroopa Komisjon esitas 30. novembril 2016 Euroopa Liidule ettepanekud, mille abil EL saab olla konkurentsivõimelisem globaalsel energiaturul, minnes üle puhta energia kasutamisele.

Euroopa Komisjoni esindaja sõnul muudavad antud ettepanekud ELi riikide majandust modernsemaks, luues tingimused püsivate töökohtade, investeeringute ning majanduse kasvu jaoks.

Puhas energia Euroopa elanikele (ingl. kl. *Clean Energy for All Europeans*) programmi üldine eesmärk on näidata, et taastuvenergiade üleminek toob sektori kasvu. Ettepanekud hõlmavad heitkoguste arvu vähendamist, energiaefektiivsuse tõstmist, taastuvenergia suuremat osakaalu, toodete paremat informeerimist elektriturul, elektrienergia varustuskindluse tõstmist ja valitsemise eeskirjade muutust Energia Liidus. [9]

Euroopa Liidu esindajad sooviivad, et EUst saaks liider taastuvenergia kasutuses, viies täide ambitsioonikaid kliima ja energiapoliitika eesmärgi, samas säilitades konkurentsivõimelise majanduse Euroopas, mis pakub tulevikus uusi töökohti ning majanduskasvu võimalusi riikidele. Veendumaks, et Euroopa tarbijad ja ettevõtjad on valmis antud muutustele, käivitab komisjon uued ja energiaefektiivsed meetmed. Tööstuse valdkonnas energiatõhusus annab võimaluse äri loomiseks ning arendamiseks, pakkudes uusi ja modernseid lahendusi.

Programmis pööratakse erilist rõhku:

- üldisele energiatõhususe parandamisele

Üldiselt, kasutades energiatõhusaid seadmeid, tarbijatel on võimalik säästa aastaks 2020 keskmiselt 500 eurot aastas majapidamise kohta. Energiatõhusus omab otsest mõju tarbijate elektriarvete vähenemises. Muutused mõõtesüsteemis, arvestamises ning kütte- ja jahutussüsteemides annavad tarbijale selgema ja täiuslikuma informatsiooni elektritarbimisest.

- energiatõhususe parandamisele majapidamistes

Majapidamiste renoveerimiseks tuleb seada õiged turutingimused, mis võimaldaksid vanu hooneid kiiremini renoveerida. Energiatõhususe visioonis mängivad olulist rolli hooned, kuna ehitised moodustavad 40% Euroopa energiatarbimisest. Kaks kolmandiku ELi hoonetest on

ehitatud enne energiatõhususe standardite olemasolu ning nende renoveerimismäär praeguseks on ainult 1% aastas. Komisjoni raporti väitel, ehitiste renoveerimine tekitaks sektoris juurde 18 miljonit uut töökohta Euroopas. Soojustus- ja lehtklaasi valdkonnas aastaks 2030 tulu võib ulatuda 23.8 miljardi euronit ning renoveerimise turul väikese suurusega ettevõtete tulu võib olla vahemikus 80-120 miljardit eurot. Täiendavad energiatõhususe tööd nagu katuse soojustamine, akende väljavahetamine ja hoone süsteemi uuendamine tooks ettevõtetele 47.6 miljardit eurot.

- energiatõhususe parandamisele läbi ökodisaini ja tarbijate teavitamise (energiamärgistus);

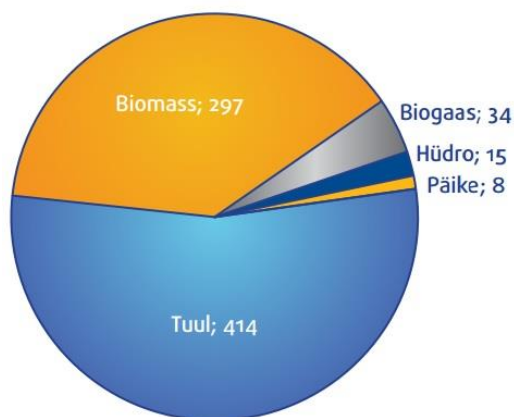
„Ökodisaini“ meetod peab tagama, et ainult energiatõhusad seadmeid võib müüa EL turul ning ostes elektrienergia seadmeid, peab olema energiamärgistuse süsteem ühtne ning andma tarbijale kogu informatsiooni toote kohta. Uuringud näitavad, et ökodisaini raamistik võiks tuua 55 miljardit eurot Euroopa ehitusvaldkonna ettevõtetele.

- finanseeringut „tarkadesse“ majadesse.

Tarkade majade kasutus aitab tarbijatele säästa elektrienergiat, hallates enamuse koduelektroonikast.

Rakendades eelnimetatud meetmeid, avaldab see otsest ja tugevat mõju riigi arengule. Ambitsioonikad eesmärgid aitavad liikmesriikidele vähendada sõltuvust imporditavast energiast, suurendada kohalikku majandust ning oma konkurentsivõimet. Tarbijate arveid peaksid vähenema kuni 20%. Üleeuroopaline eesmärk on aga tõsta aastaks 2030 energiatõhusust 30% võrra, vähendades fossiilkütuste kasutamist. Eesmärgi täitmist alustati varem ja see on jätkuv trend, sest puhta energia üleminek on võti Euroopa tulevasele tööhõivele ja kasvule. EL toetab taastuvenergiaallikatesse investeeringuid. Eelmisel aastal investeeriti 300 miljardit eurot, mida on kuus korda rohkem kui aastal 2004. [10]

Eestis on taastuvenergia elektritootmisesse investeeritud 768 miljonit eurot ja 2015. aastal lisandus investeeringuid 3 miljoni euro eest. [11] Suurem osa investeeringuid moodustasid tuuleenergeetika ja biomass, ning kõige vähem investeeritati päikseenergiasse.



Joonis 3.1 Investeeringud taastuvenergia sektorisse (mln. eurot) [11]

Lisaks, EU komisjon nõuab ajakohastada olemasolevat Energiatõhususe Direktiivi:

- ühendada energiatõhususe eesmärgid EL 2030 kliima ja energiapoliitika raamistikuga
- 2020. aastaks energiasäästumudel, mis nõuab tarnijatele ja turustajatele säästa 1,5% elektrienergiast iga aasta alates aasta 2021 kuni 2030
- parandada elektrienergia mõõtesüsteemi ja arvestamist energiatarbimises kütmise ning ventilatsiooni osas

Nõudmised puudutavad ka Ehitiste Energiatõhususe Direktiivi:

- „arukate“ (ingl. kl. *Smart*) hoonete ehitamine (kaasaegsete tehnoloogiate kasutamine, hoonete automatiseerimine, elektrisõidukite laadimise võimaluste tagamine jne)
- hoonete renoveerimise toetamine (rahastamine, energiamärgiste parandamine)

Euroopa Strateegiliste Investeeringute Fond (ingl. kl. *European Fund for Strategic Investments*) pakub suuri võimalusi rahaliste vahendite leidmiseks energiatõhususe tõstavatele projektidele, samuti taastuvenergia projektide jaoks.

Energia efektiivsus mõjub hästi ka inimeste tervisele vähendades õhusaastmist ja kasvuhoonegaaside heitkoguseid, ning seeläbi parandades õhu kvaliteedi. Suurem energiatõhusus aitab Euroopa ettevõtetel parandada oma konkurentsivõimet hoides omakulud minimaalsena. Lisaks, kogu energia ja kliimapakett 2030 suurendab ELi SKP (Sisemajanduse koguprodukt on riigi elanikkonna majandusliku olukorra näitaja) kuni 1% ning loob kuni 900 tuhat uut töökohta. Eesmärk saavutada 30% energiatõhusust toob majandusele 70 miljardit eurot ja loob 400 tuhat töökohta võrreldes 27% energiatõhususega.

Maailema elektritoodangute ümberkujunemine turgudel jätkub ning vastavalt Rahvusvahelise Energiaagentuuri andmete järgi taastuenergia allikas ületas kivisütt põhieenergia allikana 2015.a. Aastaks 2030 Euroopas oodatakse 50% elektrienergia tootmist taastuenergia allikatest ja aastaks 2050 peab elektrienergia tootmine olema süsinikuvaba.

„*Clean Energy for All Europeans*“ programmi eesmärgiks on just taastuenergia laialdane kasutuselevõtt. Euroopas on seadnud eesmärk saada koostöös teiste liikmeriikidega vähemalt 27% osakaal taastuenergia allikatest elektri lõpptarbimises ning sellega vähendada heitkoguste arvu vähemalt 40% võrra. [12]

Pikaajalise energiamajanduse arengukava 2030+ (ENMAK2030) järgi eesmärk Eestis on saada 50% osakaal taastuenergia allikatest elektri lõpptarbimises. Eurostati andmete järgi aga juba 2015. aastal taastuenergia moodustas 28,6% lõpptarbimises. [13] [14]

Arendatud päikesepaneelide ja maismaa tuuleenergia tehnoloogiad on aidanud ülemaailmselt taastuenergia lahenduste kättesaadavust muuta odavamaks ja keskkonnasäästlikumaks tehnoloogiaks. Taastuenergia sektoris Euroopas töötab üle ühe miljoni inimesi, tööhõive ainult tuuleenergeetika valdkonnas on kasvanud aastast 2013 viiekordseks võrreldes aastaga 2005. Globaalse turu andmetel hinnatakse antud üleminekut ca 6800 miljardiks euroks perioodil 2014-2035.a.

Küttesüsteemis 3/4 Euroopa majapidamistest köetakse fossiilsete kütuste abil. See moodustab 68% gaasi impordist. Antud sektori puhta energia kasv on suhteliselt aeglane. Probleemi lahendamiseks Taastuenergia Direktiiv pakutakse kütte- ja jahutusüsteemides tõsta taastuenergia allikate osakaalu 1% aastas kuni 2030.a.

Tänapäeval (2017) EL-i transpordisektori sõltuvus fossiilsetest kütustest on jätkuvalt väga suur. Nafta tarned moodustavad ca 94% ja need ressursid kasutatakse autode, veokite, laevade ja lennukite tankimiseks. Antud Direktiivi muudatused aitavad vähendada heitgaaside koguseid ning suurendavad taastuenergia osakaalu, kasutades biokütuseid ja elektrienergiat, mille kasutamine aitab vähendada heitgaaside koguseid 70% võrra. Euroopa transpordisektorit tuleb muuta tõhusamaks ja ohutumaks.

Päikese ja tuuleenergeetika tehnoloogia hinnad on langenud 80% võrreldes aastaga 2009. Selline hinna vähenemine võib tarbijaid meelitada toota elektrienergiat enda majades. Antud Direktiivi muudatuste abil tarbijate õigused laienevad ning nad saavad toota elektrienergiat, ning ülejäänud energia ülekande naabrevõrku, teenides tulu. Tööstussektorist Direktiivi

uuenduse abi alandatakse investorite ebakindlustust, vähendades kulusid. Administratiivsete koormuste vähenemine toob kasu nii tootjatele kui investoritele.

Euroopa säästab umbes 60 miljardit eurot aastas vältides fossiilkütuste importi, mis on näiteks samaväärne praeguse Luksemburgi SKP-ga. [12]

Tarbijatest on saamas puhtale energiale ülemineku juhid: uued tehnoloogiad nagu „arukad võrgud“, „targad majad“, päiksepaneelid katustel ja salvestussüsteemid võimaldavad energiatarbijatel tegutseda aktiivselt elektriturul.

Energia Liidu komitee üheks priorideediks on tarbijate rahulolu. Üleminek puhtale energiale peab olema aus nendes sektoritest ja piirkondades, mis sõltuvad sellest. Kõikidel ELi tarbijatel on õigus elektrit kasutada omatarbeks, seda säilitada või jagada ja müüa elektriturul, teenides võimalusel kasumit. Need muudatused lihtsustavad majapidamistele ja ettevõtetele kontrollida energiatarbimist ja elektriarvet. Igapäevased toimingud nagu arvete maksmine, tarnijate muutmine ning uue lepingu sõlmimine muutub lihtsamaks, kiiremaks ja täpsemaks tänu digitaalsele lugemisele. Tarbijad saaksid usaldusväärset ja selget informatsiooni turu pakkumistest, kasutades hinnavõrdlemiseks *online* võimalusi aitamaks teha paremaid valikuid. Samuti saaksid nad elektripakette kergemini vahetada tänu ülemineku tasu piiramisele. Uued eeskirjad tagavad tarbijakaitse tõhususe.

Energiakulu on oluline faktor, mis on endiselt võrreldes Ameerika Ühendriikidega väga kõrge. Ambitsioonikas 30% energiasäästu eesmärk aitab tulevikus kulusid alandada. Uue elektituru reeglid stimuleerivad efektiivse elektrienergia genereerimist ja tarbimist, aidates vähendada heitmeid nii tarbimises kui tootmises. Lõppeesmärk on saada paindlikum võrk nii elektritarbimise kui ka võrgukulude eest, mis muudaks süsteemi optimaalseks. Komisjon tahab tugevdada sotsiaalsed aspekte, mis parandaksid elutingimusi ja säästaks raha väikese sissetulekuga peredele, kellel puudub võimalus kütta oma kodusid, rääkimata energiasäästliku renoveerimisest. ELi eesmärkide saavutamine on võimalik ainult läbi kooskõlastatud meetmete ning seadusandluse EL-s riiklikul tasemel. [15]

4. LEAP mudel Eesti Energiasüsteemi jaoks

Mudeli eesmärk on uurida:

- Akupankade vajadust Eesti energiasüsteemile
- Direktiivi muudatuste ja „Eesti Pikaajalise Energiamajanduse Arengukava 2030“ (ENMAK+2030) mõju Eesti energiasüsteemile
- Plaanitavate ELi ja Eesti programmide eesmärkide täitmise analüüs:
 - Aastaks 2030 „Puhas Energia Euroopa Elanikele“ (ingl. *Clean Energy for All Europeans*) programmi tähtsaimaks mõteks on saada koostöös teiste EL liikmesriikidega vähemalt 27% osakaal taastuvenergia allikatest elektri lõpptarbimises vähendades sellega heitkoguseid vähemalt 40% võrra. Tõsta energiatõhusust 30% võrra, millest suurema osa moodustab majade renoveerimine. [12]
 - ENMAK2030 programmi eesmärgiks on saada 50% taastuvatest energiaallikatest elektrit lõpptarbimises ja vähendada heitkoguseid vähemalt 70% võrra (võrreldes 1990 aastaga) ning aastaks 2050 saavutada heitkoguste vähenemist 80%. [13]
 - Rahvusvahelise Energiaagentuuri (IEA) andmete järgi aastaks 2030 Euroopas prognoositakse 50% elektrienergia tootmisest taastuvenergia allikatest ja aastaks 2050 peab elektrienergia tootmine olema süsinikuvaba. [12]

Aluseks on võetud baasstsenaarium, mille põhjal on koostatud stsenaarium tootmise ja tarbimise kohta. Tarbimise stsenaariumis on kirjeldatud olukord, kus rahvaarv väheneb 1,2 mln inimeseni ning samal ajal SKP kasvab konstantselt 5% aastas kuni stsenaariumi lõpuaastani. Tootmise stsenaariumis suureneb tugevalt taastuvate energiaallikate poolt installeritud elektri tootmise võimsus (suurenevad turbast, puidust, biogaasist ja päikeseenergiast jaamad installeritud võimsused). Nii tarbimise kui tootmise stsenaariumi juures on tarbimine, omatarve ja kaod jäänud samaks baasstsenaariumiga.

- Baasaastad: 1999 kuni 2015
- Esimene stsenaariumi aasta: 2016
- Viimane stsenaariumi aasta: 2040
- Energiaühik: tonni TJ (elektrienergia tonni GWh)
- Valuuta: euro €

Stsenaariumide loomise põhjaks on lisatud andmeid Statistikaameti andmebaasist ajavahemiku 1999 kuni 2015 kohta. Samuti on kohandatud ja lisatud erinevaid elektri tootmise ning põlevkiviõli tootmise parameetreid nagu elektriline kasutegur, installeeritud võimsus ja tootmistehnoloogia tüüp.

4.1 Baasstsenaarium

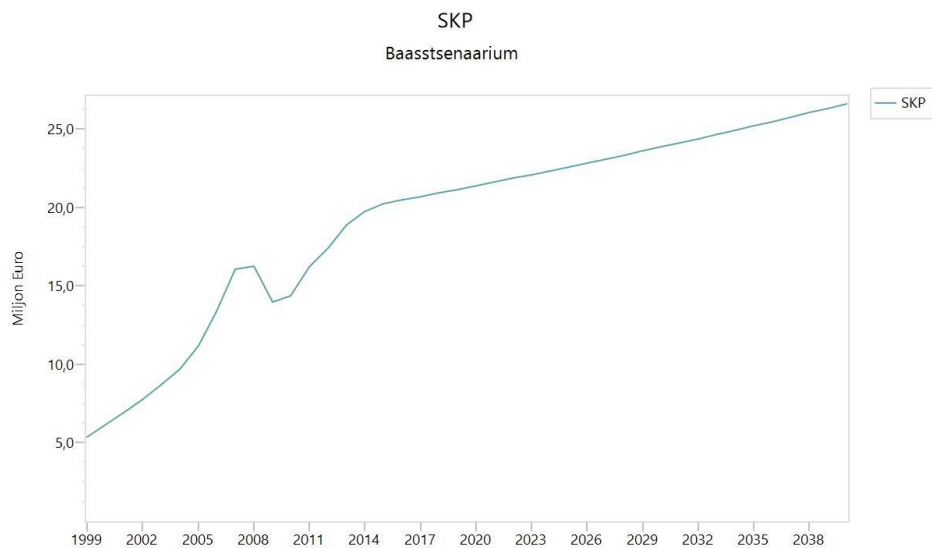
Baasstsenaarium loomiseks on peamiselt kasutatud Statistikaameti andmebaasi aastastatistikat. Baasstsenaariumi tarbimine ja tootmine on pandud sõltuma ajaloolisest statistikast aastast 1999 kuni 2015 kasutades „Growth (HistoricalGrowth)“, sest nimetatud funktsioon kuvab küllaldase täpsusega tarbimise ja tootmise muutusi. Lisatud on järgmised andmeid Statistikaameti põhjal:

- SKP ning rahvaarv
- Tarbimise andmed kütuste kaupa
- Elektri tootmise kaod
- Elektri tootmise omatarve
- Elektri tootmine kütuste kaupa

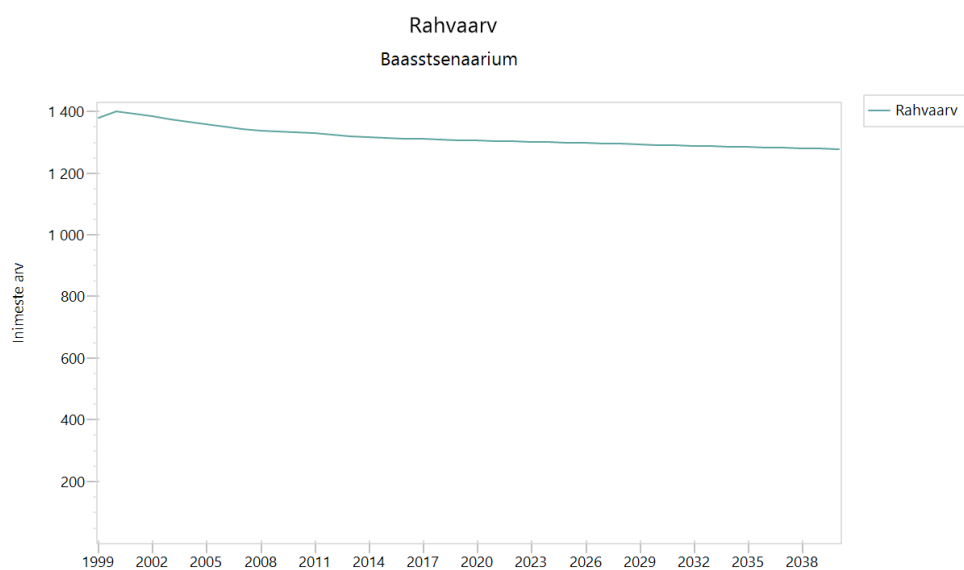
Baasstsenaariumis on SKP kasvuks määratud 1,1% aastas, võttes arvesse 2014. aasta ja 2015. aasta SKP erinevust. [16] Eeldatakse, et SKP kasv jääb kuni stsenaariumi lõpuni samaks. Rahvaarv muutus Eestis 0,19% võrra väiksemaks võrreldes 2014. aasta ja 2015. aasta 1.jaanuar, kuid kui võrrelda muutust 2015. aasta ja 2016. aasta vahel, siis see seal rahvaarv hoopis kasvas 0,20% võrra rändesaldo tõttu. [17] Baasstsenaariumis eeldatakse, et rahvaarv jätkab siiski vähenemist ja määratakse muutuseks 0,11% aastas kuni stsenaariumi perioodi lõpuni.

Tootmise osas on lähtutud Elering AS-i tootmispiisavuse 2015. aasta aruandest. Selle põhjal on koostatud stsenaariumis ette nähtud suletavad tootmisseedmed ja olemasolevate tootmisseedmete võimsuse vähenemine. 2016. aastaks on planeerinud Iru elektrijaamas ühe ploki konserveerimine, mis tähendab 62 MW võrra tootmisvõimsuse vähenemist. Kuni aastani 2023 seotud piirangutega IED leevendusmeetme alusel töötavatele vanadele plokkidele on ette nähtud 619 MW võrra tootmisvõimsuse vähenemine. 2024. aastal on ette nähtud Eesti ja Balti elektrijaamade blokkide sulgemist kokku 619 MW võrra. Baasstsenaariumi lõpuaastaks on määratud põlevkivist elektritootmise lõppemine.

Tootmisressursi tasakaalustamiseks on lisatud aastatel 2016 kuni 2025 tuuleelektrijaamu 1521 MW eest. [18]



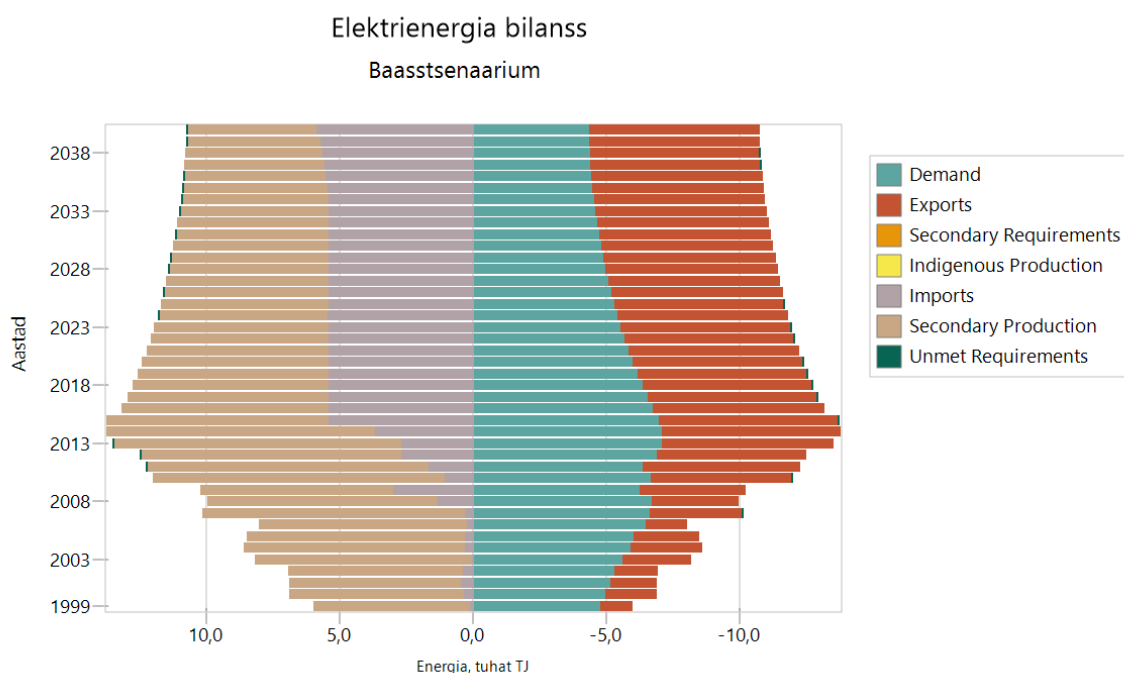
Joonis 4.1 SKP muutus



Joonis 4.2. Rahvaarvu muutus

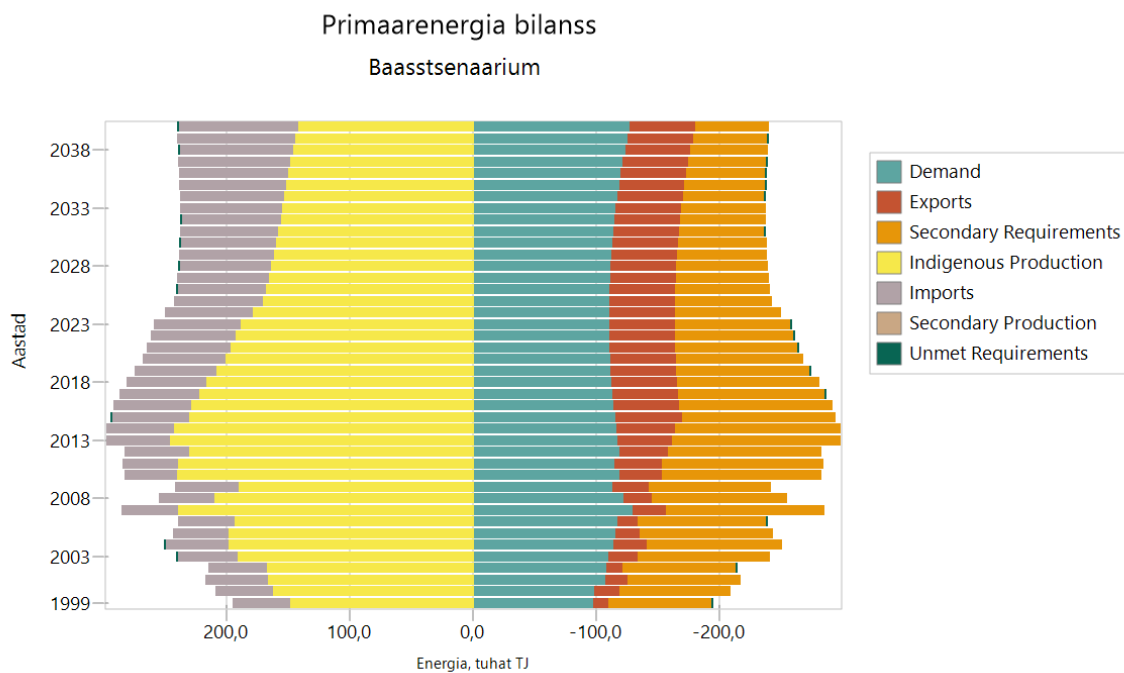
4.1.1 Tulemused

Joonis 4.3 Elektrienergia bilansson näha, et elektrienergia bilansis jääb import aastani 2035 samale tasemele, siis hakkab kasvama ning eksport jääb samale tasemele alates stsenaariumi algusaastast. Elektri tootmine väheneb pidevalt ning 2016. aasta 7,7 tuhat GWh-st on baastsenaariumi lõpuks alles jäänud 4,8 tuhat GWh. Baastsenaariumi lõpuaastal on jätkuvalt situatsioon, kus elektrit eksporditakse rohkem kui tarbitakse. Aastal 2015 on need näitajad ligikaudu võrdsed. Kokkuvõttes on bilanss tasakaalus igal aastal.



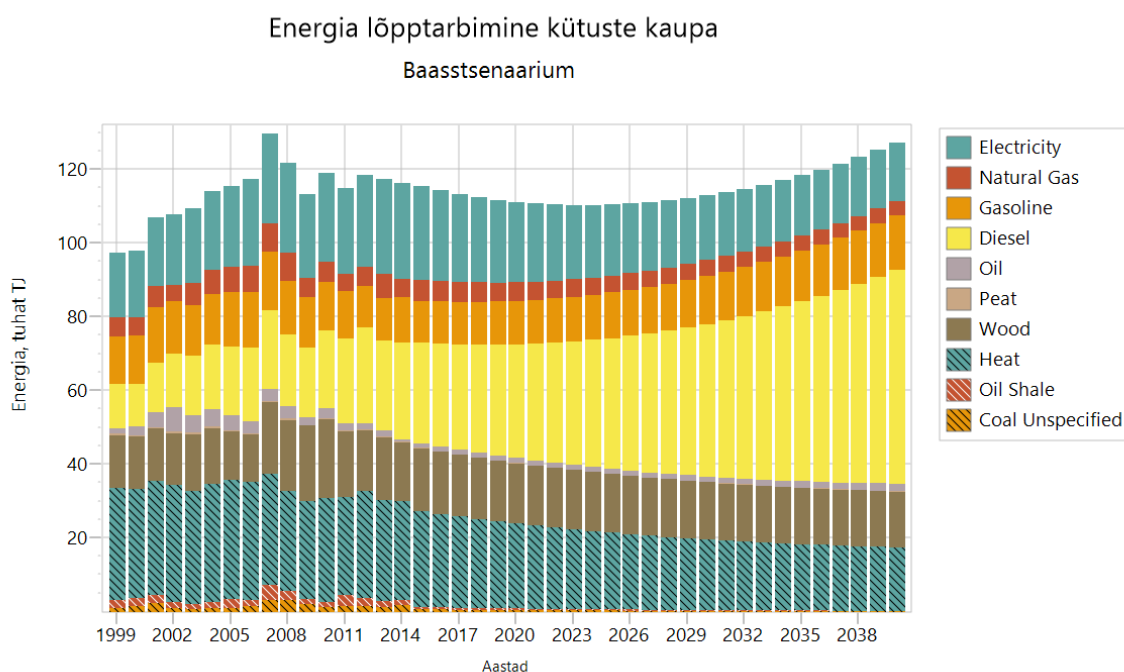
Joonis 4.3 Elektrienergia bilanss

Erinevalt elektri tarbimise vähenemisega elektrienergia bilansi joonisel suureneb energia tarbimine vastavalt joonisele 4.4. Imporditavate kütuste hulk näitab kasvutrendi, samas kui eksport püsib stsenaariumi esimese aasta tasemel. Primaarenergia tootmine on pidevas langustrendis, mida enim mõjutab põlevkivi kütusena kasutatavate elektrijaamade sulgemine.



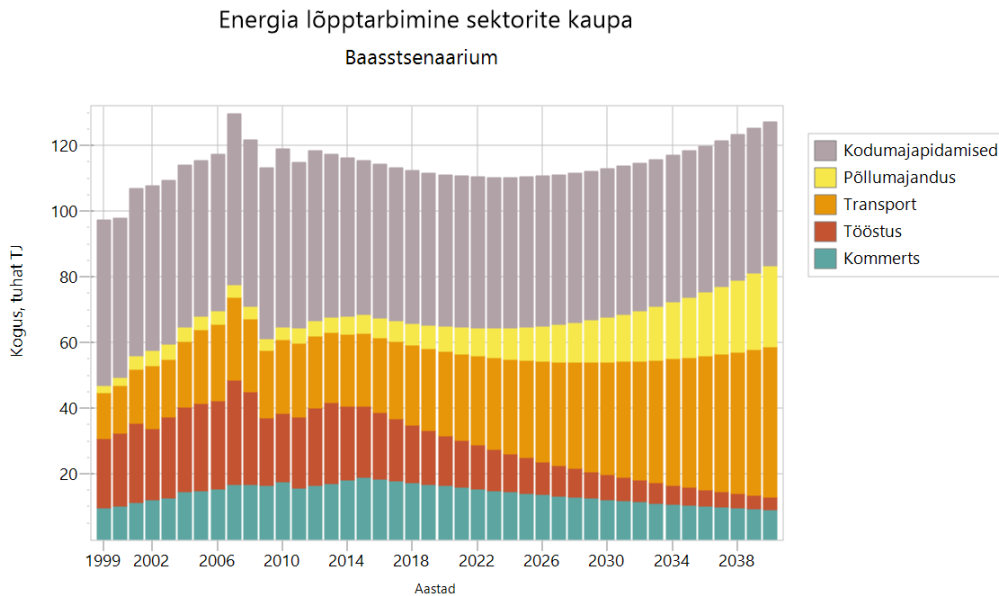
Joonis 4.4 Primaarenergia bilanss

Joonise 4.5 järgi energia lõpptarbimisest hakkab suurenema enim diisli kasutamine. Samal ajal elektri tarbimine väheneb, mida võib põhjendada rahvastiku vähenemisega.



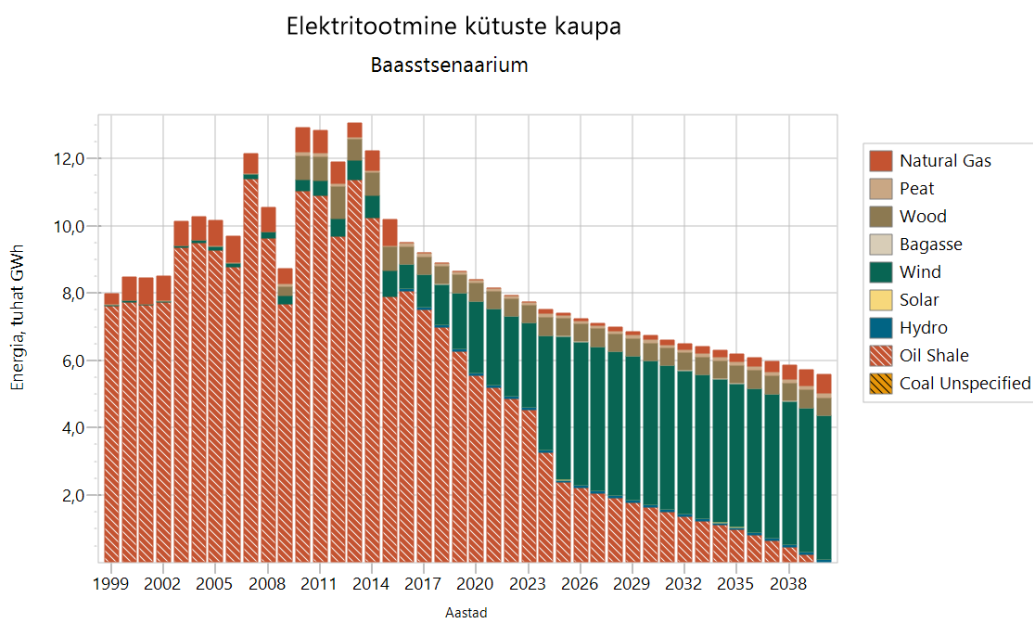
Joonis 4.5 Energia lõpptarbimine kütuste kaupa

Joonisele 4.5 sekundeerub joonis 4.6, mis näitab transpordi sektoris suurimat tarbimise kasvamist. Samuti suureneb energia tarbimine põllumajanduses, kuid väheneb tööstussektoris.



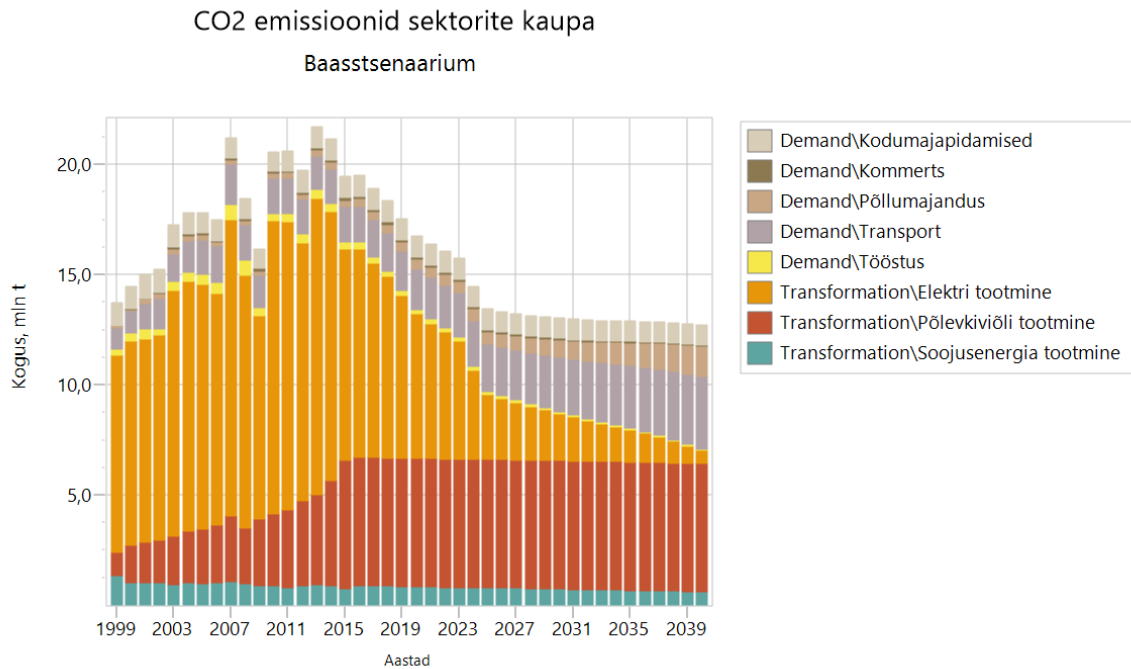
Joonis 4.6 Energia lõpptarbimine sektorite kaupa

Elektri tootmiseks kasutatavate kütuste muutus allub eelduses kirjeldatule nagu selgub jooniselt 4.7. Põlevkivi kasutamise hulk väheb drastiliselt ja samal ajal suurenevad turbast ja tuulest toodetud elektri kogused. Elektri toodetakse 4,6 tuhande GWh võrra vähem kui 2015. aastal.



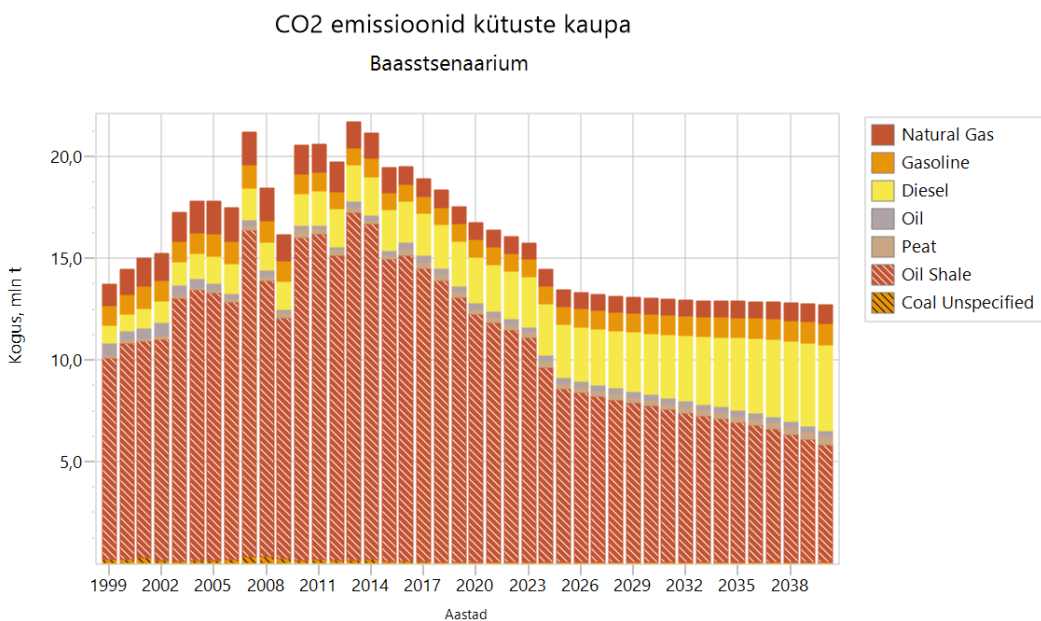
Joonis 4.7 Elektri tootmine kütuste kaupa

Hoolimata rahvastiku vähenemisest, tõusevad transpordi ja põllumajanduse sektorites CO₂ emissioonid. Samal ajal tööstuse ja kommertssektorite emissioonid muutuvad marginaalseks. Vastavad trendid CO₂ emissioonidele sektorite kaupa on joonisel 4.8



Joonis 4.8 CO₂ emissioonid sektorite kaupa

Joonise 4.9 järgi tekitab põlevkivi ka viimasel aastal enim CO₂ emissioone, sest alles jäävad põlevkiviõli tootvad tehased. Diisli poolelt suurenevad emissioonid vastavad joonisele 4.5.



Joonis 4.9 CO₂ emissioonid kütuste kaupa

4.1.2 Järeldused

Vastavalt rahvaarvu langusele ning samaaegselt proportsionaalselt suuremale SKP tõusule, toimuvad suurimad muutused transpordi ja põllumajanduse sektorites. Transpordis kasutatav energia hulk saab suuremaks kodumajapidamistes kasutatavast energiahulgast. Seda protsessi võib ette kujutada nii, et inimesed saavad jõukamaks ning tekib situatsioon, kus igal pereliikmel on auto või põllumeestel mitu traktorit seoses suurenenud tootmisvajadusega välisturgudele.

Põlevkivienergeetika hääbumine elektri tootmise seisukohalt toob kaasa küll CO₂ emissioonide vähenemise, kuid seda asenduv tuuleenergeetika vajab pidevalt uusi investeeringuid. Teisalt, on tuule kasutamine Eesti oludes tõenäoliselt pikas perspektiivis odavam ja suurima tootlikkusega taastuvenergia allikas, kui võrrelda seda näiteks päikesekiirgusega ja hüdroressurssidega Eestis.

Selle stsenaariumi järgi ENMAK2030+ eesmärk saada 50% taastuvatest energiallikatest elektrit lõpptarbimises täitub, mille tõttu täitub ka CO₂ emissioonide prognoositav langustrend 70% võrra. (võrreldes aastaga 1990 -23 mln t).

Hoolimata transpordisektori järsust arengust, jääb Eestis suurimaks CO₂ emissioonide tekitajaks siiski põlevkivi kuni aastani 2040. Põlevkivi kasutamise otstarve on muutunud elektri tootmiselt põlevkiviõli tootmisele ning selle ekspordile.

Akupankade laiaulatuslik integreerimine baasstsenaariumis puudub, kuna eksport jääb samale tasemele alates stsenaariumi algusaastast. 2017.a. seisuga Eesti jaotus- ega põhivõrgus akupankade integreerimist ei toimu ning üleliigne energia müüakse elektriturul. Eestil on välisühendused Soome, Venemaa ja Läti elektrisüsteemiga (ühendusüsteem BRELL), mis hoiavad võrgu stabiilsust. Samas on Elering AS-i tahe saada sõltumatuks Venemaast ja samal ajal suurendada taastuvenergia allikatest toodetava elektri kogust, mis võib põhjustada tulevikus võrgus ebastabiilsust, ning akupankade intregeerimine on sel juhul vajalik.

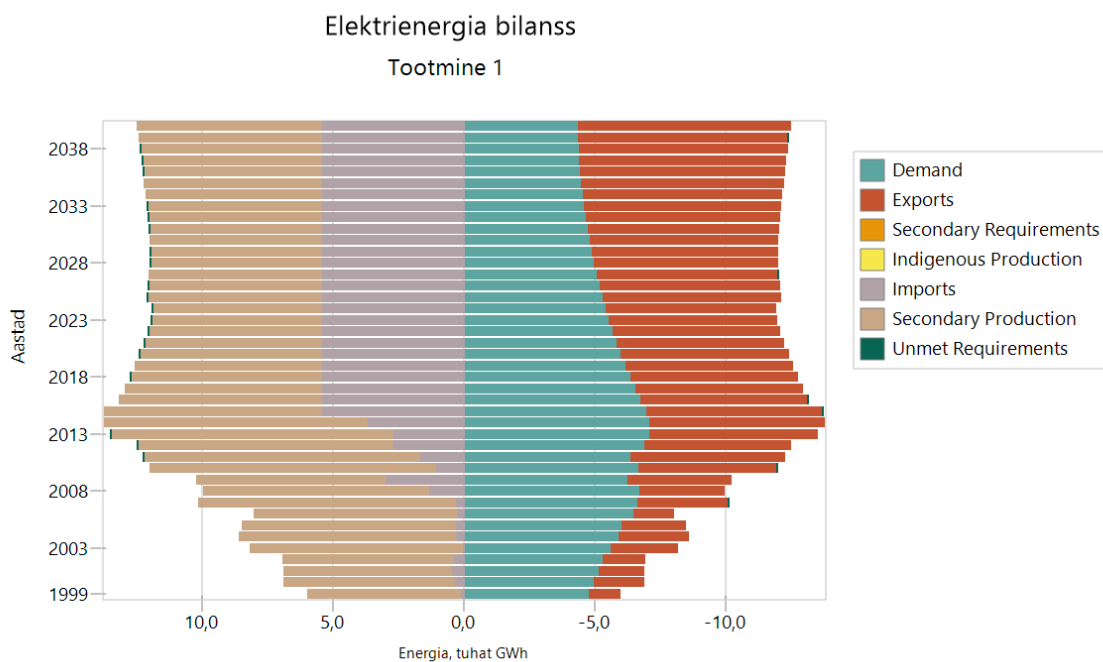
Eesti põhivõrgu Eleringi AS esindaja, strateegiajuhi Kalle Kukke sõnul „Me põhimõtteliselt igati toetame arenguid, mis aitavad kaasa salvestustehnoloogiate arengule ning nende põhiselt teenuste pakkumisele. Teenuste all peetakse silmas paindlikkusteenuseid (bilansi tasakaalustamise, ülekoormuse juhtimise vms eesmärgil), mida vajab nii süsteemihaldur (Elering AS) kui ka jaotusvõrguettevõtjad.“

4.2 Tootmise stsenaarium

Baasstsenaariumis kirjeldatud põlevkivist ja tuulest toodetava elektrienergia installeeritud võimsuste muutus jääb samaks. ENMAK 2020-l on erinevaid eesmärke, mida võiks tootmise stsenaariumide läbiviimisel täita, näiteks taastuvenergia osakaal energia lõpptarbimises peaks moodustama 25% ning taastuvenergia osakaal transpordisektori lõpptarbimises peaks moodustama 10%. [19] ENMAK 2030 võtab näiteks eesmärgiks tootmise poole pealt, et taastuvatest energiaallikatest elektri tootmise moodustamise 50% sisemisest elektri lõpptarbimisest ning imporditava kütuse osakaaluks alla 50% elektri tootmises. [13] Nimetatud eesmärkide täitmine nõuab küllalt agressiivset tuuleenergeetika arendamist Eesti pinnal, kuid sellisele lähenemisele toetudes on tootmise stsenaariumis kuni lõpuaastani tehtud järgmised muudatused installeeritud võimsuste teholoogiates: turvast kütust kasutavate elektrijaamade võimsust suurendanud 22 MW-lt 100 MW-ni, puitu kasutavate elektrijaamade võimsust suurendanud 60 MW-lt 300 MW-ni, biogaasi kasutavate elektrijaamade võimsust suurendanud 2 MW-lt 250 MW-ni, päikseenergiat kasutavate elektrijaamade võimsust suurendanud 0,6 MW-lt 100 MW-ni ning maagaasi kasutavate elektrijaamade võimsust vähendanud 111 MW-lt 10 MW-ni, et vähendada sõltumatust peamiselt maagaasi eksportivast Venemaast. Installeeritud võimsuste muutustest on näha, et võetud on selge suund taastuvate energiaallikate poole ning fossiilsetest kütustest loobutud. Selle tulemusena peaks Eestis installeeritud elektritootmise võimsus jääma aastaga 2015 võrreldes samale tasemele aastal 2040. Vastavad tootmisvõimsuste osakaalud on toodud alljärgneval graafikul.

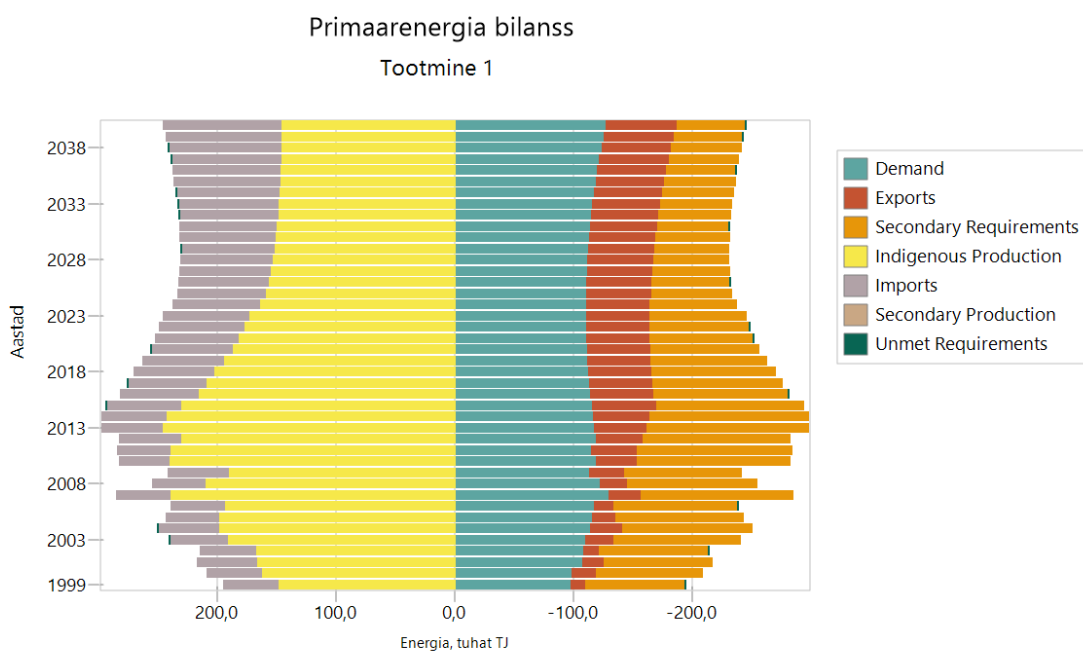
4.2.1 Tulemused

Jooniselt 4.10 on näha, et elektrienergia import jääb samale tasemele ning eksport kasvab 3,3 tuhande GWh võrra, võrreldes omavahel aastaid 2015 ja 2040. Elektri tootmine väheneb küll aastani 2024, kuid hakkab siis taas pikas perspektiivis tõusma. Tootmise stsenaariumi lõpuaastaks on situatsioon, kus elektrit eksporditakse ligikaudu kaks korda rohkem kui tarbitakse. Kokkuvõttes on bilanss tasakaalus igal aastal.



Joonis 4.10 Elektrienergia bilans

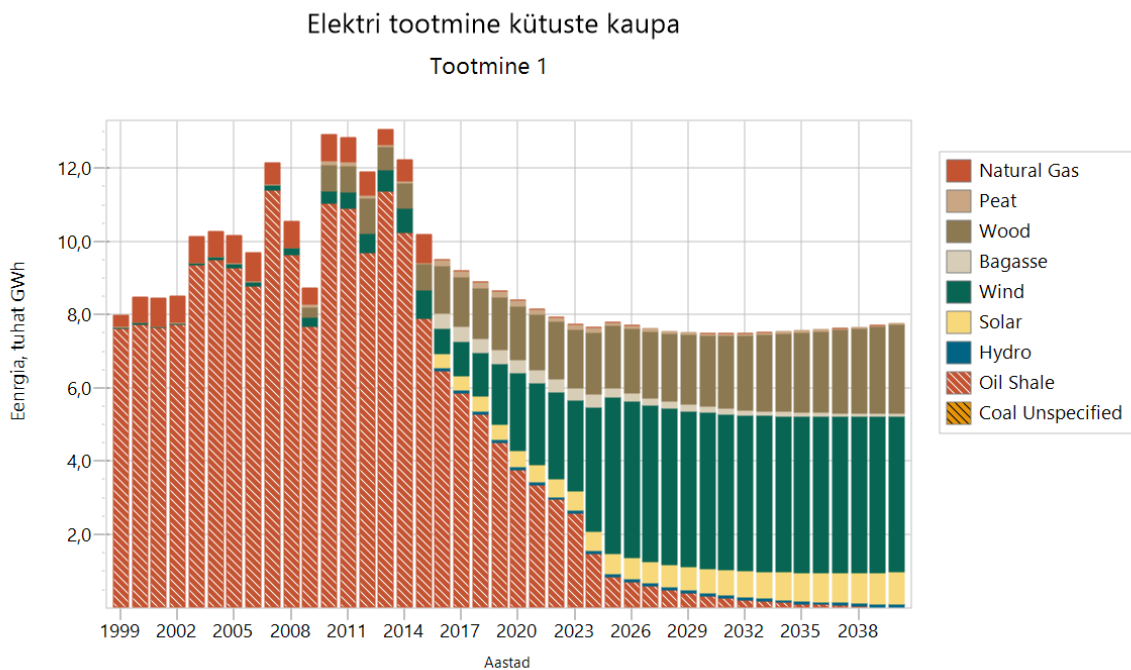
Erinevalt elektri tarbimise vähenemisega, kasvab primaarenergia tarbimine vastavalt joonisele 4.11. Imporditavad kütused kasvavad sarnaselt tarbimisel. Eksport püsib stsenaariumi esimese aasta tasemel. Primaarenergia tootmine on pidevas langustrendis, mida enim mõjutab põlevkivi kütusena kasutatavate elektrijaamade sulgemine. Sama, s viimastel aastatel on näha stabiliseerumist tootmises.



Joonis 4.11 Primaarenergia bilans

Seoses tootmisstsenariumi tarbimisprognooside samale tasemele jäämisega võrreldes baasstsenariumiga, on energia lõpptarbimine kütuste ja sektorite kaupa samad baasstsenariumiga.

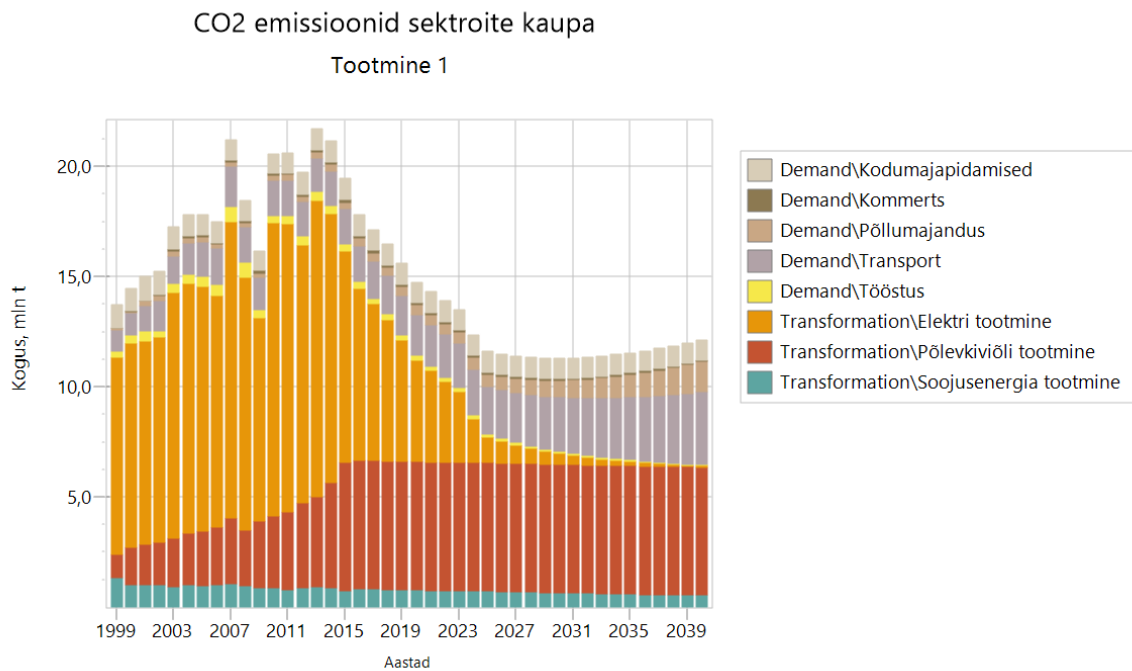
Elektri tootmiseks kasutatavate kütuste muutus allub eelduses kirjeldatud (Joonis 4.12.) Põlevkivi kasutamise hulk väheeb drastiliselt ja muutub nulliks. Samal ajal suureneb tuulest toodetud elektri kogus. Üldine elektri tootmine väheneb tootmise stsenaariumi lõpuks võrreldes 2015. aastaga 2,5 tuhat GWh, kuid näitab kasvutrendi alates aastast 2030. Täendusrikas on ka 1,7 tuhande GWh võrra puitkütusest elektritootmise kasv. Samuti, hakkavad elektrit tootma 100 MW summaarse installeritud võimsusega päikesepaneelid, kokku 0,9 tuhat GWh eest stsenaariumi lõpuaastaks.



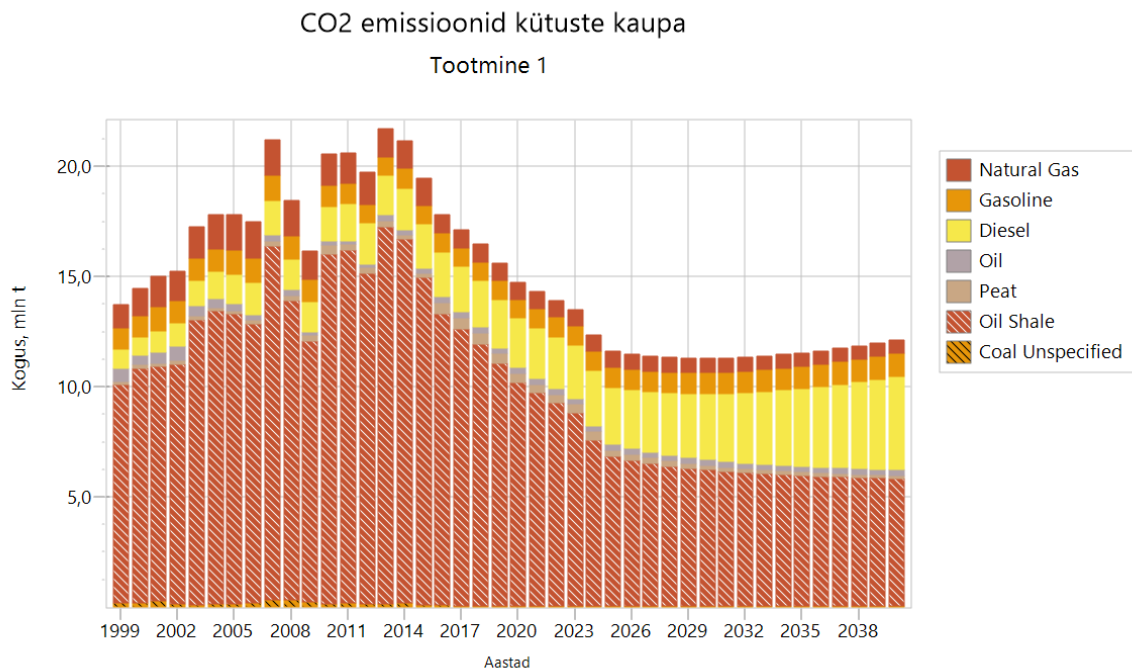
Joonis 4.12 Elektri tootmine kütuste kaupa

Seoses tootmise stsenaariumis tarbimisprognooside samale tasemele jäämisega võrreldes baasstsenariumiga, CO₂ emissioonid on sektorite kaupa ligikaudu samad baasstsenariumiga. Suurima erinevuse võib jooniselt 4.13 järeldada, et seoses põlevkivi märgatava vähenemisega ja selle asendumisel taastuvate energiaallikatega elektri tootmiseks ei tekita elektri tootmine lõpuaastal peaaegu üldse CO₂. Samas, joonise 4.14 järgi tekitab põlevkivi summaarselt viimasel aastal enim CO₂ emissioone, sest jäävad alles põlevkiviõli tootvad tehased. Diisli poolt suurenevad emissioonid vastavad transpordisektori kasvule. Kasvuhoonegaaside

emissioonid vähenevad kuni aastani 2028 ning pärast seda kasvavad mõõdukalt kuni lõppaastani 0,8 miljoni tonni võrra. See on põhjendatud muutustega transpordisektoris.



Joonis 4.13 CO₂ emissioonid sektorite kaupa



Joonis 4.14 CO₂ emissioonid kütuste kaupa

4.2.2 Järeldused

Eesti pindalast poole võtab enda alla mets. Seega on õigustatud puidust kui biomassist elektri tootmine, kuid seda tänaste koguste juures. Vastavalt rahvastiku vähenemisele langeb ka elektri tarbimine, ning stsenaariumi järgi toodetakse rohkem elektri kui vaja. Üleliigne elektrienergia küll eksporditakse ja müüakse elektriturul maha, kuid milleks kulutada seda ühe inim põlve jagu taastuvat energiaressurssi ebaotstarbekalt? Puidu kasutamisel elektri tootmises võiks seda hoopis suunata soojuse tootmisesse ja seeläbi väheneb ka maagaasi import Venemaalt. Samuti, üleliigset energiat võiks salvestada akupankadesse ja kasutada neid tippkoormuse katmiseks.

Rahvusvahelise Energiaagentuuri prognooside järgi elektritootmine aastaks 2050 ei muutu süsinikuvabaks, vaadates aastate 2023-2040 trendi. Tootmise stsenaariumis kirjeldatud ENMAK 2020 eesmärgist suudaks stsenaarium täita taastuvenergia osakaalu energia lõpptarbimise moodustamisel 25%, kuid taastuvenergia osakaalu transpordisektori lõpptarbimises 10% ei suuda stsenaarium täita. ENMAK 2030 eesmärgiks olnud taastuvatest energiaallikatest elektri tootmise moodustamise 50% sisemisest elektri lõpptarbimisest suudab stsenaarium täita.

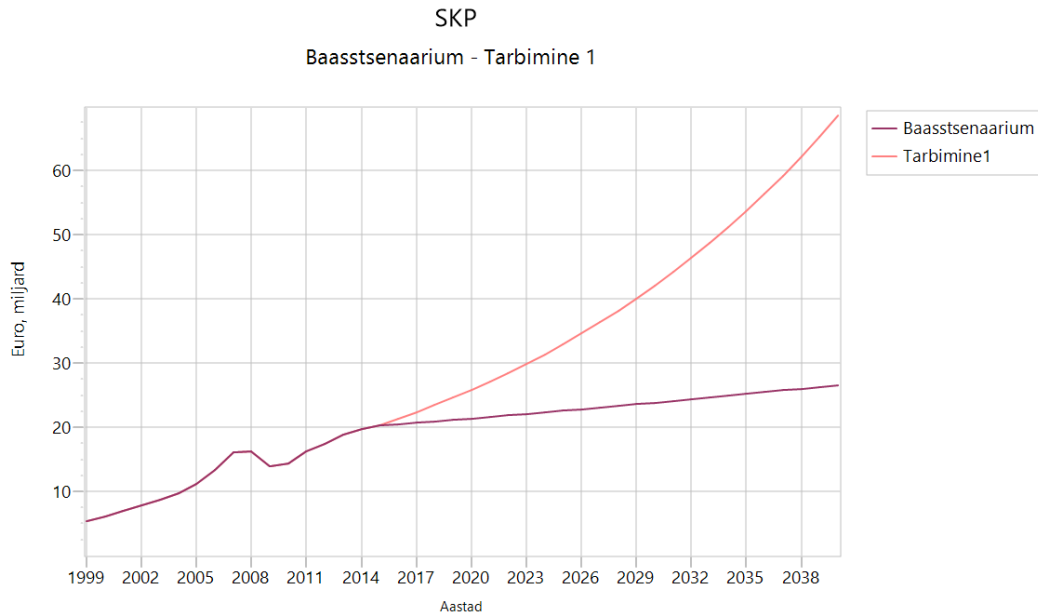
Taastuvenergia kasutust propageeritakse ning nende märkimisväärne toodetava võimsuse kasv toob endaga kaasa akupankade kasutamise. Selleks, et Rahvusvahelise Energiaagentuuri prognoosid aastaks 2050 täituks on vaja seadusandluse poolt soodustavaid meetmeid akupankade kohta. 2017 a. seisuga Eesti Võrgueeskirjas puudub akupanka tähendus elektrivõrgus.

4.3 Tarbimise stsenaarium

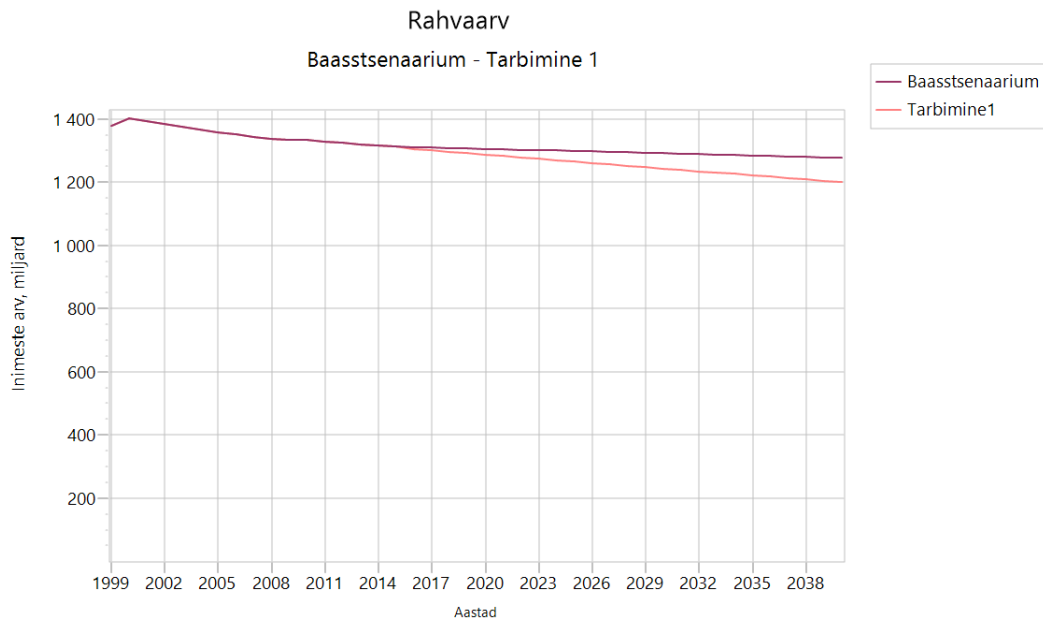
Baasstsenaariumis kirjeldatud põlevkivist ja tuulest toodetava elektrienergia installeeritud võimsuste muutus jääb samaks. Tarbimise stsenaarium on loodud eesmärgiks analüüsida mõju Eesti energeetika harule, mis on tingitud põhilistest makromajanduslikest protsessidest.

Esimese tarbimise stsenaariumi eelduseks on võetud loomulikud majanduslikud ja demograafilised protsessid. Prognoosiks on võetud rahvastiku arvu kahanemine 1, 2 mlni aastaks (vt. joonis 4.16) 2040 ning SKP 5% iga aastane kasv (vt. joonis 4.15). Rahvastiku

arvu tulemus seisneb olemasolevates demograafilises protsessides, kuid toimub kiiremini võrreldes baasstsenaariumiga. SKP kasv on tingitud tehnoloogiamahukase tööstusharude arengul Eesti territooriumil. Direktiivi muutused aitavad suurendada ELi liikmesriikidele SKP ning luua uusi töökohti.



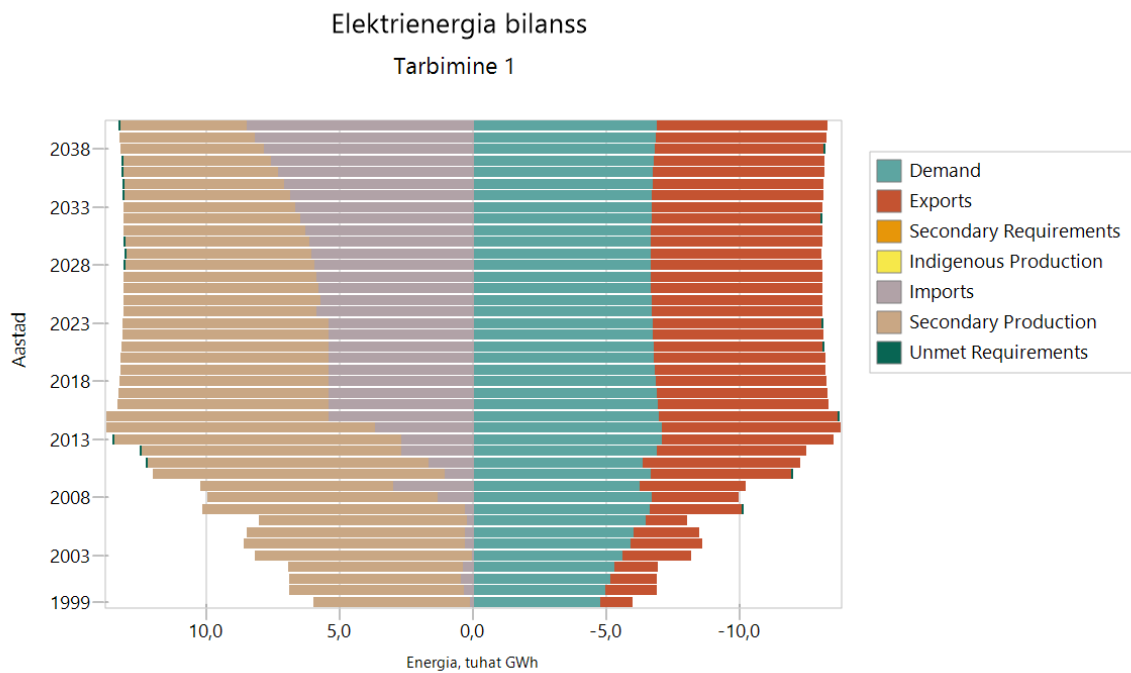
Joonis 4.15 SKP võrdlus baasstsenaariumiga



Joonis 4.16 Rahvaarvu võrdlus baasstsenaariumiga

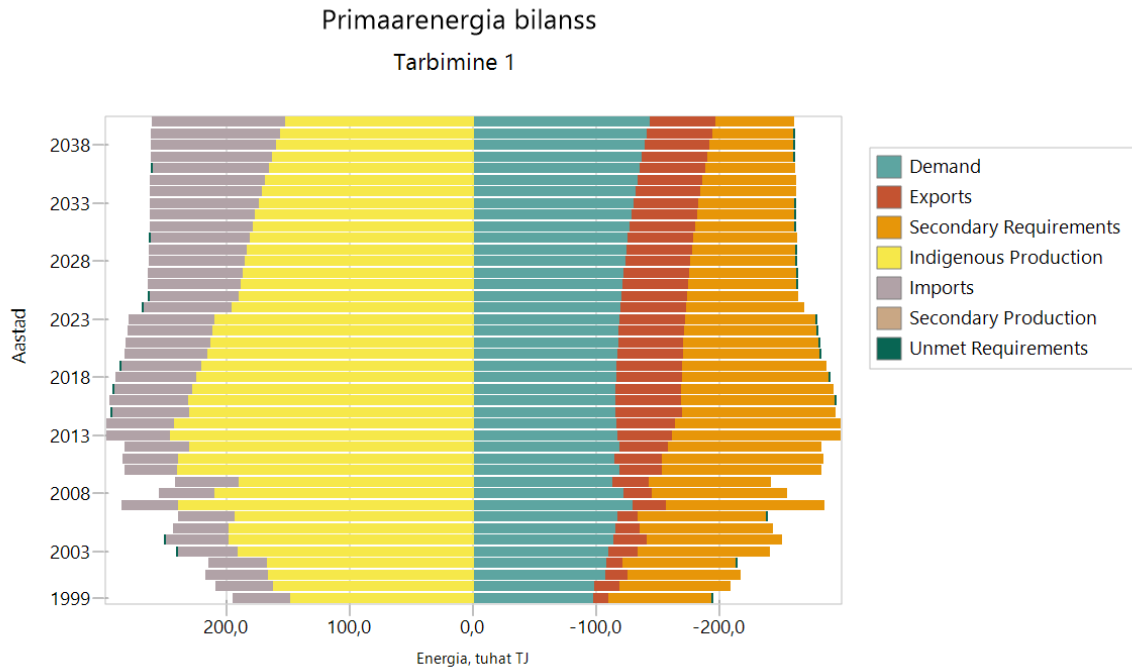
4.3.1 Tulemused

Joonise 4.17 alusel võib järeldada, et nõudlus elektrienergia vastu jääb püsivaks ja et eksport ületab importi kuni aastani 2031, ehk Eesti suudab müüa elektrienergiat väljapoole. Võrreldes baasstsenaariumiga, kus nõudlus elektrienergia vastu väheneb (vt. joonis 4.3), „Tarbimise“ stsenaariumil nõudlus püsib, hoolimata sellele rahvastiku arvu kahanemisele. Nõudluse püsimine on tingitud SKP kasvust. Inimeste sissetulekud kasvavad, sellega kasvab soov rohkem tarbida. Ostetakse rohkem elektriseadmeid, kasutatakse rohkem internetiteenuseid, millega kaasneb elektrienergia suurem tarbimine. Samal ajal põlevikivi kütusena kasutatavate elektrijaamade elektrienergia toodangu kompenseerimiseks, hakatakse elektrit rohkem importima ning import hakkab ületama eksporti alates aastast 2032. Eestist saab elektrienergia impordist sõltuv riik.



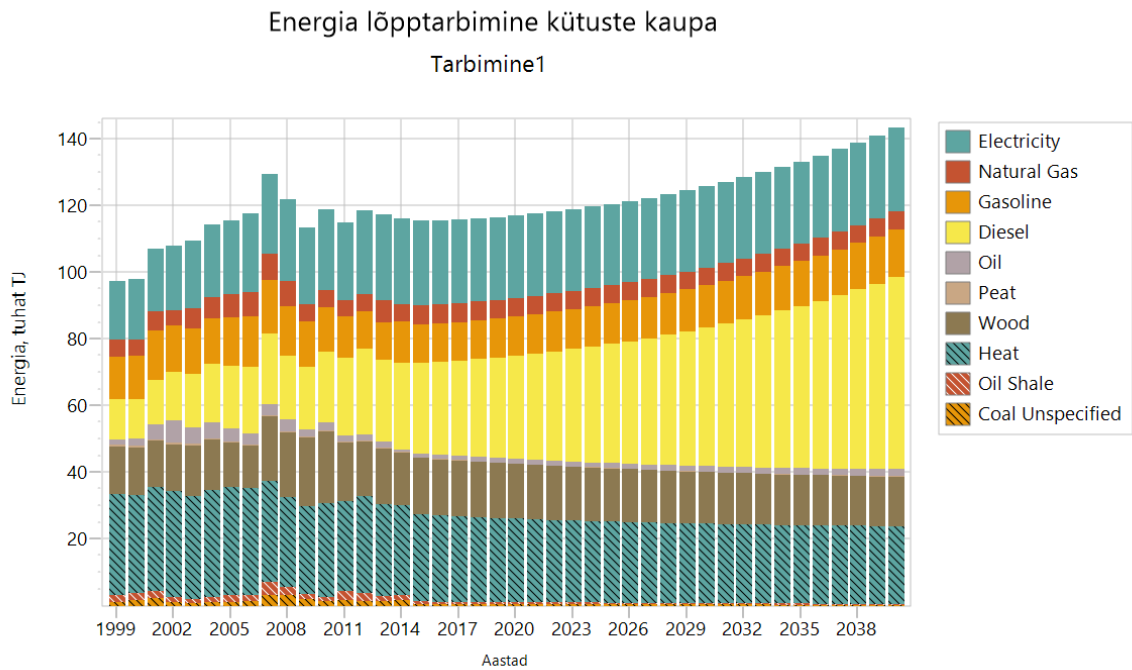
Joonis 4.17 Elektrienergia bilanss

Joonis 4.18 näitab, et primaarressursside tarbimine suureneb. Eksport püsib samal tasemel, kuid primaarressursside import kasvab, samaaegselt kahaneb sisemine toodang. See tuleneb asjaolust, et aastal 2040 põlevikivist enam energiat ei toodeta. Puuduv energia kompenseeritakse impordiga. Primaarenergia tootmine on pidevas langustrendis, mis mõjutab põlevikivi kütusena kasutatavate elektrijaamade sulgemist.



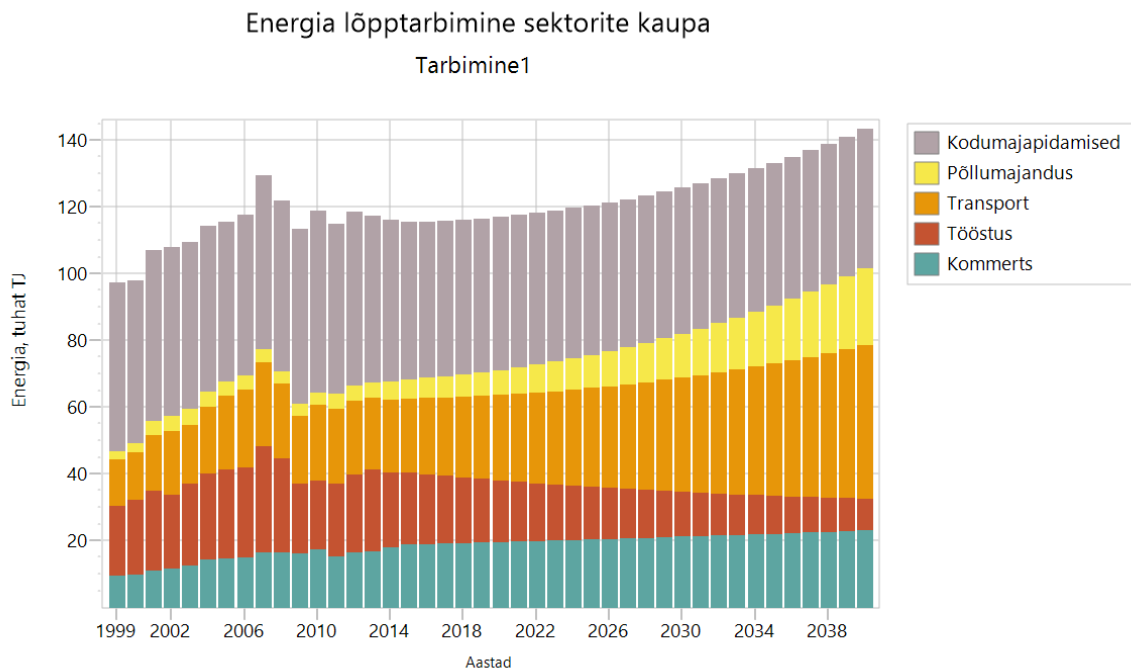
Joonis 4.18 Primaarenergia bilanss

Joonise 4.19 järgi energia lõpptarbimisest hakkab suurenema enim diisli kasutamine. Samal ajal elektri ja soojuste tarbimine püsib samal tasemel, mida võib põhjendada inimeste tulude kasvamisega, vaatamata rahvastiku arvu vähenemisega.



Joonis 4.19 Energia lõpptarbimine kütuste kaupa

Joonisele 4.19 sekundeerub joonis 4.20, mis näitab transpordi sektoris suurimat tarbimise kasvamist. Samuti suureneb energia tarbimine põllumajanduses ja kommertssektoris, kuid väheneb tööstussektoris.

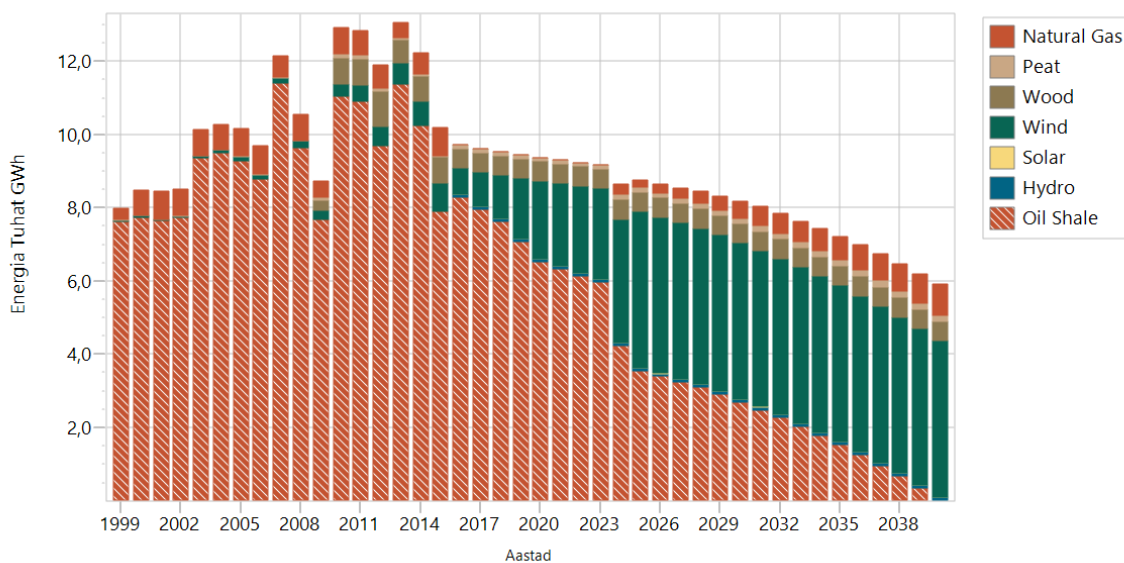


Joonis 4.20 Energia lõpptarbimine sektorite kaupa

Elektri tootmiseks kasutatavate kütuste muutus allub eelduses kirjeldatule (Joonis 4.20) Põlevkivi kasutamise hulk väheneb tunduvalt ja samal ajal suureneb tuulest toodetud elektri kogus. Turbast ja puidust toodetud elektri kogus püsib samal tasemel. Aastast 2024 suureneb maagaasist toodetud elektrienergia. Üldine elektrienergia tootmine väheneb võrreldes 2015 aastaga 4,3 tuhande GWh võrra.

Elektritootmine kütuste kaupa

Tarbimine 1



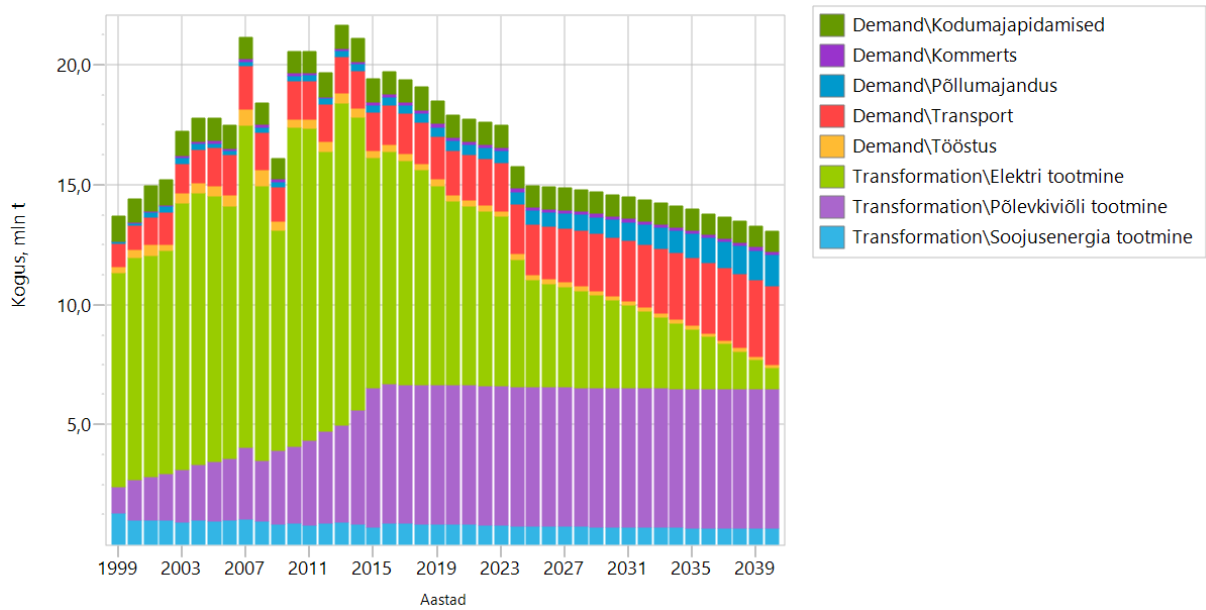
Joonis 4.21 Elektri tootmine kütuste kaupa

Vaatamata rahvastiku vähenemisele, tõusevad transpordi ja põllumajanduse sektorites CO₂ emissioonid. Samal ajal tööstuse ja kommertssektorite emissioonid muutuvad marginaalseks. Nimetatud seosed on kuvatud joonisel 4.21.

Kõige suurema mõju CO₂ emissioonidele avaldub põlevkivi väiksem kasutamine elektrienergia tootmiseks. Vastavad trendid CO₂ emissioonidele sektorite kaupa on kajastatud Joonisel 4.22. Järgmise joonise, Joonise 4.23, järgi tekitab põlevkivi ka viimasel aastal enim CO₂ emissioone, sest põlevkiviõli tootvad tehased jäävad alles.

CO2 emissioonid sektorite kaupa

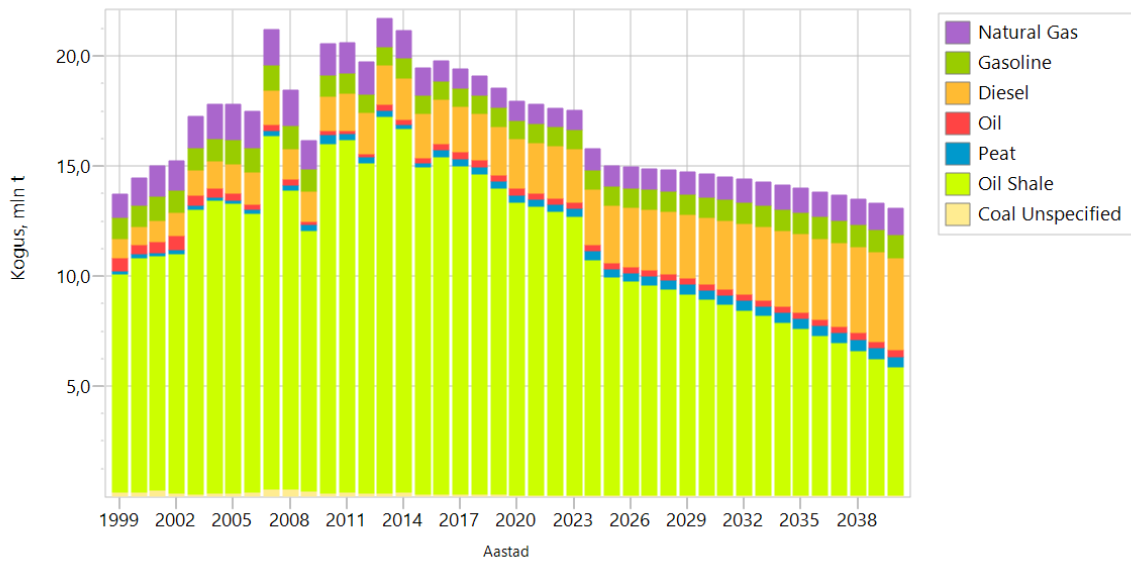
Tarbimine 1



Joonis 4.22 CO₂ emissioonid sektorite kaupa

CO2 emissioonid kütuste kaupa

Tarbimine 1



Joonis 4.23 CO₂ emissioonid kütuste kaupa

4.3.2 Järeldused

Tarbimise mudeli alusel võib järeldada, et SKP trend mängib olulist rolli energeetikas. Modelleerides rahavaarvu langust ja samaaegselt SKP kasvu, tulemused näitavad energia lõpptarbimise kasvu transpordi sektoris, põllumajanduses ja ärisektoris. Seda protsessi võib ette kujutada nii, et inimesed saavad jõukamaks ning tekib situatsioon, kus tarbitakse rohkem kaupu, millega kaasneb transpordikulude kasv. Ostetakse rohkem sõiduautosid, sõidetakse rohkem, sellega kaasneb kütusetarbimise kasv. Ostetakse rohkem toitu/käitakse rohkem restoranides, sellega kaasneb põllumajanduse toodangumahu kasv. Nõutakse rohkem teenindust. Kõik need faktorid on tingitud SKP kasvust ja avaldavad mõju energia lõpptarbimisele.

Põlevkivienergeetika hääbumine elektri tootmise seisukohalt toob kaasa küll CO₂ emissioonide vähenemise, kuid seda asenduv tuuleenergeetika vajab pidevalt uusi investeeringuid. Teisalt, tuule kasutamine Eesti oludes on tõenäoliselt pikas perspektiivis odavam ja suurima tootlikkusega taastuvenergia allikas, kui võrrelda seda, näiteks, päikesekiirgusega ja hüdroressurssidega Eestis.

Vaatamata transpordisektori ja põllumajanduse järsule muutumisele, jääb Eesti pinnal suurimaks CO₂ emissioonide tekitajaks siiski põlevkivi aastal 2040. Rahvusvahelise Energiagentuuri prognoosid aastaks 2050 olla süsinikuvaba ei õnnestu. Vaadates mudeli oleva CO₂ graafikut aastate 2030-2040 erinevust on vähe tõenäoline, et aastaks 2050 emissioonid langevad nullini.

ENMAK2030 eesmärk saada 50% taastuvatest energiaallikatest elektrit lõpptarbimises ja vähendada heitkoguseid vähemalt 70% täitub, ning sellega täitub ka muudetud Direktiivi eesmärk. Akupankade lai kasutamine antud stsenaariumis puudub, kuna elektrienergia bilanssi jägri on näha, et Eestist saab impordist sõltuv riik.

4.4 Kokkuvõte

Igapäevasteks olulisteks otsuste vastuvõtmiseks on stsenaariumi koostamine hädavajalik, sest see võimaldab luua pildi võimalikest tuleviku lahendusest, ning aitab vältida vigu või liigseid investeeringuid. Sel juhul peab olema tagatud stsenaariumite piisav täpsus, kuna tegu on siiski teooria rakendamisega.

Töö eesmärgiks oli kasutada LEAP-i Eesti energiasüsteemi kirjeldamisel ja mudelite koostamisel. LEAP tarkvara on ülesehituselt lihtne ja kasutajasõbralik, kuid algandmete leidmine või nende teisendamine LEAP tarkvarale sobivale kujule on keeruline. Samuti, jääb kohati selgusetuks, millised sisendandmed on olulised ja millised mitte. Sellest omakorda sõltub tulemuste täpsus. Tarkvara kasutajalt eeldatakse vaikimisi, justkui ta tunneks erinevaid modelleerimise viise ja matemaatilisi põhifunktsioone. Suure plussina võib selle tarkvara puhul märkida tulemuste graafikute kujundamise mitmekülgust.

Erinevate stsenaariumite loomise ja nende mõistmise osas rikastas tehtud töö energeetikaalast maailmapilti. Tihtilugu ei kuvanud stsenaarium koheselt reaalsesse minevaid tulemusi, ning stsenaariumi lähteandmetes oli tarvis muudatusi läbi viia, mis eeldas omakorda tarkvara tundmaõppimist.

Loodud kahe Eesti energiasüsteemi stsenaariumi kohta tulid välja mitmed huvitavad tähelepanekud. Tarbimise stsenaariumis, vaatamata elanikkonna vähenemisele, on näha, et SKP kasv avaldab mõju lõppenergia tarbimise kasvule. Antud stsenaariumi puhul Eestist saab impordist sõltuv riik, kuid tootmise stsenaariumis elektrienergiat eksporditakse ligikaudu kaks korda rohkem. Kõikide stsenaariumite puhul täituvad ENMAK'i eesmärgid ning Direktiivi muudatuste poolt eesmärgid. Rahvusvahelise Energiaagenturi eesmärk saada aastaks 2050 süsinikuvabaks on vähe tõenäoline. Kõige reaalsem tulevikustsenaarium on baasstsenaarium, sest reaalselt lähtudes Elering AS-i tootmispiisavuse aruandest väheneb põlevkivist toodetava elektri kogus ja suureneb tuuleenergeetika osakaal. Antud stsenaarium tähendab Eestile vähem kulutusi elektritootmiseseadete rajamiseks (sh akupankade integreerimiseks).

Kui Eesti seab enda eesmärgiks saada sõltumatuks Venemaast ning suurendada taastuvenergiaallikatest toodetud elektrit, siis akupankade integreerimine sel juhul aitab tasakaalustada võimsuse kõikumist ja hoida pinge stabiilsust, kui häiringud ja kõrvalekalded toimuvad. Akupankade vajadust tõestab tootmisstsenaarium, kus on taastuvatest energiaallikatest elektri tootmine moodustab 50%.

Eesti põhivõrgu Eleringi AS esindaja, strateegiajuhi Kalle Kukke arvates, Elering AS igati toetab salvestustehnoloogia arengut, kuid nende kasutuselevõtt peab nii tootjatel kui tarbijatel vastavalt maksimeerima kasumit tootmisest või minimeerima kulusid tarbimisele.

Lõputöö kokkuvõte

Lõputöö eesmärgiks oli uurida akupankade võimalikku kasutust Eesti õigusruumis ja elektrisüsteemis ning leida vastust lahendamisele kuuluvatele küsimustele. Eesmärgid on täidetud ning töö käigus küsimustele vastatud.

Selles töös on antud ülevaade olemasolevatest energiasalvestite viisidest ja salvestustehnoloogiatest. Nende hulka kuuluvad: mehaaniline, keemiline, elektrikeemiline, elektristaatiline ja -magneetiline energiasalvestusviisid. Eesti elektrivõrgule sobiks elektrokeemiline salvestusviis, teisisõnu akupatareid. Eesti *off-grid* lahendustes on juba kasutusel pliiakud (geelakud), selle kõrge kasuteguri (75-85%) ja madala hinna eelise tõttu (154-446 €/kW). Need faktorid mängivad olulist rolli akupanga valimisel ja integreerimisel võrku. Eesti põhivõrgu Elering AS ja jaotusvõrgu Elektrilevi OÜ esindajad on maininud, et akupankade integreerimisel võrku on tähtis hinnata seadmete tasuvust, nende integreerimine peab nii tootjatele kui tarbijale maksimeerima kasumit või minimeerima kulusid. Eestis on akupankade teema tõusnud viimaste aastate jooksul aktuaalseks, kuid veel neid võrgus laiaulatuslikult ei kasutata.

Tuginedes teaduslikele artiklitele, töös on kirjeldatud salvestite potentsiaalne tehniline ja majanduslik kasu neid võrku integreerides. Energiasalvestite detailsel analüüsil, sealhulgas turuanalüüs, tõstakse esile mitmeid positiivseid aspekte, näiteks, akupanga võime salvestada elektrienergia madalakoormuste perioodide jooksul, ehk madalate hinnadega ning tippkoormustel antud energia müüakse kallima hinnaga ära.

Tähelepanu on pööratud salvestite tehnilisele poole, on toodud välja salvestite tähtsamad omadused ja eelised. Seadmete võime salvestada, muuta võrku tõhusamaks ja töökindlamaks, on oluline eelis tuleviku elektrivõrgule. Elektrisalvesteid kasutatakse mitmete elektrivõrguga seotud nõuete tagamiseks ja probleemide lahendamiseks.

Eesmärk oli analüüsida akupankade mõju ja vajadust Eesti jaotusvõrgule. Aluseks on võetud Comillas Pontifical Ülikoolis (Hispaania) tehtud analüüs ja on võrreldud Eesti olukorraga. Analüüsiga on jõutud järeldusele, et seisuga 2017 akupangad ei ole veel majanduslikult elujõulised kasutamaks neid madal- ja keskpinge alajaamade tippkoormuse vähendamiseks, kuna nende eluiga on veel liiga lühike ja hinnad jätkuvalt kõrged. Kuid see tehnoloogia ja sektor arenevad väga kiiresti ja, võimalik, et viie aasta pärast, pakuvad erinevaid võimalusi elektrisüsteemide murekohtade lahendamiseks. Tuginedes teadusartiklitele, võib väita, et

akupankade kasutamine on kasulikum linnas võrreldes linnalähedaste ja maal asuvate piirkondadeaga. Juhul, kui akupangad on paigutatud kesk- ja madalpinge alajaamadesse, siis on sääst suurem kui kasutada akusid keskpingevõrgus. See tuleneb sellest, kui madalpinge ja keskpinge tarbijate tippkoormus ei kattu ühele ajale. EL on juba teinud samme selleks, et akupanka integreerida, kuid Eesti analüüs näitab, et seaduses on vastav samm tegemata. Lõputöö autor on pakkunud enda poolt välja akupanga tähenduse määramise. Samuti, on teinud ettepaneku akupankade tehnilistele nõuetele kirjeldamiseks Eesti õigusruumis.

Eelmise aasta lõpus väljastati Euroopa Liidu poolt Energeetika Direktiivi muudatused ja antud töös on uuritud nende muudatuste põhipunkte. Nendeks on: eneriatõhususe parandamine, taastuvenergiaallikate osakaalu suurendamine ja tarbija rahulolu. Nende rakendamine avaldab otsene ja tugev mõju riigi arengule. Energia efektiivsus mõjub hästi ka inimeste tervisele vähendades õhusaastmist ja kasvuhoonegaaside heitkoguseid ja seeläbi parandades õhu kvaliteeti. Tarbijatest on saamas puhtale energiale ülemineku juhid: uued tehnoloogiad nagu „arukad võrgud“, „targad majad“, päiksepaneelid katustel ja salvestussüsteemid võimaldavad energiatarbijatel tegutseda aktiivselt elektriturul. Lisaks, kogu energia ja kliimapakett 2030 suurendab ELi sisemajanduse koguprodukti kuni 1% ning loob kuni 900 tuhat uut töökohta. Akupankade integreerimine võrku aitab Eestis Euroopa Liidu poolt seatud eesmärkide saavutamisel, kuid veel lähiaastatel ei ole majanduslikult otstarbekas.

Lõputöös on antud ülevaade ka Eesti Pikaajalise energiamajanduse arengukava 2030+ (ENMAK2030+) eesmärkidest. ENMAKi mõned eesmärgid on ELi poolt pakutavatest kõrgemad, taastuvenergia allikatest osakaal elektri lõpptarbimises täideti Eesti poolt juba 2015. aastal.

Töö viimases peatükis on koostatud LEAP mudelit: baasstsenaarium Eesti energiasüsteemi kohta, mille põhjal koostatakse tarbimise ja tootmise stsenaariumid. Igapäevases elus otsuste vastuvõtmiseks on stsenaariumi koostamine hädavajalik, sest see võimaldab silme ette luua pildi võimalikest tuleviku lahendusest, aitab vältida vigu või liigseid investeeringuid. Sellisel juhul peab olema tagatud stsenaariumite piisav täpsus, kuna tegu on siiski teooria rakendamisega.

Kõige reaalsem tulevikustsenaarium on baasstsenaarium, sest lähtudes Eleringi tootmispiisavuse aruandest väheneb põlevkivist toodetava elektri kogus ja suureneb tuuleenergeetika osakaal. See stsenaarium tähendab Eestile vähem kulutusi elektritootmisseedete rajamiseks. Kui Eesti seab enda eesmärgiks saada sõltumatuks

Venemaast ja suurendada taastuenergiaallikatest toodetud elektrit, siis akupankade integreerimine sel juhul aitab tasakaalustada võimsuse kõikumist ning hoida pinge stabiilsust, kui toimuvad häiringud ja kõrvalekalded.

Antud töö tulemusena sai tõestatud, et akupankade kasutus jaotus- ja põhivõrgus on praeguseks majanduslikult ebaotstarbekas, kuna nende eluiga on veel liiga lühike ja hinnad jätkuvalt kõrged. Kuid tehnoloogia sektor areneb kiiresti ja Eesti suurimad võrguettevõtted nagu jaotusvõrk Elektrilevi OÜ ja põhivõrk Elering AS toetavad salvestustehnoloogiate arenguid.

Kirjandus

- [1] Elina Rebecka Rikkas. Aalto University, Mechanical Engineering Department. Individual study report, part 2. "Electrical Storages" 2017.
- [2] Алексеев Б. А., „Применение накопителей энергии в электроэнергетике, *Электро* 1/2005, 2005.
- [3] Link S., Hõimoja H., Drovtar I., Rosin A., *Energiasalvestid ja -salvestustehnoloogiad*, Tallinn, Tallinna Tehnikaülikool, 2015.
- [4] SMA Solar Technology AG, „Sunny Portal,“
[WWW]. <https://www.sunnyportal.com>. (14.05.17).
- [5] EASE European Association for Storage of Energy, Sodium-Nickel-Chloride Battery, EASE.
- [6] Lopes Ferreira H., Fulli G., Kling W. ja Pecas Lopes J., „Storage Devices impact on electricity distribution, *21st International Conference on Electricity Distribution*, 2011.
- [7] Ibrahim H., Beguenane R., Merabet A., Technical and financial benefits of electrical energy storage.
- [8] Universidad Pontificia Comillas - IIT, Analysis of the impact of battery storage on power distribution systems, *23rd International Conference on Electricity Distribution*, Hispaania, 2015.
- [9] Euroopa Komisjon, Commission proposes new rules for consumer centred clean energy transition, 30.11.2016.
[WWW]. <http://ec.europa.eu/energy/> (23.03.17).
- [10] Euroopa Komisjon, Putting energy efficiency first: consuming better, getting cleaner - MEMO/16/3986, Brüssel, 2016.
- [11] Eesti Taastuvenergia Koda, Taastuvenergia aastaraamat, 2015.
- [12] Euroopa Komisjon, Achieving global leadership in renewable energies-

MEMO/16/3987, Brüssel, 2016.

- [13] Majandus- ja kommunikatsiooniministeerium, ENMAK 2030+ .Energiamajanduse riiklik arengukava aastani 2030+, Tallinn, 2016.
- [14] Eurostat, „Share of renewable energy in gross final energy consumption (t2020_31),“ [WWW]. <http://ec.europa.eu/eurostat/> (01.04.17)
- [15] Euroopa Komisjon, Providing a fair deal for consumers - MEMO/16/3961, Brüssel, 2016.
- [16] Statistikaamet, „2015. aastal kasvas Eestimajandus 1,1%,“ [WWW]. <https://www.stat.ee/pressiteade-2016-029> (03.12.16)
- [17] Statistikaamet, „Rahvaarvu kasvamist mõjutas välisränne,“ [WWW]. <https://www.stat.ee/pressiteade-2016-048>. (03.12.16)
- [18] Elering, Eleringi tootmispiisavuse aruanne, 2015.
- [19] Majandus- ja kommunikatsiooniministeerium, ENMAK2020, Energiamajanduse riiklik arengukava aastani 2020.
- [20] European Environment Agency, „Share of renewable energy in gross final energy consumption,“ 15 detsember 2016.
[WWW].<https://www.eea.europa.eu/> (06.04.17)

Lisa 1. Jooniste ja tabelite nimekiri

Tabel 1.1 Akupatareide tehnilised omadused

Joonis 1.1 Hüdroakumulatsioonijaam [3]

Joonis 1.2 SÕES tööpõhimõte [1]

Joonis 1.3 Hooratas energiasalvesti tööpõhimõte [1]

Joonis 1.4 Ülikondensaatori energiasalvesti tööpõhimõte

Joonis 1.5 Ülijuhtiva energiasalvesti lihtsustatud ehitus [3]

Joonis 1.6 Vesinik – energiasalvesti tööpõhimõte [1]

Joonis 1.7 Sünteetilise gaasi salvesti tootmise protsessi tööpõhimõte [1]

Joonis 1.8 Pliiaku tööpõhimõte [1]

Joonis 1.9 Nikkel-kaadmiumaku tööpõhimõte [1]

Joonis 1.10 Väävel-naatriumaku tööpõhimõte [1]

Joonis 1.11 Naatrium nikkelkloriid aku tööpõhimõte [1]

Joonis 1.12 Liitium-ioonakud tööpõhimõte [1]

Joonis 1.13 Vanaadium- redoksaku tööpõhimõte [1]

Joonis 1.14 Polüsulfiid-bromiidaku tööpõhimõte [3]

Joonis 1.15 Tsink-bromiidaku põhimõte [1]

Joonis 2.1 Erinevate energiasalvestite kasutusala

Joonis 2.2 Salvestite lai kasutusala [7]

Joonis 3.1 Investeeringud taastuvenergia sektorisse (mln. eurot) [11]

Joonis 4.1 SKP muutus

Joonis 4.2. Rahvaarvu muutus

Joonis 4.3 Elektrienergia bilanss

Joonis 4.4 Primaarenergia bilanss

Joonis 4.5 Energia lõpptarbimine kütuste kaupa

Joonis 4.6 Energia lõpptarbimine sektorite kaupa

Joonis 4.7 Elektri tootmine kütuste kaupa

Joonis 4.8 CO₂ emissioonid sektorite kaupa

Joonis 4.9 CO₂ emissioonid kütuste kaupa

Joonis 4.10 Elektrienergia bilanss

Joonis 4.11 Primaarenergia bilanss

Joonis 4.12 Elektri tootmine kütuste kaupa

Joonis 4.13 CO₂ emissioonid sektorite kaupa

Joonis 4.14 CO₂ emissioonid kütuste kaupa

Joonis 4.15 SKP võrdlus baastsenaariumiga

Joonis 4.16 Rahvaarvu võrdlus baastsenaariumiga

Joonis 4.17 Elektrienergia bilanss

Joonis 4.18 Primaarenergia bilanss

Joonis 4.19 Energia lõpptarbimine kütuste kaupa

Joonis 4.20 Energia lõpptarbimine sektorite kaupa

Joonis 4.21 Elektri tootmine kütuste kaupa

Joonis 4.22 CO₂ emissioonid sektorite kaupa

Joonis 4.23 CO₂ emissioonid kütuste kaupa