

ANALÜÜS JA ETTEPANEKUD ENERGIASALVESTUSE TURU KÄIVITAMISE KOHTA

Analüüsi autor: Peep Siitam, detsember 2021a.

Sisukord

Lühikokkuvõte.....	2
1. Salvestusvajadusest, salvestusvajaduse sõltuvus mittejuhitava elektritootmise (VRE) osakaalust ning VRE mõjust elektrihindadele.....	2
2. Salvestusteenused, mis toetavad elektrisüsteemi toimimist tervikuna, teenuste kaupa koos rakendatavate tehnoloogiatega.....	5
3. Salvestustehnoloogiate põhiparameetrid	9
4. Energiasalvestuse maksumus.	11
5. Salvestuse maksumust mõjutavad pikaajalised mõjud.	16
6. Salvestuse mõju elektritarbija kulutustele.....	18
7. Salvestuse sotsiaal-majanduslikud mõjud.	19
8. Salvestuslahenduste turutõrked.....	19
9. Ettepanekud energiasalvestuse turu käivitamiseks.....	21

Lühikokkuvõte.

Eestis asuvate salvestuslahenduste suuremahulisele kasutuselevõtule (hinnanguliselt ca 1500MW, 30GWh) pole täna tõsiseltvõetavat alternatiivi. Energiasalvestite kasutuselevõtt Eesti elektrisüsteemis vähendab tarbijate kulutusi elektrienergiale, vähendab elektritootmise õhuheitmeid, parandab varustuskindlust, suurendab maksutulude laekumist ja parandab läbi pikaajaliste hinnariskide maandamise Eesti elanike toimetuleku võimalusi ning eesti investeerimiskeskonda.

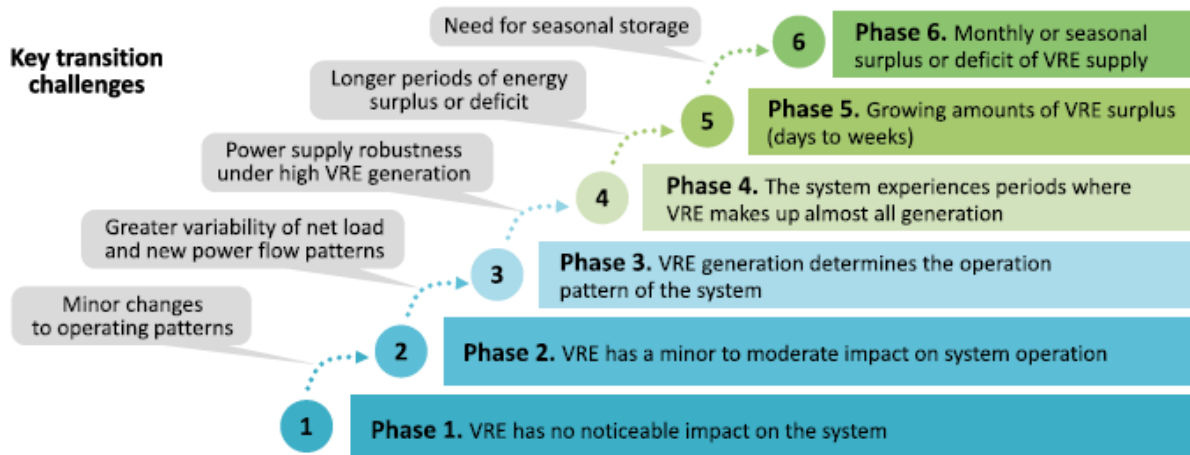
Salvestuslahenduste kasutuselevõtuks on rida peamiselt administratiivseid takistusi, mille kõrvaldamiseks pakub töö lahendusi.

Analüüs ja ettepanekud pole mõeldud struktureeritud ja vormikohase uuringuna, vaid materjalina, mida tuleks pidevalt ajakohastada.

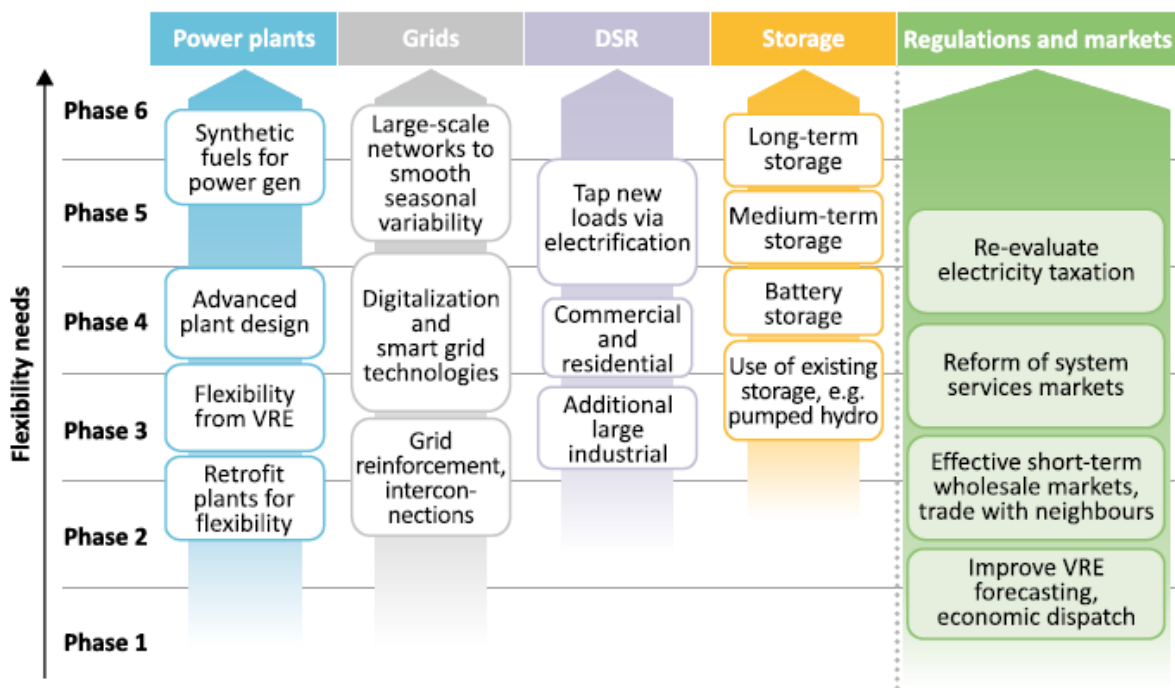
1. Salvestusvajadusest, salvestusvajaduse sõltuvus mittejuhitava elektritootmise (VRE) osakaalust ning VRE mõjust elektrihindadele.

Paindlikkuslahenduste kasutuselevõtt on vajalik, et tagada elektrisüsteemi toimimine dünaamilise elektritootmise korral kõigis ajavahemikes: alates sagedusreaktsioonist kuni hooajalise paindlikkuseni. Peamised võimalused paindlikkuse tagamisel on elektrivõrgud, tarbimiskaja, juhitavad tootmisvõimsused ning elektrienergia salvestamine. Tööstuse, soojusmajanduse ning mobiilsussektori sidumine elektrisüsteemi paindlikkusvahenditega muudab paindlikkuse potentsiaali lihtsamaks ning ühiskonnale kasulikumaks. Euroopa Komisjoni hinnangul tuleb EL-27-s 2030. aastaks rakendada vähemalt 97GW ulatuses elektrienergia salvestusvõimsusi¹ Elektrisüsteemi väljakutsed on otseses sõltuvuses mittejuhitava elektritootmise osakaalust elektritootmises (vt. joonis 1) ning paindlikkusmeetmete rakendamise ja uute poliitikameetmete rakendamise vajadus on üldiselt otseses sõltuvuses mittejuhitavase elektritootmise osakaaluga kogu elektritootmises (vt. joonis 2).

¹ Study on energy storage – Contribution to the security of the electricity supply in Europe. European Commission, Final report, 2020



Joonis 1. Elektrisüsteemi ülemineku väljakutsed sõltuvalt mittejuhitava elektritootmise osakaalust.²



Joonis 2. Paindlikkusmeetmete ja uute poliitikameetmetevajadus sõltuvalt mittejuhitava elektritootmise osakaalust.³

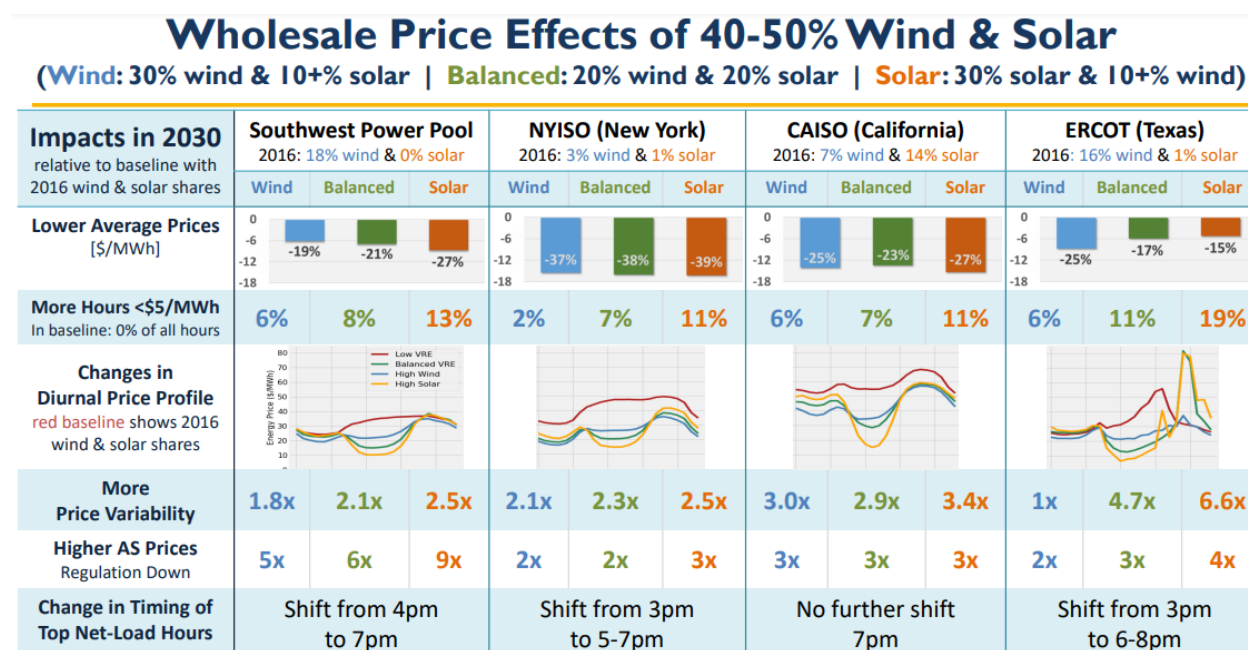
Kliimaneutraalse majanduse eesmärkide saavutamine pole võimalik riikidevahelise koostööta, kuid siiski on vajalik üksikute riikide selget visiooni enda elektrisüsteemi korraldamisest kliimaneutraalsel viisil. Imperial College of London poolt 2021a. juunis avaldatud raport Suurbritannia võimalustest

² World Energy Outlook 2018, International Energy Agency. Joonis 7.17, lk 299

³ World Energy Outlook 2018, International Energy Agency. Joonis 7.17, lk 303

kliimaneutraalse majanduse saavutamiseks⁴ leiab, et soodsaim viis eesmärkide saavutamiseks on massiivne tuuleenergia rakendamine koos suuremahulise salvestuslahenduste kasutuselevõttuga. Tuumaenergia senisest massiivsem kasutuselevõtt on ligilähedaselt konkurentsivõimeline tuuleenergia alternatiividega vaid juhul, kui selle elektritootmise hind on 50% praegusest hinnatasemest. Suurbritannia võrdluse toomine siinkohal on asjakohane sarnaselt heade tuuleolude tõttu.

Mittejuhitava taastuvenergia osakaal ning jaotus erinevate tootmisviiside vahel mõjutab märkimisväärselt keskmise elektrihinna kujunemist, hindade volatiilsust, süsteemiteenuste hinda ning tipuhindade ajalist nihet. 2018a. Lawrence Berkeley National Laboratory poolt US Department of Energy poolt tellitud uuringus vaadeldi USA 4 erineva piirkonna modelleerimise põhjal erinevate tootmismeetodite koosluse põhjal mõju eelnimetatud kriteeriumidele, vt. joonis 3.



Joonis 3. Mittejuhitava elektritootmise erinevate variatsioonide mõju keskmisele elektrihinnale, hinna volatiilsusele, süsteemiteenuste hindadele ning tipuhindade ajastusele.⁵

Jooniselt 3 nähtub mittejuhitava elektritootmise koosluse oluline mõju keskmisele elektrihinnale. Nimetatud uuringu tulemused pole siiski otseselt rakendatavad Eesti olude kirjeldamiseks ning on siinkohal esitatud vaid võimalike mõjude illustreerimiseks. Eesti olude kirjeldamiseks oleks vaja eraldi analüüsi stohhalistes mudelites (NB! Mitte deterministlikes mudelites, nt Balmorel, EnergyPro, LEAP, NEMO).

Kokkuvõttes saab väita, et VRE ulatusel ja kooslusel on oluline mõju elektrihindadele, salvestusvajadusele, süsteemiteenustele ning hinnatippude kujunemisele. Kuna elektrienergia salvestamiseks on väga erinevaid viise erinevate tehnoloogiliste lahenduste ning eesmärkidega, siis saab väita, et

⁴ Net-zero GB electricity: cost-optimal generation and storage mix, Imperial College of London, 2021, lk 5-6

⁵ Impacts of High Variable Energy (VRE) Futures on Wholesale Electricity Prices, and on Electric-Sector Decision making, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2018, lk 7

salvestuslahenduste sihitud ja koordineeritud kasutuselevõtt mõjutab elektrisüsteemi kui terviku toimimist ning elektrienergia tarbijahindade kujunemist.

Käesolevas töös keskendutakse elektrienergia erinevatele salvestuslahenduste kirjeldamisele, salvestustehnoloogiate hindadele ja omavahelisele konkurentsivõimele ning konkurentsivõimele juhitavate elektritootmisvõimalustega, konkurentsivõimet elektrivõrkude ja tarbimiskajaga võrreldes ei vaadelda.

2. Salvestusteenused, mis toetavad elektrisüsteemi toimimist tervikuna, teenuste kaupa koos rakendatavate tehnoloogiatega.

Salvestusteenused võib jagada 5 erineva eesmärgi vahel, need on kirjeldatud tabelis 1.

Jrk	Teenuste valdkond	Võimalikud teenused
1.	Hulgituru teenused	<ul style="list-style-type: none"> Arbitraaz RES tugi RES mahapiiramise minimeerimine Võimsuse tagamine süsteemis Tavatootmise tugi Hooajaline salvestus
2.	Põhivõrku toetavad teenused	<ul style="list-style-type: none"> Põhivõrgu investeringute edasilükkamine Pöörleva reservi tagamine
3.	Jaotusvõrku toetavad teenused	<ul style="list-style-type: none"> Jaotusvõrgu investeringute edasilükkamine Lokaalne pingekontroll Reaktiivvõimsuse kompenseerimine Teadlik saarestumine
4.	Süsteemiteenused	<ul style="list-style-type: none"> FCR aFRR mFRR Pingetugi Süsteemi taastamine Tarbimise juhtimine Asendusreserv
5.	Lõpptarbijale suunatud teenused	<ul style="list-style-type: none"> Tippude tasandamine Elektrivarustuse jätkuvus Energiakulu juhtimine Häiringute piiramine Pingekvaliteedi juhtimine

Tabel 1. Salvestustehnoloogiate poolt pakutavad teenused.

Kõigil tabelis 1 kirjeldatud salvestusteenustel on erinevad parameetrid ning teenuste osutamiseks sobivad erinevad salvestustehnoloogiad. Tuleb tähele panna, et paljud nimetatud teenustest toetavad otseselt või kaudsemalt põhi- ja jaotusvõrkude tööd. Seetõttu on elektrisüsteemi kui terviku ning tarbijahindade optimeerimise seisukohast vajalik tagada kõigi teenuste osutamisest huvitatud osapoolte võrdne ja mittediskrimineeriv juurdepääs teenuste osutamisele.

Tabelis 2 on esitatud loetelu peamistest salvestusteenustest koos sobivate salvaestustehnoloogiate lihtsustatud kirjeldamisest. Ülevaatlikkuse huvides ei ole siinkohal eristatud näiteks akutehnoloogiaid ja vesiniku tootmise tehnoloogiaid.

Jrk	Teenus	Teenuse lühikirjeldus	Sobivad tehnoloogiad
1.	Arbitraaz (olemasolev teenus)	Elektrituru hinnatippude tasandamine, 1-500MW, 1-10h, min 250 tsüklit/a, käivitus <10min	Mehhaaniline salvestus: PHS, CAES Soojussalvestus: SHS, ThCES, LAES Keemiline salvestus: H2 Elektrokeemiline salvestus: BESS, ECR
2.	RES tugi (arenev teenus)	RES tootmise reservvõimsus. 100kW-2MW, 20 min-1h30min, pidev käitus, käivitus 15 – 30sek	Mehhaaniline salvestus: PHS, CAES Soojussalvestus: SHS, ThCES, LAES Keemiline salvestus: H2 Elektrokeemiline salvestus: BESS, ECR
3.	RES mahapiiramise minimeerimine (arenev teenus)	1kW-1GW, 1h-10h, min 300 tsüklit/a, käivitus <5min	Mehhaaniline salvestus: PHS, CAES Soojussalvestus: SHS, ThCES, LAES Keemiline salvestus: H2, P2G, P2L Elektrokeemiline salvestus: BESS, ECR
4.	Võimsuse tagamine (arenev teenus)	Põletusseadmete asendamine tipuelektri tootmisel, 1-500MW, 2-10h, 50-365 tsüklit/a	Mehhaaniline salvestus: PHS, CAES Soojussalvestus: SHS, ThCES, LAES Keemiline salvestus: H2 Elektrokeemiline salvestus: BESS
5.	Tavatootmise tugi (arenev teenus)	Tavatootmise optimeerimine: generaatorite töö sildamine, generaatori käivitamise kiirendamine, tööaeg kuni 700s, käivitus <1min, tsükleid vastavalt generaatori vajadusele	Mehhaaniline salvestus: PHS, CAES Soojussalvestus: SHS, ThCES, LAES Elektrokeemiline salvestus: BESS
6.	Hooajaline salvestus (tulevikuteenus)	10-100MW, tööaeg nädal kuni mõned kuud, tsükleid 1-5/a, käivitus <10 min	Mehhaaniline salvestus: PHS, PHS koos tavatootmisega, CAES Keemiline salvestus: H2, P2G, P2L Soojussalvestus: P2H (eriti ATES ATES), LAES, ThCES
7.	Põhivõrgu investeringute edasilükkamine	Uute elektriühenduste ehitamise või vanade rekonstrueerimise asemel salvestusvõimsuste ehitamine, 50-500MW, 1-8 t, tsükleid aastas >100, käivitus mõned minutid	Mehhaaniline salvestus: PHS, CAES Elektrokeemiline salvestus: BESS Soojussalvestus: LAES
8.	Põhivõrgu tugi	Läbilaskevõimsuse parandamine, häitingute kõrvaldamine, pingelangu, ebastabiilse pinge ja subsünkroonse resonantsi kompenseerimine, 10-100MW, salvestuse kestus 5	Elektriline salvestus: Hoorattad Elektrokeemiline salvestus: BESS Mehhaaniline salvestus: PHS, CAES Soojussalvestus: LAES

		s-2t, töötükleid aastas 20-100, käivitus mõned ms	
9.	Jaotusvõrgu investeringute edasilükkamine (olemasolev teenus)	Uute elektriliinide ehitamise või vanade rekonstrueerimise asemel salvestusvõimsuste ehitamine, võrguparameetrite optimeerimine, 500kW-10MW, 1-4 t, tsükleid aastas ca 50, käivitus mõned sekundid	Elektrokeemiline salvestus: BESS Soojussalvestus: LAES
10.	Lokaalne pingekontroll (olemasolev teenus)	Energiasalvestus pingeprofiili lubatud lepingulistes või regulatiivsetes piirides hoidmiseks, 100kW (kvar) → mõned MW (Mvar) keskpingel, 10kW (kvar) → mõned 100kW (kvar) madalpingel, töötükkel 2 → 10 h, tiputundide tugi, käivitus <5min	Elektrokeemiline salvestus: BESS Mehaaniline salvestus: PHS, CAES Soojussalvestus: LAES
11.	Reaktiivvõimsuse kompenseerimine (olemasolev teenus)	TSO ja DSO reaktiivenergia vähendamine, mõned 100kvar → mõned Mvar, igapäevane töötükkel, käivitus mõni minut	Elektrokeemiline salvestus: BESS Mehaaniline salvestus: LAES, PHS
12.	Teadlik saarestumine (olemasolev teenus)	Katkestuste puhul elektrivarustuse tagamine, 10kW-1MW (LV), 100kW-10MW (HV), käivitus <20ms	BESS
13.	FCR (frequency containment reserve, olemasolev teenus)	Eesmärgiks on tootmise ja tarbimise tasakaalu hoidmine sama sünkroonala piires, salvestusmaht sõltub riigist, kasutusaeg kuni 15min, tsükleid aastas ca 250, käivitus kuni 30s	Keemiline salvestus: vesinik Elektrokeemiline salvestus: BESS Mehaaniline salvestus: PHS, CAES, hoorattad Soojussalvestus: LAES, SETS
14.	aFRR (automatic frequency restoration reserve, olemasolev teenus)	Sekundaarne sageduskontrolli mehhanism süsteemis, salvestusmaht sõltub riigist, kasutusaeg vastavalt vajadusele, tsüklied >250tk/a, käivitus 30s – 15min	Keemiline salvestus: vesinik Elektrokeemiline salvestus: BESS Mehaaniline salvestus: PHS, CAES, hoorattad Soojussalvestus: LAES
15.	mFRR (manual frequency restoration)	Tertsiaalne sageduskontrolli mehhanism süsteemis, salvestusmaht sõltub riigist,	Keemiline salvestus: vesinik Elektrokeemiline salvestus: BESS

	reserve, olemasolev teenus)	kasutusaeg vastavalt vajadusele, tsüklied >250tk/a, käivitus 30s – 15min	Mehaaniline salvestus: PHS, CAES, hoorattad Soojussalvestus: LAES
16.	Asendusreserv (olemasolev teenus)	Sageduskontrolli tugimehhanism täiendava eabilansi katmiseks, salvestusmaht sõltub riigist, kasutusaeg vastavalt vajadusele, tsüklied >250tk/a, käivitus >15min	Keemiline salvestus: vesinik Elektrokeemiline salvestus: BESS Mehaaniline salvestus: PHS, CAES, hoorattad Soojussalvestus: LAES
17.	Tarbimise juhtimine (arenev teenus)	Piirkonna tarbimisbilansi toetamine, salvestusmaht 1-100MW, kasutusaeg >15min, tsüklied 250-10000, käivitus <1s	Keemiline salvestus: vesinik Elektriline salvestus: SMES Elektrokeemiline salvestus: BESS Mehaaniline salvestus: PHS, CAES, hoorattad Soojussalvestus: LAES, SETS
18.	Pingetugi (arenev teenus)	Nõrkade võrkude sagedustugi, salvestusmaht >1MW, kasutusaeg mõnikümend sek, tsüklied vastavalt vajadusele, käivitus <1s	Elektriline salvestus: superkondensaatorid Elektrokeemiline salvestus: BESS Mehaaniline salvestus: hoorattad
19.	Süsteemi taastamine	Välise toeta elektrisüsteemi taaskäivitamine, salvestusmaht 5-50MW, kasutusaeg sekundid – tunnid, tsüklied 10-20 aastas, käivitusaeg, mõni minut	Keemiline salvestus: vesinik Elektrokeemiline salvestus: BESS Mehaaniline salvestus: PHS, CAES, hoorattad Soojussalvestus: LAES
20.	Pingetugi (olemasolev teenus)	Pingetugi reaktiivvõimsuse lisamisega, salvestusmaht 10-100s MVAR, kasutusaeg <1h, käivitus: mõned sek	Elektrokeemiline salvestus: BESS Mehaaniline salvestus: PHS, CAES
21.	Lõpptarbija tippude tasandamine (behind the meter, olemasolev teenus)	Salvestusmaht 50kW-10MW, kasutusaeg 1-4t, <50tsüklied aastas, käivitus <min	Elektrokeemiline salvestus: BESS Mehaaniline salvestus CAES, LAES Soojussalvestus: Carnot' akud
22.	Energiakulu juhtimine	Salvestusmaht 1kW-10MW, kasutusaeg 1-6t, 50-250 tsüklied aastas, käivitus <min	Elektrokeemiline salvestus: BESS Mehaaniline salvestus CAES, LAES Soojussalvestus: Carnot' akud
23.	Elektrivarustuse jätkuvus	Katkestuste korral elektrivarustuse tagamine, salvestusmaht 50 kW-20MW, kasutusaeg mõned tunnid, <50 tsüklied aastas, käivitus: ms	Keemiline salvestus: sünteetilised kütused Elektrokeemiline salvestus: BESS Mehaaniline salvestus: CAES Soojussalvestus: LAES, Carnot' akud

Tabel 2. Olemasolevate ning lähitulevikus esilekerkivate teenuste loetelu koos peamiste parameetrite ning sobivate salvestustehnoloogiate kirjeldamisega.

Tabelis 2 kasutatud lühendite selgitused:

PHS: Pump-hüdrosalvestus

CAES: Suruõhk energiasalvestus

LAES: Vedelõhk energiasalvestus

BESS: Akusalvestus

PHES: Soojuspump energiasalvestus

CSP: Kontsentreeritud päikeseenergia

P2G: Power-to-Gas

P2L: Power-to-Liquid

P2H: Power-to-Heat

SHS: Sensible Heat Storage

SETS: Smart Electric Thermal Storage

ThCES: Termokeemiline energiasalvestus

P2H2P: Power-to-Heat-to-Power

ECR: Elektrokeemiline rekuperatsioon

3. Salvestustehnoloogiate põhiparameetrid

Salvestustehnoloogiate, eriti akutehnoloogiate arendamisel toimub maailmas laialdane innovatsioonitegevus, mistõttu käesolev töö ei kirjelda ligilähedaseltki kõiki salvestusvõimalusi ning on seega käsitletav vaid lihtsustatud ülevaatenäitena. Tabelis 3 on esitatud mõnede salvestustehnoloogiate peamised parameetrid.

Salvestustehnoloogia nimetus	Salvestustehnoloogia kirjeldus	Salvestustehnoloogia tüüpilised parameetrid elektrivõrgus
Elektrokeemiline salvestus		
Naatrium-väävel aku	Naatriumist (Na) ja väävlist (S) koosnev sulasoola aku, mis töötab kõrgetel temperatuurivahemikel ja sobib peamiselt üle 4-tunniseks kasutuseks.	Mõnest kW-st kuni mõne MW-ni, salvestusmaht >100kWh
Liitium-ioon aku	Aku, mis põhineb liitiumi metalloksiid katoodil ja grafiitanoodil toimuvatel laadimis- ja	1kW-100MW, <200MWh

	tühjenemisreaktsioonidel, kasutatakse paljudes rakendustes.	
Pliiaku	Aku, mis koosneb plii dioksiidist (PbO ₂ , positiivne elektrood) ja pliiist (Pb, negatiivne elektrood) jaoks. Ventilatsiooniga ja klapiga reguleeritavad akud moodustavad selle tehnoloogia kaks alamtüüpi.	Kuni mõni MW, <10MWh
Naatrium-metall-aku	Niklist (Ni), naatriumkloriidist (NaCl) ja naatriumist (Na) koosnev sulaaku, mida hoitakse temperatuuril 270–350 °C. Kulude ja töötemperatuuri vähendamiseks töötatakse välja muid materjale kasutavaid akusid. Näiteks, paljulubavad on Naatrium-raudfosfaat akud (SIB)	Mitmed MW ja MWh-d
Tsink-hübriidkatoodaku	Suure energiatihedusega akusalvestustehnoloogia, mis kasutab odavaid ja laialdaselt kättesaadavaid materjale. Tsink-hübriidkatoodakudes kasutatakse mittesüttivaid, peaaegu neutraalse pH-ga veepõhiseid elektrolüüte.	250kW-2MW, kuni 10MWh
Redox flow battery	Aku, milles elektrolüüt on pakkides olevast energiatootmisest. Selle tehnoloogia atraktiivsed omadused on mastaapsus tänu modulaarsusele, võime iseseisvalt energiat ja võimsust muuta ning pikk tsükkel ja eluiga.	
Mehaaniline salvestus		
Suruõhk energiasalvestus	Põhineb elektri kasutamisel õhu kokkusurumiseks ja selle salvestamiseks maa-alustesse koobastesse. Õhk vabastatakse vajaduse korral ja juhitakse läbi turbiini elektri tootmiseks.	Kuni 500MW, 1-20GWh
Hoorattad	Tugineb rootori pöörlemisel tekkival kineetilisel energial läbi "peaaegu hõõrdumiseta kesta", mis võib inertsiga kaudu anda lühiajalist võimsust.	Kuni 20MW, kuni 5MWh

Pump-hüdroalvestus	Salvestab energiat, pumbates vett alumisest reservuaarist ülemisse ja vabastades selle seejärel läbi turbiinide elektrit tootes. Kõige levinum salvestustüüp	Kuni 3600MW, kuni 40GWh
Elektriline energiasalvestus		
Superkondensaator	Superkondensaatorid salvestavad energiat iga elektroodi kahekihilises kihis, mis on eraldatud dielektrikuga ja võivad energiat koheselt tühjendada. Keemilise reaktsiooni puudumise tõttu on tsükli eluiga suurusjärgus suurem kui akude eluiga.	250kW-2MW, 2,5-20kWh

Tabel 3. Mõnede salvestustehnoloogiate lühikirjeldus ja põhiparameetrite loetelu.

4. Energiasalvestuse maksumus.

Salvestuse maksumus sõltub paljudest asjaoludest, märkimisväärsematena on käesolevas töös välja toodud järgmised kriteeriumid:

- Salvestusmahu kapitalikulud ja finantseerimise tingimused,
- Eluiga ja salvestustsüklite arv,
- Muundamisefektiivsus,
- Elektrienergia sisseostuhind,
- Salvestamise püsi- ja muutuvkulud,
- Võrguühenduse pingeaste ja võrgutasud,
- Maksud
- Salvestuskoha kliimaatilised tingimused.

Mistahes salvestustehnoloogiate võrdlemisel ning salvestuse täiskulu arvutamisel tuleb tagada kõigi energia salvestamiseks ja elektrivõrku tagasiantavate kulude arvestamine ning süsteemi kogutsükli muundamisefektiivsus (*grid to grid*). Teadaolevate salvestustehnoloogiate salvestamise maksumuse arvutamine kõigi salvestusteenuste lõikes käesoleva töö mahus pole mõistlik ega vajalik.

Kuna hulgiturul kauplemisel on suurim mõju tarbijate poolt makstavale elektrihinnale, salvestamise sotsiaal-majanduslikule mõjule ning elektrimajanduse keskkonnamõjule, siis on käesolevas töös piiratud peamiste omavahel konkureerivate tehnoloogiate salvestusteenuse maksumuste võrdlemisega võrdsustatud eeldustel elektri hulgituru päev ette ja päevasisesel kauplemisel.

Käesolevas töös on omavahel võrreldud järgmisi salvestustehnoloogiate kooslusi:

- Eesti 500MW võimsusega pump-hüdroakumulatsioonijaam 12-tunnise salvestusmahuga (6GWh) lahendus Paldiskis liitumisega 330kV pingel, **Paldiski PHS 12h**

- Konventsionaalne (hüpoteetiline) 500MW võimsusega pump-hüdroakumulatsioonijaam 12-tunnise salvestusmahuga (6GWh) lahendus abstraktses asukohas, liitumisega 330kV pingel, **PHS BAU, 12h**
- 100MW võimsusega 400MWh salvestusmahuga Li-ion akupank, liitumisega 330kV pingel, **100MW 400MWh BESS**
- 50MW võimsusega päikeseenergia park koos 140MWh salvestusmahuga Li-ion akupangaga, liitumisega 110kV pingel (akude mahtuvus arvatud PV tootmisprognoosi järgi, elektri sisseostuhind arvestatud analoogselt teiste võrreldavate tehnoloogiatega), **50MW PV + 140MWh BESS**
- Kombitsükliga gaasiturbiin väljundvõimsusega 500MW, **CCGT, NG40EUR/MWh**
- Rohevesiniku tootmine koos komprimeerimise, ladustamise ning hilisema elektrienergiaks muundamisega kütuseelemendi abil, väljundvõimsus 500MW, 2200 töötundi aastas, **2200h Electrolyser + fuel cell,**
- Rohevesiniku tootmine koos komprimeerimise, ladustamise ning hilisema elektrienergiaks muundamisega kütuseelemendi abil, väljundvõimsus 500MW, 8000 töötundi aastas, **8000h Electrolyser + fuel cell.**

Võrreldavate tehnoloogiate põhitingimused on järgmised:

Omakapitali määr		50%
Projekti nõutav IRR		10,5%
Võrguelektri sisseostuhind	EUR/MWh	10,30,80,120
Elektrihinna kasvutempo (müük ja ost)	p/a	1.02
Võrgukulu (330kv) netotarbimiselt	EUR/MWh	5
Võrgukulu (110kv) netotarbimiselt	EUR/MWh	10
Võrgukulu kasvutempo	p/a	1.02

Paldiski PHS 12h põhieeldused on võetud järgmised (Energiasalv Pakri andmed):

Jaama maksumus	tuh€/MW	1,250
Jaama võimsus	MW	500
Jaama eelduslik kogumaksumus	tuh.€	625,000
Keskmine kasulik eluiga	aastat	50+
Laenu pikkus	aastat	30
Salvestuse efektiivsus		76.0%
Graniidi hinna kasvutempo	p/a	1.02
Graniidi neto müügihind	EUR/t	13
OPEX,	%CAPEX/p.a.	0.85

PHS BAU, 12h põhieeldused on (autori andmed)

Jaama maksumus	tuh€/MW	1,500
----------------	---------	--------------

Jaama võimsus	MW	500
Jaama eelduslik kogumaksumus	tuh.€	750,000
Keskmine kasulik eluiga	aastat	50
Laenu pikkus	aastat	30
OPEX	% CAPEX/p.a.	0.85
Efektiivsus	%	76

US Energy Information Administration, 2019
andmete alusel

100MW 400MWh BESS

Jaama maksumus	tuh€	103,600,000
Jaama salvestusmaht	MWh	400
Keskmine kasulik eluiga	aastat	10
Inverter	EUR/kWh	21.0
Moodul	EUR/kWh	200.0
BoS	EUR/kWh	27.0
EPC	EUR/kWh	32.0
Total CAPEX	EUR/kWh	259.0
O&M, fixed/y	EUR/year	1,500,000
DoD	tsükl/p	1
Päevi aastas		300
Salvestuse efektiivsus	%	90
Laenu pikkus	aastat	10

50 MW PV + 140MWh BESS

	Lazard	(akude mahtuvus PV toodangu järgi)
Jaama salvestusmaht	MWh	140
Salvestusmaht aastas	MWh	42,000
PV	MW	50
PV CAPEX	tuh. EUR/MW	550
PV tootlikkus aastas	MWh	55,000
Inverter	EUR/kWh	21
Moodul	EUR/kWh	200
BoS	EUR/kWh	54
EPC	EUR/kWh	14
Total CAPEX (akud)	EUR/kWh	289
PV CAPEX	tuh€	27,500
Salvesti maksumus	tuh€	40,460
Süsteemi kogumaksumus	tuh€	67,960
O&M	EUR/MWh	11
DoD	tsükl/p	1
Päevi aastas		300
Salvestuse efektiivsus	%	0.9
Kasulik eluiga		10
Laenu pikkus	aastat	10

CCGT, NG40EUR/MWh		
CCGT CAPEX	tuhEUR/MW	900
Jaama võimsus	MW	500
Total CAPEX	tuh EUR	450,000
Elektritootmise efektiivsus	%	60
Töötunde	t/a	2,200
Kasulik eluiga	aastat	25
Laenu pikkus	aastat	20
Elektri tootmise efektiivsus	%	0.55
Maagaasi hind	€/MWh	40 (80, 120EUR/MWh elektriinna puhul)
Ülekandekulu Elering	€/MWh	2
Ülekandekulu Gaasivõrgud/muu DSO	€/MWh	2
Maagaasi aktsiis 2020 (79,14 €/000m3)	€/MWh	1
Kokku hind	€/MWh	45 (85)
Töötunde aastas	h	2,200
Elektritoodang aastas	MWh	1,100,000
Muutuv OPEX	EUR/GJ	2,02
Muud kulud (CO2)	kgCO2/MWh	400
CO2 hind	EUR/t	60

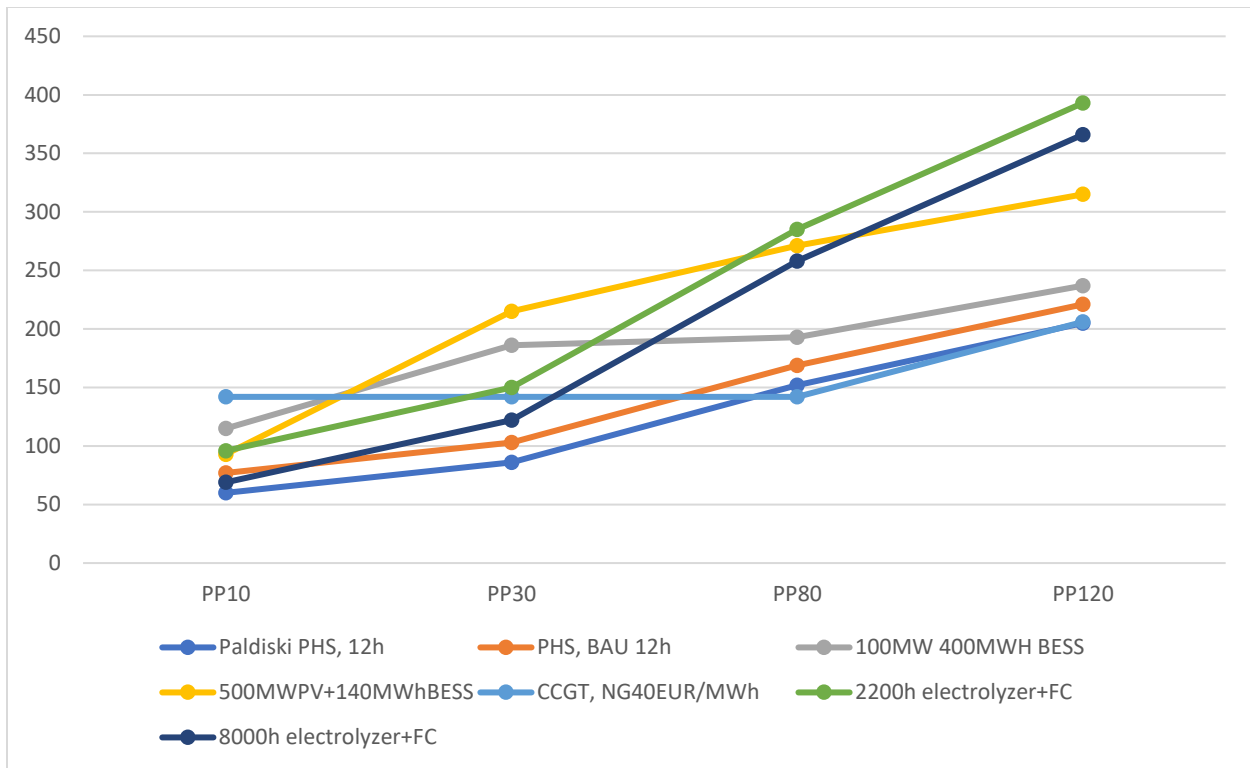
8000h Electrolyser + fuel cell.	2020 Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment, DoE	
Fixed O&M, incl property, insurance, licence, permitting	th.€/year	20,000
Storage O&M	th.€/year	73.50
PEM Fuel cell	th.€/year	18,800
Töötunde aastas	h	8,000
Elektri ost aastas	GWh	10,811
Elektrolüüsi maht aastas	GWh	4,000
Salvestusmahtu aastas, long term	GWh	4,000
Kompremeerimise maht	GWh	4,000
H2 extraction maht	GWh	4,000
PEM Fuel Cell maht	GWh	4,000
Laenu pikkus	aastat	20
CAPEX		
Jaama maksumus	tuh. €	955,000
Jaama väljundvõimsus	MW	500
Elektrolüüs (60bar)	%	0.85
Elektrolüüs (60bar)	EUR/W	0.9
Elektrolüüsi ehituskulu	tuh. €	450,000
Kompremeerimine (250bar)	%	0.97
Kompremeerimine (250bar)	EUR/W	0.04

Kompremeerimise capex	tuh. €	20,000
Long term storage (kadu aastas)	%	0.01
Long term storage	tuh. €	35,000
Kasulik eluiga	yr	25
PEM Fuel Cell (kadu)	%	0.4
PEM Fuel Cell	EUR/W	0.9
PEM Fuel Cell	tuh. €	450,000
Total CAPEX	tuh. €	955,000

Mõnede salvestustehnoloogiate salvestusmaksuse võrdlus, EUR/MWh (esimese tööaasta keskmine elektrienergia müügihind)				
	Elektrienergia keskmine sisseostuhind, EUR/MWh			
	PP10	PP30	PP80	PP120
Paldiski PHS, 12h	60	86	152	205
PHS, BAU 12h	77	103	169	221
100MW 400MWH BESS	115	186	193	237
500MWPV+140MWhBESS	93	215	271	315
CCGT, NG40EUR/MWh	142	142	142	206
2200h elektrolyzer+FC	96	150	285	393
8000h elektrolyzer+FC	69	122	258	366

Tabel 4. Mõnede salvestustehnoloogiate salvestusmaksused (EUR/MWh, esimese tööaasta keskmine elektrienergia müügihind).

Tabelis 4 esitatud salvestusmaksumuste võrdlus graafiliselt on esitatud joonisel 4.



Joonis 4. Mõnede salvestustehnoloogiate salvestusmaksumused (EUR/MWh, esimese tööaasta keskmine elektrienergia müügihind).

Tabelist 4 ja jooniselt 4 nähtub, et salvestuse maksumus on otseses sõltuvuses salvestamiseks tarbitud elektrienergia hinnast ning mida väiksem on kogutsükli muundamise kasutegur, seda suurem on hinnakasvu tõusunurk.

Tuleb arvestada, et kõneks olev maksumuste võrdlusmudel on oluliselt lihtsustatud ning võib erineda oluliselt konkreetsete arendusprojektide vastavatest näitajatest paljude muutujate varieeruvuse tõttu

5. Salvestuse maksumust mõjutavad pikaajalised mõjud.

- Salvestatud energia ja salvestatud energia saamiseks kulutatud energia suhe (ESOI)

Kuna globaalne elektritarbimine kasvab tulevikus väga kiiresti ning Maa loodusressursid on lõplikud, siis varasemast olulisemat suuremat mõju energiahindadele, sh salvestuse maksumusele omab ESOI. ESOI-d käsitletakse kui mingi salvestusseadmega genereeritud ja selle salvestusseadme kogu elutsükli jooksul tarbitud energia suhet. Üldtunnustatud meetodikat erinevate salvestustehnoloogiate ESOI võrdlemiseks pole ning seetõttu tuleb mistahes võrdluste puhul tähelepanelikult jälgida kasutatud eelduste õigsust võib teadusuuringute üldise järeldusena tõdeda, et ESOI on seda suurem (kasuliku energia suhe on parem), mida pikem on salvestusseadme eluiga, mida rohkem salvestustsükleid sama seadmega saab teha ning mida suurem on seadme salvestusmaht.

Stanfordi ülikooli, Western Washingtoni ülikooli ja Imperial College of London teadlaste poolt 2015a. koostatud uuringu põhjal kirjutatud artiklis "Hydrogen or batteries for grid storage? A net energy analysis"⁶

⁶ Energy and Environmental Science, https://gcep.stanford.edu/pdfs/HydrogenBatteries_GridStorage.pdf

esitatud arvustuste põhjal saab väita, et geoloogilise (mehaanilise) salvestuse ESOI on suurem vesiniksalvestuse ESOI-st, mis omakorda on suurem erinevate akutehnoloogiate vastavatest näitajatest. Võrdlus on graafiliselt esitatud joonisel 5.

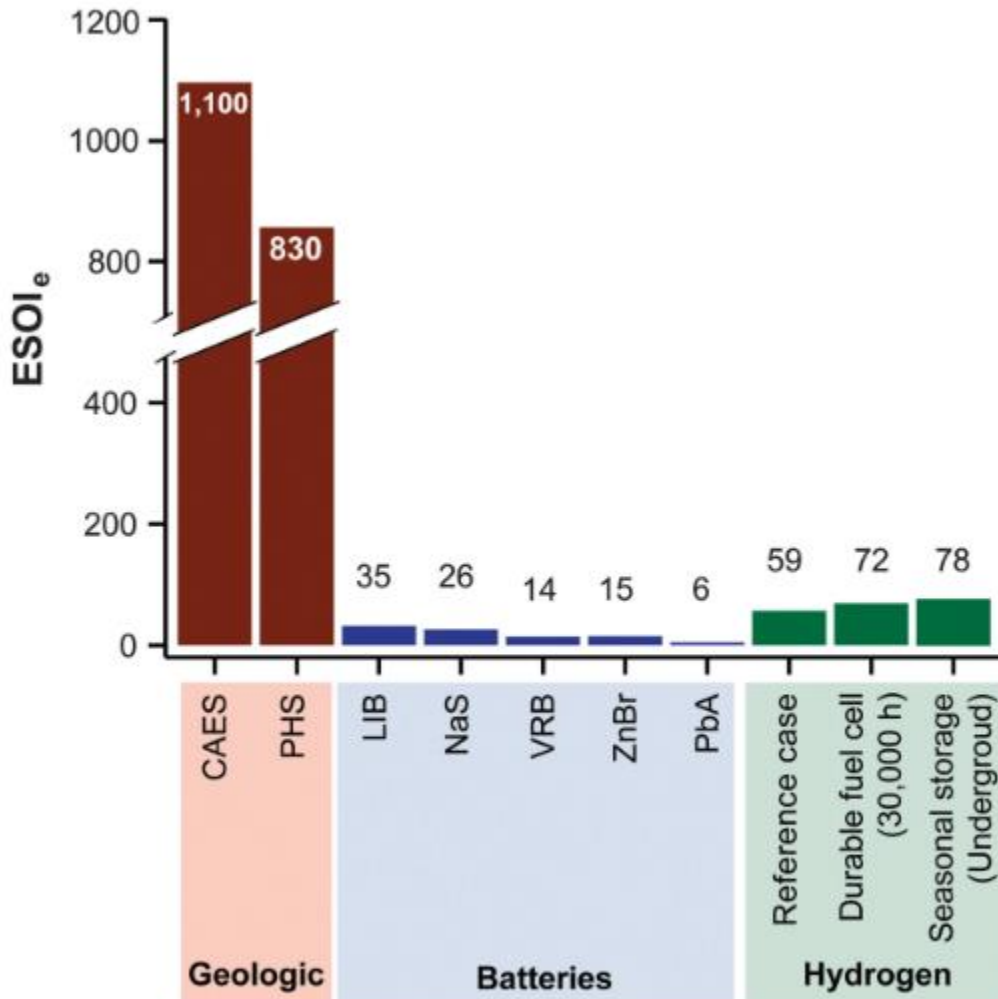


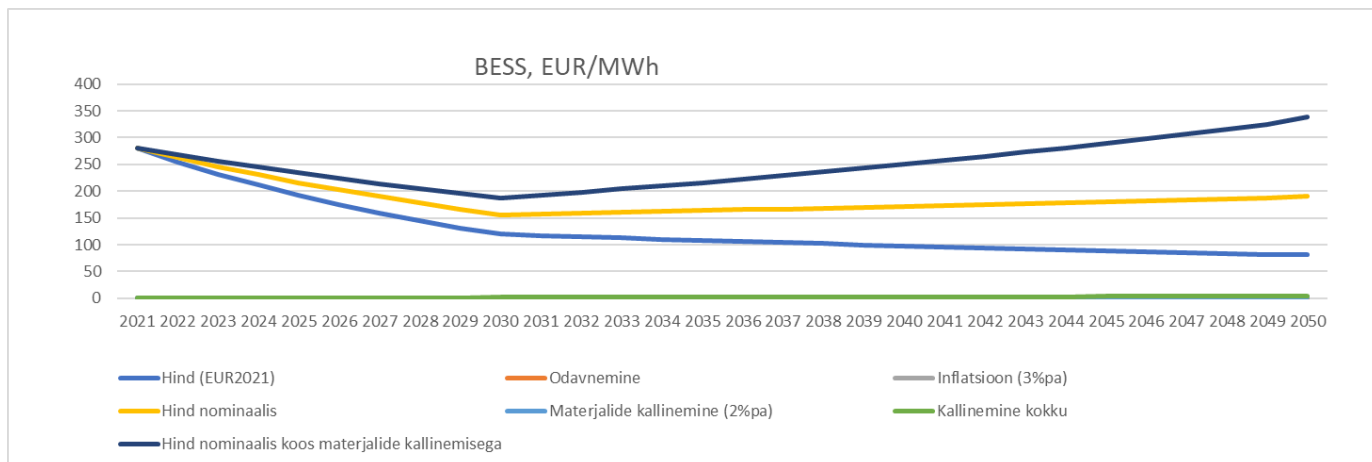
Fig. 8 ESOI_e ratios of energy storage in geologic, battery, and regenerative fuel cell systems. (Values for geologic and battery technologies are taken from ref. 46.)

Joonis 5. Erinevate salvestusviiside ESOI võrdlus.

- Inflatsioon ja materjalide kallinemine.

Kuigi salvestustehnoloogiate arenduses tehakse märkimisväärset arendustööd ning tehnoloogiad muutuvad kestmateks, efektiivsemateks ning odavamateks, mõjutab eeldatav inflatsioon ning toorainete tarbimise järsust kasvust tingitud eeldatav materjalide kallinemine märkimisväärselt salvestamise lõppmaksumust. Joonisel 6 on näidatud akutehnoloogia eeldatava odavnemise ja inflatsiooni ning materjalide kallinemise koosmõju perioodil 2021-2050. Kuigi joonisel 6 on esitatud hüpoteetilise

inflatsiooni ja materjalide kallinemise mõju tuleb mistahes pikaajaliste hinnaprognoside tegemisel ja valikute langetamisel selgelt eristada nominaalhindu ja konkreetselt vaadeldava aasta reaalhindu.



Joonis 6. Akutehnoloogiate eeldatava odavnemise ja inflatsiooni ning materjalide kallinemise koosmõju perioodil 2021-2050.

- Koosmõju teiste majandusvaldkondadega.

Analoogselt kõigi ülejäänud majandusvaldkondadega on ka energeetikas nõ. võitvateks lahendusteks sellised, kes suudavad erinevate äride positiivseid külgi ühendades täiendavat sünergia luua ning toodete ja teenuste väärtusahelat pikendada. Nii näiteks kombineerib Paldiskisse kavandatava 500MW pump-hüdroakumulatsioonijaama tehniline lahendus omavahel mäenduse ning energeetika. Sellise sünergia tulemusena on võimalik realiseerida eraldiseisvana mitteperspektiivsed ärid selliselt, et kokkuvõttes saadakse tavapärasest pump-hüdroakumulatsioonijaamast efektiivsem salvestuslahendus (vrd. Paldiski PHS 12h ja PHS BAU 12h). Analoogse näite võib tuua vesiniksalvestusest, mille puhul *grid to grid* väga madalast kasutegurist on kütuseelemendis eralduva soojuse utiliseerimisel võimalik saada normaalse kasuteguri ning ärimudeliga salvestuslahendus. Lühidalt, energiasalvestuse sobivimate lahenduste otsimisel ei tohiks piirduda vaid elektroenergeetika valikutega.

6. Salvestuse mõju elektritarbija kulutustele.

- Mõju elektrihinnale. Salvestuse maksumust mõjutavaid kriteeriume käsitleti punktis 4 ja tabelis 4 esitati erinevate salvestuslahenduste salvestusmaksumused. Paldiski PHS,12h näite põhjal saab järeldada, et elektrienergia 30EUR/MWh sisseostuhinna puhul on piisava salvestuskoguse puhul tarbijatele müüdava elektrienergia hind 86 EUR/MWh (kõik hinnad EUR2021) ehk kapitalikuludid katva salvestusteenuse maksumus on selle näite puhul 56 EUR/MWh. Arvestades pikaajalisi taastuenergia hinnaprognose võib sellist sisseostuhinda madala tarbimise ja kõrge taastuenergiatootmise puhul pidada üsna realistlikuks. Sellest on lihtne järeldada selle salvestuslahenduse väga head konkurentsivõimet mistahes fossiilseid kütuseid kasutava elektritootmiseseadmega. **Sellest omakorda on lihtne tuletada, et salvestid on elektrisüsteemis hinnatippude vähendajad, hinnastabiilsuse loojad ning võimaldavad pikaajaliselt prognoositavate elektrihindade fikseerimist.**
- Mõju võrgutasule. Kuna võrgutasu jaotub Eestis solidaarsuse põhimõttel tarbijate vahel elektritarbimist arvestades ning salvestid on elektrisüsteemis alati netotarbijad, **siis väheneb uute**

(suur)tarbija lisandumisega ülejäänud elektritarbijate võrgutasu. Võrgutasu vähendamise ulatus sõltub konkreetsest lahendusest ning võrguga liitumise tingimustest.

7. Salvestuse sotsiaal-majanduslikud mõjud.

- CO₂ vähendamine ja kvoodimüügi tulude suurendamine. Salvestus konkureerib otseselt fossiilsete elektrijaamadega, mistõttu aitab salvestamine vähendada energiatootmise keskkonnamõju ning annab valitsusele võimaluse Eestis mittekasutatud CO₂ kvootide müügiks. Eeldades, et 2030a. genereeritakse Eesti salvestitest ca 1,5TWh elektrienergiat, mis hoiab ära samas mahus fossiilsetest allikatest pärit elektrienergia tootmist (eeldatav keskmine eriemissioon 400kgCO₂/MWh), vabaneb aastas hinnanguliselt 600tuh.t CO₂ kvooti, mille väärtus (80EUR/tCO₂) on 48milj.EUR/a.
- Elektritootmise kulude vähendamine. Kuna salvestus konkureerib fossiilsete elektrijaamadega ning salvestitest genereeritava elektrienergia tootmiskulud on oluliselt väiksemad fossiilsete elektrijaamade tootmiskuludest, siis vähendavad Eestis asuvad salvestid elektritootmiseks tehtavaid tootmiskulusid. See suurendab elektritootmise lisandväärtust ning riigieelarvet. Mõju suurus sõltub igakordselt konkreetsetest projektidest ning nende konkurentsivõimest
- Väiksemad elektriarved ja võrgukulud. Vt. punkt 6.
- Suure lisandväärtusega investeeringud. Eeldades, et Eestisse investeeritakse summaarsena hinnanguliselt 1 päeva tarbimise jagu erinevat tüüpi ja erineva otstarbega salvesteid (ca 30GWh) ning salvestuse erimaksumus on hinnanguliselt 150EUR/kWh, võiks salvestusest tulenevate investeeringute väärtuseks hinnata suurusjärgus 4,5 miljardit eurot. Tegu on suure lisandväärtust loovate investeeringutega.
- Parem varustuskindlus ja energiapuudus. Tabelites 1 ja 2 esitatud loetelus teenustest, mida salvestuslahendused saavad elektrisüsteemi pakkuda on lihtne järeldada, et Eestis asuvad salvestuslahendused mängivad olulist rolli energia varustuskindluse ja eriti energiapuuduse tagamisel.
- Eeldus investeeringutele. Elektrienergia prognoosimatus on üks olulisemaid takistusi investeerimiskeskonna arendamisel ja investeeringute realiseerimisel. Eestis asuvad salvestid vähendavad hindade volatiilsust, parandavad hindade prognoositavust ning parandavad sellega eesti investeerimiskeskonda, vt. ka p.6.

8. Salvestuslahenduste turutõrked.

Euroopa Komisjoni poolt 2020a. läbiviidud uuringus "Study on energy storage – Contribution to the security of the electricity supply in Europe" tuuakse peamiste väljakutsetena salvestuslahenduste kasutuselevõtul välja järgmised teemad:

- Avalikkuse toetus ning strateegiate puudumine
- Loostamine ning standardimine
- Energiaturgude disain ja võimsusmehhanismid
- Süsteemiteenuste strateegiate ebaselgus ja ebaühtlus EL-s
- Võrguküsimused ja suhted võrguoperaatoritega
- Maksuküsimused.
- Salvestuse olemuslik defineerimine energeetika õigusruumis.

Konkreetselt soovib Euroopa Komisjon uuringus järgmiste poliitikameetmete rakendamist salvestuslahenduste esilekutsumise kiirendamiseks:

1. Energia salvestamine nõuab selget strateegiat, mis käsitleb süsteemi paindlikkuse ja stabiilsuse vajadusi ning poliitilisi tõkkeid, millega kaasneb erinevatele tehnoloogilistele küpsustele kohandatud toetus
2. Liikmesriigid peaksid tegelema loastamise hõlbustamisega.
3. Liikmesriigid peaksid seadma prioriteediks uue elektrituru ülesehituse täieliku rakendamise ja tegelema allesjäänud takistustega, eelkõige seoses piisavate hinnasignaalidega ja juurdepääsuga abiteenuste turgudele.
4. Võrgutariifid, net metering (sic!) ning võrgueeskirjad on endiselt suur takistus salvestamisel.
5. Maksustamise läbivaatamine, peamiselt energia maksustamise direktiivi (ETD) kaudu, on ülioluline salvestatud energia topeltmaksustamise kaotamisel.
6. Konkurentsivõimelisi paindlikkuse ressursse tuleks käsitleda võrdsetel alustel võrguinvesteeringutega.

Käesoleva töö koostaja reaalse arenduskogemuse põhjal on salvestuslahenduste Eestisse kavandamisel ja ehitamisel järgmised peamised takistused:

- Administratiivne risk.

Mistahes poliitilised elektriturgu mõjutavad otsused mistahes turupiirkonna riigis aastakümnete jooksul on tinginud selle, et pangad puhtalt elektrituru vastu salvestuslahendusi ei finantseeri. Kuna selliseid poliitilisi riske pole võimalik maandada (liikmesriikide subsidiaarsuse põhimõtte), saab isegi tasuvaid salvestusprojekte finantseerida vaid kas (1) pikaajaliste salvestusteenuste osutamise lepingute vastu (nii pikki lepinguid turupõhiselt täna ebakindla turudisaini tõttu ei sõlmita, Eestis suuri tööstustarbijaid pole ning piiriüleseid lepinguid teha ei saa), (2) riiklike garantiide või käenduste vastu või (3) suurettevõtete bilansi vastu (suurprojektide puhul selliseid ettevõtteid Eestis pole).

- Turudisaini sobimatus uute investeeringute esilekerkimiseks.

NordPooli marginaalkuludel põhinev turudisain on algselt kavandatud olemasolevate Norra hüdrojaamade vahel konkurentsi tekitamiseks, mis elektriturule suunatud salvestuslahendustesse investeerimist kuidagi ei soodusta. Jutt pakkumise ja nõudluse põhjal tekkivast õiglasest ning investeeringuid võimaldavast elektri hinnast pole tõsiseltvõetav energeetikaprojektide pikaajaliste loastamis- ja ehitusperioodide tõttu.

- Ebaterve konkurents võrguoperaatoritega.

Ka eelnimetatud Euroopa Komisjoni uuring energiasalvestusest viitab vajadusele tagada salvestusele võrdsed võimalused võrguinvesteeringute teostamisel. Tegelikult 2022 Eestis on aga selline, et puudub vähimigi arusaamine sellest, milline saab olema süsteemiteenuste osutamise õigusruum ja turudisain, milliseid teenuseid saavad osutada turuosalisel ning millised teenused osutatakse konkurentsivõimelisel põhivõrgu operaatori poolt. Tähelepanuväärne on siinkohal, et salvestuslahendused saavad suurepäraselt (vt tabel 2, p.7) aidata kaasa võrguarenduste

edasilükkamisele, kuid selliste võimaluste ärakasutamisel teevad otsuseid turuosalistega otseselt konkureerivad võrguettevõtjad. Ilmselt erapoolik ning turukeskkonda halvendav käitumispraktika. Turukeskkonda halvendavaks ning investeeringuid pärssivaks tegevuseks tuleb kindlasti pidada AS Elering 2019a. poolt nõu "turutesti" kattevarjus läbiviitud sünkroonkompensaatorite ost, kus turuosalisi sisuliselt teenuste ostmise imiteerimisega peteti.

- Loastamine.

Energeetikaprojektide loastamisega seoses pole üksikuid väikseid probleeme, kogu planeerimisõigus tuleb sisuliselt ümber vaadata. Põhiprobleemiks on kehtivate normide, standardite ja nõuete eiramine planeerimismenetluses ning planeerimisõiguse üliluslikkus muude seadustega võrreldes.

Nimetatud takistuste kõrvaldamiseks tuleb strateegilisi projekte käsitleda vajaduspõhiselt, Eesti väiksust ja vajadusi arvestades pole universaalmeetmete koostamine ja rakendamine millegagi põhjendatav.

9. Ettepanekud energiasalvestuse turu käivitamiseks.

Energiasalvestus ei ole energiasüsteemis eraldiseisev nähtus, salvestuslahendused tuleb kavandada erasektori ja avaliku sektori võrdsetel alustel toimivas koostöös kliimaneutraalse energiamajanduse teekaardi väljatöötamise ning ühise elluviimisega. Aluseks võiks võtta Rohetiigri eestvõttel koostatud Energia Teekaardi materjalid.

Alljärgnevalt on markeeritud hetketeadmise põhjal olulisemad energiasalvestuse kasutuselevõtuks vajalikud tegevused:

- Süsteemiteenuste turu ja selle tingimuste defineerimine, võimsusmehhanismi regulatsiooni sätestamine, võrdse kohtlemise tagamine võrguinvesteeringutega võrreldes (vastutaja: Elering ja MKM)
- Erasektori ja avaliku sektori koostöös luua kliimaneutraalsuse saavutamiseks vajalike investeeringute kaasamise motivatsioonimehhanism ning salvestusega säästetava CO₂ emissiooni motiveerimise kompensatsioonimehhanism (Ettepanek: Energia teekaardi meeskond ja MKM energeetikaosakond, hiljem finantssektori kaasamine)
- Tarbijate pikaajaliste hinnariskide maandamiseks pikaajaliste salvestusteenuse ja/või balansseeritud taastuenergia ostu-müügilepingute sõlmimine (CfD, PPA), balansseerimata taastuenergia ostu-müügilepingute sõlmimine ei ole efektiivseim viis kliimaneutraalsuse eesmärkide saavutamiseks (vastutaja: RKAS, MKM, RahM).
- Tagada ametkondade tõhus ja kiire koostöö lubade ja kooskõlastuste andmisel, planeeringute kinnitamisel ja keskkonnamõtjude hindamisel ning kehtestada menetlustoimingutele maksimaalsed lubatud ajapiirid vastavalt taastuenergia direktiivi (EL) 2018/2001 artiklile 16. Strateegilistelt olulistest taastuenergia projektide puhul määrata riigi poolt üks vastutav kontaktisik, kelle kaudu toimub ettevõtja ja riigi vaheline asjaajamine (MKM, SiM, KEM).