



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Ilari Partanen

PUMPPUVOIMALAN KANNATTAVUUS
SUOMESSA VERRATTUNA PAINEILMAVA-
RASTOON

Tekniikka
2024

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Ilari Partanen
Opinnäytetyön nimi	Pumppuvoimalan kannattavuus Suomessa verrattuna paineilmaparastoon
Vuosi	2024
Kieli	suomi
Sivumäärä	50
Ohjaaja	Shekar Satpute

Tämän opinnäytetyön tarkoitus on vertailla pumppuvoimalaitosta ja paineilmaparastoa keskenään. Vertailukohtina käytetään näiden soveltuvuutta Suomeen, sekä taloudellista kannattavuutta Suomessa. Vertailu tehdään vuoden 2021 ja 2023 pörssisähkön keskihinnoin. Jokainen laitos toteuttaa tutkimuksessa latauksen kerran vuorokaudessa yöaikaan ja purun päivällä. Tutkimuksessa osoitetaan myös, kuinka vuoden 2021 ja 2023 pörssisähkön hinta on muuttunut ja kuinka tämä muutos näkyy energiavarastojen potentiaalisissa tuotoissa.

Tutkimusaineisto on haettu vapaassa käytössä olevilta nettisivuilta ja opinnäytetöistä, joten tulokset ovat suuntaa antavia. Tutkimuksessa esitellään energiavarastojen kysynnän nousulle uusiutuvan energian lisääntymine. Vaihtelevan energiantuotannon takia Suomen energiaverkko tarvitsee taajuuden palautus reserviä, joka takaa sähkön tuotannon vakauden, sekä auttaa sähkön hinnan ennustettavuudessa. Työssä esitellään esimerkkeinä Pyhäsalmen ja Vaarunvuoren suunniteltuja pumppuvoimalahankkeita, Huntorfin paineilmaparasto, sekä modulaariset AirBattery ja Ocean Battery. AirBattery tukeutuu Isotermiseen prosessiin. Ocean Battery käyttää apunaan meren massan luomaa painetta. Molemmissa käytetään apuna veden kineettistä energiaa sähkön tuottajana.

Molemmat pumppu-, sekä paineilmaparastot kilpailevat samoista rakennusalueista Suomessa. Perinteisen diapaattisen paineilmaparaston rakentamiskustannukset ovat halvemmat kuin pumppuvoimalaitoksen, mutta sen kehnon hyötysuhteen takia se ei pysty haastamaan pumppuvoimalaa energiavarastona. Kuitenkin modulaarisella isotermisellä paineilmaparastolla AirBatterylla hyötysuhde vastaa pumppuvoimalan hyötysuhdetta. Tällä ratkaisulla on hyötynään myös rakennuskustannuksien optimointi ja rakennusalueen joustavuus sen modulaarisen käytettävän ansiosta. Opinnäytetyössä tehdyssä vertailussa taloudellinen hyöty olisi tällä korkeampi kuin suunnitteilla olevalla Pyhäsalmen pumppuvoimalalla.

Avainsanat: pumppuvoimala, paineilmaparasto, energiavarastointi, taloudellinen kannattavuus, uusiutuva energia

ABSTRACT

Author	Ilari Partanen
Title	The profitability of pumped hydroelectric storage compared to compressed air energy storage in Finland
Year	2024
Language	Finnish
Pages	50
Name of Supervisor	Shekar Satpute

The purpose of this thesis is to compare a pumped hydro powerplant and a compressed air energy storage system. The comparison focuses on suitability and economic viability in Finland. The comparison is made using the average electricity prices from 2021 and 2023. Each facility discharges their capacity once a day in daytime and charges their capacity on nights. This thesis also demonstrates the change in electricity prices between 2021 and 2023 and how this change affects the potential revenues of energy storage systems.

The research data has been collected from freely available websites and theses. Results are indicative. The research presents the increasing need for energy storages due the growing share of renewable energy. Due the variable energy production, the Finnish electricity grid requires frequency restoration reserves, which ensure the stability of electricity production and help in predicting electricity prices. The thesis presents examples of planned pump hydro projects in Pyhäsalmi and Vaarunvuori, the Huntorf compressed air storage, as well as modular AirBattery and Ocean Battery. AirBattery relies on isothermal process, while Ocean Battery utilizes the pressure created by the mass of the sea. Both systems use the kinetic energy of water as an electricity generator.

Both pump and compressed air storage systems compete for the same construction sites in Finland. The construction costs of a traditional diabatic compressed air storage are lower than those of a pump hydro power plant, but due its poor efficiency, it cannot challenge the pump hydro as an energy storage. However isothermal compressed air storages match the efficiency of a hydro power plant. The solution also benefits from optimizing construction costs and the flexibility of the construction site due its modular usage. In comparison made in the thesis, the economic benefit would be higher with the AirBattery than with the planned pump hydro plant in Pyhäsalmi.

Keywords: pumped hydroelectric storage, compressed air energy storage, energy storage, economic viability, renewable energy

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
1 JOHDANTO	7
2 TOIMINTAKENTTÄ	8
2.1 Uusiutuvan energian lähteet	8
2.2 Sähköinen energianvarastointi	9
2.3 Lyhytaikaiset energiavarastot (Sähkö)	13
2.3.1 Sähköakut	13
2.3.2 Vauhtipyörä	15
3 PITKÄAIKAISET ENERGIAVARASTOT VEDESSÄ	16
3.1 Pumppuvoimala	16
3.2 Ocean Battery	20
3.3 Maanalaiset vesialtaat	22
4 PITKÄAIKAISET ENERGIAVARASTOT ILMASSA	24
4.1 Diapaattinen paineilmavarasto	25
4.2 Adiabaattinen paineilmavarasto	27
4.3 Isoterminen paineilmavarasto	28
5 PITKÄAIKAISTEN ENERGIAVARASTOJEN VERTAILU	31
5.1 Sijainti	31
5.2 Hyötysuhde	34
5.3 Kustannukset	35
6 YHTEENVETO	42
LÄHDELUETTELO	44

TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1. Liikennekäytössä olevien sähköautojen kehitys vuosina 2010–2023. Taulukko luotu käyttäen apuna: (Autoalan tiedotuskeskus, 2024)	14
Taulukko 2. Pyhäsalmen energiavarasto lukuina (Kiiski;Juujärvi;& Satpute, 2023)	19
Taulukko 3. Energiavarastojen tiedot vertailussa (Luotu Excelohjelmalla).....	35
Taulukko 4. Esimerkkien vuosittainen voitto (Luotu Excelohjelmalla).....	38
Taulukko 5. Pyhäsalmi verrattuna AirBatteryyn samassa kokoluokassa (Luotu Excelohjelmalla)	40

KUVALUETTELO

Kuva 1. Fingridin reservimarkkinoiden osa-alueet (Kuvankaappaus) (Fingrid, 2024)	10
Kuva 2. Sähkön tuotanto (sininen) ja sähkön kulutus (keltainen) vuonna 2023. Kuvankaappaus) (Fingrid, 2024).....	11
Kuva 3. Sähkön tuotanto (sininen) ja sähkön kulutus (keltainen) vuonna 2012. (Kuvankaappaus) (Fingrid, 2024)	12
Kuva 4. Eri energian varastointikeinot aseteltuna kapasiteetin ja purkautumisajan mukaan. (Elektropedia, 2005).....	16
Kuva 5. Havainnekuva pumppuvoimalaitoksesta (Kiiski;Juujärvi;& Satpute, 2023)	17
Kuva 6. Ocean Battery moduli (Innovation News Network, 2022)	21
Kuva 7. Lämpö- ja kylmäakku (STEK ry, 2022)	23
Kuva 8. Kaavio diapaattisesta paineilmaenergiavarastosta (Estoolbox, 2019)....	26
Kuva 9. Adiabaattisen laitoksen havainnekuva (Kuvankaappaus) (EASE, 2016)..	28
Kuva 10. Esimerkkikuva AirBattery paineilmaenergiavarastosta (Kuvankaappaus) (Augwind Energy, 2022)	29
Kuva 11. Maan alle upotetut paineilma tankit (Surkes, 2021)	30
Kuva 12. Itämeren merialueet (Itämeri.fi, 2006).....	32
Kuva 13. Ocean Batteryyn eri tuotemallit (Kuvankaappaus): (Ocean Grazer, 2021)	34

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä tehdään selvitystä pitkäaikaisten sähköksi muutettavien energiavarastojen rakentamismahdollisuudesta Suomessa. Työssä käydään läpi ilmaston muutoksen aiheuttaman vihreän siirtymän vuoksi muuttuvaa energian tuotantoa. Sähkön tuotanto Suomessa on siirtymässä vahvasti tuulivoimaa hyödyntäväksi, joka aiheuttaa epätasapainoa tuotannon ja kysynnän välillä. Työssä avataan säästä riippuvaisen sähkön tuotannon ongelmia niin sähköverkon vakauden, kuin sähkön hinnan ennustettavuuden kannalta.

Sähkön tuotannon tasaajana työssä painotetaan pitkäaikaisia energiavarastoja, joihin tällä hetkellä kaupallisessa mittakaavassa kuuluu pumppu- ja paineilmavarastot. Näistä käytäviä asioita ovat tekniset toimintaperiaatteet, sekä niihin pohjautuvat uudet modulaariset ratkaisut.

Opinnäytetyön tarkoituksena on vertailla näiden kahden soveltamismahdollisuutta Suomessa taloudellisen näkökulman kautta.

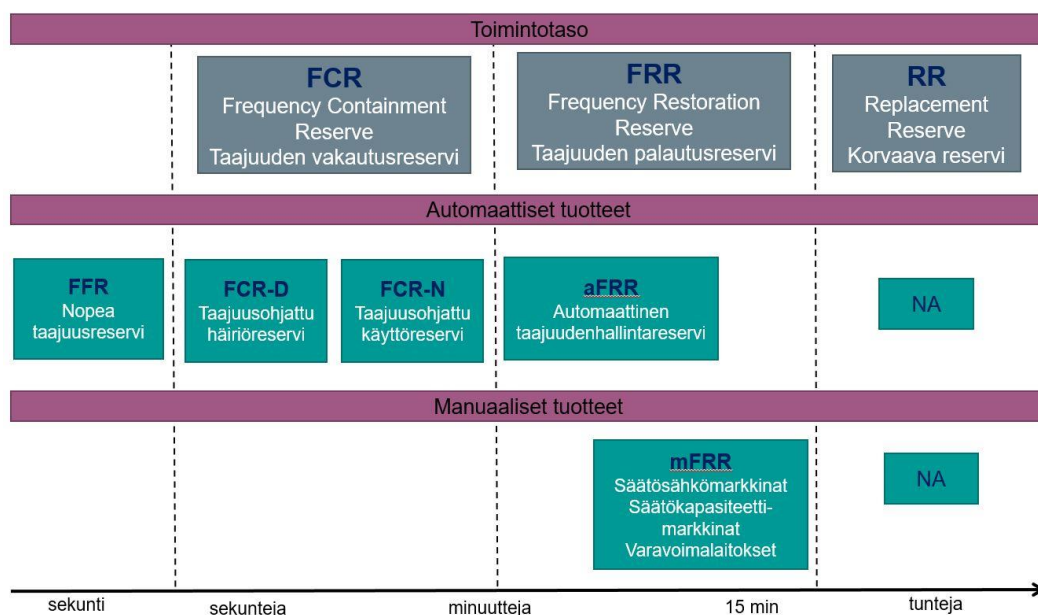
2 TOIMINTAKENTTÄ

Sähkön tarve Suomessa on kasvanut vuodesta 1990 (62 000 GWh) vuoteen 2022 (82 000 GWh). Tämä tarkoittaa 24 % nousua sähkön tarpeessa. (Tilastokeskus, 2023) Suomessa on lisätty tasaisesti uusiutuvaa energiaa. Vuonna 1990 uusiutuvalla energialla suomessa tuotettiin 57,6 TWh. Tämän on lähes kolminkertaistunut vuoteen 2022, jolloin Energian tuotanto uusiutuvalla energialla on kohonnut lukemaan 150 TWh. Vastaavasti suurimman laskun energian tuotannossa on tehnyt fossiiliset polttoaineet, sekä turve. Niillä tuotettu energia on laskenut samalla aikavälillä 192 TW tunnista 122 TW tuntiin. (Tilastokeskus, 2023)

2.1 Uusiutuvan energian lähteet

Vuonna 2022 Suomen päästöistä 72 % syntyi energiasektorilta. Energiantuotanto on suurin päästöjen tuottaja ja tämän takia suurimmat investoinnit päästöjen hallitsemiseksi suuntautuvat energiasektorille. (Sallinen, 2023) Suomessa investoidaan tuulivoimaan vuosina 2022–2025 yli kuusi miljardia euroa. Tämä vastaa suunnilleen yhtä suurta investointia kuin Suomen teollisuuden kiinteät investoinnit yhteensä vuonna 2021.

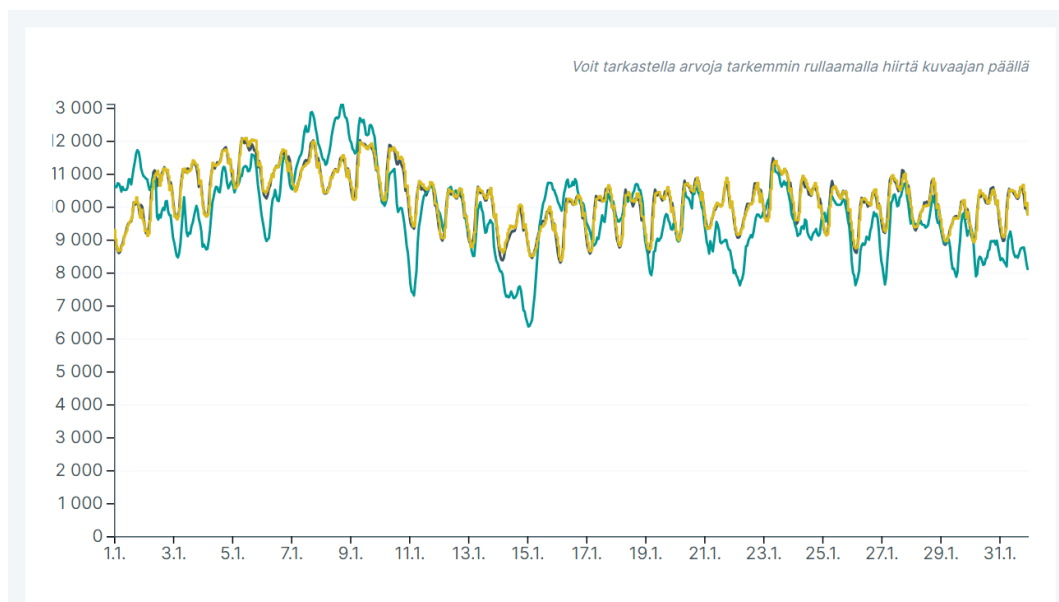
Tuulivoiman osuus Suomessa käytetystä sähköstä oli noin 10 vuotta sitten alle prosentin. Vuonna 2022 tuulivoiman määrä on noussut käytetyssä sähkössä noin 10 prosenttiin ja vuonna 2025 ennakoitaan lukeman olevan 27 % Suomen käyttämästä sähköstä. (Tuulivoimayhdistys, 2022) Eri tahojen tekemien ennusteiden mukaan Suomen tuulivoimakapasiteetti olisi vuositasolla 30TWh-41,5 TWh vuonna 2030. Smart Energy Transition hankkeen mukaan (2018) lukema voisi olla jopa 60 TWh vuoteen 2040 mennessä. Tuulivoimalla tuotettiin Suomessa sähköä 14,5 TWh vuonna 2023. Ennusteiden mukaan tuulivoimalla tuotettu sähkö tulisi ainakin kaksinkertaistumaan nykyisetä. (Tuulivoimayhdistys, 2019)



Kuva 1. Fingridin reservimarkkinoiden osa-alueet (Kuvankaappaus) (Fingrid, 2024)

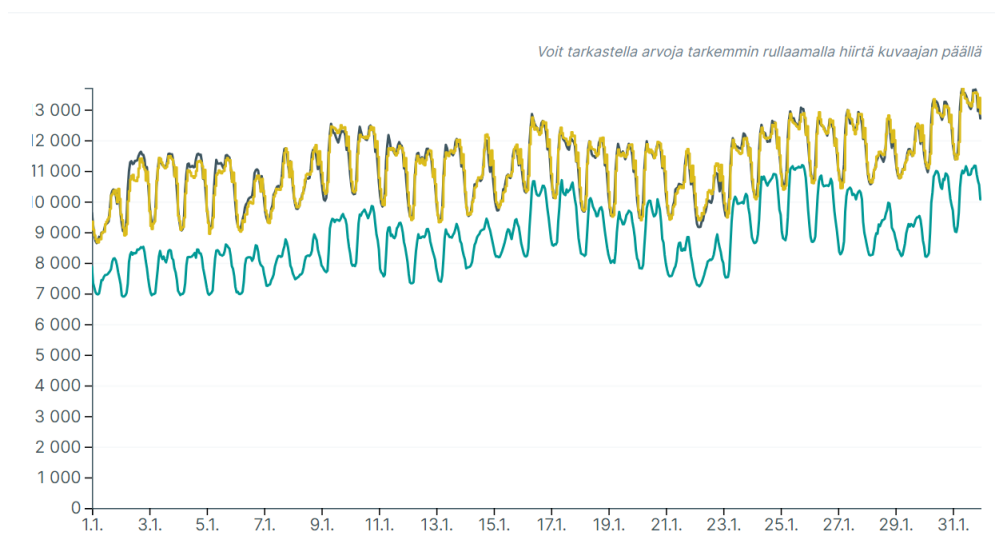
Sähkön ylituotannon aikaan sähköä voidaan varastoida energiavarastoihin tai myydä ulkomaille. Maailmalla suurin osa varastoitavasta sähköstä sijoitetaan pumppuvoimalaitoksiin. Pumppuvoimalaitokset vastaavat 98 % maailman energian varastoinnista. (Alanärä, 2020)

Seuraava kuva (Kuva 2) kuvaa sähkön kulutusta (keltainen) ja sähkön tuotantoa (sininen) vuonna 2023.



Kuva 2. Sähkön tuotanto (sininen) ja sähkön kulutus (keltainen) vuonna 2023. Kuvankaappaus) (Fingrid, 2024)

Kuvasta huomaa kulutuksen ja tuotannon vähäisen korreloinnin. Myöskään kulutus piikit ja tuotantopiikit eivät aina kohtaa. Eroavaisuudet kulutuksen ja tuotannon välillä on korjattu ostosähköllä. Seuraava kuva (Kuva 3) on vuodelta 2012, jolloin tuulivoiman osuus Suomen sähkön tuotannosta oli mitätön.



Kuva 3. Sähkön tuotanto (sininen) ja sähkön kulutus (keltainen) vuonna 2012. (Kuvankaappaus) (Fingrid, 2024)

Tästä kuvaajasta näemme, että Suomen sähkön tuotanto on ollut selkeästi kulumme alapuolella ja tuotettua sähköä on jouduttu ostamaan huomattavasti enemmän kuin nykyään. Kuvaajissa on myös yksi erittäin tärkeä ero ja se on tuotantopiikkien korrelointi. Vuoden 2012 tuotannossa (Kuva 3) on huomattavissa se, että tuotanto piikit ja laskut ovat aina samoissa kohdissa. Katsoessa vuoden 2023 kuvaajaa (Kuva 2) huomataan, että tuotanto pyrkii jäljittelemään kulutusta, mutta heittelevyys on suurta. Välillä sähköä tuotetaan huomattavasti enemmän kuin tarvittaisiin ja välillä huomattavasti vähemmän. Sähkön tuotannon ollessa selvästi vähäisempi kuin tuotannon muuttuu sähkön hinta halvaksi, jopa negatiiviseksi. Mitä suuremmaksi kulutus kasvaa verrattuna tuotantoon, sitä kalliimmaksi sähkön hinta muuttuu. (Fingrid, 2024) Vuonna 2023 sähköä myytiin negatiivisella hinnalla 467 tuntia. Vuonna 2022 lukema oli 27 tuntia ja sitä edeltävinä vuosina 5 ja 9 tuntia. (Energiateollisuus, 2024)

Sähkön tuotanto tulee tulevaisuudessa olemaan enemmän ja enemmän säästä riippuvainen. Sähkön kulutuksen ollessa samalla tasolla vuonna 2023 kuin 2022 (~80 GWh) tarkoittaa se, että tuulivoiman (14,5 GWh) osuus sähkön tuotannosta

on ollut noin 17 %. Ennusteiden mukaan tuulivoimalla tuotettu sähkö tulee vähintäänkin tuplaantumaan vuoteen 2030 mennessä. Tällöin tuulivoiman osuus sähkön tuotannosta olisi samalla sähkön kokonaistarpeella 38 %. Toki sähkön tarve voi lisääntyä tulevaisuudessa, mutta energiatehokkaiden ratkaisujen ansiosta voi tarve pysyä myös samana. Joidenkin ennusteiden mukaan sähkön tuotannosta jopa puolet voitaisiin kattaa tuulivoimalla vuonna 2030. (Huutilainen, 2023)

Sähköverkko tulee tarvitsemaan tulevaisuudessa enemmän säätövoimaa toimiakseen. Sähkön tuotannon ennustettavuuden heikentymisen vuoksi on suomen panostettava energian varastointiin. Tämä on ymmärretty myös eduskunnassa ja Petteri Orpon hallitusohjelma onkin linjannut, että 1.1.2024 alkaen säätökykyisen vesivoiman ja pumppuvoimahankkeiden toteutumista edistetään. Tämä asetusmuutos mahdollistaa vesivoimahankkeiden tukemisen energiatuella ja tukiharkinnassa edelle olevien uusien teknologioiden lisäksi etusijalle asetetaan myös säätökykyä edistävät hankkeet. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2023)

2.3 Lyhytaikaiset energiavarastot (Sähkö)

Energiavarastoja voidaan jakaa lyhyt- ja pitkäaikaisiin varastoihin. Lyhyt aikaiset varastot reagoivat usein nopeasti, mutta eivät kykene säilyttämään energiaa niin suurina määrinä kuin pitkäaikaiset varastot. Lyhytaikaisia varastoja käytetään usein, kun halutaan tuottaa paljon energiaa hetkellisesti. Nämä soveltuvat hyvin yksittäisten prosessien käyttöön.

2.3.1 Sähköakut

Sähköakut ovat kemiallisia. Toimintaperiaate nojautuu eri varauksilla varustettujen napojen väliseen elektronien virtaukseen. Napoja kutsutaan anodiksi (positiivinen) ja katodiksi (negatiivinen). Akustoa ladattaessa elektroneja siirtyy anodille, josta ne akkua purettaessa siirtyvät takaisin katodille. Elektronien liike aiheuttaa sähkövirran, jolla on jännite. Katodi valmistetaan esimerkiksi raudasta tai litiumista, anodi usein grafiitista. Litium akulla hyötysuhde on tyypillisesti yli 90 %,

ja latauspurku syklejä noin 80 % purkusyvyydellä 6 000 kpl. Akku kestää myös tätä kauemmin, mutta akun elinikä määritellään usein siihen pisteeseen, jossa sen kapasiteetti on laskenut sadasta prosentista kahdeksaankymmeneen. (Koskinen, 2023)

Yksittäisillä talouksilla energiaa varastoidaan usein akkuihin. Akkuja löytyy esimerkiksi sähköautoista, joiden käyttö on lisääntymässä. Taulukosta 1 näkee, kuinka sähköautojen määrä on Suomessa lähes kaksinkertaistunut vuosittain vuodesta 2010 alkaen. (Autoalan tiedotuskeskus, 2024)

Taulukko 1. Liikennekäytössä olevien sähköautojen kehitys vuosina 2010–2023. Taulukko luotu käyttäen apuna: (Autoalan tiedotuskeskus, 2024)

Vuosi	täyssähköiset henkilöautot	henkilöautot, lataushybridit	täyssähköiset pakettiautot	pakettiautot, lataushybridit	täyssähköiset kuorma-autot
31.12.2010	23	0	74	0	0
31.12.2011	56	0	75	0	0
31.12.2012	109	128	84	0	0
31.12.2013	169	296	84	0	0
31.12.2014	360	569	96	1	0
31.12.2015	614	973	129	1	1
31.12.2016	844	2 441	170	7	1
31.12.2017	1 449	5 719	210	14	1
31.12.2018	2 404	13 095	256	29	2
31.12.2019	4 661	24 703	312	39	2
31.12.2020	9 697	45 621	444	107	7
31.12.2021	22 921	76 990	796	182	9
31.12.2022	44 889	104 039	1556	258	25

Kaupallisessa mittakaavassa akut ovat suosittuja vaihtoehtoja. Akut pystyvät vastaamaan nopeasti kysyntään ja niiden avulla pystytään tasapainottamaan taajuutta lyhyellä aikavälillä. Suomeen ollaan rakentamassa pohjoismaiden suurinta akkuvarastoa, joka on kapasiteetiltaan 56,4 MW /112,9 MWh. Tämä akkuvarasto

on suunniteltu reservi käyttöön, jolla tasapainotetaan energian tuotannon piikkejä. (Neonen, 2023)

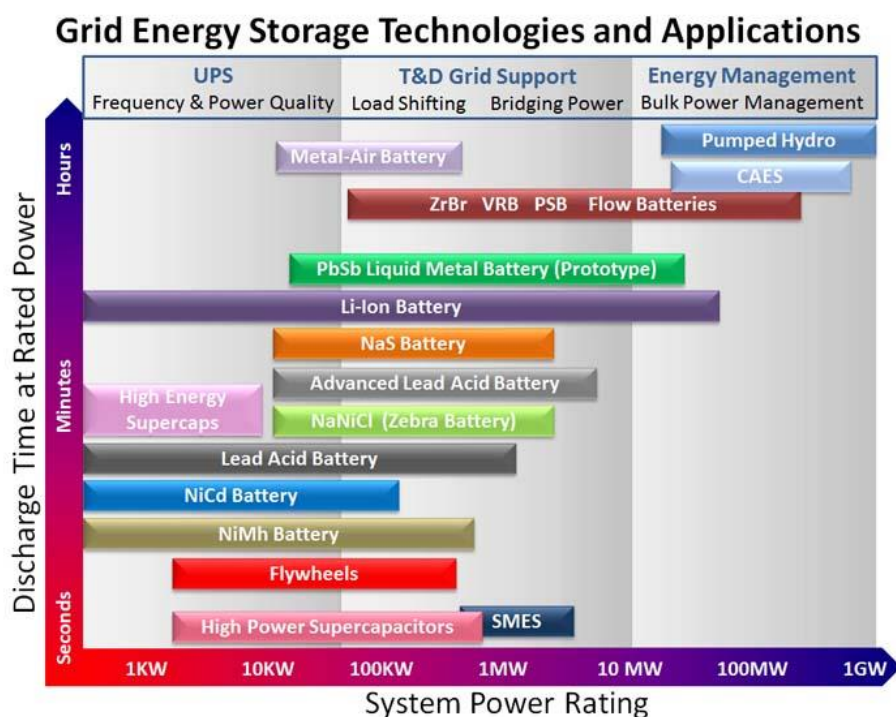
2.3.2 Vauhtipyörä

Vauhtipyörillä pystytään takaamaan lyhyt aikaista tehoa. Vauhtipyörä on ympyrän muotoinen paino, jota pyöritetään sähkön avulla, jolloin se varautuu kineettiseen muotoon. Sähkön tarpeen ollessa suuri vauhtipyörän liike tuottaa generaattorin kautta sähköä takaisin haluttuun kohteeseen. Ajan myötä vauhtipyörä hidastuu kitkan takia, eikä vauhtipyörään pystytä sitomaan suuria määriä energiaa.

Vauhtipyörän etuna on kuitenkin sen teho. Teraloop on kehittänyt akselittoman vauhtipyörän, jonka ensimmäinen markkinoille tulevan tuotteen on suunniteltu olevan neljä metriä halkaisijaltaan. Tällainen vauhtipyörä pystyisi antamaan 200 KW tehon puolen tunnin ajan. Tämä tarkoittaa energiavaraton sisältävän parhaimmillaan 100 KWh. Reagointi vauhtipyörällä on akun tavoin sekunnin luokkaa, joten sitä pytyttään hyödyntämään taajuuden lyhytaikaisessa tasaamisessa. (Luotola, 2018)

3 PITKÄAIKAISET ENERGIAVARASTOT VEDESSÄ

Pumppu- ja paineilma varastot ovat tällä hetkellä ainoat menetelmät, jotka kykenevät pitkäaikaiseen energianvarastointiin suurella kapasiteetilla. (Kuva 4). Näistä kahdesta pumppuvoimalaitokset ovat ylivoimaisesti suuremmassa käytössä, mutta myös näyttöä paineilma-varastojen (CAES) käytöstä sähkön tuotannon taasaajana löytyy.

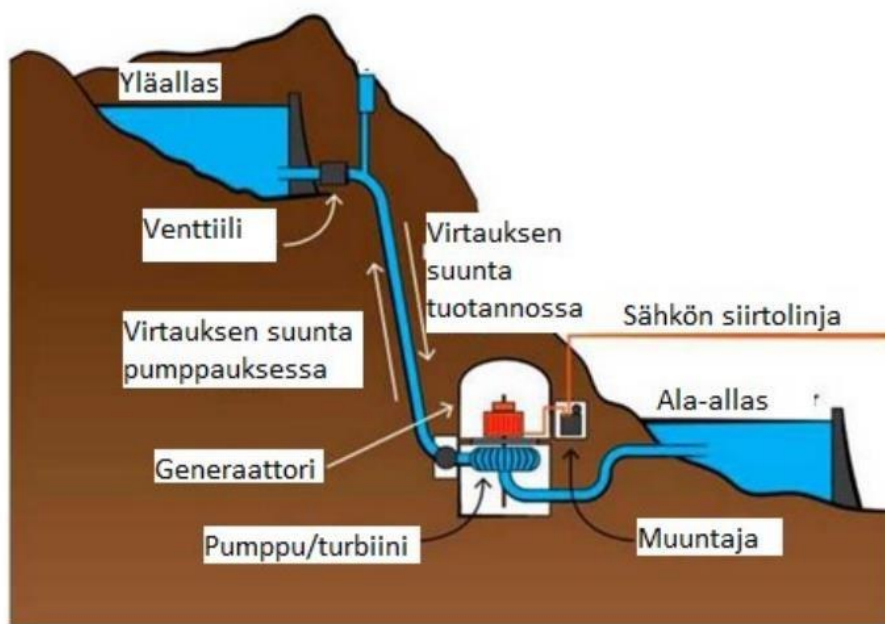


Kuva 4. Eri energian varastointikeinot aseteltuna kapasiteetin ja purkautumisajan mukaan. (Elektropedia, 2005)

3.1 Pumppuvoimala

Pumppuvoimalan toimintaperiaate on yksinkertainen. Voimalassa on kaksi allasta, joista toinen on sijoitettu toista altaasta korkeammalle. Halvan sähkön aikaan vettä pumpataan matalammasta altaasta korkeampaan, jolloin energia muuttuu sähköenergiasta pumpun kautta potentiaalienergiaksi (Kuva 5). Sähkön tarpeen ollessa suurempaa kuin tuotanto, vesi päästetään kulkemaan yläaltaasta takaisin

ala-altaaseen. Välille on sijoitettu generaattori tai generaattoreita, jotka muuntavat veden liike-energian takaisin sähköksi. Usein tämän tyyppiset laitokset toimivat 70 %–80 % hyötysuhteella, joka on energian varastoinnissa toistaiseksi hyvä lukema. Hyötysuhteella tarkoitetaan sitä, kuinka suuri osa sähköstä, joka laitetaan säilöttäväksi, saadaan takaisin. Esimerkiksi 80 % hyötysuhteella säilöittäessä 10 MW sähköä, saadaan $0,8 \cdot 10 = 8$ MW takaisin käyttöön sähköä. (Kiiski;Juujärvi;& Satpute, 2023)



Kuva 5. Havainnekuva pumppuvoimalaitoksesta (Kiiski;Juujärvi;& Satpute, 2023)

Pumppuvoimalan hyötysuhde pystytään laskemaan karkeasti seuraavalla tavalla:

Ensiksi lasketaan veden yläaltaaseen siirtämiseen vaadittava energia:

$$E_p = \frac{\rho_{H_2O} \times g \times h \times V}{\eta_p}$$

Missä:

E_p = pumppaukseen käytetty energia

ρ_{H_2O} = veden tiheys

g = maan vetovoima

h = korkeusero

V = tilavuus

η_p = pumpun hyötysuhde

Seuraavaksi esitetään kaava, jolla voidaan laskea veden alas päästämällä tuotetun sähkön määrä:

$$E_{gen} = \rho_{H_2O} \times g \times h \times V \times \eta_g \times \eta_t$$

Missä:

E_{gen} = sähköksi muutettu energia

η_g = generaattorin hyötysuhde

η_t = turbiinin hyötysuhde

Hyötysuhde saadaan jakamalla pumppaukseen käytetty energia (E_p) sähköksi muutetulla energialla (E_{gen}). (Tiainen, 2020)

Kaavoista nähdään, että pumpun ja generaattoreiden lisäksi vaikuttavia asioita ovat veden tiheys, maan vetovoima, korkeusero ja tilavuus. Ainoastaan kahta näistä voi paikan valinnalla muuttaa huomattavalla tasolla. Nämä muuttujat ovat korkeusero ja tilavuus.

Useimmat pumppuvoimalaitokset ovat 100–1 000 metriä korkeita. (Webb, n.d.) Suomessa olevat vesivoimalaitokset ovat tyypillisesti 5–30 metriä korkeuseroltaan. Suomessa onkin törmätty ongelmaan, että pumppuvoimala käyttöön soveltuvia vuoristoja ei löydy. Suomessa on kuitenkin ollut suunnitteilla useita pumppuvoimalaitoksia.

Uusimmissa suunnitelmissa on yläaltaan nostamisen sijaan päätetty laskea ala-altaasta. Altaan vaativan tilan louhimisen on todettu olevan kannattamatonta. Kuitenkin ala-altaaksi sopeutuu myös vanhat kaivokset, joiden avulla kustannukset saadaan alemmas.

Uusimpana hankkeena on suunnitteilla Pyhäsalmen kaivokseen laskeva pumppuvoimalaitos. Kaivoksen korkeusero olisi 1 400 metriä ja toteutuessaan olisi maailman suurimmalla pudotuksella varustettu pumppuvoimalaitos. Taulukossa 2 on Pyhäsalmen kaavailtu pumppuvoimalaitos lukuina (Taulukko 2).

Taulukko 2. Pyhäsalmen energiavarasto lukuina (Kiiski;Juujärvi;& Satpute, 2023)

Pyhäsalmen energiavarasto
Teho 75 MW / Kapasiteetti 530MWh
Tuotantoaika 7 tuntia (latauksen purkaus)
Veden pumppaaminen takaisin yläaltaaseen 9 tuntia (lataus)
Arvioidut rakennuskustannukset 125 miljoonaa euroa v. 2022. Arvioidut kustannusten nousun vaikutus projektin hintaan olisi noin 10–20 prosenttia
Työ- ja elinkeinoministeriö myöntämät investointituet hankkeelle vuonna 2021, 26,3 miljoonaa euroa
Rakennusaikainen työvoimatarve noin 600 henkilötyövuotta ja käynnistyttyään laitos työllistäisi noin 5–20 henkilöä

Pyhäsalmen pumppuvoimalaitoksen rakennus suunnittelu on jäissä, sillä EPV Energia ilmoitti syksyllä 2023 luopuvansa hankkeesta. Syynä tähän ilmoitettiin investointi- ja rahoituskustannusten hurja nousu. Syy ei ollut epätyypillinen, mutta yleensä tämän kaltaiset hankkeet ovat kaatuneet jo yläaltaan ympäristövaikutuksiin. Suomen luonnonsuojeluliiton puheenjohtajan mukaan pumppuvoimaloiden ympäristövaikutuksiin on hankala ottaa kantaa ennen tapauskohtaista selvitystä, mutta mainitsee kaivokseen rakennettavan ala-altaan olevan lähtökohtaisesti hyvä asia. Kaivos on itsessään muokannut luotoa jo niin paljon, että tällaisia tiloja tulisi saada koskemattoman luonnon sijasta hyötykäyttöön. (Tilvis, 2023)

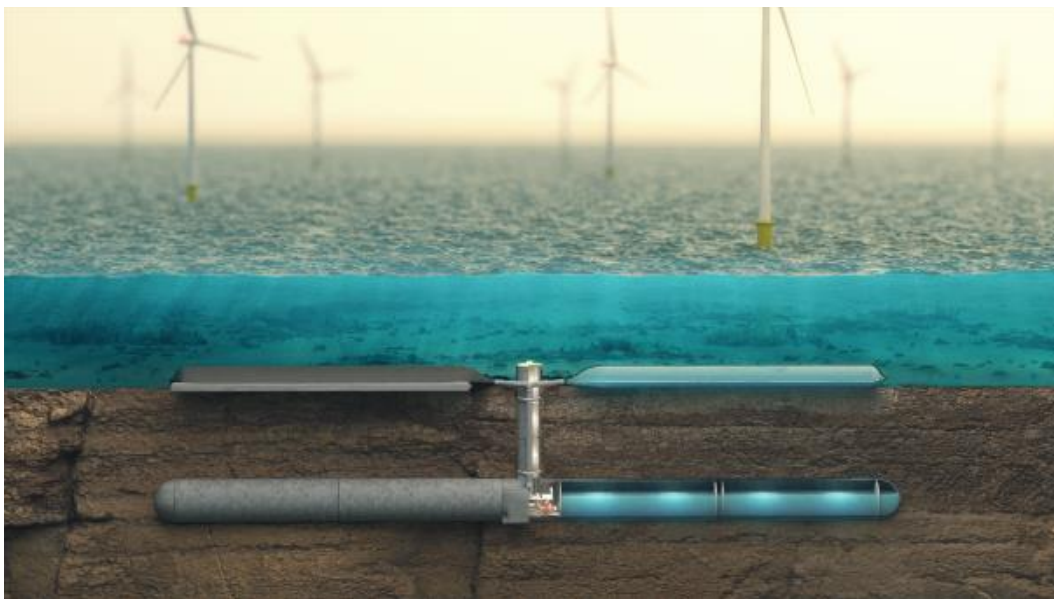
Pumppuvoimaloiden elinikä on yli 50 vuotta, eivätkä vaadi hirveämmin hoitotoimenpiteitä. Esimerkiksi akustoissa elinkaari on noin 15 vuotta. Tämä riippuu paljon myös akun käyttötavasta. Elinkaaren päätöksen olleessa lähellä, pystytään laitoksen elinikää kasvattaa vielä vuosiksi. (Ramula, 2021)

3.2 Ocean Battery

Ocean Battery on Ocean Grazerin uusi innovaatio, jonka toimintaperiaate on samanlainen kuin pumppuvoimalaitoksessa. Tässäkin tapauksessa vesi virtaa yläaltaasta ala-altaaseen. Korkeusero kuitenkin on vain parin metrin luokkaa.

Tämä pumppuvoimala malli on suunniteltu merelle ja yhdistettäväksi merituulivoimalaan. Innovaation ajatuksena on rakentaa joustavasta materiaalista putki, joka sidotaan meren pohjaan. Tämän putken ja meren pohjan alla on rakennettu ala-allas, kova kuorinen allas, johon veden annetaan meren paineen avustuksella virrata (Kuva 6).

Kehittäjän mukaan tällä tekniikalla voidaan päästä 70–80 % hyötysuhteeseen, joka on tyypillinen pumppuvoimalaitoksille. Tuulivoimapuistossa tällä tavalla energiaa voitaisiin varastoida jopa gigawatti luokkaan saakka, eli innovaatio kamppailee samassa markkinassa kuin tyypillinen pumppuvoimala. Tämä on lähes kaksinkertainen määrä, mitä Suomeen suunnitellun Pyhäjoen varasto olisi toteutuessaan (530 MWh). (Ocean Grazer, n.d.)



Kuva 6. Ocean Battery moduli (Innovation News Network, 2022)

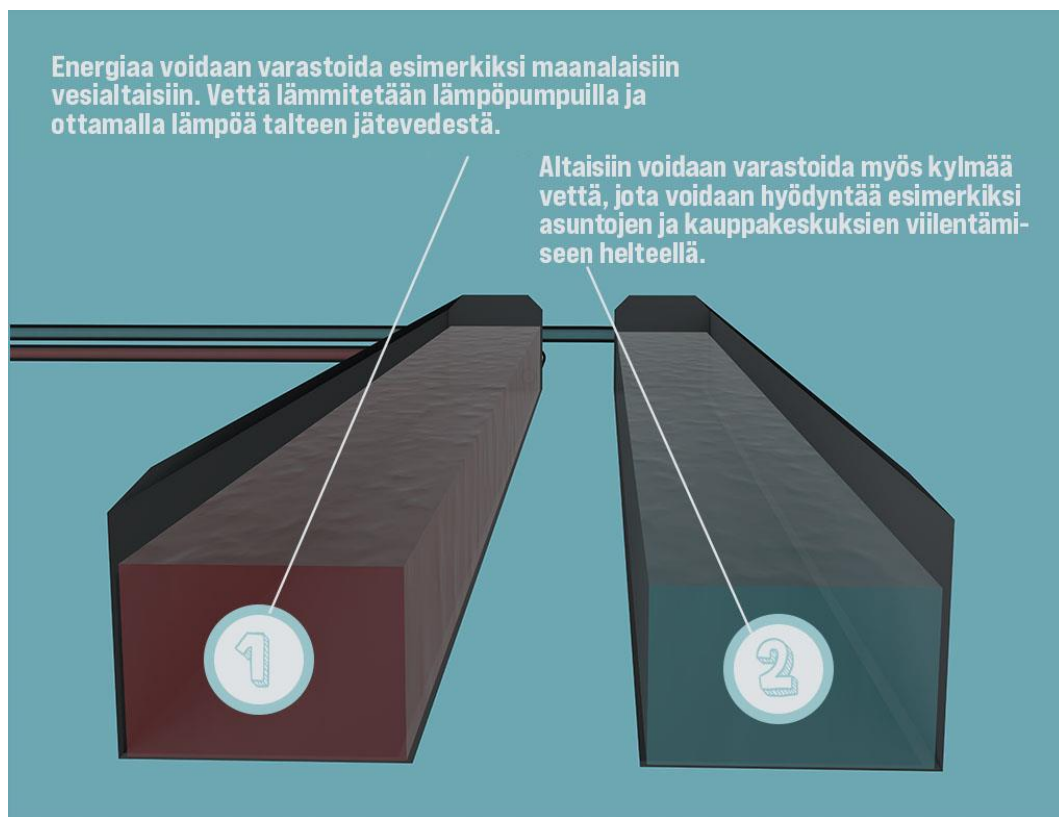
Halvan sähkön aikaan tuulivoimalan tuottama sähkö menisi varastoitavaksi, eli vesi pumpattaisiin maan alla olevasta altaasta pohjaan sidottuun joustavaan putkeen, ”yläaltaaseen”. Kalliin sähkön aikana venttiili avattaisiin ja veden annettasi virrata maan takaisin maan alla olevaan säiliöön generaattorin kautta. Eroavaisuus perinteiseen pumppuvoimalaitokseen on se, että korkeuseron tuoman potentiaalienergian sijaan, energia on säilötty veden putkeen kohdistamaan paineeseen. Tekniikan hyödyntäminen ei vaadi harvinaisia luonnon materiaaleja, vaan pääasiassa moduulit koostuvat betonista, teräksestä ja muovista/PVC:stä. (Ocean Grazer, n.d.)

Ocean Battery on modulaarinen ja voidaan asentaa tuulivoimapuiston rakennuksen yhteydessä, sekä myös jo olemassa oleviin laitoksiin. Moduulin betonista tehdyt ala-altaat ovat kooltaan 20 000 kuutiota. Yksi moduuli on kooltaan 10 MWh. Moduuleita voidaan liittää yhteen halutun kapasiteetin saamiseksi. Varastoja voidaan purkaa puolesta tunnista aina neljään tuntiin. Tämä tarkoittaa, että yksittäisessä moduulissa suurin saatu teho on 20 MW ja pienin 2,5 MW. Energiavaraston modulaarinen käyttötapa antaa myös paljon joustavuutta ja säätövara tahdottuihin kapasiteetti ja teho luokkiin (Ocean Grazer, 2021)

3.3 Maanalaiset vesialtaat

Veteen sähköksi muutettavan energian lisäksi sidotaan paljon lämpöä. Lämmitys on kotitalouksien suurin energian kuluttaja. Tästä syystä on olemassa kaukolämpöverkosto, johon varastoidaan lämmintä vettä. Vesi lämmitetään sähkön avulla tai poltettavista energianlähteistä jäävän hukkaenergian avulla. Esimerkiksi Vantaan Energia on rakentamassa Kuninkaalaan noin miljoonan kuutiometrin kokoista lämpövarastoa. Valmistuessaan lämpövaraston suuruus on viisinkertainen maailman toiseksi suurimpaan lämpövarastoon verrattuna. Varasto tuottaa lähes 100 GWh energiaa. Tarkoituksena on varastoida vesi 140 asteessa, joka on yli veden kiehumispisteen (100 astetta). Luolassa on siis oltava oikea paine, jotta vesi pystytään tällä tavalla varastoimaan. (Marttinen, 2020)

Suomessa pystytään hyödyntämään jätevettä lämpöpumppujen ohella maanalaisissa vesialtaissa (Kuva 7). Maanalaisiin vesialtaisiin voidaan varastoida myös kylmää vettä, jota käytetään kiinteistöjen viilennyksessä helteiden aikaan.



Kuva 7. Lämpö- ja kylmäakku (STEK ry, 2022)

Sähkön muuntaminen lämmöksi on investointikustannuksiltaan noin 100 kertaa edullisempaa kuin vastaavan energian varastoiminen sähköinä. Lämpövarastoja Suomessa on useampia. Lämpövarastot eivät suoraan vastaa sähkön varastoinnin ongelmaan, mutta laadukkaalla kaukolämpö ja kaukoviilennys verkostolla saadaan kevennettyä sähkön tarvetta rakennusten lämmityksessä ja viilennyksessä. (STEK ry, 2022)

4 PITKÄAIKAISET ENERGIAVARASTOT ILMASSA

Paineilmavaraston eli CASE:n (Compressed Air Energy Storage) toiminta perustuu paineistettuun ilmaan. Ilmaa puristetaan haluttuun paineeseen useiden kompressorien avustuksella säiliöön. Sähkön tarpeen ollessa suuri, ilmaa taas vapautetaan turbiinin läpi, joka generaattorin avulla muuttaa varastoidun energian takaisin sähköksi. Paineilmavarasto sopeutuu samoihin käyttötarkoituksiin kuin pumppuvoimala, eli tasaamaan kulutushuippuja myös nopealla aikavälillä. Paineilmavarastot noudattavat termodynamiikan lakeja, joista tärkeimpänä:

$$\frac{p_1 \times V_1}{T_1} = \frac{p_2 \times V_2}{T_2}$$

Missä:

p_1 = paine ennen puristusta

p_2 =paine säiliössä

V_1 = Säiliön tilavuus ennen puristusta

V_2 = Säiliön tilavuus puristuksen jälkeen

T_1 = Säiliön lämpötila ennen puristusta

T_2 = Säiliön lämpötila puristuksen jälkeen

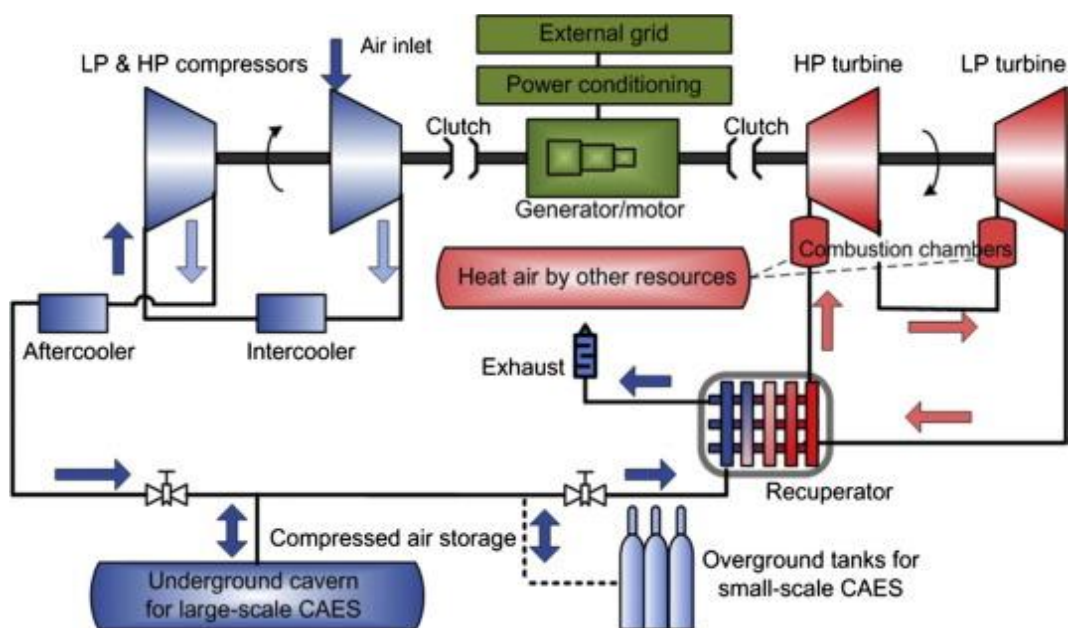
Näistä vakiona pysyvät V_1 ja V_2 , sillä säiliön tilavuus ei muutu. Kaupallisessa paineilmavarastossa painetta kasvatetaan noin 45–75 baariin, eli 45–75-kertaiseksi normaalista ilmanpaineesta. Paineen kasvaminen tarkoittaa yhtälön mukaan myös sitä, että lämpötila kasvaa samassa suhteessa paineen kanssa. Laitosta on kuitenkin hankala rakentaa kestävänsä kovin korkeita lämpötiloja, joten systeemiä joudutaan jäähdyttämään. (Hörkkö, 2022)

4.1 Diapaattinen paineilmaparasto

Paineilmavarastotyyppinä on olemassa useita, mutta kaupallisessa käytössä oleva tekniikka on diapaattinen, joka tarkoittaa sitä, että lämpöä siirtyy prosessin reunojen läpi. Paineistettua ilmaa jäähdytetään jokaisen kompressio vaiheen jälkeen, jotta lämpötila ei nouse liian suureksi. Tämä vaikuttaa paljon paineilmaparaston hyötysuhteeseen, sillä suurimmat häviöt syntyvät jäähdytyksestä, sekä lämmön poistumisesta systeemistä. Tällä kuitenkin pystytään parantamaan varastoidun ilman kapasiteettia, sillä kylmempi ilma vie kuumaa ilmaa vähemmän tilaa. (Honkanen, 2019)

Energian tarpeen kasvaessa varastosta päästetään kaasua, joka lämmitetään tyyppillisesti maakaasun avulla ja johdatetaan turbiinien läpi. Kaasun uudelleen lämmittäminen parantaa prosessin hyötysuhdetta. Kuvassa 8 esitetään kaavio diapaattisesta paineilmaparastosta. Pumpattava ilma käy useiden kompressorien läpi, joiden välissä ilmaa aina jäähdytetään. Tämän jälkeen ilma ohjataan maan alla olevaan luolaan tai maan pinnalla oleviin pienempiin tankkeihin.

Purkusyklin aikana ilma ohjataan lämmönvaihtimen kautta jälkilämmitykseen, joka tapahtuu tyyppillisesti parissa eri osassa. Diapaattisessa voimalassa jälkilämmitys tapahtuu fossiilisilla polttoaineilla.



Kuva 8. Kaavio diapaattisesta paineilmaenergiavarastosta (Estoolbox, 2019)

Maailmassa on tällä hetkellä olemassa vain kaksi suurta paineilma varastoa, jotka toimivat molemmat diapaattisesti. Ensimmäinen rakennettu on Huntorfin voimalaitos, joka on rakennettu Saksaan 1978. Toinen paineilma-varasto löytyy McIntoshista USA:sta. Kyseinen laitos on rakennettu 1991. Laitokset ovat rakennettu tasapainottamaan sähköverkkoa eritavoilla Huntorfin laitoksen purkuajan ollessa vain parin tunnin luokkaa verrattuna McIntoshin 26 tunnin purku-aikaan.

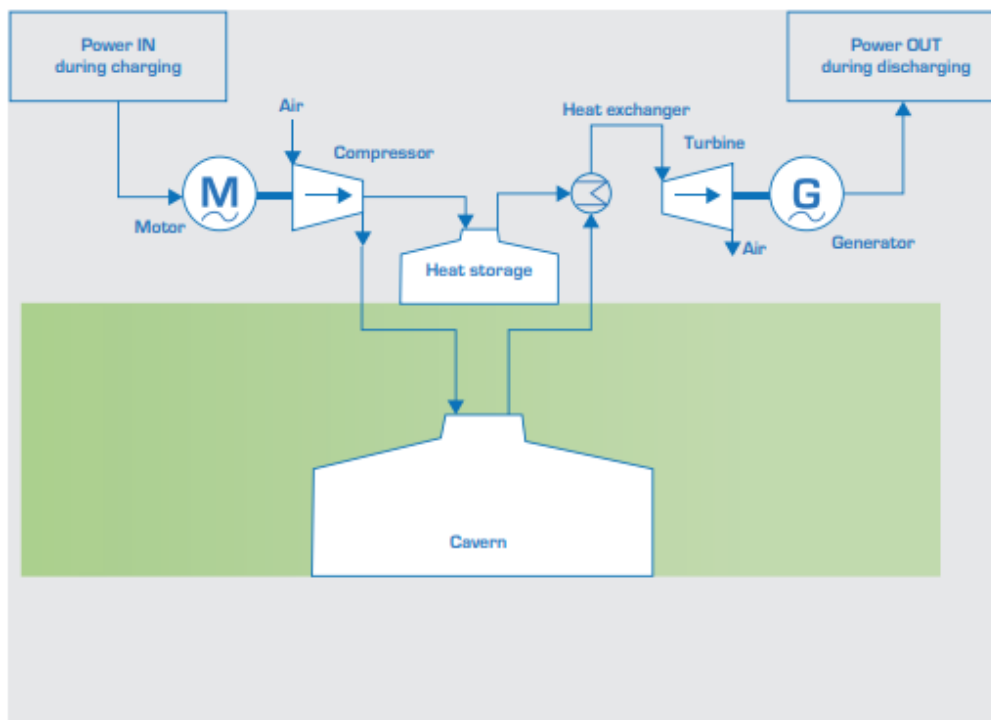
Huntorfin laitos hyödyntää varastonaan kahta vanhaa suolakaivosta, joiden yhteen laskettu tilavuus on 310 000 kuutiota. Laitos on toiminut ydinvoiman yhteydessä 8 tunnin lataus jaksolla ja 2 tunnin tuottamisen syklillä. Laitos pystyy vastaamaan huippukulutuksen tasaajana 290 MW voimalla. Vuonna 2007 tehtiin toimenpiteitä, jolla saatiin nostettua teho 320 MW asti. Laitoksen hyötysuhde on 42 %. (Jafarizadeh;Soltani;& Nathwani, 2020)

McIntoshin voimala on myös rakennettu käyttämään vanhaa suolakaivosta hyväkseen. Varaston suuruus on yli 500 000 kuutiota. Laitos on suunniteltu tasapainottamaan sähköverkkoa pidemmällä ajan jaksolla ja pystyy tuottamaan 110 MW te-

hoa jopa 26 tunnin ajan. Kyseinen varasto on hyötysuhteeltaan 54 %, joka on huomattavasti parempi kuin Saksaan rakennetulla Huntorfin laitoksella. Parempi hyötysuhde on saavutettu hyödyntämällä hukkalämpöä, joka syntyy ilmaa puristaessa. Tämä myös laskee fossiilisen polttoaineen käyttöä uudelleen lämmityksessä 22–25 %. (Jafarizadeh;Soltani;& Nathwani, 2020)

4.2 Adiabaattinen paineilmavarasto

Adiabaattisessa paineilmavarastossa lämpöenergiaa ei tuoda tai poisteta systeemistä. Tämä vaatii puristuksesta syntyvän lämmön talteen ottoa ja säilöntää käytettäväksi myöhemmin uudelleen lämmityksessä (Kuva 9). Tällä tavalla nostettiin Huntorfin laitoksen hyötysuhdetta. Diapaattisen laitoksen muuttaminen täysin adiabaattiseksi ei onnistu niin helposti kuin voisi ajatella. Laitokseen tulisi mukauttaa kompressorit, turbiini, sekä lämmön vaihdin toimimaan erilaisilla lämpötiloilla kuin diapaattisessa. Lämmön talteenotto varasto tulisi myös rakentaa, eikä prosessissa saisi tapahtua lämpöhäviöitä. Adiabaattista paineilmavarastoa ei ole vielä pystytty rakentamaan. (Barbour & Pottie, 2021)



Kuva 9. Adiabaattisen laitoksen havainnekuva (Kuvankaappaus) (EASE, 2016)

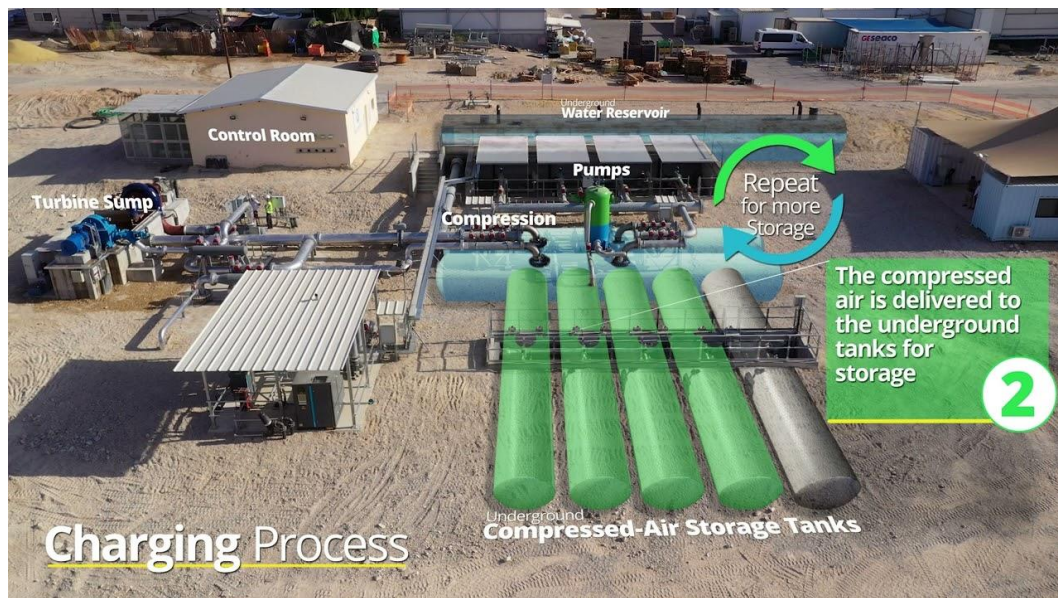
4.3 Isoterminen paineilmaparasto

Isotermisessä paineilmaparastossa lämpötila pysyy vakiona. Tällaisessa systeemissä ei vaadita ollenkaan ilman uudelleen lämmittämistä purun aikana. Systemi vaatisi tehokkaan lämmön siirron, jotta puristuksessa syntyvää lämpöä pystyttäisiin tasaisesti poistamaan. (Honkanen, 2019)

Israelilainen yritys Augwind on kehittänyt ratkaisun, joka käyttää Isotermistä toimintatapaa hyväkseen. Toimintaperiaate tukeutuu paineistettuun ilmaan energian varaajana ja veteen lämmön absorboijana, sekä virtaavana kineettisenä energiana, joka vesiturbiinin avulla muutetaan sähköksi.

Ratkaisussa säiliöön pumpataan vettä, jonka annetaan puristaa säiliössä olevaa ilmaa. Vesi absorboi hitaassa puristuksessa syntyvän lämmön, ja tällä tavalla prosessista saadaan isoterminen. Paineistunut ilma ohjataan toiseen säiliöön, johon

se varastoidaan noin 40 baarin paineeseen. Purkusyklissä ilma vapautetaan takaisin vedellä täytettyyn säiliöön, jossa se syrjäyttää säiliössä olevan veden. Puristuksessa syrjäytynyt vesi johdetaan putkien avulla vesiturbiiniin, jonka avulla veden liike muutetaan takaisin sähköksi (Kuva 10). (Augwind Energy, 2022)



Kuva 10. Esimerkkikuva AirBattery paineilmaenergiavarastosta (Kuvankaappaus) (Augwind Energy, 2022)

Yksittäinen moduuli koostuu kahdesta säiliöstä, joista kumpikin on 13 m pitkiä ja 2,5 m leveitä. Säiliöt upotetaan 3,5 metrin syvyyteen ja haudataan betonin kaltaisella aineella. Pinnalle jää vain huoltoaukko. Kalliiden maanpäällisten metalli tankkien sijaan AirBattery käyttää joustavia polymeeri säiliöitä, jotka leikkaavat kustannuksia. Lisäksi tankkien upotuksen takia, tankit eivät vie tilaa maanpinnalta (Kuva 11).



Kuva 11. Maan alle upotetut paineilma tankit (Surkes, 2021)

Yhtiön mukaan hyötysuhde AirBatterylla olisi 70–80 % eli samaa luokkaa kuin pumppuvoimaloilla. Myös elinkaaren odotetaan olevan yli 40 vuotta, eikä suurempia hoitotoimenpiteitä pitäisi joutua tekemään. Moduuleiden määrän mukaan energiaa pystytään varastoimaan 10 megawattitunnista aina 1 000 megawattituntiin. Säiliötä voidaan purkaa 4–12 tunnin aikana. Paineistetun ilman moduuleita tarvitaan useita, sillä yksi paineistettu tankki sisältää noin 0,3MWh energiaa. (Bellini, 2021) (Augwind Energy, 2022)

5 PITKÄAIKAISTEN ENERGIAVARASTOJEN VERTAILU

Paineilmavarastot, sekä pumppuvoimalat ovat Suomessa törmänneet samoihin ongelmiin. Suurimpina ongelmina on sopivan paikan löytyminen, sekä investointikustannukset. Yksittäiset investointikustannukset ovat niin korkealla, ettei näihin uskalleta sijoittaa. Molemmat tekniikat vaativat myös ympäristöltään paljon. Pumppuvoima korkeuseroja ja paineilma valmiita kaivoksia tai luolia. Suuriin projekteihin kuuluu myös paljon ympäristöhuolia, joihin useat suunnitellut projektit ovat jo loppuneet

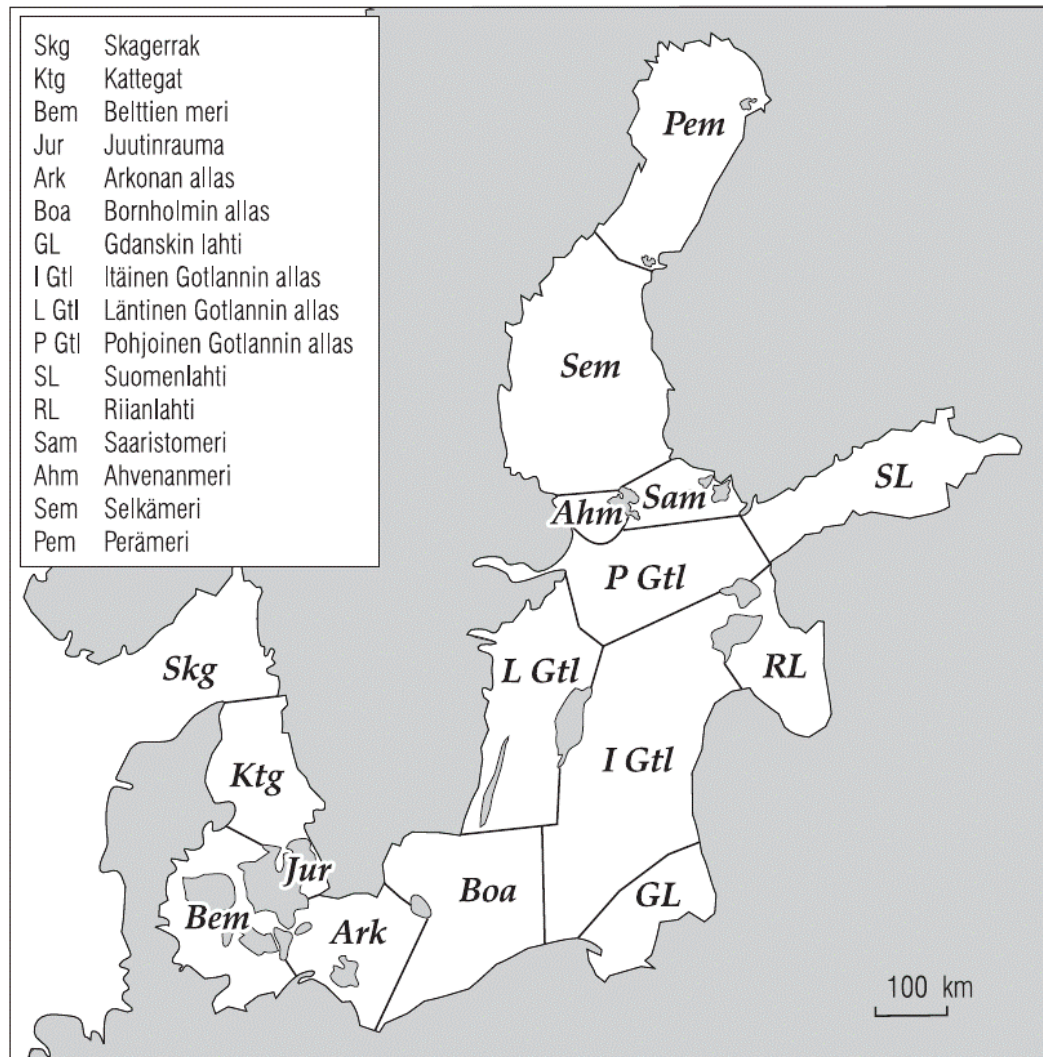
5.1 Sijainti

Molemmat laitostyytit ovat kamppailleet sopivien olosuhteiden löytymisestä. Kustannusten hillitsemiseksi molemmat vaativat valmiit olosuhteet, pumppuvoima korkeuseron ja paineilma maanalaisen luolan tai kaivoksen. Pumppuvoimalaitoksella hyötynään tässä on kuitenkin sovellettavuus, sekä maan pinnalle, että luolaan tai kaivokseen. Suomessa maan pinnalla korkeuseroja ei kuitenkaan ole riittävästi, joten pumppuvoimalaa ei pystytä rakentamaan maan pinnalle juuri missään. Tästä syystä pumppuvoimalat, sekä paineilma-varastot kilpailevat pääosin samoista rakennuspaikoista. Tähän mennessä molempiin laitos tyyppiin soveltuvat paikat ovat taipuneet suunnitelmissa pumppuvoimaloiden puolelle.

Modulaaristen ratkaisujen puolelta AirBattery ei vaadi valmiita olosuhteita. Tämän pystyy istuttamaan melkein mihin vain, missä pystyy kaivamaan neljän metrin syvyyteen. Varastojen päällä pystyy esimerkiksi viljelemään, joten moduuleita pystyisi rakentamaan esimerkiksi peltojen alle. Täällä ne eivät veisi myöskään tilaa.

Ocean Battery ei myöskään vaadi samanlaisia olosuhteita kuin tyypilliset pumppuvoimalat tai paineilma-varastot. Suomessa Ocean Batteryä voitaisiin hyödyntää osana merelle sijoitettua tuulipuistoa. Suurin osa Suomessa olevasta tuulivoi-

masta on länsirannikolla ja myös suunnitteilla olevista merituulipuistoista ennakoidaan tulevan Selkä- ja Perämerelle, eli Suomen ja Ruotsin väliin (Kuva 12).



Kuva 12. Itämeren merialueet (Itämeri.fi, 2006)

Itämeri on matala meri. Keskimääräinen syvyys Selkämerellä on 66 m ja Perämerellä 41 m. Meren pohjassa oleva paine voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$P = \rho \times g \times h$$

Missä:

P= Paine

ρ =tiheys

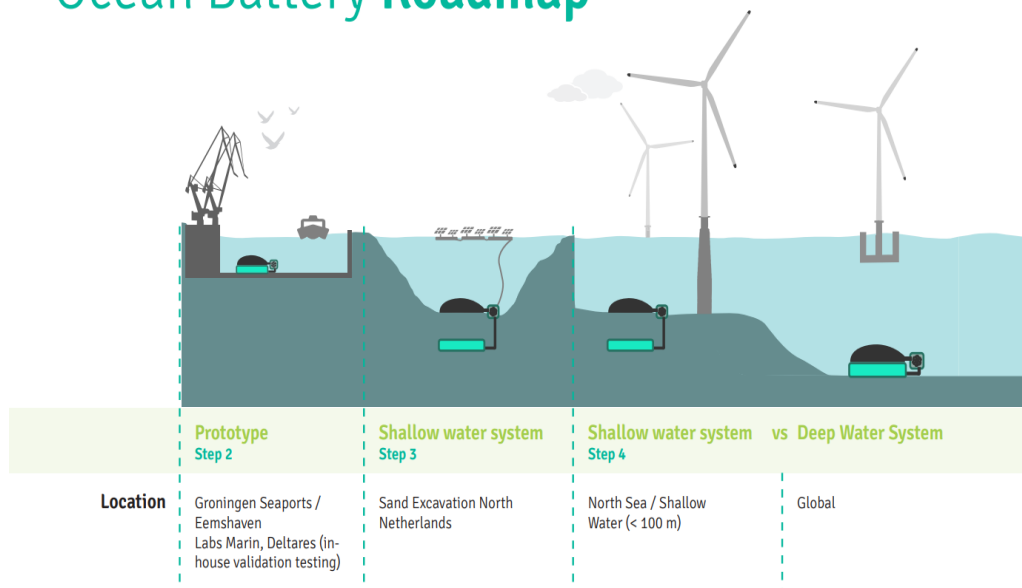
g =maan vetovoima

h = korkeus

Veden tiheys Itämeressä vaihtelee hieman, mutta keskimäärin tiheys on ihan vähän yli 1 000 kg/m³. Maan vetovoima sen sijaan on standardi 9,81 m/s². Meren pohjan keskipaine käyttämällä kaavaa on siis Selkämerellä 647 469 Pa ja Perämerellä 401 010 Pa, eli 6,5 bar ja 4 bar. Normaali ilmanpaine on noin 1 bar, joten paine meren pohjassa on 4–6,5 kertainen. Paineen muutos on selkeä, mutta tämä saattaa rajoittaa joitain luvattuja arvoja esimerkiksi tehosta ja hyötysuhteesta. (Ocean Grazer, 2021)

Tuotetta ei ole vielä testattu käytännössä tuulivoimalan yhteydessä, mutta tuotteesta kaavaillaan 2023–2025 tulevan versio sekä alle 100 metrin syvyisiin vesiin, että yli 100 metrin syvyisiin vesiin. Paineen kasvaessa tuotteen suunnittelu muuttuu hieman. Syvemmissä vesissä hyötynä olisi kasvava paine, joka vaikuttaa maksimi tehoon (Kuva 13).

Ocean Battery Roadmap



Kuva 13. Ocean Battery:n eri tuotemallit (Kuvankaappaus): (Ocean Grazer, 2021)

Tekniikka on vielä kehitysvaiheessa, eikä dataa kaupallisesta käytöstä vielä ole. Itämeren mataluudesta huolimatta tekniikka on potentiaalinen myös Suomen olosuhteisiin, sillä merelle sijoitettujen tuulipuistojen määrä tulee tulevaisuudessa kasvamaan.

5.2 Hyötysuhde

Hyötysuhteeltaan pumppuvoimalat ovat tällä hetkellä edellä. Pumppuvoimalaitoksissa hyötysuhde on yleisesti 70–80 % verrattuna diapaattiseen paineilmavoi-malaan, jonka hyötysuhde on parhaimmillaan 55 %. Huonomman hyötysuhteen lisäksi diapaattinen paineilmavarasto käyttää fossiilista polttoainetta toimiakseen. Pumppuvoimalaitoksessa fossiilisia polttoaineita ei käytetä. Molemmat tekniikat ovat vanhoja, eikä suuria harppauksia hyötysuhteen kanssa ole otettu. Kuitenkin paineilmavarastojen hyötysuhdetta on hieman pystytty parantamaan käyttämällä hyväksi hukkalämpöä. Paineilmavarastoja pitäisi pystyä kehittämään vastaamaan adiabaattista tai isotemistä laitosta kohti. Täysin adiabaattinen laitos voisi pystyä

jopa 70 % hyötysuhteeseen. Vastaavasti isotermissellä laitoksella voitaisiin päästä myös sen yli.

Modulaarisissa ratkaisuisa AirBattery:n (isoterminen paineilmaparasto) ja Ocean Battery:n välinen hyötysuhde on samankaltainen 70–80 %. Tämä vastaa perinteisen pumppuvoimalaitoksen hyötysuhdetta. Molemmat näistä tekniikoista nojaavat osittain paineeseen ja osittain vesivoimaan kehitettyihin komponentteihin, sillä molempien käyttämä turbiini on sovellus perinteikkäästä vesivoimaturbiinista. Molemmissa siis kineettisen energian luo paine, mutta liikkuvasta vedestä generoidaan sähköä.

5.3 Kustannukset

Rakentaminen vastaa selkeästi suurinta osaa elinkaaren aikaisista kustannuksista. Taulukossa 3 on eri laitosten tiedot jaoteltuna.

Taulukko 3. Energiavarojen tiedot vertailussa (Luotu Excelohjelmalla)

Laitos tyyppi	Pumppuvoimalaitokset		Paineilmaparasto (diapaattinen)	Modulaariset	
	Vaarunvuori	Pyhäsalmi	Huontford	Paineilmaparasto (isoterminen)	Pumppuvoimala (meren paineen avulla)
Teho MW	500MW	75MW	290MW	3,3-10MW	2,5MW-20MWh
Purku aika tunneissa	10 h	7 h	3 h	4–12 h	0,5–4 h
KapasiteettiMWh	5 000MWh	525MWh	870MWh	40MWh	10MWh
Rakentamisen hinta	410 miljoonaa	150 miljoonaa	150 miljoonaa	7,3 miljoonaa	
Rakennus hinta/käyttöikä	8,2 miljoonaa/vuosi	3 miljoonaa/vuosi	3 miljoonaa/vuosi	0,183 miljoonaa/vuosi	
Hinta €/kWh	82 €/kWh	285 €/kWh	172 €/kWh	183 €/kWh	
Hinta €/kW	850 €/kW	2000 €/kW	517 €/kW	730–2190 €/kW	
hyötysuhde	75 %	77 %	42 %	70–80 %	70–80 %

Suomessa Vaarunvuorelle Jyväskylän läheisyyteen oli jo 1970-luvulla suunnitteilla pumppuvoimalaitos. Suunnitelmien mukaan laitos olisi pystynyt 500 MW purku-tehoo kymmenen tunnin ajaksi, eli vesiakun koko olisi ollut noin $500 \text{ MW} * 10 \text{ h} = 5\,000 \text{ MWh} = 5 \text{ GWh}$ (Mervola, 2022) Rakennuskustannusten ajateltiin olevan 850 miljoonaa markkaa, joka nykyarvo euroissa olisi noin 410 miljoonaa euroa. Tämän arvion mukaan rakennushinnan mukaan laskettu kilowattituntihinta on $410 \text{ miljoonaa euroa} / 5\,000\,000 \text{ kWh} = 82 \text{ €/kWh}$. Pumppuvoimalan elinikä on tyypillisesti ainakin 50 vuotta, joten toimintavuosille jaettuna hinnaksi tulee $410 \text{ miljoonaa euroa} / 50 \text{ vuotta} = 8,2 \text{ miljoonaa euroa toimintavuotta kohden}$. (Peltonen, 1982)

Toisena erimerkkinä Pyhäsalmeen suunnitteilla oleva pumppuvoimalaitos. Pumppuvoimala pystyisi tuottamaan 7 tuntia sähköä verkkoon 75 MW teholla, eli varaston suuruus olisi $75 \text{ MW} * 7 \text{ h} = 525 \text{ MWh}$. Taulukosta myös näemme arvioidun rakennuskustannuksen tämän mittakaavan laitokselle. 125 miljoonaa euroa arvioiduilla 10–20 prosentin kustannusten nousulla. Tällöin kustannukset olisivat $137,5\text{--}150 \text{ miljoonaa euroa}$. Kilowattituntia kohden hinta olisi noin $150 \text{ miljoonaa euroa} / 525\,000 \text{ kWh} = 285 \text{ €/kWh}$. Rakennus kustannus 50 vuodelle taas vastaavasti on $150 \text{ miljoonaa euroa} / 50 \text{ vuotta} = 3 \text{ miljoonaa euroa/vuosi}$. (Ramula, 2021)

Huntorfin paineilmavaraston rakennuksen hinta-arvio on nykyrahassa noin 150 miljoonaa euroa. (Tilastokeskus, 2024) Ennen korjausta kapasiteettia kasvattavaa korjausta laitos pystyi tuottamaan 290 MW tehon 3 tunnin ajan. Tämä tekee sen kapasiteetista $290 \text{ MW} * 3 \text{ h} = 870 \text{ MWh}$. Vastaavasti hinta kilowattituntia kohden hinta on $150 \text{ miljoonaa euroa} / 870\,000 \text{ kWh} = 172 \text{ €/kWh}$. Tämä on huomattavasti halvempi kuin Pyhäsalmen pumppuvoimalaitoksella. Huntorfin laitos on ollut pystyssä 45 vuotta, joten on reilua käyttää arviona samaa 50 vuoden tuotanto elinkaarta kuin pumppuvoimaloissa. Rakennus kustannukset jaettuna 50 vuodelle ovat $3 \text{ miljoonaa euroa}$, joka on sama kuin Pyhäsalmeen kaavaillulla pumppuvoimalaitoksella.

AirBattery on solminut Vuoden 2021 joulukuussa 8 miljoonan dollarin, eli 7,33 miljoonan euron diilin Israelin sähköyhtiön kanssa. Varaston suuruudeksi on määritelty 40 MWh. (surkes, 2021) Yritys on ilmoittanut käyttö iäksi 40 vuotta. Sijoituksella varastoidun kilowattitunnin hinnaksi tulee 7,33 miljoonaa euroa / 40 000 KWh = 183 €/kWh. 7,33 miljoonan euron sijoitus jaettuna 40 vuoden käyttöajalle on 183 250 euroa.

Ocean Batteryille suoranaista hintaa moduulin rakentamiselle ei kerrota, mutta moduulin kerrotaan nostavan 10 MW tuuliturbiinin arvoa 2,7 miljoonaa euroa. 750 MW tuulipuistossa arvon kerrotaan nousevan 200 miljoonaan euroon. Takaisinmaksu aika investoinnille olisi Ocean Gracerin mukaan alle kahdeksan vuotta. Käyttöiän on arvioitu olevan yli 20 vuotta rajoittajattomalla syklien määrällä. Tänä aikana ei pitäisi olla tarvetta suuremmille huoltotoimille. (Ocean battery, 2023) Tietoa rakennuskustannuksiin pohjautuvasta energian hinnasta ei ole kuitenkaan vielä tietoa.

Pörssisähkön hinta yöllä oli vuonna 2021 keskimäärin 60,175 €/MWh. Päivän keskihinta on ollut 89,49 €/MWh. Vuonna 2023 vastaavat lukemat ovat yöltä 67,9 €/MWh ja päivältä 112,1 €/MWh. (Pörssisähkö.net, 2024) Sähkön hinta on yöllä noussut 7,725 €/MWh ja päivällä 22,61 €/MWh. Päiväsähkön hinta on noussut 2,9 kertaa enemmän kuin yösähkön. Tämä vaikuttaa positiivisesti energian varastoinnista saatuihin tuloihin.

Seuraavassa taulukossa (Taulukko 4) on laskettuna neljälle eri laitokselle vuosille 2021 ja 2023 tuotto, mikäli laitokset olisivat olleet toiminnassa Suomessa kyseisillä ajanjaksoilla. Laskuissa latauspurku syklejä on ollut jokaisessa 365 vuotta kohden. Yön keskihinta on kerrottuna kapasiteetilla ja vuosittaisilla latauksilla. Näiden kolmen tule on merkittynä negatiiviseksi. Tähän on lisätty päivän keskihinta, joka on kerrottuna kapasiteetilla, purkujen määrällä, sekä hyötysuhteella. Tästä tulokseksi saadaan voitto vuodessa. Tässä ei ole huomioitu laitoksen muita käyttökuluja tai veroja.

Taulukko 4. Esimerkkien vuosittainen voitto (Luotu Excelohjelmalla)

Laitos tyyppi	Pumppuvoimalaitokset		Paineilma- varasto (diapaattinen)	Modulaari- set
Laitos	Vaarunvuori	Pyhä- salmi	Huontford	Paineilma- varasto (isotermi- nen)
Purkuja vuodessa (kpl)	365	365	365	365
Kapasiteetti (MWh)	5 000	525	870	40
hyötysuhde (%)	75 %	77 %	42 %	70 %
Yön keskihinta 2021 (€/MWh)	60,175	60,175	60,175	60,175
Päivän keskihinta 2021 (€/MWh)	89,49	89,49	89,49	89,49
Yön keskihinta 2023 (€/MWh)	67,9	67,9	67,9	67,9
Päivänkeskihinta 2023 (€/MWh)	112,1	112,1	112,1	112,1
Voitto vuodessa 2021 (€)	12 670 063	1 673 327	-7 173 200	36 033
Voitto vuodessa 2023 (€)	29 519 375	3 529 158	-6 610 756	154 322
Rakennus hinta/käyttöikä (€/vuosi)	8 200 000	3 000 000	3 000 000	183 000
Voitto 2021 - Rakennushinta/käyttöikä (€)	4 470 063	-1 326 673	-10 173 200	-146 967
Voitto 2023 - Rakennushinta/käyttöikä (€)	21 319 375	529 158	-9 610 756	-28 678

Vaarunvuoren laitoksella voitto olisi ollut vuonna 2021 noin 12,5 miljoonaa euroa, joka olisi noussut vuoden 2023 yli kaksinkertaiseksi 29,5 miljoonaan euroon. Laitos olisi tehnyt molempina vuosina voittoa, vaikka lyhentäisi toimintavuosille jaetun rakennuskustannukset voitoista. Pyhäsalmen laitos olisi sen sijaan tehnyt 1,7 miljoonan voiton vuonna 2021 ja myös yli kaksinkertaisen 3,5 miljoonan voiton vuonna 2023. Toimintavuosille jaettu rakennuskustannusvähennyksen jälkeen laitos olisi kuitenkin tällä tavalla käytettynä tehnyt 1,3 miljoonaa euroa tappiota. Kuitenkin vuonna 2023 vähennyksen laitos olisi päässyt voitolle myös vähennyksen jälkeen reilun puoli miljoonaa.

Huntorfin laitos sen sijaan olisi tehnyt tappiota molempina vuosina yli 6 miljoonaa euroa ja rakennuskustannusvähennyksien jälkeen noin 10 miljoonaa. Huntorfin laitos on toki tehty vastaamaan huipputehoon ja pystyy hyötymään hyvin kaikkein

kalleimmat tunnit. Varaston kapasiteetti ja teho on suurempi kuin Pyhäsalmele suunnitellulla laitoksella rakennuskulujen ollessa samalla tasolla. Huonon hyötysuhteen takia laitos ei kuitenkaan tällä tavalla käytettynä ole kannattava.

Nostaessa Huntorfin laitoksen hyötysuhteen 69 %, olisi se tuottanut 530 € rakennusvähennyksen jälkeen vuonna 2023. Vastaavasti päästessä voitolliseksi vuonna 2021 olisi hyötysuhteen oltava 78 %. Diapattisella paineilmavarastolla ei kuitenkaan ole mahdollista päästä niin korkeisiin hyötysuhteisiin, jotta varaston rakentaminen olisi kannattavaa muun kuin verkon tasapainottamisen kannalta. Ongelmana säilyy myös uudelleen lämmittämiseen tarvittava fossiilinen polttoaino. Näistä syystä myös kaivokset, jotka soveltuisivat myös paineilmaenergiavarastoksi, suunnitellaan ensisijaisesti pumppuvoimakäyttöön.

Isoterminen AirBattery olisi 2021 tehnyt voittoa 36 000 € ja vuonna 2023 yli nelinkertaisen voiton 154 000 €. Kuitenkin rakennuksesta tulevan vähennyksen jälkeen molempina vuosina tulisi tappiota. AirBattery on kuitenkin skaalattava, joten kasvatetaan sen kapasiteetti täsmäämään Pyhäsalmeen kaavailtua pumppuvoimalaitosta. Ainut hinta projektille on tällä hetkellä 7,33 miljoonaa euroa 40 MWh laitosta kohden. Pyhäsalmen laitos on toteutuessaan kapasiteetiltaan 525 MWh. Se on 13,125 kertaa suurempi kuin AirBatteryyn toteuttama, joten 40 MWh laitoksen hinta tulee kertoa tällä lukemalla. Hinnaksi 525 MWh laitokselle tulisi hintaa $7,33 \text{ milj.€} * 13,125 = 96,2 \text{ miljoonaa euroa}$.

Taulukossa 5 vertaillaan Pyhäsalmen pumppuvoimalaitosta ja AirBatteryä samassa koko luokassa. AirBattery esitetty kolmella eri hyötysuhteella, sillä tästä ei ole vielä tarkkaa tietoa. Pyhäsalmen laitos myös esitettynä kahdella eri rakennushinnalla.

Taulukko 5. Pyhäsalmi verrattuna AirBatteryyn samassa kokoluokassa (Luotu Excelohjelmalla)

Laitos tyyppi	Pumppuvoima		Modulaariset		
	Pyhäsalmi	Pyhäsalmi	Paineilmavarasto (isoterminen)		
Purkuja vuodessa (kpl)	365	365	365	365	365
Kapasiteetti (MWh)	525	525	525	525	525
hyötysuhde (%)	77 %	77 %	70 %	75 %	80 %
Yön keskihinta 2021 (€/MWh)	60,175	60,175	60,175	60,175	60,175
Päivän keskihinta 2021 (€/MWh)	89,49	89,49	89,49	89,49	89,49
Yön keskihinta 2023 (€/MWh)	67,9	67,9	67,9	67,9	67,9
Päivänkeskihinta 2023 (€/MWh)	112,1	112,1	112,1	112,1	112,1
Voitto vuodessa 2021 (€)	1673327	1673327	472930	1330357	2187783
Voitto vuodessa 2023 (€)	3529158	3529158	2025476	3099534	4173593
Rakennus hinta/käyttökä (€/vuosi)	3000000	2500000	2400000	2400000	2400000
Voitto 2021 - Rakennus-hinta/käyttökä (€)	-1326673	-826673	-1927070	-1069643	-212217
Voitto 2023 - Rakennus-hinta/käyttökä (€)	529158	1029158	-374524	699534	1773593

Taulukosta 5 huomataan, että 75 % hyötysuhteella AirBattery voisi olla taloudellisesti kannattavampi kuin pumppuvoimala rakentaessa 525 MWh energiavarastoa. Yrityksen arvion mukaan hyötysuhde todennäköisemmin on 75–81 %. (Augwind, 2020) 75 % hyötysuhde tarkoittaa vuonna 2023 noin 700 000 € - 530 000 € = 170 000 € eroa AirBatteryyn hyväksi. 80 % hyötysuhteella ero nousisi yli 1,2 miljoonaan euroon, joka on 2,3 kertainen pumppuvoimalaan verrattuna. AirBatteryyn käyttö tulisi siis näiden sopimusten hinnalla kannattavammaksi verrattuna pumppuvoimalaitokseen.

Pyhäsalmen laitos on esitetty kahdella eri rakennuskustannuksella, sillä alkuperäinen kaavailtu budjetti on 125 miljoonaa euroa, jolloin vuosittaiseksi maksettavaksi tulisi 2,5 miljoonaa euroa. Tällä päästään vuonna 2023 hieman yli miljoonan euron voittoon. Vastaavaan voittoon päästään AirBatterylla 76,6 % hyötysuhteella.

Pyhäsalmen laitoksen rakennuskustannusten kohotessa yli 125 miljoonaan euroon, tulee sen rakentaminen kalliimmaksi kuin AirBatteryyn. Tämän takia AirBatteryyn käyttöä sähköverkon reservinä kannattaisi taloudelliselta harkita. (Augwind, 2020) Talouden lisäksi AirBattery ei vaadi valmiita olosuhteita ollakseen järkevä sijoitus. Tuotteena se on kuitenkin uusi, joten sen toiminnallisuutta ei tunneta vielä niin laajasti kuin perinteikkään pumppuvoimalan.

6 YHTEENVETO

Tuulivoiman lisääminen ja fossiilisten sähköntuottotapojen poistuminen ovat lisänneet tarvetta sähköverkon tasaamiseen. Ennen tuulivoiman lisäämistä sähkön tuotanto oli ennustettava ja myös taajuuden ylläpitäminen helpompaa. Tällä hetkellä tasaaminen tapahtuu ostetulla sähköllä, sekä vesivoimalla. Energianvarastoinnin on ajateltu olevan kannattamatonta toimintaa, eikä tähän ole sen vuoksi panostettu. Sähkön hinnan vaihtelevuuden takia mielenkiinto energianvarastointia kohtaan on kuitenkin noussut.

Pitkäaikaisten energiavarastojen rakentaminen on Suomessa ollut haastavaa. Pääsyyt ovat olleet taloudellinen kannattamattomuus, suurta pääomaa vaativat hankkeet, sekä korkeus erot erityisesti pumppuvoimalaitoksilla. Suomessa on ollut useampia pumppuvoimalaitos hankkeita, jotka eivät ole menneet rakennuslupaa pidemmälle. Paineilmavarastoja Suomeen ei ole kaavailtu.

Pumppuvoima laitoksen ja paineilmavaraston suurin ero on taloudellisella puolella hyötysuhde. Paineilmavaraston rakentaminen voisi olla sijoituksena pumppuvoimalaitosta halvempaa, mutta sen hyötysuhde on liian heikko korvatakseen säästetyt rakennuskustannukset. Tämän lisäksi diapaattiset paineilmavarastot hyödyntävät jälkilämmityksessä fossiilisia polttoaineita.

Uusi isoterminen paineilmavoimala AirBattery pystyy vastaamaan pumppuvoimalaitoksen hyötysuhteeseen. Se kykenee pumppuvoiman tavoin toimimaan sekä taajuuden vakautus, että taajuuden palautus reservissä. Isotermisellä paineilmavariavastolla on potentiaalia haastaa pumppuvoimalaitokset Suomen kaltaisessa maassa, jossa olosuhteet pumppuvoimaloiden rakentamiselle ovat huonot. Tämän lisäksi modulaarisella ratkaisulla pystytään hillitsemään rakennus kustannuksia, sillä kapasiteettia ei tarvitse rakentaa niin suureksi heti. Kapasiteettia kyetään rakentamaan lisää, jos se koetaan tarpeelliseksi. Ratkaisu vastaa myös suuriin

rakennuskustannuksiin liittyviin ongelmiin ja vähentää näin riskiä sijoittaa energian varastointiin.

AirBatteryn kehittyessä olisi hyvä tehdä vertailu myös tämän hetken määrällisesti suurimpaan energianvarastointitapaan, eli kemiallisiin akkuihin. Näihin AirBatteryllä on etunaan pidempi elinkaari, sekä ympäristöystävällisemmät komponentit.

LÄHDELUETTELO

- Alanärä, A. (4 2020). *Trepo.tuni.fi*. Haettu 22. 2 2024 osoitteesta Sähköenergian varastointi veden potentiaalienergiaan: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/121988/Alan%E4r%E4Antti.pdf?sequence=2>
- Augwind. (12 2020). Haettu 12. 3 2024 osoitteesta <https://ir.aug-wind.com/wp-content/uploads/2020/12/Augwind-Efficiency-Assessment-Announcement-1.pdf>
- Augwind. (2020). *Augwind-Efficiency-Assessment-Announcement*. Haettu 19. 3 2024 osoitteesta <https://ir.aug-wind.com/wp-content/uploads/2020/12/Augwind-Efficiency-Assessment-Announcement-1.pdf>
- Augwind Energy. (9. 3 2022). *Youtube video*. Haettu 17. 2 2024 osoitteesta https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.youtube.com%2Fwatch%3Fv%3DVe1OHMAAus&psig=AOvVaw1Exo01W1Ln_q8hb2GQAuDb&ust=1710426201014000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBUQjhXqFwoTCICywaK48YQDFQAAAAAdAAAAABAE
- Autoalan tiedotuskeskus. (1. 2 2024). *Liikennekäytössä olevien ladattavien autojen määrä*. Haettu 25. 2 2024 osoitteesta https://www.aut.fi/tilastot/autokannan_kehitys/sahkoautojen_maaran_kehitys
- Barbour, E.;& Pottie, D. L. (6. 8 2021). *Tiede artikkeli adiabaattisesta paineilma-energiavarastosta*. Haettu 17. 2 2024 osoitteesta <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435121003470>
- Bellini, E. (2. 11 2021). *pv magazine: Augwind's compressed air tech for renewables storage*. Haettu 20. 3 2024 osoitteesta <https://www.pv->

magazine.com/2021/02/11/augwinds-compressed-air-tech-for-renewables-storage/

EASE. (3 2016). *Adiabatic Compressed Air Energy*. Haettu 2. 3 2024 osoitteesta European association for storage of energy: https://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2016/03/EASE_TD_ACAES.pdf

Elektropedia. (2005). *Energy Storage Applications - The Challenges*. Haettu 10. 2 2024 osoitteesta https://www.mpoweruk.com/grid_storage.htm

Energiateollisuus. (4. 1 2024). *Power Point esitys sähkön hinnasta*. Haettu 27. 2 2024 osoitteesta <https://energia.fi/wp-content/uploads/2024/01/Sahkon-hintatilastot-4.1.2023.pdf>

Estoolbox. (2019). *Compressed Air Energy Storage*. Haettu 2. 3 2024 osoitteesta https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Festoolbox.org%2Findex.php%2Fbackground%2F8-samples%2F9-caes-introduction&psig=AOvVaw3J4NcmxJ9Vmh41_eF_DXd6&ust=1710959701241000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBIQjRxqFwoTC KCGpNv7glUDFQAAAAAdAAAAAB

Fingrid. (2023). *Yritys sivut*. Haettu 22. 2 2024 osoitteesta tehoreselvi 2023: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/tehoreservi/maksut/tehoreservi-2023/>

Fingrid. (21. 2 2024). *Sähkön tuotanto ja kulutus*. Haettu 21. 2 2024 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinainformaatio/kulutus-ja-tuotanto/>

Fingrid. (2024). *Yrityssivut, reservimarkkinat*. Haettu 22. 2 2024 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/#reservilajit>

Honkanen, S. (21. 4 2019). *LUT kandidaatintyö*. Haettu 17. 2 2024 osoitteesta Mekaaniset energiavarastot:

https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/159345/Kandidaatintyo_Honkanen_Santeri.pdf?sequence=1

Huotilainen, H. (30. 1 2023). *Tekniikka ja talous: Tuulivoima voi tuottaa 2030 Suomen sähkönkulutuksesta jopa puolet – Näin käy sähkön hinnalle.*

Haettu 25. 2 2024 osoitteesta

<https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/tuulivoima-voi-tuottaa-2030-suomen-sahkonkulutuksesta-jopa-puolet-nain-kay-sahkon-hinnalle/7d096ed9-99a7-493a-9ae1-69d384707947>

Hörkkö, R. (7. 12 2022). *Aaltoyliopiston kandidaatintyö.* Haettu 16. 2 2024

osoitteesta https://rikuhorkko.fi/projektit/eng_2022_Horkko_Riku.pdf

Innovation News Network. (2. 9 2022). *The Ocean Battery: The most sought-after innovation in the utility industry.* Haettu 2024. 3 10 osoitteesta

<https://www.innovationnewsnetwork.com/the-ocean-battery-the-most-sought-after-innovation-in-the-utility-industry/25032/>

Itämeri.fi. (2006). *Itämeri numeroina.* Haettu 19. 2 2024 osoitteesta

<https://itameri.fi/fi->

[Fl/Luonto_ja_sen_muutos/Ainutlaatuinen_Itameri/Itameri_numeroina](https://itameri.fi/fi-Fl/Luonto_ja_sen_muutos/Ainutlaatuinen_Itameri/Itameri_numeroina)

Jafarizadeh, H.;Soltani, M.;& Nathwani, J. (1. 4 2020). *Science direct: Assessment of the Huntorf compressed air energy storage plant performance under enhanced modifications.* Haettu 15. 2 2024 osoitteesta

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890420302004>

Kiiski, H.;Juujärvi, R.;& Satpute, S. (22. 6 2023). *Vaasan ammattikorkeakoulun verkkolehti.* Haettu 10. 2 2024 osoitteesta

<https://energiaa.vamk.fi/artikkelit/vaikuttavuus/pumppuvoimalaitokset-tehokas-ja-kestava-energiavarasto-uusiutuvalle-energialle/>

Koskinen, L. (30. 5 2023). *Akkukäyttöisten sähkövarastojen tekniikat ja markkinatilanne*. Haettu 10. 3 2024 osoitteesta https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/800990/Koskinen_Lari.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Kramula, J. (27. 8 2021). *Pumppuvoimalaitos Suomeen*. Haettu 15. 3 2024 osoitteesta https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/163163/kandidaatinty%C3%B6_ramula_janina.pdf

Luotola, J. (5. 3 2018). *Insinöörilehti: Teraloop käynnisti leijuvan vauhtipyörän*. Haettu 2024. 3 17 osoitteesta <https://insinööri-lehti.fi/artikkelit/teraloop-kaynnisti-leijuvan-vauhtipyoran/>

Marttinen, V. (22. 9 2020). *YLE: Vantaalle louhitaan maailman suurin lämpövarasto*. Haettu 10. 3 2024 osoitteesta <https://yle.fi/a/3-11556904>

Mervola, P. (28. 2 2022). *Keskisuomalainen: Jyväskylän paikallislehti, pääkirjoitus*. Haettu 15. 3 2024 osoitteesta [Mieliipide | Vaarunvuoren vesiakkua pitäisi vielä harkita uudelleen: https://www.ksml.fi/paakirjoitus-mielipide/5754641](https://www.ksml.fi/paakirjoitus-mielipide/5754641)

Neonen. (27. 12 2023). *Neoen aloittaa Suomessa kapasiteetiltaan Pohjoismaiden suurimman akkuvaraston rakentamisen*. Haettu 27. 2 2024 osoitteesta <https://finland.neoen.com/fi/uutiset/2023/neoen-aloittaa-suomessa-kapasiteetiltaan-pohjoismaiden-suurimman-akkuvaraston-rakentamisen/>

Ocean battery. (2023). *The solution for the global energy storage problem*. Haettu 2. 3 2024 osoitteesta <https://oceangrazer.com/wp-content/uploads/2022/01/Ocean-Battery-Magazine-A4-media.pdf>

Ocean Grazer. (7. 7 2021). *Harbour-Eventin esitys*. Haettu 28. 2 2024 osoitteesta https://oceangrazer.com/wp-content/uploads/2021/07/Ocean-Battery-Info-Flyer-Harbor-Event-07_07_2021.pdf

Ocean Grazer. (n.d.). *Ocean Grazer yrityssivut*. Haettu 14. 2 2024 osoitteesta <https://oceangrazer.com/>

Peltonen, Y. S. (19. 2 1982). *Insinööriutiset: 540MW pumppuvoimala korpilahdelle?* Haettu 15. 3 2024 osoitteesta <https://drive.google.com/file/d/1xvHN31MXaqc7QzmzJjwjQfCDGH98IITD/view>

Pörssisähkö.net. (2024). *Pörssisähkön hinnat*. Haettu 17. 3 2024 osoitteesta <https://porssisahko.net/tilastot>

Ramula, J. (27. 8 2021). *LUT kandidaatintyö*. Haettu 12. 2 2024 osoitteesta https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/163163/kandidaatinty%C3%B6_B6_ramula_janina.pdf?sequence=1 Suomeen:

Sallinen, P. (31. 5 2023). *Energiautiset: Energiasektorin päästöt vähenivät: Petri Sallinen*. Haettu 20. 2 2024 osoitteesta <https://www.energiautiset.fi/kategoriat/tuotanto/energiasektorin-paastot-vahenivat.html>

STEK ry. (2022). *Energiamurros sarja*. Haettu 10. 3 2024 osoitteesta <https://energiamurros.fi/sahkon-varastointi/>

Surkes, S. (15. 12 2021). *IEC inks \$8 million deal with company that uses air, water to store energy*. Haettu 18. 2 2024 osoitteesta <https://www.timesofisrael.com/iec-inks-8-million-deal-with-company-that-uses-air-water-to-store-energy/>

Tiainen, S. (16. 12 2020). *LUT kandidaattityö*. Haettu 20. 2 2024 osoitteesta
Pumppuvoimalaitoksen käyttö Saksassa:
<https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/162056/Pumppuvoimalaitosten%20k%E4ytt%F6%20Saksassa.pdf?sequence=1>

Tilastokeskus. (17. 4 2023). *Energian kokonaiskulutus väheni 5 % vuonna 2022*.
Haettu 20. 2 2024 osoitteesta
<https://www.stat.fi/julkaisu/cl8Int36ar51h0duts69hbekez>

Tilastokeskus. (2. 11 2023). *Sähkön tuotanto tuulivoimalla ja ydinvoimalla nousivat vuonna 2022*.
Haettu 20. 2 2024 osoitteesta
<https://www.stat.fi/julkaisu/cl8mo29omxf8t0dukky5aa8i1>

Tilastokeskus. (2024). *Rahanarvomunnin*. Haettu 21. 3 2024 osoitteesta
<https://www.stat.fi/tup/laskurit/rahanarvonmuunnin.html>

Tilvis, E. (7. 1 2023). *STT: Energiatekniikan professori uskoo, että pumppuvoimala auttaisi sähkön huippuhinnoissa*. Haettu 10. 2 2024 osoitteesta
<https://www.lapinkansa.fi/energiatekniikan-professori-uskoo-etta-pumppuvoima/6173135>

Tuulivoimayhdistys. (2019). *Tuulivoimaennusteita*. Haettu 20. 2 2024 osoitteesta
<https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoima-suomessa-ja-maailmalla/tuulivoimaennusteita>

Tuulivoimayhdistys. (14. 6 2022). *Suomessa saavutetaan tänä vuonna 1000:n tuulivoimalan ja 5000:n megawatin rajapyykit*. Haettu 20. 2 2024 osoitteesta
<https://tuulivoimayhdistys.fi/ajankohtaista/tiedotteet/suomessa-saavutetaan-tana-vuonna-1000n-tuulivoimalan-ja-5000n-megawatin-rajapyykit>

Työ- ja elinkeinoministeriö. (14. 12 2023). *Muutoksia energiatuen myöntämisen ehtoihin vuosina 2023-2027*. Haettu 20. 2 2024 osoitteesta <https://tem.fi/-/muutoksia-energiatuen-myontamisen-ehtoihin-vuosina-2023-2027>

Uusitalo, K. (18. 12 2022). *Yle artikkeli*. Haettu 4. 3 2024 osoitteesta tällainen on tehoreservi, jota on hyödynnetty viimeksi 12 vuotta sitten: <https://yle.fi/a/3-12573527>

Webb, K. (n.d.). *Oregon state university: opetusmateriaali*. Haettu 15. 2 2024 osoitteesta [pumped hyro energy storage: https://web.engr.oregonstate.edu/~webbky/ESE471_files/Section%203%20Pumped%20Hydro.pdf](https://web.engr.oregonstate.edu/~webbky/ESE471_files/Section%203%20Pumped%20Hydro.pdf)

