



# Sähkön varastoinnin tulevaisuuden ratkaisut

**Teknologiat, haasteet ja mahdollisuudet**

Mika Kauppinen

Opinnäytetyö, AMK

Toukokuu 2024

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma (AMK)

**Kauppinen, Mika**

**Sähkön varastoinnin tulevaisuuden ratkaisut. Teknologiat, haasteet ja mahdollisuudet**

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Toukokuu 2024, 50 sivua.

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

**Tiivistelmä**

Kansainväliset ilmastotavoitteet ilmastonmuutoksen torjumiseksi ovat kasvattaneet uusiutuvien energialähteiden käyttöä sähköntuotannossa. Erityisesti tuuli- ja aurinkovoima ovat riippuvaisia ympärillä vallitsevista olosuhteista. Tästä syystä sähkön varastointia tarvitaan entistä enemmän nyt ja tulevaisuudessa.

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia eri sähkön varastointiteknologioita sekä niiden haasteita ja mahdollisuuksia. Tutkimuksella pyrittiin myös selvittämään eri teknologioiden merkitys uusiutuvan energian hyödyntämisen kannalta sekä vertailemaan erilaisia ratkaisuja sähkön varastointiin liittyen.

Tavoitteisiin pääsemiseksi luotiin kirjallisuuskatsaus aiheeseen tutkimalla eri varastointiratkaisuja sekä niiden potentiaalia tulevaisuuden energiajärjestelmässä. Teoriapohjan tueksi toteutettiin asiantuntijahaastattelu, jonka avulla pyrittiin löytämään vastauksia sähkön varastoinnin nykytilaan ja tulevaisuuden näkymiin.

Tuloksena syntyi kattava kuvaus eri sähkön varastointiteknologioista ja niiden tuomista mahdollisuuksista energiaverkkojen vakaana pitämiseksi. Pääpaino pyrittiin pitämään yleisimmin käytössä olevissa teknologioissa ja niiden hyödyntämisessä.

Erilaisten sähkön varastointiteknologioiden tuomalla hyödyllä voidaan merkittävästi vaikuttaa siihen, kuinka energiajärjestelmämme joustavuutta rakennetaan. Sähkön varastoinnilla on kasvava rooli ja se on avainasemassa siirryttäessä kohti kestävämpää ja ilmastoneutraalia yhteiskuntaa.

**Avainsanat (asiasanat)**

sähkönvarastointi, energianvarastointi, uusiutuva energia, energiansiirto

**Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)**

-

**Kauppinen Mika**

**Future solutions for electricity storage systems. Technologies, challenges and possibilities**

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, May 2024, 50 pages.

Degree Programme in Electrical and Automation Technology. Bachelor's thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

### **Abstract**

International goals to tackle climate change have increased the use of renewable energy sources in electricity production. In particular, wind and solar power are dependent on the surrounding conditions. This is why electricity storage systems are needed even more now and in the future.

The aim of the thesis was to study different electricity storage technologies and their challenges and possibilities. The research also aimed to find out the importance of different technologies in terms of the utilization of renewable energy and to compare different types of solutions related to electricity storage systems.

In order to reach these goals, a literature review was created on the subject by studying different storage solutions and their potential in the future energy system. To support the theory base, an expert interview was conducted, which was used to find answers to the current state of electricity storages and future prospects.

The result was a comprehensive description of different electricity storage technologies and the possibilities they could bring to keep our energy network stable. The main focus was on the most commonly used technologies and their utilization.

The benefit brought by various electricity storage technologies can significantly influence how the flexibility of our energy system is built. Electricity storages will play a key role in moving towards a more sustainable and climate-neutral society.

### **Keywords/tags (subjects)**

electricity storage, energy storage, renewable energy, energy transfer

### **Miscellaneous (Confidential information)**

-

## Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto</b> .....	<b>4</b>
1.1	Tutkimuksen tausta ja tavoitteet .....	4
1.2	Tutkimusmenetelmä .....	5
1.3	Toimeksiantaja .....	5
<b>2</b>	<b>Sähkön varastointi yleisesti</b> .....	<b>6</b>
2.1	Energianvarastoinnin merkitys .....	6
2.2	Uusiutuvan energian tavoitteet .....	7
<b>3</b>	<b>Sähkön varastoinnin nykyratkaisut</b> .....	<b>9</b>
3.1	Teknologiat.....	10
3.1.1	Pumppuvoimalaitos .....	10
3.1.2	Paineilmavarastot .....	11
3.1.3	Vauhtipyörä .....	12
3.1.4	Akut .....	13
3.1.5	Vetyvarastot.....	15
3.1.6	Suprajohtavat magneettiset energiavarastot.....	16
3.1.7	Superkondensaattori .....	17
3.1.8	Lämpövarastot .....	18
3.2	Energianvarastoinnin käyttökohteet .....	19
<b>4</b>	<b>Energiavarastot Suomessa ja maailmalla</b> .....	<b>21</b>
4.1	Esimerkkejä energiavarastoista Suomessa .....	22
4.1.1	Lappeenrannan Yllikkälän akkuvarasto .....	22
4.1.2	Vaasan Vaskiluodon lämpövarasto.....	23
4.1.3	Kankaanpään hiekka-akku .....	24
4.1.4	Helenin lämpövarastot .....	25
4.2	Esimerkkejä energiavarastoista maailmalla .....	26
4.2.1	Bath Countyn pumppuvoimalaitos, USA .....	26
4.2.2	Cortes-La Muelan pumppuvoimalaitos, Espanja .....	27
4.2.3	Moss Landing Energy Storage Facility, USA.....	27
4.2.4	Zhangjiakoun paineilmavarasto, Kiina .....	28
<b>5</b>	<b>Sähkön varastoinnin tulevaisuus</b> .....	<b>29</b>
5.1	Kustannukset.....	29
5.2	Kestävyys.....	32
5.3	Varastoinnin hallinta .....	34

5.4	Haasteet ja mahdollisuudet .....	35
<b>6</b>	<b>Asiantuntijahaastattelu.....</b>	<b>36</b>
6.1	Haastattelun tulokset.....	37
6.2	Tulosten analysointi .....	43
<b>7</b>	<b>Pohdinta .....</b>	<b>44</b>
	<b>Lähteet .....</b>	<b>46</b>
	<b>Liitteet.....</b>	<b>50</b>
	Liite 1. Haastattelurunko.....	50

## Kuviot

Kuvio 1.	Sähkövarastot maailmanlaajuisesti.....	9
Kuvio 2.	Sähkövarastot EU-maissa, Sveitsissä ja Norjassa .....	9
Kuvio 3.	Pumppuvoimalaitoksen perusrakenne .....	11
Kuvio 4.	Paineilmavaraston toimintaprosessi.....	12
Kuvio 5.	Suomalaisen Teraloopin kehittämä vauhtipyörä .....	13
Kuvio 6.	Akun toimintaperiaate purkautuessa .....	14
Kuvio 7.	BESS-järjestelmän perusrakenne .....	15
Kuvio 8.	Vedyn tuotantoprosessi uusiutuvaa energiaa hyödyntäen .....	16
Kuvio 9.	SMES-järjestelmän perusrakenne .....	17
Kuvio 10.	Superkondensaattorin rakenne .....	18
Kuvio 11.	Lämpövaraston toimintaperiaate .....	19
Kuvio 12.	Energiavarastojen käyttökohteet.....	20
Kuvio 13.	Yllikkälän akkuvarasto .....	23
Kuvio 14.	Vaskiluodon lämpövaraston rakenne .....	24
Kuvio 15.	Kankaanpään hiekka-akku.....	25
Kuvio 16.	Bath Countyn pumppuvoimalaitoksen karttakuva .....	27
Kuvio 17.	Moss Landing Energy Storage Facility ulkopuolelta.....	28
Kuvio 18.	Zhangjiakoun laitoksen paineilmavarasto.....	29
Kuvio 19.	Litiumioniakkujen keskimääräinen hintojen kehitys 2013-2023 .....	31

## Taulukot

Taulukko 1.	Energian kokonaiskulutus energialähteittäin .....	8
Taulukko 2.	Energian varastointiteknologioiden vertailua .....	32

**Lyhenteet:**

PHS	Pumppuvoimalaitos (Pumped Hydro Storage)
CAES	Paineilmavarasto (Compressed-air energy storage)
SMES	Suprajohtava magneettinen energiavarasto (Superconducting magnetic energy storage)
Li-ion	Litiumioniakku (Lithium-ion battery)
BESS	Akkukäyttöinen energiavarasto (Battery Energy Storage System)
BMS	Akun hallintajärjestelmä (Battery Management System)
PCS	Tehomuunnosjärjestelmä (Power Conversion System)
EMS	Energianhallintajärjestelmä (Energy Management System)
ESS	Energian varastointijärjestelmä (Energy Storage System)

# 1 Johdanto

## 1.1 Tutkimuksen tausta ja tavoitteet

Uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön kasvaessa on myös sähkön varastoinnin rooli korostunut merkittävästi viime vuosina. Sähköverkot tarvitsevat nykyään entistä enemmän joustavuutta mahdollistaakseen täydellisen tuotannon ja kulutuksen tasapainon. Uusiutuvien energiamuotojen, kuten aurinko- ja tuulivoiman käytön suurimpana haasteena on niiden vaihtelevuus. Ne ovat vahvasti riippuvaisia kulloinkin vallitsevista sääolosuhteista. Sähkönkulutus vaihtelee jatkuvasti, eivätkä tuotantohuiput sekä sähköntarve aina osu samalle ajanhetkelle. Toimintavarmuuden saavuttamiseksi onkin luotu erilaisia ratkaisuja, joilla sähköntuotannon ja -kulutuksen vaihtelevuutta pystytään tasoittamaan. Tällä tarkoitetaan yleisesti sähkön tai energian varastointia. Uusilla teknologioilla ja innovaatioilla on suuri merkitys siihen, kuinka sähkön varastointi voidaan jatkossa integroida osaksi tulevaisuuden sähköjärjestelmiä.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tutkia sähkön varastoinnin tulevaisuuden ratkaisuja sekä tarkastella erilaisia sähkön varastointiteknologioita, haasteita ja mahdollisuuksia. Tässä opinnäytetyössä tullaan myös selvittämään sähkön varastoinnin merkitys uusiutuvan energian integroinnissa ja sähköverkkojen vakaana pitämisessä. Tavoitteena on myös tutkia erilaisia haasteita, kuten kustannuksia, kestävyyttä ja varastoinnin tehokasta hallintaa. Tämän lisäksi tutkimuksessa arvioidaan erilaisia mahdollisuuksia, joita sähkön varastoinnin tulevaisuus voi tarjota energiateollisuudelle ja kuluttajille. Tutkimuksen loppupuolella esitetään myös suositukset siihen, miten sähkön varastoinnin tulevaisuuteen voidaan varautua ja mihin toimenpiteisiin tulisi ryhtyä. Tämän opinnäytetyön ensisijaisena tavoitteena on tarjota tärkeää tietoa siitä, miten sähkönvarastoinnin teknologinen kehitys voi vaikuttaa energiateollisuuden ja sähköjärjestelmien tulevaisuuteen. Työstä voi olla hyötyä niin tutkijoille kuin päättäjille, jotka pyrkivät ymmärtämään, miten sähkönvarastointi voi muokata ja edistää energia-alaa.

Tutkimuksessa luotiin kirjallisuuskatsaus aiheeseen, jonka perustana käytettiin alan kirjallisuutta eri sähkönvarastointiteknologioista, sovelluksista ja tulevaisuuden suuntauksista. Kirjallisina lähteinä hyödynnettiin pääasiassa aiheesta kirjoitettuja kirjoja, artikkeleita, uutisia ja aiempia tutkimuksia. Tutkimuksen toisena merkittävänä tiedonhankintamenetelmänä oli asiantuntijahaastattelu. Haastateltavana henkilönä toimi Fortumin aurinkoteknologiapäällikkö Eero Vartiainen.

Haastattelu toteutettiin teemahaastatteluna Microsoft Teamsin välityksellä ja vastaukset kirjattiin paperille haastattelun aikana. Haastattelulla pyrittiin erityisesti saamaan konkreettisia ja mahdollisimman ajankohtaisia näkemyksiä sähkönvarastoinnin tulevaisuuden kehityksestä. Haastattelun tulokset esitellään opinnäytetyön loppupuolella.

## 1.2 Tutkimusmenetelmä

Tutkimuksen toteuttamisessa hyödynnettiin menetelmänä laadullista eli kvalitatiivista tutkimusta. (Juhila 2021.) Tarkoituksena oli selvittää sähkön varastoinnin tulevaisuuden näkymiä ja ratkaisuja eri näkökulmista sekä perehtyä erilaisiin haasteisiin ja mahdollisuuksiin. Tavoitteena oli myös saada mahdollisimman tuoretta ja monipuolista tutkimustietoa aiheeseen liittyen. Tutkimuksen alkuvaiheessa muodostettiin tutkimuskysymykset, joihin opinnäytetyöllä pyritään vastaamaan. Tutkimuskysymykset ovat:

1. Millaisia sähkön varastointi ratkaisuja on tänä päivänä käytössä?
2. Mitkä ovat sähkön varastoinnin haasteet ja mahdollisuudet?
3. Mitkä sähkön varastointiratkaisut ovat tulevaisuuden kannalta houkuttelevimpia?

Tutkimuskysymykset auttoivat aihepiirin rajaamisessa ja helpottivat tiedon hankintaa. Kysymysten pohjalta pystyttiin myöhemmin myös jalostamaan tarvittavat lisäkysymykset asiantuntijahaastattelua varten.

## 1.3 Toimeksiantaja

Opinnäytetyön toimeksiantajana on Jyväskylän Ammattikorkeakoulu (JAMK). Vuonna 1994 perustettu korkeakoulu toimii kolmessa eri toimipisteessä Jyväskylässä sekä Biotalousinstituutissa Saarijärven Tarvaalassa. Opiskelijoita JAMK:ssa on keskimäärin 9500 ja henkilöstöä noin 900. JAMK:n päätehtävinä on tuottaa työelämän vaatimuksiin soveltuvaa korkeakouluopetusta, osallistua AMK-opetusta ja työelämää tukevaan tutkimus- ja kehitystyöhön sekä toteuttaa aikuiskoulutusta työelämäosaamisen ylläpitämiseksi ja vahvistamiseksi. JAMK:n vahvuusaloihin kuuluvat biotalous, monialainen kuntoutus, sovellettu kyberturvallisuus, automaatio ja robotiikka, matkailu sekä uudistuva oppiminen. (JAMK n.d.)

JAMK:n uudistetun, vuoteen 2030 ulottuvan strategian nimenä on ”Osaaminen kilpailukyvyksi”. Strategian tavoitteena on ammattikorkeakoulun opiskelijoiden, henkilöstön sekä asiakkaiden kilpailukyvyyn parantaminen uuden osaamisen avulla. Strategisen kehittämisohjelman tavoitteena on muodostaa uuden sukupolven korkeakoulu, jonka tarkoituksena on vastata talouden ja yhteiskunnan asettamiin haasteisiin sekä uudistaa korkeakoulun toimintamalleja ja rakenteita. Strategian avulla tullaan kehittämään henkilöstöä ja johtamista, toimivia työelämäyhteyksiä, uuden sukupolven pedagogiikkaa, TKI-toimintaa, laadunhallintaa sekä kansainvälisyyttä. (Halttunen n.d.)

## **2 Sähkön varastointi yleisesti**

### **2.1 Energianvarastoinnin merkitys**

Uusiutuvien energiamuotojen, kuten tuuli- ja aurinkovoiman käyttö on kasvanut merkittävästi viime vuosina. Tulevaisuudessa näitä energiamuotoja tullaan myös entistä enemmän hyödyntämään osana kestäviä energijärjestelmiä. Haittapuolena tuuli- ja aurinkoenergian käytössä on niiden huono kontrolloitavuus. Olosuhteiden muutokset, kuten vuorokauden- ja vuodenaikojen vaihtelut hankaloittavat näiden energiamuotojen täydellistä hyödyntämistä. Aina ei voi olla tuulinen tai aurinkoinen sää, ja nämä seikat muodostavatkin omat haasteensa tuuli- ja aurinkovoiman käyttöön. (Mitä on sähkön varastointi? 2020.)

Sähköntuotannon ja kulutuksen vaihteluiden tasoittamiseksi on pyritty keksimään erilaisia ratkaisuja, joilla sähköenergiaa voidaan varastoida myöhempää käyttöä varten. Sähköä on pyrittävä varastoimaan kahdella aikajänteellä. Kausivarastointi tarkoittaa nimensä mukaisesti sitä, että sähkönvarastointi tapahtuu kausittaisesti, eli pidemmällä aikavälillä. Esimerkiksi aurinkosähköä otetaan talteen kesällä ja hyödynnetään talvella. Vuorokausivarastointi puolestaan perustuu lyhyemmän aikajänteen varastointiin. Kun aurinko paistaa päivällä, sen tuottama energia voidaan ottaa talteen ja käyttää yöllä, silloin kun aurinko ei paista. Pohjoismaissa suositetaan sähkön varastoinnissa paljon vesivoimaa, jota voidaan käyttää ympäri vuoden ja sitä on yleensä runsaasti saatavilla. Tästä syystä Suomessa, eikä muuallakaan Pohjoismaissa ole ongelmaa varastoida sähköä pitkällä aikavälillä. Kuitenkin lyhyen aikavälin varastoinnissa tulee vastaan monia eri haasteita, joihin olisi tulevaisuudessa löydettävä ratkaisuja. (Mitä on sähkön varastointi? 2020.)

Sähkön varastoinnista puhuttaessa tulee muistaa, että sähköä itsessään ei voida varastoida millään tavalla. Sitä voidaan kuitenkin muuttaa toiseen energiamuotoon, joka voidaan varastoida. Tämä varastoitu energia pystytään myöhemmin muuttamaan takaisin sähköenergiaksi ja käyttämään tarpeen mukaan. (Sähkön ja Energian varastointi 2023.) Tässä opinnäytetyössä tullaan jatkossa viittaamaan sähkön varastoinnin lisäksi myös energian varastointiin.

## 2.2 Uusiutuvan energian tavoitteet

Kolme neljäsosaa EU-alueen kasvihuonepäästöistä aiheutuu sähköntuotannosta, lämmityksestä ja liikenteestä. Ne kaikki kuuluvat oleellisena osana ihmisten jokapäiväiseen arkielämään. Euroopan Unionin yhteisenä tavoitteena on ilmastoneutraalius vuoteen 2050 mennessä (Miten EU edistää uusiutuvaa energiaa 2023). Tämä ei tule kuitenkaan onnistumaan, jos uusiutuvien energiamuotojen käyttöä ei kasvatettavasti huomattavasti. Päästöjen vähentämisellä tuleekin olemaan suuri vaikutus lähitulevaisuudessa.

EU:ssa kulutetun, uusiutuvista energialähteistä peräisin olevan energian osuus kasvaa vuosittain kovalla vauhdilla. Tällä hetkellä sen osuus on yli 20 % kaikesta energiantuotannosta. Määrä on kaksinkertaistunut vuoden 2004 jälkeen. Syyskuussa 2023 EU-parlamentti hyväksyi uuden tavoitteen uusiutuvan energian osuudelle, joka on 42,5 % vuoteen 2030 mennessä. EU:n tavoitteena on pyrkiä riippumattomaksi energiantuonnista sekä vähentää kasvihuonepäästöjen syntymistä koko EU-alueella. (Miten EU edistää uusiutuvaa energiaa 2023.)

Euroopan Unionin yhteisten tavoitteiden saavuttamiseksi kaikkien jäsenvaltioiden on sitouduttava noudattamaan kansallisia energia- ja ilmastosuunnitelmia. Jokaisen jäsenmaan on toimittava hallintomalliasetuksessa (EU) 2018/1999 vahvistetun hallintoprosessin edellyttämällä tavalla. Suomi on ilmoittanut tavoitteekseen saavuttaa vähintään 51 % uusiutuvan energian osuuden vuoteen 2030 mennessä. (Uusiutuvan energian RED II -direktiivi 2022.)

Uusiutuviin energialähteisiin kuuluvat mm. aurinkovoima, tuulivoima, vesivoima, puuenergia, peltoenergia, biovoima ja lämpöpumput. Tärkeimpiä Suomessa käytettäviä uusiutuvia energialähteitä ovat bioenergia (puupohjaiset polttoaineet) sekä vesivoima. Tuulivoiman osuus on myös kasvanut viime vuosina merkittävästi ja se kattaakin jo noin 10 % jokavuotisesta sähköntuotannosta. Myös maalämpöä ja aurinkoenergiaa hyödynnetään sähköntuotannossa yhä kasvavassa määrin.

Bioenergialla, tuulivoimalla ja lämpöpumppujen käytöllä tulee olemaan korostunut merkitys Suomen pitkän aikavälin strategiassa kohti ilmastoneutraaliutta. Kasvua odotetaan vuoden 2035 jälkeen myös aurinkoenergian käytössä. (Uusiutuvan energian RED II -direktiivi 2022.) Suomessa käytettäviä energianlähteitä ja niiden osuutta kokonaiskulutuksesta on vertailtu Taulukossa 1.

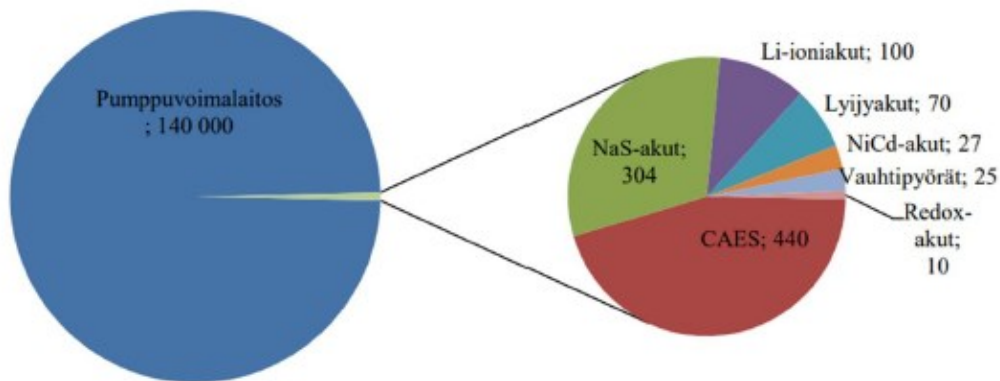
Taulukko 1. Energian kokonaiskulutus energialähteittäin 2023 Q1 (Tilastokeskus 2023)

	Määrä (TJ)	Osuus (%)	Vuosimuutos (%)
<b>ENERGIAN KOKONAISKULUTUS</b>	344 352	100	-1.5
1 Uusiutuva energia	150 548	43.7	8.6
1.1 Vesivoima	12639	3.7	0.6
1.2 Tuulivoima	17057	5	35.3
1.3 Puupolttoaineet	101871	29.6	11.9
1.4 Muu uusiutuva energia	18981	5.5	-15.3
2 Fossiiliset polttoaineet ja turve	111611	32.4	-11.2
2.1 Öljy (fossiilinen osuus)	59987	17.4	-10.7
2.2 Hiili	24684	7.2	3.1
2.3 Maakaasu	11096	3.2	-33.3
2.4 Turve	12710	3.7	-14.7
2.5 Muut fossiiliset polttoaineet	3135	0.9	0
3 Ydinenergia	75199	21.8	11.8
4 Sähkön nettotuonti	4877	1.4	-68.9
5 Muu energia	2118	0.6	0
Yksikkö: Määrä (TJ): TJ, Osuus (%): Prosentti, Vuosimuutos (%): Prosentti			
Lähde: Tilastokeskus, energian hankinta ja kulutus			

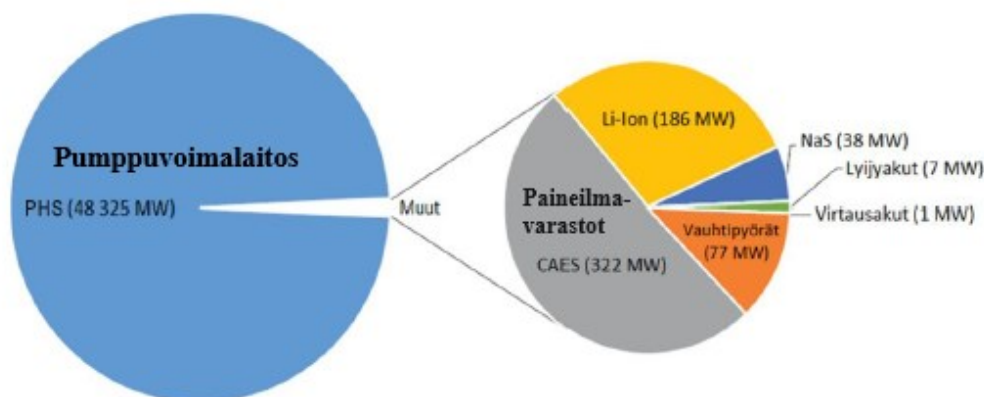
Taulukosta 1 nähdään, että uusiutuvan energian osuus Suomessa on alkuvuonna 2023 ollut 43,7 prosenttia kokonaisenergiankulutuksesta. Etenkin tuulivoiman käyttö on kasvanut vuositasolla merkittävästi. Fossiilisista polttoaineista puolestaan maakaasun osuus energiantuotannossa on vähentynyt voimakkaasti viime vuodesta. Huomattavia muutoksia on jo lyhyessä ajassa tapahtunut, mutta toistaiseksi ollaan vielä kaukana 51 prosenttiyksikön tavoitteesta. Tavoitteisiin pääsemiseksi tulisi lisätä erityisesti tuuli- ja vesivoiman käyttöä, kasvattaa entisestään puupolttoaineiden osuutta sekä vähentää fossiilisen öljyn käyttöä energiantuotannossa.

### 3 Sähkön varastoinnin nykyratkaisut

Sähkön varastointitekniikat jaotellaan toimintaperiaatteensa mukaisesti mekaanisiin, sähkökemiallisiin, kemiallisiin ja sähköisiin tekniikoihin. Mekaanisia tekniikoita ovat esimerkiksi pumppuvoimalaitos (PHS), paineilmaparasto (CAES) sekä vauhtipyörä. Sähkökemiallisiin tekniikoihin kuuluvat mm. akut ja kemiallisiin tekniikoihin puolestaan vetyvarastot. Sähköisiä tekniikoita ovat suprajohtavat magneettiset energiavarastot (SMES) sekä superkondensaattorit. (Blomqvist, Härkönen & Makkonen 2017, 4). Tulevissa kappaleissa perehdytään tarkemmin tällä hetkellä käytössä oleviin sähkön varastointitekniikoihin. Yleisimmin käytettyjä varastointitekniikoita on vertailtu kuviossa 1 sekä kuviossa 2.



Kuvio 1. Sähkövarastot maailmanlaajuisesti (Blomqvist, Härkönen & Makkonen 2017)



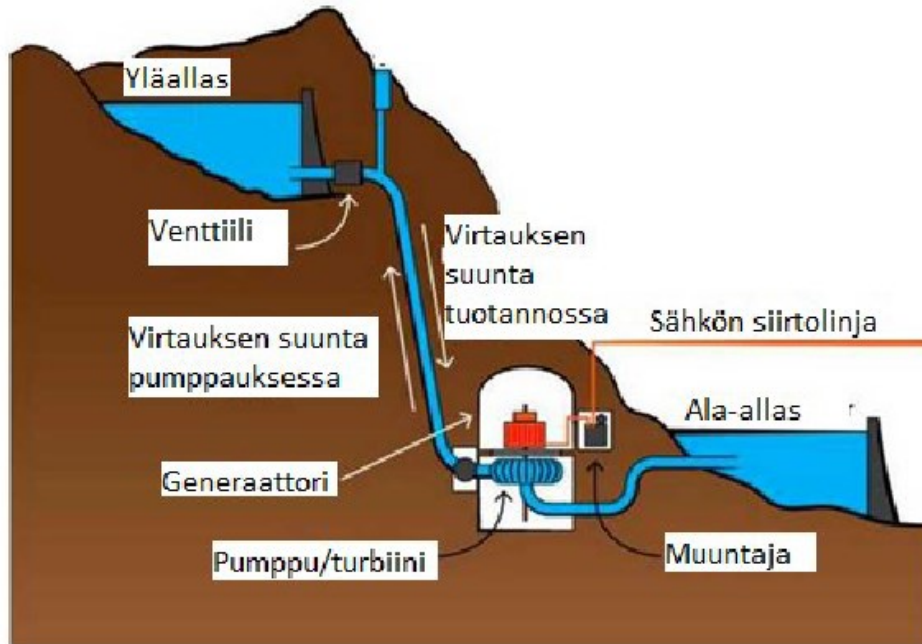
Kuvio 2. Sähkövarastot EU-maissa, Sveitsissä ja Norjassa (Blomqvist, Härkönen & Makkonen 2017, muokattu)

## 3.1 Teknologiat

### 3.1.1 Pumppuvoimalaitos

Sähkön varastointimenetelmistä yleisimmin käytetty teknologia on pumppuvoimalaitos. Se on tällä hetkellä maailmanlaajuisesti yleisin käytössä oleva energian varastointimenetelmä. Teknologian ylivoimaiseen suosioon ovat vaikuttaneet mm. sen suhteellisen yksinkertainen rakenne sekä kustannustehokkuus. Perinteisten vesivoimaloiden sijaan pumppuvoimalaitoksilla kyetään varastoi-  
maan ja vapauttamaan energiaa nopeasti tarpeen mukaan. Tällä menetelmällä onkin ollut suuri merkitys uusiutuvan energian varastoinnin kannalta. (Kiiski, Juujärvi & Satpute 2023.)

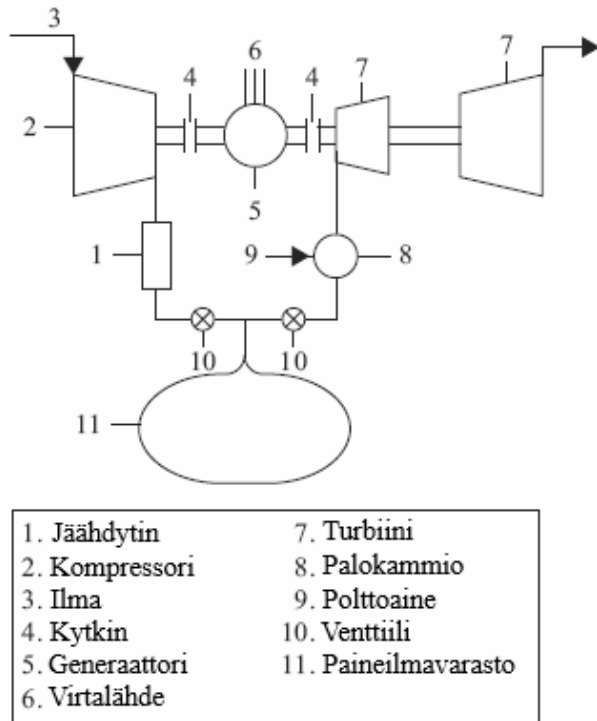
Pumppuvoimalaitoksen toimintaprosessi on hyvin yksinkertainen. Sen toimintaperiaatteena on veden pumppaaminen alemmasta altaasta ylempään vesialtaaseen. Tällä tavoin voidaan hyödyntää altaiden välistä potentiaalienergiaa. Alapuolelta pumpattu vesi säilötään ylempään vesialtaaseen. Kun sähköntarve on suuri, voidaan laitos käynnistää ja johtaa ylhäällä oleva vesi altaiden välissä olevan turbiinin läpi. Turbiini pyörittää generaattoria, joka tuottaa tarvittavaa sähköenergiaa. (Alanära 2020, 1.) Pumppuvoimalaitoksen etuna tavalliseen vesivoimalaan nähden on veden varastointialtaiden välinen korkeusero, joka voi olla jopa useita satoja metrejä. Pumppuvoimalalla tuotettu energiamäärä onkin riippuvainen juuri altaiden välisestä korkeuserosta. Esimerkiksi Suomalaisen vesivoimaloiden pudotuskorkeudet ovat yleensä vain 5–30 metriä. Myös yläaltaan koko ja vesimäärä vaikuttavat pumppuvoimalaitoksen kokonaiskapasiteettiin. (Kiiski, Juujärvi & Satpute 2023.) Pumppuvoimalaitoksen rakenne ja sen tärkeimmät osat on esitetty kuviossa 3.



Kuvio 3. Pumppuvoimalaitoksen perusrakenne (Alanära, 2020)

### 3.1.2 Paineilmavarastot

Sähköä voidaan myös varastoida paineilman avulla. Tyypillisimmillään paineilmaparasto koostuu neljästä eri komponentista. Näitä ovat kompressori, palokammio, turbiini sekä sähkögeneraattori (ks. kuvio 4). Prosessi toimii siten, että kompressoria käyttämällä syötetään korkeapaineista ilmaa palokammioon. Polttoainetta ruiskutetaan kammioon, jossa se palaa kuumentaen siellä olevaa korkeapaineistettua ilmaa. Palokammiossa syntyvät kuumat korkeapaineiset kaasumaiset yhdisteet pyörittävät turbiinia, joka on yhteydessä sähköä tuottavaan generaattoriin. Noin kaksi kolmasosaa turbiinin tuottamasta mekaanisesta energiasta käytetään kompressorin käyttämiseen. Jäljelle jäävä yksi kolmasosa muunnetaan sähkögeneraattorilla sähköksi. (Sallam, Malik & Om 2021, 110–111.)



Kuvio 4. Paineilmavaraston toimintaprosessi (Sallam, Malik & Om 2021, muokattu)

### 3.1.3 Vauhtipyörä

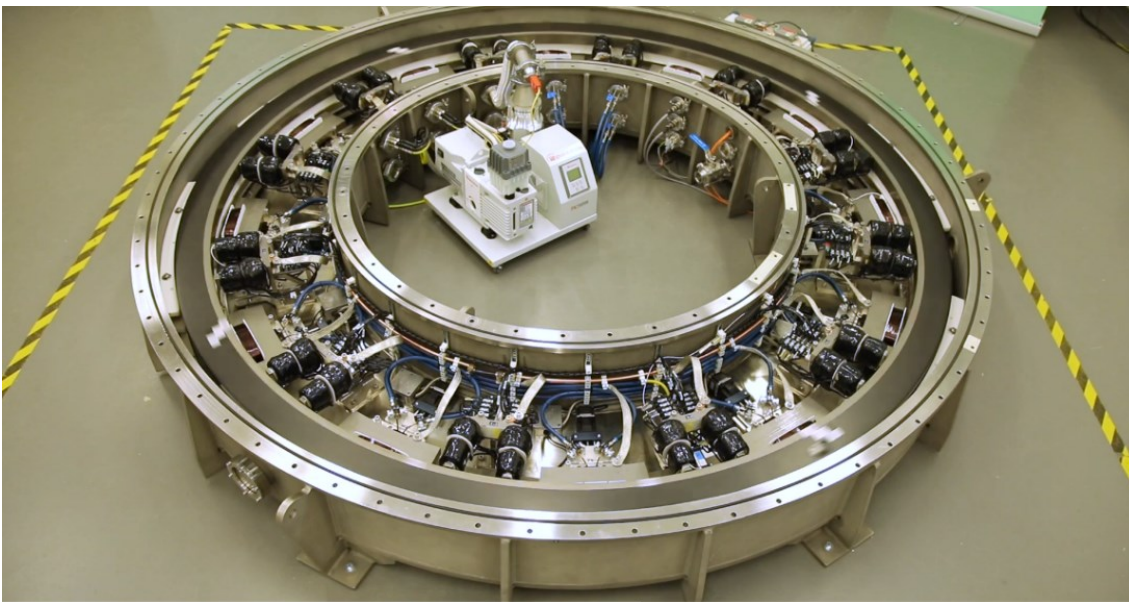
Vauhtipyörän toiminta perustuu liike-energiaan. Vauhtipyöräjärjestelmä varastoi energiaa mekaanisesti kineettisen energian muodossa, pyörittämällä massaa suurella nopeudella. Sähkövirta pyörittää vauhtipyörän roottoria ja pitää sen pyörimässä niin kauan, kunnes varastoitu energia halutaan vapauttaa käyttöön. Käytettävissä olevan energian määrään ja sen kestoon vaikuttaa vauhtipyörän massa ja sen pyörimisnopeus. Pyörivässä vauhtipyörässä liike-energia on vauhtipyörän pyörimisnopeuden ja massan hitausmomentin funktio. Hitausmomentti on siis suoraan verrannollinen vauhtipyörän massaan ja halkaisijaan. Mitä suuremmalla nopeudella vauhtipyörä pyörii ja mitä kevyempi se on, sitä enemmän energiaa kyetään varastoimaan. (Jeter 2021.)

Kappaleen liike-energia eli kineettinen energia ilmaistaan työmäärällä, jonka esine voi tehdä liikkeen seurauksena. Se voidaan esittää Kaavalla 1.

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

missä  $m$  on kappaleen massa (kg) ja  $v$  sen vauhti (m/s) (Inkinen & Tuohi 2006, 136).

Kotimainen startup-yritys Teraloop on kehittänyt Aalto-yliopiston Startup Centerissä Espoon Otaniemessä uutta vauhtipyörää jo usean vuoden ajan (ks. kuvio 5). Vauhtipyörää voidaan käyttää esimerkiksi sähköverkossa syntyvien virtapiikkien tasaamiseen sekä ylläpitämään sähkönjakelua lyhyiden sähkökatkojen aikana. Pyörivänä osana on ohut hiilikuituvanne, jota sähkövirta pyörittää valtavalla nopeudella. Vauhtipyörän synnyttämä liike-energia voidaan valjastaa takaisin sähköenergiaksi silloin kun sitä eniten tarvitaan. (Mutanen & Saarela 2020.)



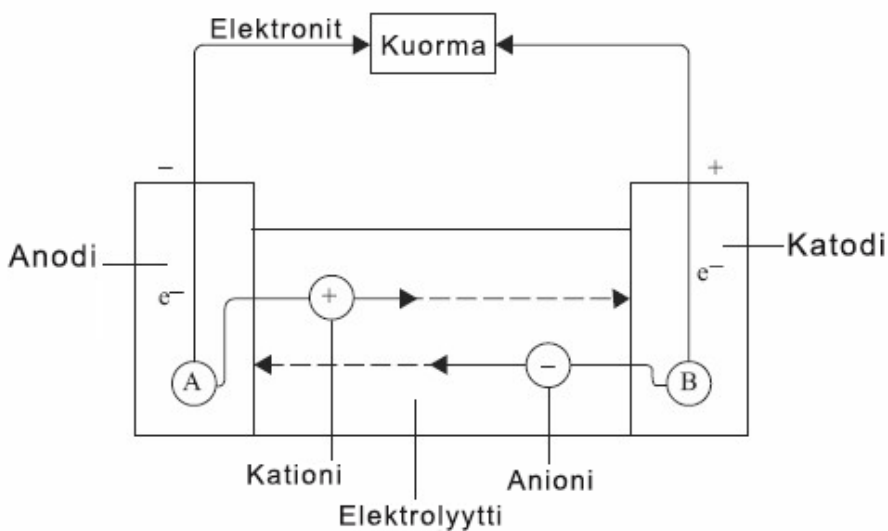
Kuvio 5. Suomalaisen Teraloopin kehittämä vauhtipyörä (Mutanen & Saarela 2020)

### 3.1.4 Akut

Vanhin sähköenergian varastointimenetelmä on akku. Jo 1700-luvun lopulta peräisin oleva tekniikka on vuosien saatossa kehittynyt yhdeksi tärkeimmistä sähköön varastointitavoista. Akkujen kehitykseen ovat vaikuttaneet erilaisten kannettavien laitteiden ja järjestelmien yleistyminen. Sähköautojen suosio on myös omalta osaltaan ollut vauhdittamassa akkuteknologioiden kehitystä. Teollisuuskäytössä yleisimmät akkutyypit ovat lyijyhappoakku, nikkeli-kadmiumakku ja suljettu huoltovapaa lyijyakku. Suurta suosiota ovat myös saavuttaneet litiumioniakut (Li-ion), joita käytetään monipuolisesti etenkin autoteollisuudessa sekä matkapuhelimissa. Litiumioniakkujen etuja muihin

akkutyyppeihin verrattuna ovat niiden suurempi energiatiheys, pidempi käyttöaika ja nopea ladattavuus. (Musawi 2017, 3–8.)

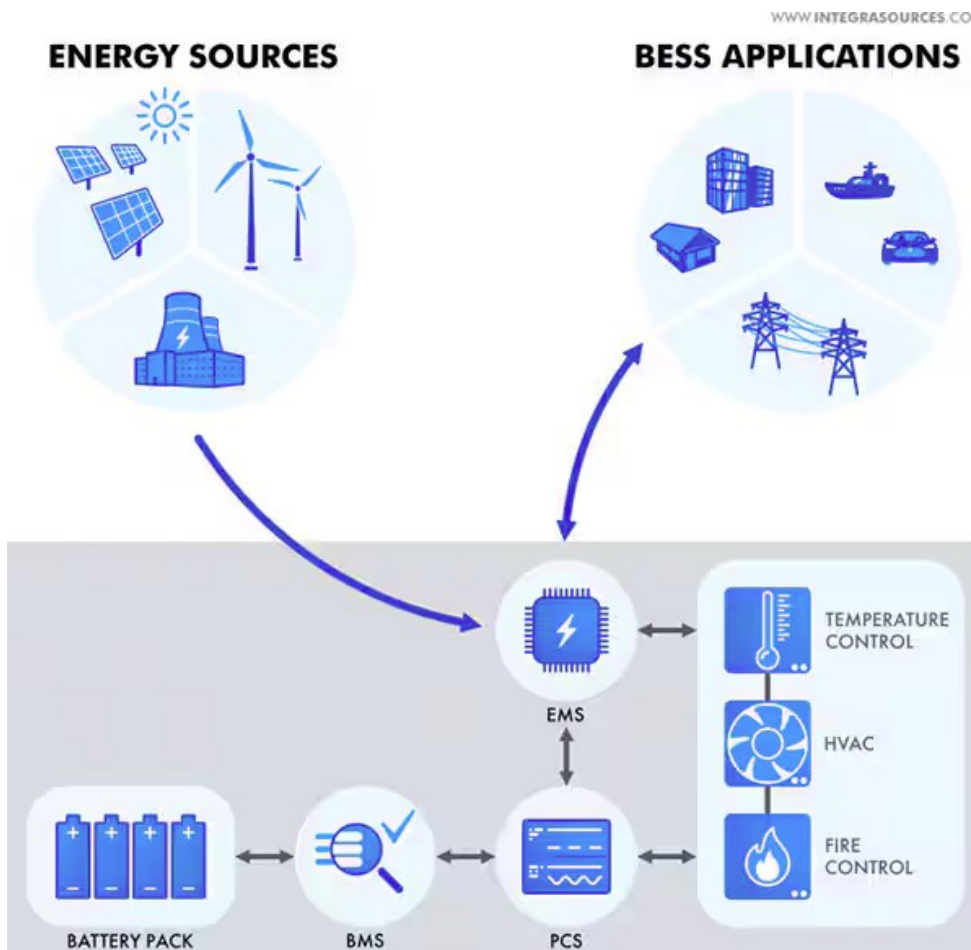
Akun toiminta perustuu sähkökemialliseen reaktioon eli elektrolyysiin. Siinä kaksi elektrodia, anodi ja katodi muodostavat sähköparin (ks. kuvio 6). Johtavana osana elektrodien välissä on nestemäinen tai geelimäinen aine eli elektrolyytti. Kun akku kytketään virtapiiriin, syntyy anodilla hapettumisreaktio ja katodilla pelkistymisreaktio. Hapettumisreaktion seurauksena muodostuneet elektronit liikkuvat negatiivisesti varautuneelta anodilta virtapiiriin välityksellä katodille muodostaen sähkövirran. (Akut 2020.)



Kuvio 6. Akun toimintaperiaate purkautuessa (Sallam, Malik & Om 2021, muokattu)

BESS-järjestelmä eli akkukäyttöinen energian varastointijärjestelmä (Battery Energy Storage System) tarkoittaa nimensä mukaisesti sitä, että ladattavia akkuja käytetään energian varastointiin ja sen purkamiseen myöhempää käyttöä varten. BESS-järjestelmässä voidaan käyttää useita eri akkutyyppejä kuten litiumioniakkuja, lyijyakkuja, nikkeli-kadmiumakkuja, natrium-rikkiakkuja tai virtausakkuja. Perinteisesti BESS-järjestelmä koostuu akuista, akun hallintajärjestelmästä (BMS), tehomuunnosjärjestelmästä (PCS) sekä energianhallintajärjestelmästä (EMS). Näiden lisäksi järjestelmä pitää sisällään erilaisia turvajärjestelmiä, joita voi olla useita. Tyypillisiä turvajärjestelmiä ovat lämpötilan hallinta, ilmanvaihdon säätely sekä palontorjuntajärjestelmä. BESS-järjestelmää ei pidä terminä sekoittaa energian varastointijärjestelmään (ESS), joka on käsitteenä laajempi ja kattaa yleensä useita muitakin energianvarastointitekologioita, kuten

vauhtipyörät, vesivoiman, paineilman jne. (Solovev 2021.) BESS-järjestelmä sekä siihen kuuluvat sovellukset ja turvajärjestelmät on esitelty kuviossa 7.

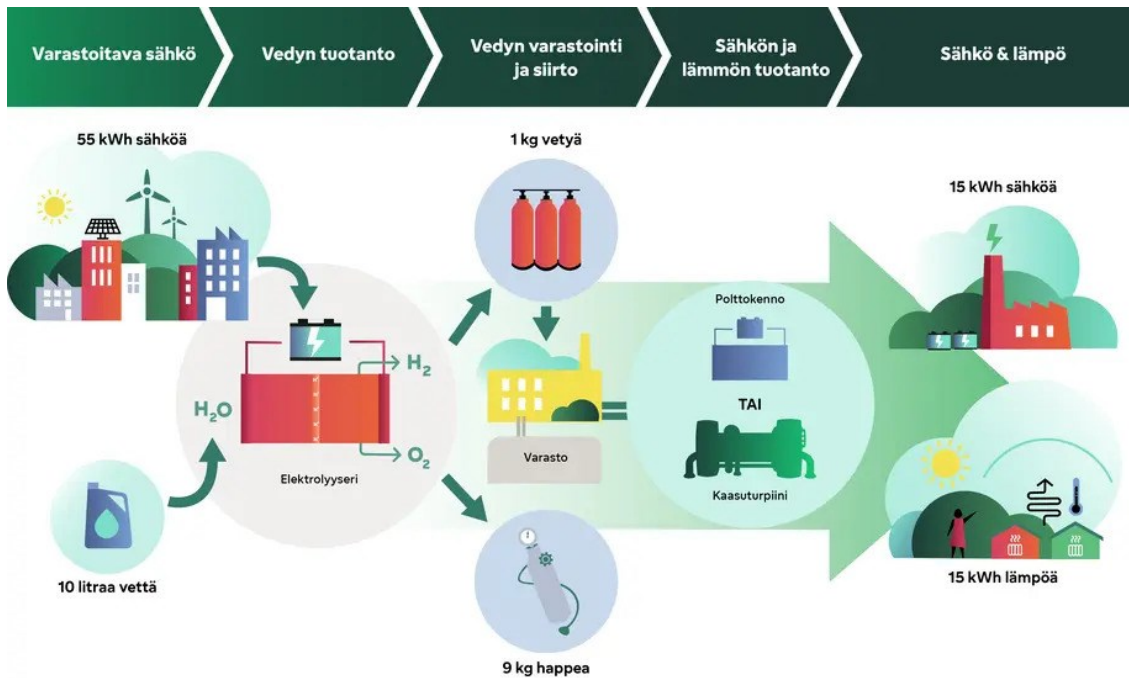


Kuvio 7. BESS-järjestelmän perusrakenne (Integra Sources LCC 2021)

### 3.1.5 Vetyvarastot

Vetyä on käytetty energianlähteenä jo vuosisatojen ajan. Sitä kuitenkin löytyy maapallon ilmakehästä hyvin vähän, joten sitä on lähes aina itse tuotettava. Suurin osa teollisuudessa käytetystä vedystä tuotetaan reformoimalla fossiilisista polttoaineista, joka aiheuttaa huomattavan määrän hiilidioksidipäästöjä. Sen sijaan elektrolyysiä hyödyntämällä voidaan vedyn tuottamiseksi tehdä täysin päästötön. Menetelmä toimii siten, että vesimolekyylit erotellaan sähkön avulla hapoksi ja vedyksi. Vesimolekyyleistä syntynyt vety voidaan varastoida ja ottaa myöhemmin käyttöön. Esimerkiksi jos sähkön kulutuksen tarve on pienempi kuin aurinko- tai tuulivoiman tuotanto, voidaan uusiutuvalla energialla tuotettu ylijäämäenergia käyttää vedyn tuottamiseen. Varastoitu vety voidaan myöhemmin muuttaa takaisin sähköenergiaksi, silloin kun aurinko- tai tuulivoimaa ei

ole riittävästi saatavilla. Vedyn muuttaminen takaisin sähköenergiaksi tapahtuu useimmiten käyttämällä sitä polttokennojen tai kaasuturbiinien polttoaineena. Kevyen rakenteensa ja korkean energiatiheydensä vuoksi vety sopii varastointiaineeksi hyvin. Se kuitenkin vie paljon tilaa, joten sitä varastoidaan useimmiten paineistettuihin säiliöihin. Vety on myös erittäin räjähdysherkkä aine, joten sitä tulee käsitellä huolellisesti. (Vartiainen 2020.) Vedyn tuotanto elektrolyysiä hyödyntämällä on esitetty kuviossa 8.



Kuvio 8. Vedyn tuotantoprosessi uusiutuvaa energiaa hyödyntäen (Vartiainen 2020)

### 3.1.6 Suprajohtavat magneettiset energiavarastot

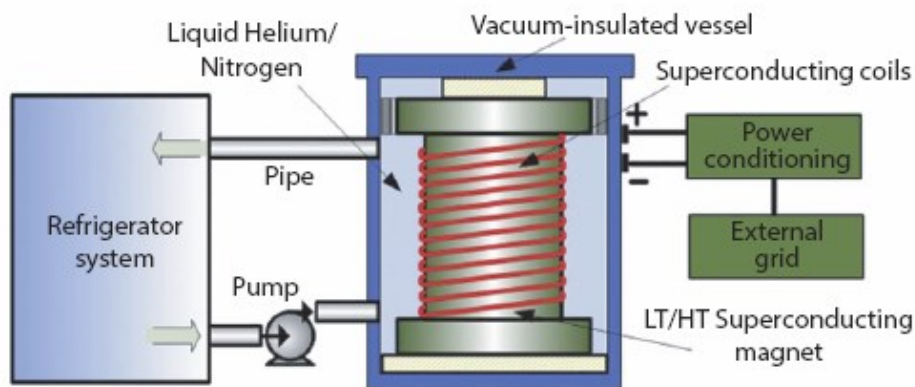
Suprajohtavassa magneettisessa energianvarastointijärjestelmässä (SMES) sähköenergia varastoidaan kelan synnyttämään magneettikenttään. SMES-järjestelmä koostuu suprajohtavasta käämistä, jäähdytysyksiköstä sekä tehonsäätöyksiköstä (ks. kuvio 9). Tehonsäätöyksikkö syöttää tasavirtaa käämiin, joka varastoi energiaa. Käämiin varastoitu energia voidaan ilmaista Kaavalla 2.

$$E = \frac{1}{2} LI^2 \quad (2)$$

jossa  $L$  on käämin induktanssi ja  $I$  käämiin syötetty virta. (Sahoo & Umakanta 2021, 85).

Käämiin varastoitu energia on siis riippuvainen käämin induktanssista ja sen läpi kulkevan virran neliöstä. Varastointikapasiteetin parantamiseksi suprajohtavan materiaalin resistanssi pyritään pitämään lähes nollassa. Mahdollisimman pienen resistanssin saavuttamiseksi suprajohtava materiaali jäähdytetään kryogeenisesti erittäin alhaisessa lämpötilassa. Kun tehontarve on suuri, käämiin varastoitu energia voidaan vapauttaa sähköverkkoon tehonsäätöyksikön avulla. (Sahoo & Umakanta 2021, 85–86.)

SMES-järjestelmällä on useisiin muihin energianvarastointiratkaisuihin nähden pieni energiatiheys, mutta sen etuina ovat korkea elinkaari sekä suurempi tehotiheys (10,000 W/kg). Yhtenä esimerkkinä suprajohtavasta materiaalista on niobiumtitaani, jota jäähdytetään nestemäisellä heliumilla. Suprajohtavia magneettisia energiavarastoja käytetään mm. tuulivoiman vaihteluiden tasoittamiseen, koska järjestelmän varaaman energian voi vapauttaa käyttöön hyvinkin nopeasti. (Sahoo & Umakanta 2021, 85–86.)

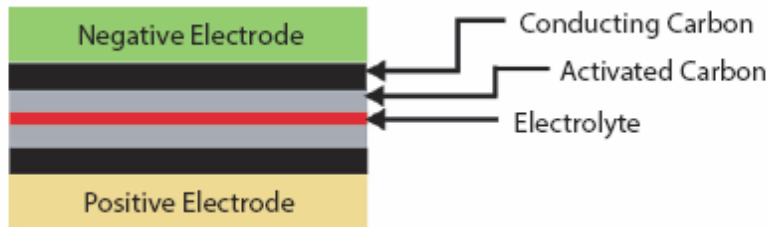


Kuvio 9. SMES-järjestelmän perusrakenne (Sahoo & Umakanta 2021, 86)

### 3.1.7 Superkondensaattori

Kuten mikä tahansa muukin kondensaattori, superkondensaattori koostuu kahdesta elektrodista, mutta siinä energia varastoituu sähköstaattisesti kaksikerroksiseen kapasitanssiin perinteisen kiinteän dielektrisen materiaalin sijaan. Tuplakerros muodostuu elektrolyytin ja johtavan hiilikerroksen väliin (ks. kuvio 10). Superkondensaattorin energiatheyttä voidaan lisätä käyttämällä pinta-

alaltaan suuria materiaaleja, kuten aktiivihiihtä. Muihin energian varastointiteknologioihin verrattuna superkondensaattoreilla on nopea vasteaika, suuri tehotiheys ja pitkä elinkaari. Haittapuolena on sen pieni energiatiheys. Superkondensaattoreista voidaan myös käyttää nimitystä ultra-kondensaattori tai kaksikerroksinen kondensaattori. (Sahoo & Umakanta 2021, 86.)



Kuvio 10. Superkondensaattorin rakenne (Sahoo & Umakanta 2021, 86)

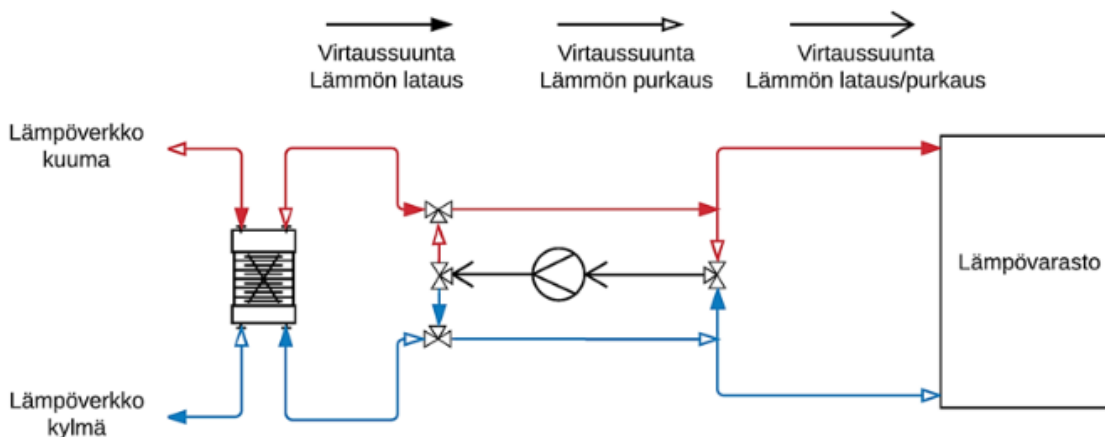
Superkondensaattoria on mahdollista käyttää esimerkiksi akun korvaajana tai lyhytaikaisena varavoiman lähteenä. Niitä käytetään erityisesti raskaassa kalustossa kuten junissa, kun halutaan varastoida jarrutuksesta saatava energia nopeasti talteen. Superkondensaattori onkin toimiva ratkaisu tilanteisiin, joissa järjestelmän on kyettävä siirtämään suuria määriä energiaa nopeasti. Superkondensaattorin erinomaiset ominaisuudet ja sen helppo valmistusprosessi takaavat hyvän kilpailuasetelman perinteisiin akkuihin nähden. Teknologia voisikin tulevaisuudessa mahdollisesti korvata akkujen käytön kokonaan joissakin sovelluksissa. (Blomqvist, Härkönen & Makkonen 2017, 17.)

### 3.1.8 Lämpövarastot

Lämpövarastot jaotellaan yleensä lyhytaikaisiin varastoihin sekä pitkäaikaisvarastoihin. Lyhytaikaisen varaston tarkoituksena on tasata vuorokauden tai viikon aikana syntyviä lämpöenergian kysynnän vaihteluita. Esim. kaukolämpöä voidaan varastoida sekä päivällä mutta myös yöllä, silloin kun kulutus on matalimmillaan. Talteen otettua lämpöenergiaa voidaan tarpeen mukaan käyttää varastoista silloin, kun kulutus on suurta eli aamulla ja illalla. Näin lämmöntuotto jakautuu tasaisesti eri vuorokaudenaikojen mukaan. Lisävarmuutta tuovat useat verkossa olevat lämpövarastot. Silloin lämmöntuotantokapasiteettia ei tarvitse suunnitella maksimikulutuksen mukaan. (Strandström & Vesanto 2018, 4.)

Pitkäaikaisvaraston käyttö perustuu nimensä mukaisesti pidemmän aikavälin varastointiin. Tämä tarkoittaa sitä, että lämpöä varastoidaan kausiluonteisesti. Lämpöä varastoidaan ensisijaisesti silloin, kun lämmöntarve on matala. Esimerkiksi kesällä, jos tehdas ei ole toiminnassa, on järkevää varastoida lämpöenergiaa talven varalle. Kun tehdas talvella käynnistetään ja kulutus on suurta, voidaan varastoitu lämpöenergia ottaa hyötykäyttöön. (Strandström & Vesanto 2018, 4.)

Lämpöä voidaan varastoida useilla eri menetelmillä. Tyypillisin lämpöenergian varastointitapa on vesivarasto. Ne ovat usein maan pinnalla olevia eristettyjä säiliöitä, mutta suurimmat vesivarastot voidaan rakentaa myös maan alle. Maanpäälliset vesivarastot on tarkoitettu lähinnä lyhytaikaisiksi varastoiksi, tasaamaan erityisesti vuorokausivaihteluita. Vesivarasto on tällä hetkellä ainoa laajamittaisesti käytössä oleva lämmön varastointimenetelmä. Toinen keino on varastoida lämpöenergiaa maan sisään, kuten esimerkiksi kallioon. Tällä on pyritty lämmön pitkäaikaiseen varastointiin. Useista kokeiluluonteisista hankkeista huolimatta, kyseinen ratkaisu ei ole kuitenkaan osoittautunut kovin kilpailukykyiseksi. (Strandström & Vesanto 2018, 5.) Lämmön varastoinnin toimintaa on kuvattu tarkemmin kuviossa 11.



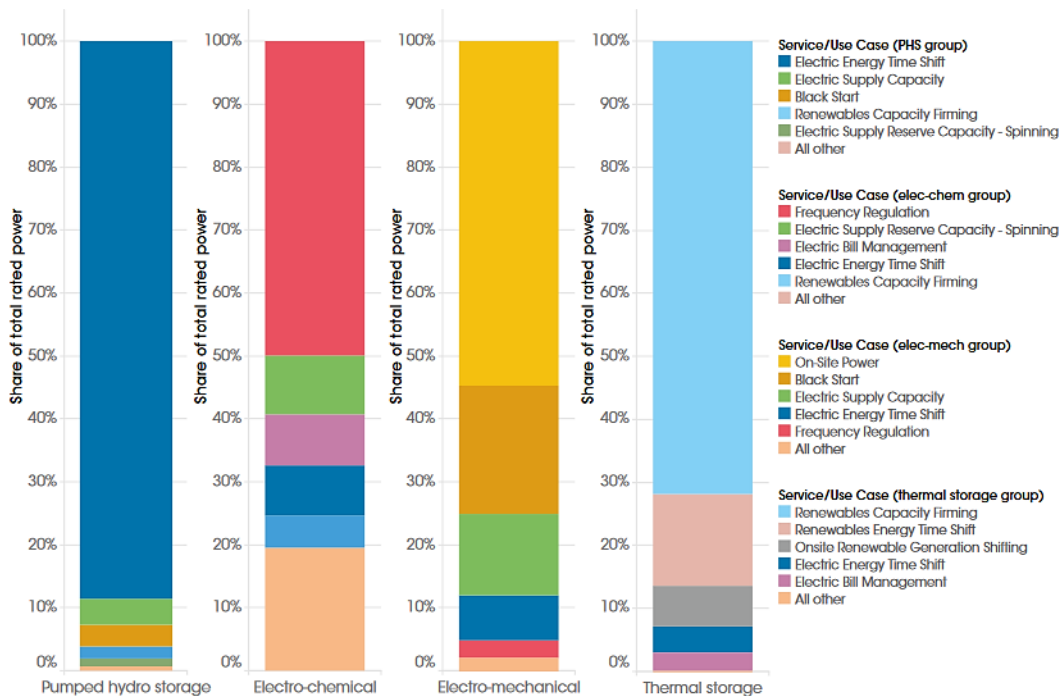
Kuvio 11. Lämpövaraston toimintaperiaate (Strandström & Vesanto 2018, 5)

### 3.2 Energianvarastoinnin käyttökohteet

Sähkön varastoinnilla tulee olemaan ratkaiseva rooli siirryttäessä kohti kestävämpää energiankäyttöä. Kun erilaisten uusiutuvien energialähteiden osuutta sähköntuotannossa kasvatetaan, myös sähköjärjestelmät tarvitsevat entistä enemmän joustavuutta. Sähköä tulee pystyä varastoimaan

päiviksi, viikoiksi tai jopa kuukausiksi. Eri energianvarastointitekniologioita käytetään maailmanlaajuisesti useaan eri tarkoitukseen.

Kuviossa 12 on esitelty erilaisia energianvarastointitekniologioita niiden käyttökohteiden mukaan. Pumppuvoimalaitosten tehtävänä energianvarastoinnissa on lähes yksinomaan siirtää sähkön tarjontaa alhaisen kysynnän ajoista suuren kysynnän aikoihin tuotantokustannusten alentamiseksi. Sähkökemiallisia varastointitekniologioita, kuten akkuja käytetään suurimmaksi osaksi sähköverkon taajuusvaihteluiden tasaamiseen. Mekaanisten teknologioiden roolina on toimia esimerkiksi osana voimalaitosten uudelleenkäynnistämässä katkoksen jälkeen. Lämpöenergian varastointia puolestaan hyödynnetään silloin, kun halutaan vahvistaa uusiutuvan energian vaihtelevaa kapasiteettia. On mielenkiintoista huomata, että suurimpien käyttökohteiden lisäksi kaikkia eri teknologiatyyppejä hyödynnetään osittain myös muihin käyttötarkoituksiin.



Kuvio 12. Energiavarastojen käyttökohteet (IRENA 2017, 13)

## 4 Energiavarastot Suomessa ja maailmalla

Pumppuvoimalaitokset ovat yleisimmin maailmalla käytetty energian varastointitekniikka, mutta etenkin sähköverkkoihin liitettävät akut ovat kasvattaneet suosiotaan viime vuosina. Pumppuvoimalaitosten asennettu kokonaisteho vuonna 2021 oli noin 160 GW. Maailmanlaajuinen energiakapasiteetti oli noin 8500 GWh vuonna 2020, mikä vastaa yli 90 % kaikista globaaleista energian kokonaisvarastoista. Maailman suurin pumppuvoimalaitoskapasiteetti löytyy Yhdysvalloista. Suurinta osaa nykyisin käytössä olevista pumppuvoimalaitoksista hyödynnetään päivittäiseen tasapainotukseen. Vaikka verkkoon kytkettyjen akkujen kokonaiskapasiteetti on huomattavasti pienempi verrattuna pumppuvoimalaitoksiin, on niiden osuus kuitenkin ollut selkeässä kasvussa viime vuosina. Koko verkon kattava maailmanlaajuinen akkukapasiteetti vuoden 2022 lopussa oli lähes 28 GW. Tästä kapasiteetista suurin osa on asennettu viimeisen 6 vuoden aikana. Vuonna 2022 akustojen käyttöönotto kasvoi maailmanlaajuisesti yli 75 % edelliseen vuoteen verrattuna. Yhteensä akkukapasiteettia kasvatettiin noin 11 GW. Yhdysvallat ja Kiina olivat markkinajohtajia, joista molemmat tekivät kokoluokaltaan useiden gigawattien lisäyksiä. Sähkönvarastoinnissa akkuja käytetään tyypillisesti osatunti-, tunti- ja päivittäistasapainotukseen. Litiumioniakut ovat käytetyin akkuteknologia ja se muodostaakin suurimman osan kaikesta uudesta asennetusta akkukapasiteetista. (Grid-scale Storage n.d.)

Suomessa sähkön tuotannon ja kulutuksen vaihteluita on pyritty tasapainottamaan pääasiassa vesivoiman avulla. Suurin osa säätövoimasta tuotetaan kotimaisella vesivoimalla tai ostetaan muualta Pohjoismaista, joissa säädettävää vesivoimatuotantoa on usein hyvin saatavilla. Myös kysyntäjoustoilla pystytään nykyään hallitsemaan sähkön kysyntähuippuja ja siten vaikuttamaan säätövoiman tarpeeseen. (Säätövoima n.d.) Suomessa energiaa varastoidaan myös kaukolämpöverkkoihin liitetyissä tuntuvan lämmön varastoissa sekä sähköverkkoon kytketyissä akustoissa, joilla pyritään erityisesti lyhytaikaiseen taajuuden säätöön. Akkuteollisuuden kannalta Suomesta on tullut kansainvälisesti suuri mielenkiinnon kohde. Tähän ovat erityisesti vaikuttaneet mineraalirikas maaperä, hyvät verkkoyhteydet sekä huippuluokan osaaminen. Myös lämmön kausivarastointi on Suomessa kasvattanut suosiotaan. Kannattavuutta on lisännyt suuri lämmitystehon tarve, joka puolestaan johtuu maamme pohjoisesta sijainnista. (Hepolampi 2021, 29.)

Vaikka pumppuvoimalaitokset ovatkin suosittu energianvarastointimuoto maailmalla, ei Suomessa ole tällä hetkellä ensimmäistäkään toiminnassa olevaa pumppuvoimalaa. Suomessa sähkön tuotanto ja kulutus on ollut aikaisemmin kohtalaisen vakaalla pohjalla, eikä pumppuvoimaloille nähty varsinaisesti tarvetta ennen uusiutuvien energiamuotojen yleistymistä. (Kiiski, Juujärvi & Satpute 2023.) Esimerkiksi Posion ja Kemijärven alueella sijaitsevalla Jumiskon vesivoimalaitoksella on pumppuasema, joka toimii pumppuvoimalan toimintaperiaatteella, mutta sitä ei kuitenkaan varsinaisesti luokitella pumppuvoimalaitokseksi, koska se sijaitsee perinteisen vesivoimalaitoksen yhteydessä. (Tuulivoimalaitoksen ja siihen liitetyn energiavaraston liiketoimintamalli 2014, 14)

Useita pumppuvoimalahankkeita on ollut vuosien varrella käynnissä, mutta ne ovat usein kariutuneet kannattamattomuus- tai ympäristöteknisistä syistä. Näistä viimeisimpänä mainittakoon Pyhäsalmen kaivokseen suunniteltu pumppuvoimalaitos. Se olisi valmistuessaan ollut Suomen ensimmäinen ja yli 1400 metrin pudotuskorkeudellaan maailman korkein pumppuvoimalaitos. Hanke jäi kuitenkin toteutumatta, sillä projektissa pitkään mukana ollut EPV Energia vetäytyi hankkeesta loppuvuonna 2023 kustannusten noustua liian suuriksi. (Pyhäsalmen kaivokseen pumppuvoimalaitos n.d.)

Uutta pumppuvoimalaitosta kaavaillaan parhaillaan Kemijärvelle Ailangantunturin sisään, jonne kaivettaisiin noin 200 metriä pitkä tunneli, joka johtaisi alempana sijaitsevaan Kemijärveen. Ailangantunturin lisäksi alueelle on suunnitteilla useita muitakin pumppuvoimaloita, joiden yhteisteho olisi noin 2000 MW luokkaa. Hanke on kuitenkin vielä suunnitteluasteella ja varsinainen päätös rakentamiselle saadaan todennäköisesti vasta muutaman vuoden kuluttua. (Passoja 2024.)

## **4.1 Esimerkkejä energiavarastoista Suomessa**

### **4.1.1 Lappeenrannan Ylilikkälän akkuvarasto**

Uusiutuvaan energiaan keskittynyt ranskalaisyritys Neoen rakensi yhteistyössä kantaverkkoyhtiö Fingridin kanssa Lappeenrannan Ylilikkälään suuren akkuvaraston, joka valmistui vuonna 2020 (ks. kuvio 13). Power Reserve One -niminen yksikkö on nimellisteholtaan 30 MW ja energiakapasiteetiltaan 30 MWh. Yksikkö koostuu suuritehoisesta litiumioniakustosta, joka Suomen sähköverkkoon kytkettynä kykenee tasaamaan verkon taajuusvaihteluita hyvinkin nopeasti. (Anteroinen 2020.) Tällä hetkellä Neoen rakentaa ensimmäisen akkuvaraston yhteyteen uutta yksikköä nimeltä Power

Reserve Two, jota se kuvaa Pohjoismaiden suurimmaksi akkuvarastoksi. Sen teho tulee olemaan noin 56 MW ja energiakapasiteetti noin 113 MWh. Ensimmäisen yksikön tavoin kyseessä on litiumioniakusto, jonka tehtävänä on tasapainottaa tuotannon ja kulutuksen vaihteluita sähköverkossa. Investointiarvoltaan noin 40 miljoonan euron akkuvarasto on tarkoitus ottaa käyttöön vuoden 2025 aikana. Yhtiö suunnittelee myös uusia akkuvarastoja niin Lappeenrantaan kuin muuallekin Suomeen. (Väisänen 2023.)



Kuvio 13. Yllikkälän akkuvarasto (Neoen 2023)

#### 4.1.2 Vaasan Vaskiluodon lämpövarasto

Vuonna 2020 Vaasan Vaskiluodossa otettiin käyttöön tilavuudeltaan yksi Suomen suurimpia energiavarastoja (ks. kuvio 14). Kyseessä on Vaskiluodon voimalaitoksen alapuolella sijaitseviin entisiin öljyluoliin rakennettu lämpöenergiavarasto. Loppuvuonna 2023 valmistuneen laajennustyön avulla saatiin voimalaitoksen sähkökattiloiden tehoa nostettua 40 megawattista yhteensä 160 megawattiin ja energiavaraston kapasiteetti kasvatettua 8 gigawattitunnista 11 gigawattituntiin. Kaukolämmön- ja sähköntuotannon käytettävyyttä parantava lämpöenergiavarasto on Suomen mittakaavassa hyvin merkittävä. Noin 30 metriä maanpinnan alapuolella sijaitsevat tunnelit ovat tilavuudeltaan yhteensä 210 000 m<sup>3</sup>. Lataus- ja purkutehoa järjestelmällä on yhteensä 110 MW, joka riittää purkutehosta riippuen 4–20 vuorokaudeksi. Sähkökattiloilla tuotetulla energialla vä-

hennetään polttoainetarvetta, parannetaan joustavaa energiantuotantoa ja kulutusta sekä mahdollistetaan pidempiä alasajojaksoja voimalaitokselle. Yhdessä suuren lämpövaraston kanssa ne tuovat riittävää tasapainoa lämmöntuotantojärjestelmän toimintaan ja vähentävät kustannuksia sekä hiilidioksidipäästöjä. (Vaasan Voima 2023.)



Kuvio 14. Vaskiluodon lämpövaraston rakenne (Vaasan Voima 2023)

#### 4.1.3 Kankaanpään hiekka-akku

Vuoden 2023 suomalaisiksi innovaatioksi valittu Kankaanpäässä sijaitseva hiekka-akku on 7 metriä korkea ja 4 metriä leveä teräslieriö, joka sisältää noin 100 tonnia hiekkaa (ks. kuvio 15). Polar Night Energy Oy:n kehittämä maailman ensimmäinen kaupalliseen tarkoitukseen suunniteltu hiekka-akku on kytketty osaksi paikallista kaukolämpöverkkoa. Akun toiminta perustuu lämpöenergian varastointiin. Hiekka-akku lämmitetään edullisen tuuli- ja aurinkosähkön avulla yli 500 celsiusasteen lämpötilaan. Akun varaama lämpöenergia riittää noin 150 omakotitalon päivittäiseen lämmitykseen. (Korpelainen 2023.) Hiekka-akku valmistui kesällä 2022 kaukolämpöyhtiö Vatajankoski Oy:n omistaman lämpölaitoksen pihaan ja sen varastointikapasiteetti on 8 MWh. Hiekka-akun avulla pystytään tuomaan kaukolämpöverkkoon joustavuutta erityisesti suurten kulutushuippujen aikana. Polar Night Energy on jo ryhtynyt suunnittelemaan jopa 20 kertaa suuremman akkuprojektin toteuttamista. (Mononen 2024, 13.)



Kuvio 15. Kankaanpään hiekka-akku (Vatajankoski 2024)

#### 4.1.4 Helenin lämpövarastot

Helsingin Mustikkamaan alapuolelle noin 80 metrin syvyyteen valmistui vuonna 2021 yksi Suomen suurimpia lämpövarastoja. Syvällä kallion sisässä, käytöstä poistetuissa öljyluolissa toimii nykyään Helsingin energiayhtiö Helenin rakentama kaukolämpövarasto. Lämpöpumppujen avulla esimerkiksi jätevesien ja kiinteistöjen hukkalämpö voidaan siirtää luolaston veteen. Yhteistilavuudeltaan 260 000 m<sup>3</sup> kokosiin luoliin varastoidun veden lämpötila vaihtelee 50–90°C välillä. Luolaston varama energiakapasiteetti on noin 11 500 MWh ja sen lataus- ja purkuteho on 120 MW. Luoliin varastoidun lämpöenergian avulla voidaan tasata kaukolämpöverkon kulutushuippuja ympäri vuoden, eli ne toimivat lämmön pitkäaikaisvarastona. (Helen 2020.) Luolalämpövaraston veteen varastoitu energia riittää jopa 25 000 kaksion ympärivuorokautiseen lämmittämiseen. Paksu kallioperä toimii hyvänä eristeenä, joten lämpö ei pääse myöskään karkaamaan luolasta. Mustikkamaan lämpövaraston on arvioitu pienentävän Helenin hiilidioksidipäästöjä noin 21 000 tonnilla vuodessa. (Helen 2021.)

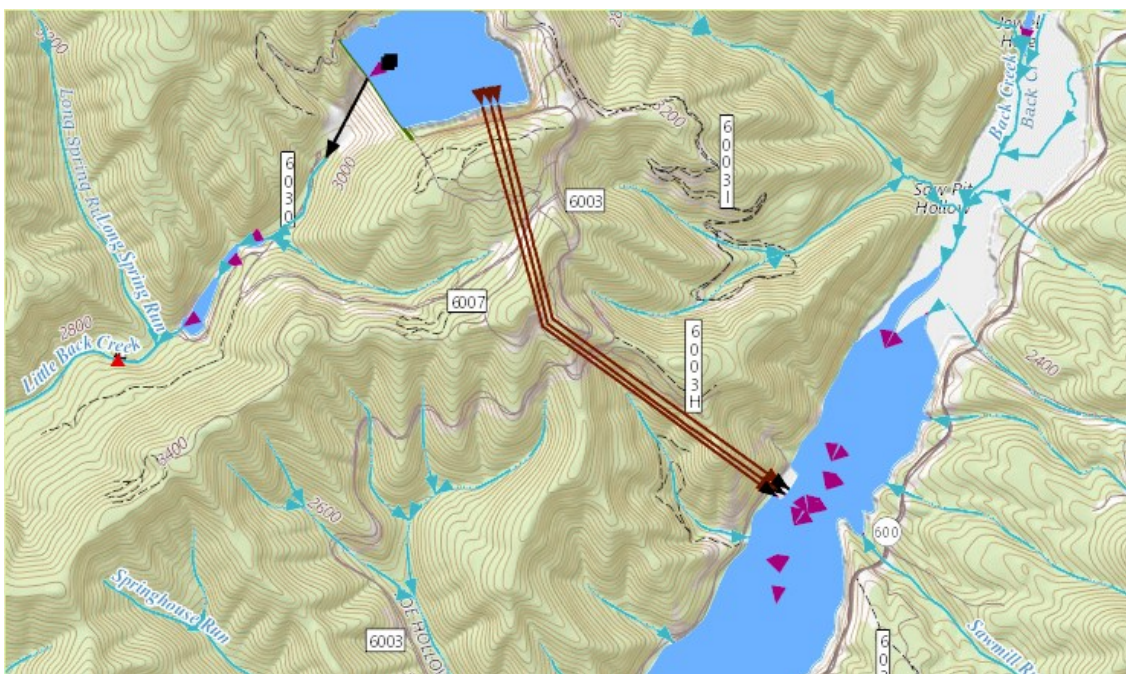
Toinen merkittävä Helenin omistama energiavarasto toimii kirjaimellisesti Helsingin ytimessä. Espin puiston alla 50 metrin syvyydessä sijaitsee peruskallioon louhittu 26 miljoonaa litraa jääkylmää vettä sisältävä tekojärvi. 80 metriä pitkä ja 40 metriä syvä tekojärvi toimii jäähdytysakkuna

luolastossa toimiville kahdelle valtavan kokoiselle lämpöpumpulle. Sillä myös tehostetaan jäähdytyksen tuotantoa ja hukkalämmön hyödyntämistä. Luolastossa toimivaa modernia kaukojäähdytysjärjestelmää käytetään Helsingin julkisten kiinteistöjen ja asuinrakennusten viilennykseen sekä lämmitykseen. (Virolainen 2019.) Helsingin Pasilassa sijaitsee myös toinen Helenin rakennuttama kokoluokaltaan hieman pienempi maanalainen tekojärvi. Halkaisijaltaan noin 20 metrin ja yli 30 metriä syvä tekojärvi toimii Esplanadin tekojärven tavoin kaukojäähdytyksen kylmävarastona. Lämmön varastointiin liittyy myös merkittävästi Katri Valan puiston alla syvällä maan sisässä sijaitseva lämpöpumppulaitos. Kokoluokaltaan maailman suurin kaukolämpöä hyödyntävä lämpöpumppulaitos otettiin ensimmäistä kertaa käyttöön vuonna 2006. (Siironen 2017.)

## **4.2 Esimerkkejä energiavarastoista maailmalla**

### **4.2.1 Bath Countyn pumppuvoimalaitos, USA**

Yhdysvaltojen Virginian osavaltiossa sijaitseva Bath Countyn pumppuvoimalaitos otettiin käyttöön vuonna 1985. Kuuden vesiturbiininsa avulla se kykenee parhaimmillaan tuottamaan noin 3000 MW edestä sähköä alle 15 minuutissa. Se on tarpeeksi tehoa kattamaan yli 750 000 kotitalouden sähköntarpeen. Bath County pumppuvoimala kattaa noin 13 % koko Yhdysvaltojen pumppuvoimarakapasiteetista. Vuonna 2021 se oli maailman suurin pumppuvoimalaitos. Yli 300 metrin korkeudella vuoren päällä olevasta yläaltaasta voidaan vuoren sisään rakennettujen tunnelien välityksellä laskea vettä alempaan altaaseen silloin kun sähkön kysyntä on huipussaan. Vesi pumpataan takaisin yläaltaaseen puolestaan silloin kun kysyntä on vähäistä. Vettä pystytään pumppaamaan turbiinien läpi jopa yli 48 miljoonaa litraa minuutissa. (Bath County Pumped Storage Station 2022.) Bath Countyn pumppuvoimalaitoksen putkistot sekä ylä- ja ala-altaan sijainnit on esitetty kuviossa 16.



Kuvio 16. Bath Countyn pumppuvoimalaitoksen karttakuva (Virginiaplaces 2021)

#### 4.2.2 Cortes-La Muelan pumppuvoimalaitos, Espanja

Euroopan suurin pumppuvoimalaitos sijaitsee Cortes de Pallásissa Espanjassa. Júcar-joen valuma-alueella toimivan laitoksen turbiiniteho on 1762 MW ja pumppausteho 1293 MW. Laitos otettiin käyttöön vuonna 1988, jolloin sinne valmistui 116 metriä korkea pato ja sen yhteyteen La Muela I -niminen pumppuvoimala. Voimalaitoskompleksia laajennettiin vuonna 2015, jolloin valmistui La Muela II. Kokonaisinvestoinnin arvo nousi näin ollen yli 1.2 miljardiin euroon. Pumppuvoimalat on rakennettu maan sisään louhittuun luolastoon, ja ne muodostavat yhdessä Euroopan suurimman pumppuvoimalaitoskompleksin. Näissä kahdessa voimalaitoksessa alempi allas on yhdistetty ylemmän altaaseen kahdella pylväällä, jotka takaavat altaiden välille noin 500 metrin pudotuskorkeuden. Pumppuvoimalaitosta käytetään monipuolisesti hallitsemaan sähkönkulutuksen ruuhkahuipuja ja se pystyy vuosittain turvaamaan noin 400 000 kotitalouden sähköntarpeen, välttämällä samalla yli kahden miljoonan tonnin CO<sub>2</sub>-päästöt vuodessa. (Iberdrola n.d.)

#### 4.2.3 Moss Landing Energy Storage Facility, USA

Moss Landing Energy Storage Facility (ks. kuvio 17) on Montereyn piirikunnassa Kaliforniassa sijaitseva maailman suurin litiumioniakuteknologiaan perustuva energianvarastointilaitos. Akkuvastasto on rakennettu entisen kaasuvoimalaitoksen paikalle ja sen omistaa Texasissa sijaitseva Vista

Energy -niminen energiayhtiö. Kesällä 2023 valmistuneen laajennustyön ansiosta akkujärjestelmän kokonaiskapasiteetti saatiin kasvatettua 750 MW / 3000 MWh:iin, mikä tekee siitä ainutlaatuisen koko maailmassa. Laitos koostuu 122 yksittäisestä kontista, jotka sisältävät yhteensä 110 000 akkumoduulia. Akkuvaraston avulla pystytään varmistamaan, että sähkösiirtoverkon haltijalla on riittävästi kapasiteettia ja resursseja ylläpitää kysynnän ja tarjonnan tasapainoa koko sähköjärjestelmässä. (Lewis 2023.)



Kuvio 17. Moss Landing Energy Storage Facility ulkopuolelta (Vistra Corp 2021)

#### 4.2.4 Zhangjiakoun paineilmavarasto, Kiina

Pohjois-Kiinassa Zhangjiakoun kaupungissa otettiin käyttöön vuoden 2022 lopulla maailman suurin ja tehokkain puhtaan paineilmaenergian varastointijärjestelmä (CAES). Kiinan tiedeakatemian pitkällisen kehityksen tuloksena syntynyt maailman ensimmäinen 100 MW:n CAES-järjestelmä pystyy varastoimaan ja vapauttamaan energiaa noin 400 MWh tehokkuudella. Zhangjiakoun laitos (ks. kuvio 18) kykenee toimittamaan paikalliseen sähköverkkoon yli 132 GWh sähköenergiaa vuodessa, mikä vastaa noin 40–60 000 kodin huippukulutusta. Se säästää noin 42 000 tonnia voimalaitoksissa poltettavaa hiiltä ja vähentää vuotuisia hiilidioksidipäästöjä keskimäärin 109 000 tonnilla. CAES-järjestelmän etuja ovat suuri varastointikapasiteetti, alhaiset pääomakustannukset, pitkä käyttöikä, turvallisuus ja ympäristöystävällisyys. Sitä pidetään yhtenä lupaavimmista teknologioista laa-

jamittaiseen energian varastointiin. Kiinassa aiotaankin tulevaisuudessa nojautua entistä enemmän paineilmaparastojen käyttöön energianvarastoinnissa ja niiden uskotaan kattavan lähes neljänneksen koko maan energiavarastoista vuoteen 2030 mennessä. (Blain 2022.)



Kuvio 18. Zhangjiakoun laitoksen paineilmaparasto (New Atlas 2022)

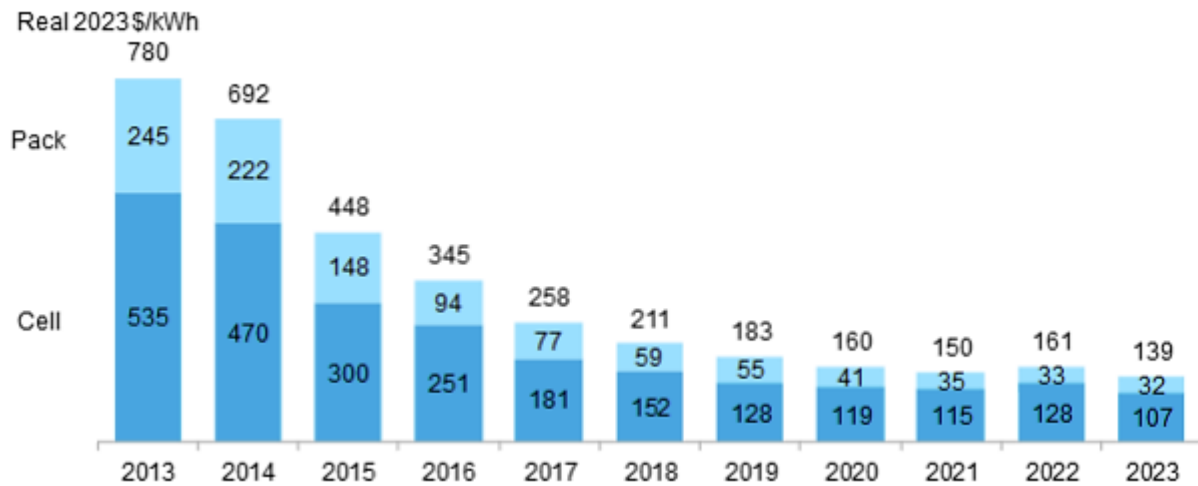
## 5 Sähkön varastoinnin tulevaisuus

### 5.1 Kustannukset

Kustannuksiin liittyen sähkön varastoinnissa noudatetaan hyvin yksinkertaista toimintamallia. Sähköä pyritään varastoimaan sen ollessa halvimmillaan ja käyttämään talteen otettua energiaa sähkön ollessa kallista. Sähkön varastointia hyödyntämällä voidaan siirtää kulutusta halpojen tuntien ajalle, myydä esim. itse aurinkopaneeleilla tuotettua energiaa takaisin sähköverkkoon, osallistua taajuusreservimarkkinoille korvausta vastaan, tasata kulutuksen huippuja ja varautua entistä paremmin sähkön toimituskatkoksiin (Sähkön varastointi – Mitä se on ja milloin energian varastointi kannattaa?)

Vaikka pumppuvoimalaitokset (PHS) hallitsevatkin koko sähkönvarastointikapasiteettia maailmassa, ei kyseiseen teknologiaan ole lähitulevaisuudessa odotettavissa merkittäviä muutoksia kustannusten osalta. PHS-järjestelmien teknisten ja taloudellisten ominaisuuksien oletetaan pysyvän suurin piirtein ennallaan ainakin vuoteen 2030 asti. Pumppuvoimalaitoksille sopivien potentiaalisten sijoituspaikkojen määrä ei myöskään tule kasvamaan lähitulevaisuudessa. Tämän lisäksi vesivoiman ja pumppuvoiman toiminnalle asetetut tiukemmat ympäristöstandardit tekevät uusista kehitystöistä entistä hankalampia ja kalliita. Sen sijaan akkuteknologiaan perustuvat varastointijärjestelmät ovat suuressa kasvussa ja ne kehittyvät nopeasti. Vuoteen 2030 mennessä akkupohjaisten sähkönvarastointijärjestelmien asennuskustannusten odotetaan laskevan noin 50–66 prosenttia. Litiumioniakkujen ohella myös muut akkutyypit ovat nousemassa entistä kustannustehokkaammiksi. (IRENA 2017, 4, 52.)

Akkujen hinnat ovat olleet tasaisessa laskussa jo vuosia, eikä kehitykselle näy loppua. Jos vuonna 2015 akkuun varastoidun sähköenergian investointikustannukset olivat noin 400 dollaria kilowattitunnilta, niin vuonna 2022 se oli enää 130 dollaria. Lyhyessä ajassa on siis tapahtunut huomattavaa kehitystä. Kustannusten pienentyessä myös akkuvarastojen kapasiteetti kasvaa kovalla tahdilla. Näillä näkymin tulevaisuudessa voidaan ympäri maailmaa asennettuihin akkuihin varastoida jopa 4500 GWh sähköä. Nykyään akkukapasiteettia on sähköverkkojen käytettävänä vain muutama gigawattitunti. Venäjän hyökkäys Ukrainaan vuonna 2022 ja sen myötä syntynyt energiakriisi omalta osaltaan vauhdittivat hetkellisesti akkujen hinnan nousua, mutta hinnat ovat sittemmin tasoittuneet ja kääntyneet taas laskuun. Tulevaisuudessa kustannusten pienentymiseen voi vaikuttaa myös liikennekäytöstä poistuvien sähköautojen akkujen uudelleenkäyttö sähkön varastointitarkoituksiin. (Sallinen 2023.) Litiumioniakkujen hintakehitystä viimeisen kymmenen vuoden aikana on havainnollistettu kuviossa 19.



Kuvio 19. Litiumioniakkujen keskimääräinen hintojen kehitys 2013–2023 (BloombergNEF 2023)

Muiden varastointiteknologioiden kustannusten kehityksen ennustaminen on hyvin haastavaa. Esimerkiksi paineilmaparastojen (CAES) kohdalla rakennussuunnittelun kustannukset ovat erityisen paikkakohtaisia ja riippuvat suurelta osin myös paikallisista ympäristörajoitteista. Paineilmaparastojen käyttö maailmalla on vielä kohtalaisen tuore ilmiö eikä sitä voi varsinaisesti verrata esim. pumppuvoimalaprojekteihin, joista on vuosikymmenten saatossa kerätty huomattavasti enemmän tietoa. Joitakin arvioita CAES-järjestelmien hintojen kehityksestä on kuitenkin esitetty. Esimerkiksi vuonna 2016 paineilmaparastojen energiakustannusten arvioitiin olevan noin 53 dollaria kilowattitunnilta. Arvioiden mukaan vuoteen 2030 mennessä tyypillisimmät kustannukset voisivat pudota 44 dollariin kilowattituntia kohden. Keskeisenä haasteena arvioidessa CAES-järjestelmän kustannuksia on edelleen kehitteillä olevien hankkeiden puute. Koska muut sähkönvarastointiteknikat houkuttelevat enemmän investointeja, on paineilmaparastojen tulevaisuudennäkymät hyvinkin epävarmat. (IRENA 2017, 56.)

Vauhtipyörien kustannukset voivat arvioiden mukaan laskea jopa 35 % vuoteen 2030 mennessä. Suurista energiakustannuksistaan (1500–6000 \$/kWh) sekä pitkästä purkuajastaan (n. 15 % tunnissa) johtuen vauhtipyörät eivät sovellu keskipitkään eikä pitkäkestoiseen energian varastointiin. Vauhtipyörien asennettujen energiakustannusten arvioidaan laskevan lukemiin 1000–3900 dollaria/kWh seuraavien noin 5 vuoden aikana. Lukuisia eri kehitysprojekteja on parhaillaan käynnissä, joilla pyritään parantamaan vauhtipyörien tehokkuutta energianvarastoinnissa. Uusilla materiaali-

hankinnoilla ja niiden hyödyntämisellä pystytään mahdollisesti tulevaisuudessa kehittämään vauhtipyörien rakenteellisia ominaisuuksia ja näin vaikuttaa varastoitavan energian määrään. Näillä toimenpiteillä pystytään myös todennäköisesti pienentämään järjestelmän kokonaiskustannuksia pitkällä aikavälillä. (IRENA 2017, 20, 62.) Taulukossa 2 on vertailtu eri varastointitekniikoiden välisiä eroja ja esitetty kustannusarviot jokaiselle tekniikalle kilowattituntia kohden.

Taulukko 2. Energian varastointitekniikoiden vertailua (Enas, T. S., Abdul, G. O., Alami, A. H., Radwan, A., Mdallal, A., Rezk, A., & Mohammad, A. A 2023, muokattu)

Tekniikka	Teholuokka (MW)	Hyötysuhde (%)	Elinikä (vuosina)	Tasoitettu sähkökustannus (\$/kWh)
Paineilmavarasto (CAES)	110–1000	42–54	20–40	2–120
Pumppuvoimalaitos (PHS)	30–5000	70–87	40–60	5–100
Lämpövarasto	0.1–300	30–60	20–30	3–60
Lyijyakku	0–40	63–90	5–15	50–400
Litiumioniakku	0–100	75–97	14–16	600–3800
Vauhtipyörä	0.25–20	90–95	15–20	1000–14,000
Superkondensaattori	0–0.3	84–97	10–30	300–2000
Polttokenno	<58.5	20–66	~20	2–15
Suprajohtava magneettinen energiavarasto	0.1–10	95–98	20–30	500–72,000

## 5.2 Kestävyys

Siirryttäessä kohti entistä suurempaa tuuli- ja aurinkoenergian hyödyntämistä, tarvitaan tulevaisuuden sähköverkkoihin yhä enemmän energianvarastointikapasiteettia katkosten tasaamiseksi ja toimitusvarmuuden ylläpitämiseksi. Pumppuvoima ja akut tulevat jatkossakin näyttelemään suurta roolia sähkön varastoinnissa. Sekä akkujen että pumppuvoimalaitosten kohdalla osa sähköstä häviää ladattaessa ja purettaessa varastoitua energiaa. Molempien tekniikoiden edestäkainen hyötysuhde on tyypillisesti noin 75–80 %. Litiumioniakuilla se on kuitenkin n. 85 % tai jopa enemmän. Erityisesti tulee kiinnittää huomiota akkujen kulumiseen. Akut heikkenevät vanhetessaan, mikä vähentää niiden varastointikapasiteettia. Tyypillisesti sähkönvarastoinnissa käytettävien akkujen odotettu käyttöikä on noin 10–20 vuotta, tekniikasta ja käyttötavasta riippuen. Akkujen eliniän loppupäässä niiden kapasiteetin voidaan odottaa laskeneen alle 70 prosenttiin alkuperäisestä kapasiteetistaan. Vakaa ja luotettavan varastointikapasiteetin ylläpitämiseksi on

suurten akkulaitosten huolehdittava jatkuvasti akkujen säännöllisestä ylläpidosta ja vaihdosta. Vertailun vuoksi esim. pumppuvoiman heikkeneminen ajan myötä on lähellä nollaa. Asianmukaisella huollolla voidaan huipputehoa ylläpitää lähes loputtomiin.

Mitään varastointiratkaisua ei voida pitää kestäväenä, ellei se ole turvallinen. Suurimmat riskit pumppuvoimalaitosten osalta liittyvät ympäristötekijöihin. Esimerkiksi voimalaitoksen padon tai varastoaltaan rikkoutuminen voi vaikuttaa tuhoisasti alueen ympäristöön sekä yhteistöihin. Sen potentiaalinen haittavaikutus on monin verroin suurempi kuin yksittäisen akuston toimintahäiriö. Näkyvin akkuihin liittyvä turvallisuusriski on lämpökarkaaminen, joka voi pahimmillaan johtaa tulipaloon tai räjähdykseen. Riskin suuruus riippuu yleensä siitä, kuinka akkuprojekti on toteutettu. Asianmukaisilla paloturvallisuusstandardeilla ja tekniikalla riski on kuitenkin erittäin pieni. Todellisuudessa suurempi riski ovat tavanomaiset sähköturvallisuuteen liittyvät ongelmat. Tämän vuoksi onkin tärkeää, että turvallisuusstandardeja noudatetaan ja niitä valvotaan tiukasti.

Kestävydestä puhuttaessa ympäristötekijät ovat avainasemassa. Verkkoon kytketty akkulaitos tarvitsee suhteellisen pienen maa-alueen ja se voidaan useimmiten rakentaa hyvin lähelle energian tarvetta tai tuotantopaikkaa, esimerkiksi voimalaitoksen yhteyteen. Näille maa-alueille sijoituilla uusilla toiminnoilla, kuten akkuvarastoilla on yleensä hyvin vähän ylimääräisiä ympäristövaikutuksia. Maa ja vesistövaikutukset liittyvätkin enemmän akkujen hävittämiseen niiden elinkaaren lopussa sekä resurssien talteenottoon uusien akkujen valmistamiseksi. Pumppuvoimalaitos puolestaan vaatii paljon suuremman maa-alueen toimiakseen. Sillä on oltava juuri tiettytyyppinen topografia ja sen maantieteellinen sijainti voi olla hyvinkin kaukana varsinaisen kysynnän sijainnista. Kaikki rakentamiseen ja käyttöön liittyvät mahdolliset ympäristövaikutukset on otettava huomioon ja niitä on kyettävä vähentämään. Ympäristövaikutukset pumppuvoimalaitoksen toiminnan aikana ovat yleensä hyvin minimaaliset. Kuitenkin varastoaltaita ympäröivän luonnon on mukauduttava jatkuvasti vaihteleviin vedenpinnakorkeuksiin, mikä voi vähentää ympäristön monimuotoisuutta. Kaikissa pumppuvoimalaitosjärjestelmissä vettä käytetään uudelleen ja uudelleen, jolloin prosessista saadaan irti maksimaalinen hyöty. Tämä tarkoittaakin sitä, että vettä tulee olla myös jatkuvasti saatavilla varastojen täyttämiseksi, jotta mahdollista haihtumista voidaan estää.

Maailmanlaajuisesti lisääntynyt uusiutuvan energian määrä johtaa väistämättä vihreämpään tulevaisuuteen. On helppo tunnistaa kestävä kehityksen edut käytettäessä varastointiratkaisua, kuten pumppuvesivoimaa tai akkuja. Näin kyetään mahdollistamaan verkon hiilidioksidipäästöjen vähentäminen uusiutuvan energian suuremman käytön ansiosta. Enemmän uusiutuvia energialähteitä mahdollistavien varastointiratkaisujen on kuitenkin oltava kestäviä, ei vain käyttövaiheessa, vaan myös alku- ja loppupäässä. (Dispatchable Renewables n.d.)

### 5.3 Varastoinnin hallinta

Sähkövarastojen hallintaan on olemassa lukuisia erilaisia ratkaisuja. Esimerkiksi erilaisilla kotivarastointijärjestelmillä pystytään pienentämään kotitalouden sähkönkulutusta ja sähköverkon kuormitusta. Järjestelmä koostuu aurinkosähkön ja akkuvarastoinnin yhdistelmästä, joita myydään kotitalouksille yleensä valmiina paketteina. Paikallisissa sähköverkoissa ja teollisuudessa käytetään myös useita erilaisia varastointijärjestelmiä erityisesti kuormitushuippujen tasaamiseen. Paikallisilla verkkovarastointijärjestelmillä voidaan esimerkiksi säätää pienjänniteverkon jännite valmiiksi asetettuun arvoon ja näin välttää suurimmat verkon kuormituspiikit. Massavarastointijärjestelmän avulla voidaan säädellä taajuutta siirtoverkkotasolla. Mikäli verkkotaajuus kasvaa hetkellisesti ylimääräisen energian vuoksi, voidaan järjestelmällä ottaa energiaa talteen ja vapauttaa sitä uudelleen käyttöön, kun taajuus laskee liian alhaiseksi.

Teollisuudessa käytetään myös varastointiyksiköitä verkkojen tasapainottamiseen. Niillä voidaan tasata kuormituspiikkejä ja kompensoida epävakaita generaattoreita, kuten tuuliturbiineja ja hallittavia kulutuslaitteita. Niitä voidaan käyttää myös latausasemien teholähteinä. Teollisuuden varastointiyksiköiden kapasiteetti vaihtelee yleensä muutamasta kilowattitunnista useisiin megawattitunteihin. Mikäli sähköä halutaan varastoida pidemmällä aikavälillä, se on mahdollista toteuttaa myös Power to X – teknologiaa hyödyntämällä. Siinä ylimääräinen sähköenergia muunnetaan joko lämmöksi tai kaasuksi. Kaasu voidaan varastoida suoraan maakaasuverkkoon ja syöttää sieltä eri lämmitysjärjestelmiin ja voimaloihin. Varastoitua lämpöä voidaan puolestaan hyödyntää esimerkiksi kaukolämpöverkoissa. (Sähkövirtaa kaikkina vuorokaudenaikoina n.d.)

Sähkön varastointi liittyy oleellisena osana myös älykkääseen sähköverkkoon (smart grid). Älykkäällä sähköverkolla voidaan monipuolisesti hallita uusiutuvasta energiantuotannosta aiheutuvaa

vaihtelua. Digitalisaation tuoma hyöty on mahdollistanut sen, että sähkön laatua ja taajuuksia voidaan nyt ja tulevaisuudessa seurata aktiivisesti ja jopa ennustaa verkon toimintaa sekä mahdollisia häiriöitä. Uusien energianhallintajärjestelmien (BEMS) ansiosta esimerkiksi kiinteistöissä energian kulutusta pystytään seuraamaan ja hallitsemaan aikaisempaa kehittyneemmin. Kehittyneen automaation avulla erilaisia kuormitustilanteita kyetään ymmärtämään paremmin ja erilaisia sähkölaitteita voidaan kytkeä päälle tai pois hyvinkin tehokkaasti. Tulevaisuudessa myös sähköautojen akut voisivat toimia hajautettuna energiavarastona ja auttaa näin tasaamaan verkon kuormitusta. (Anteroinen n.d.)

Jatkuvasti kasvava tuuli- ja aurinkovoiman tuotanto vaikuttaa erityisesti sähkömarkkinoiden ailahteluun. Sähkön hinnan muutoksiin on kyettävä reagoimaan nyt ja tulevaisuudessa hyvin nopealla aikataululla. Tänä päivänä suuressa nosteessa on etenkin tekoälyn käyttö sähkömarkkinoiden muutosten ennustamisessa. Sen avulla voidaan tutkia kulutus- ja tuotantodataa, seurata markkinahinnan muutoksia reaaliaikaisesti ja hyödyntää säätietoja. Tekoäly käyttää tätä saatavilla olevaa dataa hyödyksi määrittäessään mille markkinoille sähköä voidaan kulloinkin tarjota. Tekoälyllä tapahtuva energiavarastojen optimointi ja markkinoiden tarkastelu on nopeasti kasvavaa liiketoimintaa ja sen merkitys tulee entisestään korostumaan tulevaisuudessa. (Tanskanen 2023.)

## 5.4 Haasteet ja mahdollisuudet

Energian varastointi itsessään on yksi energiasiirtymän suurimpia haasteita ja jokaisella varastointiteknologialla on olemassa omat haasteensa. Ne voivat liittyä kustannuksiin, poliittisiin päätöksiin tai käytettävissä oleviin resursseihin. Ei voida väittää yhden tietyn varastointiratkaisun olevan juuri se ainoa oikea. Vaihtoehtoja on kuitenkin olemassa aina useita erilaisia. Esimerkiksi globaalissa mittakaavassa suosituin energian varastointiratkaisu, eli pumppuvoimalaitos on yleisesti energian varastointikustannuksiltaan edullisin vaihtoehto pitkällä tähtäimellä. Kuitenkin suuren mittakaavansa vuoksi niiden investointikustannukset ovat erittäin suurta luokkaa. Yksittäisen pumppuvoimalan rakentamiseen voi tyypillisesti kuluja satoja miljoonia euroja ja tämä johtaa hyvin helposti rahoitusongelmiin. Tästä syystä valtiot sekä valtioiden omistamat yritykset näyttelevät suurta roolia pumppuvoimalahankkeiden rahoituksessa. Pumppuvoimalaitosten hyvänä puolena on kuitenkin niiden pitkä käyttöikä. On esitetty arvioita, että pumppuvoimalaitoksen keskimääräinen käyttöikä voi olla jopa 100 vuotta tai kauemmin, edellyttäen, että niitä huolletaan asianmukaisesti. Patoaltaat ovat erittäin kestäviä rakennelmia, mutta laitoksen sähkömekaaniset komponentit eivät

ole yhtä vakaita, ja ne vaativatkin jatkuvaa huoltoa sekä kunnossapitoa. (The Future of Energy Storage 2022, 74).

Pienemmässä mittakaavassa akkujärjestelmien käyttö sähkön varastoinnissa vaikuttaa tulevaisuuden kannalta lupaavalta. Akkujen hinnat laskevat nopeasti ja samalla myös akkuvarastojen kapasiteetti kasvaa. Akkuvarastojen avulla kyetään nopeasti reagoimaan sähköverkossa tapahtuviin muutoksiin ja tasoittamaan esimerkiksi huippukuormitustilanteita. Akkuvarastojen rakentaminen ei vaadi ympäristölupaa, joten niitä voidaan rakentaa suhteellisen nopeasti. Akkuvarasto ei kuitenkaan ole sopiva joka tilanteeseen. Akkuja voidaan ladata ja purkaa vain kerran vuorokaudessa, mikä tuottaa myös omat haasteensa varaston tehokkaaseen käyttöön. Tulevaisuuden kannalta näyttää siltä, että akkujärjestelmät tulevat säilyttämään asemansa energianvarastoinnissa. Muitakin teknologioita on tiedossa ja esimerkiksi vetytalous voisi olla seuraava haastaja akkuvarastoille. (Sallinen 2023.)

Suomessa ja maailmalla toimii lukuisia startup-yrityksiä, jotka kehittävät jatkuvasti uusia ratkaisuja energian varastointiin. Uusilla innovaatioilla pyritään ratkaisemaan mm. varastointikapasiteettiin ja energiahyötysuhteeseen liittyviä ongelmia. Esimerkiksi litiumioniakkuteknologiaan kehitetään koko ajan entistä tehokkaampia ja kestävämpiä ratkaisuja. Myös lämpöenergian sekä vedyn varastointiin etsitään uusia vaihtoehtoja ja pyritään parantamaan näiden teknologioiden potentiaalia. Pitkällisen kehityksen ja tutkimuksen avulla voidaan mahdollisesti löytää aiempaa kestävämpiä ja taloudellisesti kannattavampia sähkön varastointiratkaisuja ja edistää uusiutuvien energialähteiden käyttöä sekä vähentää riippuvuutta fossiilisista polttoaineista. (Oskar 2024.)

## 6 Asiantuntijahaastattelu

Kirjallisuuskatsauksen lisäksi opinnäytetyön toisena merkittävänä osa-alueena oli asiantuntijahaastattelun tekeminen. Haastattelu tehtiin temahaastattelun rakennetta noudattaen (Hyvärinen, Suoninen & Vuori 2021). Haastattelu toteutettiin kokonaisuudessaan Microsoft Teams -ohjelman välityksellä 29.11.2023. Haastateltavana asiantuntijana toimi sähköyhtiö Fortum Oyj:n aurinkoteknologiapäällikkö Eero Vartiainen, joka edustaa Suomea ja Fortumia Euroopan aurinkosähköteknologiakomiteassa. Hän on työssään tutkinut eri sähkön varastointi ratkaisuja ja niiden mahdollisuuksia tulevaisuuden energiajärjestelmässä. Tässä kappaleessa käydään haastattelu läpi vaihe

vaiheelta sekä analysoidaan toteutetun haastattelun tuloksia. Haastattelun kesto oli noin yksi tunti.

## 6.1 Haastattelun tulokset

### **Millaisia sähkön varastointiratkaisuja Fortumilla on tällä hetkellä käytössä?**

Fortumilla on muutamia pieniä akkulaitoksia käytössä Suomessa ja Ruotsissa. Kooltaan ne eivät ole kovin isoja laitoksia, vain noin muutaman megawatin luokkaa. Perinteinen sähkön varastointi on puolestaan toteutettu vesialtaissa. Vesivoimalaitosten yhteyteen on rakennettu pato, jonka taakse vettä voidaan varastoida. Maantieteellisen sijaintinsa mukaan ne ovat joko isoja tai pieniä. Pohjoismaissa, varsinkin Ruotsissa ja Norjassa on paljon varastoitavaa vesivoimaa saatavilla. Suomessa suurin osa vesivoiman tuotannosta syntyy virtaavan veden käytöstä. Pohjoisessa Suomessa on joitakin isoja tekoaltaita, mutta enemmistö maamme vesivoimasta ei ole säädettävissä kovinkaan paljon. Tulevaisuudessa merkittävimpana sähkön varastointimuotona tulee olemaan näillä näkymin jatkossakin vesialtaat ja pumppuvoimalaitokset. Parhaillaan puhutaan esimerkiksi Kemijoen pumppuvoimalaitoshankkeesta, mutta Fortumilla itsellään ei ole tällä hetkellä pumppuvesivoimaa käytössä.

### **Onko jokin tietty varastointimenetelmä, jota pidät selkeästi kannattavampana kuin muita? Jos on niin miksi?**

Vesivoimavarastointi on todennäköisesti kaikkein halvinta, jos varastointialtaat ovat jo olemassa. Pitää kuitenkin pitää mielessä, että onko kyseessä jo olemassa oleva varasto, jolloin meille jää vain ns. käyttökustannukset. Toisena vaihtoehtona on investoida uusiin. Investoinneista puhuttaessa etenkin pumppuvoimalaitosten rakentaminen ei ole ilmaista. Akkupuolessa taas esim. litiumioniakkujen hinnat ovat tulleet koko ajan alas. Vähän aikaa sitten materiaalikustannukset olivat korkealla, mutta pidempi trendi on kuitenkin se, että ne tulevat jatkuvasti laskemaan. Toisaalta aina-kaan tällä hetkellä litiumioniakut eivät ole niin halpoja, että niiden avulla voisi kausivarastointia ajatella. Tähän tarkoitukseen akkuja tarvittaisiin niin valtava määrä, joten silloin on kannattavampaa miettiä muita ratkaisuja. Jos mietitään koko energijärjestelmää kokonaisuutena, niin edullisin tapa varastoida energiaa on tuntuvan lämmön muodossa eli vesivarastona. Esimerkiksi Suomessa meillä on paljon lämmityksen tarvetta talvisin. Silloin olisi järkevintä varastoida aurinkoenergiaa

kesältä talven varalle tai vastaavasti silloin kun tuulivoiman tuotanto on huipussaan, sitä ei tarvitsisi myydä pörssiin nollahinnalla vaan se voitaisi ottaa talteen ja käyttää silloin kun tarve on. Tunnetun lämmön varastot yleistyvät kovalla vauhdilla ja kaukolämpöverkossa vesivarastot sekä sähkökattilat ovat kasvava trendi. Sähkön varastointia lämmön muodossa voidaan siis ainakin Suomessa pitää kohtalaisen kannattavana.

### **Onko edustamallanne yrityksellä mahdollisesti kehitteillä jokin uusi ratkaisu sähkön varastointiin?**

Olemme pitäneet Fortumilla siten neutraalin linjan, että emme välttämättä katso jotain tiettyä sähkön varastointiratkaisua paremmaksi kuin toista. Lähtökohtana on se, että pyritään miettimään mikä ratkaisu sopii mihinkin käyttökohteeseen parhaiten ja tutkitaan mikä olisi kustannustehokain vaihtoehto. Emme varsinaisesti itse kehitä mitään tiettyä teknologiaa, mutta voimme olla joissakin kehitysprojekteissa mukana. Fortum on ollut vuosien varrella esimerkiksi erilaisissa sähköautoihin liittyvissä hankkeissa mukana kehittämässä sähköautojen akkuratkaisuja.

### **Miten kotitaloudet voivat hyötyä sähkönvarastoinnista?**

Suomen lämmitysjärjestelmä on hyvin pitkälle rakennettu sähkölämmityksen varaan. Maaseudulla on toki paljon talouksia, joissa käytetään puuta lämmitykseen ja ollaan siinä mielessä omavaraisia, mutta suurimmalle osalle suomalaisista tilanne on kuitenkin se, että jos et ole kaukolämpöverkossa, niin aika yleisesti käytössä on sähkölämmitys. Useimmissa järjestelmissä on jonkinlainen vesivaraaja, mutta ne ovat yleensä aika pieniä. Kovilla pakkasilla ollaan käytännössä suoran sähkölämmityksen varassa. Aurinkopaneelien ja akuston lisäksi lämpöpumput ovat yksi vaihtoehto, mutta ne vaativat sähköä toimiakseen. Kokonaisuuden kannalta tulevaisuuden järjestelmässä tulee olla entistä enemmän joustavuutta. Esimerkiksi kulutusjousto on oikeasti sellainen ratkaisu, jolla kuluttajat pystyvät itse vaikuttamaan asiaan. Kuluttajille tulee vain saada selkeät hintasignaalit, milloin sähköä on syytä säästää ja järjestelmän pitää olla automaattinen, jotta se olisi kuluttajalle mahdollisimman helppo käyttää. Järjestelmän tulisi olla myös kuluttajalle taloudellisesti hyödyllinen. Asia ei kuitenkaan ole yksittäisen kuluttajan käsissä, jos järjestelmä ei taivu siihen. Esimerkiksi etäluettavat sähkömittarit tavallaan mahdollistavat tämän, mutta tällä hetkellä niissä

ei ole automaattista relettä, jota olisi helppo ohjata. Tarvitaan siis paljon muutoksia järjestelmiin, jotta tämä kaikki mahdollistuu.

### **Onko kannattavampaa myydä esim. aurinkoenergialla tuotettu ylijäämä sähköyhtiölle vai varastoida akkuihin ja käyttää itse?**

Tämä kaikki riippuu käytännössä sähkön hinnasta tai sähkön hintaeroista. Perinteisesti Suomessa sähkön hintaerot eivät ole olleet riittävän suuria, jotta tämä kannattaisi, koska pieni akku tulee yksikköhinnaltaan sen verran kalliiksi verrattuna isoihin akkuihin. Esim. 5 tai 10 kWh akku voi olla kolmekin kertaa kalliimpi kuin yksittäinen megawattituntien kokoinen akku. Tämä tarkoittaa sitä, että hintaeron on oltava suurempi, jotta toiminnasta tulisi kannattavaa. Mikäli sähkön hinta pysyy muutamassa sentissä kilowattituntia kohden eikä se vaihtelee riittävän rajusti vuoden aikana, niin silloin ylijäämänsähkön myyminen ei yksinkertaisesti kannata. Viimevuosina on kuitenkin nähty, että sähkön hinta heittelee paljonkin. Tarkemman tiedon saamiseksi olisi tehtävä riittävät tuntilaskelmat esimerkiksi siitä, mikä olisi akkujen takaisinmaksuaika esim. viimevuotisilla pörssihinnoilla. Vuoden 2022 hinnoilla se ei välttämättä olisi kovinkaan montaa vuotta. Pitää kuitenkin muistaa, että viime vuosi oli sähkömarkkinoiden kannalta hyvin poikkeuksellinen vuosi. Näitä asioita on joka tapauksessa tarkasteltava aina pidemmällä aikavälillä. Monet kuluttajat oikeastaan osallistuvat jo tällä hetkellä sähkön varastointiin esim. lataamalla sähköautoja kotonaan yöllä halvan sähkön aikaan ja kuluttavat sen päivällä. Ihanteellinen tilanne olisi se, että sähköauto voisi olla parkissa sellaisessa paikassa, jossa on aurinkopaneelit, eli ylijäämä aurinkosähköä voitaisiin suoraan ladata auton akkuihin. Puhutaan yksinkertaisesti järjestelmäkysymyksestä, eli mihin aurinkopaneeleita kannattaisi asentaa ja miten sähköautojen latauspisteet tulisi sijoittaa.

### **Sähköautojen merkitys sähkön varastoinnissa? Mitä hyötyjä näet esim. kaksisuuntaisessa latauksessa?**

Kaksisuuntainen lataus, eli tekniikkaa, jossa sähköauton energia voidaan siirtää auton akusta takaisin sähköverkkoon. Kyseinen tekniikka tulee melko varmasti yleistymään, mutta tällä hetkellä sitä ei juurikaan paljoa käytetä. Akkujen latausjärjestelmien pitäisi mahdollistaa jo tämä ja kysymyksessä on lähinnä se, miten sitä ohjataan. Tällä hetkellä sitä ei ainakaan Suomessa ole laajamittaisesti käytössä, mutta tulevaisuudessa se yleistyy melko varmasti. Jos ajatellaan, että polttomootoriautoista luovutaan ja kaikilla on sähköauto käytössään. Tämä tarkoittaisi 2–3 miljoonaa

sähköautoa, joissa on kaikissa vähintään 50 kWh akku. Yhteensä siis yli 100 GWh akustoa, joka on merkittävä määrä järjestelmän kannalta. Sitä voitaisi käyttää toiseen suuntaan eli jos sähköä tarvitaan eikä sähköauto ole ajossa, niin akkujen energiaa olisi siinä tapauksessa mahdollista hyödyntää.

### **Millaisena näette akkuteknologioiden kehityksen tulevaisuudessa? Onko jotain uusia tehokkaampia ratkaisuja tulossa? Suola-akku vs. Li-ion akku?**

Erilaisia uusia innovaatioita on tulossa ja niitä testataan parhaillaan. Esimerkiksi virtausakkuja ja suola-akkuja ajatellaan lähinnä isomman kokoluokan ratkaisuksi. Pienemmässä mittakaavassa perinteiset litiumioniakut tulevat todennäköisesti säilyttämään asemansa. Litiumioni akkujen tuotanto on kuitenkin niin massiivista, että sitä tuskin tullaan heti syrjäyttämään. Etenkin autoteollisuus on toiminut ja toimii jatkossakin veturina Li-ion akkujen tuotannossa. Kysynnän ja valmistuskapasiteetin kasvaessa opitaan samalla tekemään asioita paremmin. Sitä mukaa myös kustannukset alenevat ja muiden teknologioiden on hankala kilpailla jo asemansa saavuttaneita akkutyyppejä vastaan. Suuressa kokoluokassa kuitenkin muutkin ratkaisut tulevat yleistymään ja voi olla sellaisia akkuteknologioita, joista ei tällä hetkellä tiedetä juuri mitään, mutta jotka tulevat myöhemmin saavuttamaan suosiota. Erilaisia akkukemioita on kuitenkin olemassa kymmeniä, ellei jopa satoja. Litiumin loppumisesta ei kannata olla huolissaan, koska silloin keksitään jokin muu akkukemia tilalle. Mikä seuraava suuren suosion saavuttava akkuteknologia voisi olla, sitä on melkein mahdoton ennustaa. Näyttäisi tällä hetkellä siltä, että hyvin pitkään tullaan pysymään litiumioni akkujen käytössä. Kustannuskehitystä vauhdittaa ensisijaisesti juuri autoteollisuus ja sitä kautta erityisesti litiumioni akkujen halpeneminen painaa myös muiden akkuteknologioiden hintoja alaspäin.

### **Vedyn varastointi. Kuinka kannattavaa se on tulevaisuudessa verrattuna muihin varastointimenetelmiin? Millaisia haasteita ja mahdollisuuksia siihen liittyy? Käyttökohteet esim. liikenteessä (polttokennoauto)?**

Vedyn varastoinnissa on erilaisia haasteita. Elektrolyysin avulla tuotetun vedyn kustannustekijöistä suurin osa koostuu sähkön hinnasta eli ns. raaka-aine kustannuksista ja elektrolyysilaitoksen investoinneista. Tällä hetkellä vetylaitoksia ei ole kovinkaan paljoa markkinoilla ja elektrolyysi- sekä vetymarkkinoiden ollessa parhaillaan kovassa nosteessa, laitokset ovat vielä kohtalaisen kalliita. Sitä

voidaan pitää kuitenkin varmana, että niiden hinnat tulevat laskemaan rajustikin alaspäin. Esimerkiksi Kiinassa on jo käytössä todella edullisia elektrolyysilaitoksia. Karkeasti arvioiden vähintään 75 prosenttia elektrolyysivedyn tuotantokustannuksista on sähkön osuutta. Silloin avainkysymyksenä ei ole enää laitteistokustannukset vaan, kuinka saadaan halpaa sähköä. Halvinta sähköä saadaan käytännössä auringosta ja tuulesta. Tuotantokustannuksista puhuttaessa aurinkovoima on tällä hetkellä lähes kaikkialla maailmassa halvin tapa tuottaa sähköä. Kun katsotaan pidemmälle tulevaisuuteen, niin tarvitaan jokin molekyyli, jolla energiaa varastoidaan ja siirretään. Tällä hetkellä näyttäisi siltä, että vety on tähän oikea ratkaisu. Polttoainetta tarvitaan sekä liikenteeseen että teollisuuteen ja silloin sähköä voidaan käyttää vedyn tuottamiseen elektrolyysillä. Vedystä voidaan tämän jälkeen jalostaa muita polttoaineita. Vetyä tuskin sellaisenaan tullaan käyttämään vaan paino tulee olemaan vedyn jalostuksella muihin polttoainemuotoihin. Se voi olla esimerkiksi syntetistä maakaasua tai metanolia. On olemassa useita erilaisia ratkaisuja siihen, miten vetyä voidaan käyttää. Kysymys on siitä, mitä polttoainetta tarvitaan ja mitkä ovat varastoinnin ja siirron kustannukset. Yksinkertaisimmillaan elektrolyysilaitos voisi olla aurinko- tai tuulivoimalan yhteydessä ja vety varastoitaisiin kalliovarastoon myöhempää käyttöä varten. Suomessa tällaisen varaston käyttö on hyvin haasteellista, koska silloin joudutaan louhimaan kallioperää. Kannattavampaa on suoraan jalostaa vety toiseksi polttoaineeksi, jolloin sitä ei tarvitse varastoida kaasumaisessa olomuodossa.

Mitä tulee polttokennoautoihin, niin sellaisen kannattavuuteen liikennekäytössä on vaikea ainaakaan tässä vaiheessa vielä uskoa. Polttokennot ovat aika kalliita eivätkä ne ole kovin pitkäkestoisia. Polttokennoston pitäisi kuitenkin riittää auton eliniän ajaksi ja mikäli sellainen pitää vaihtaa, niin se voi tulla erittäin kalliiksi. Sähköakkujen kehitys on mennyt jo niin pitkälle ja autoteollisuus on sen omaksunut, niin on vaikea uskoa polttokennoautojen räjähdysmäiseen suosioon. Yhtenä merkittävänä ongelmana on myös vetyinfra eli saadaanko riittävää jakeluverkostoa luotua kaikille autoille ja kuinka kalliiksi sellaisen rakentaminen tulee. Kuitenkaan ihan kaikkea raskasta liikennettä, kuten laiva- ja lentoliikennettä tuskin saadaan tulevaisuudessa pelkillä akuilla toimimaan. Nämäkin asiat riippuvat paljon poliittisista päätöksistä ja siitä kuinka paljon vetyinfraan panostetaan tulevaisuudessa.

## **Onko jokin tietty varastointiteknologia, jota voisi hyödyntää tulevaisuudessa vielä entistä tehokkaammin?**

Yksi mistä on puhuttu viime vuosina ovat painovoimavarastot. Veden siirtäminen esim. pumppuvoimalaitoksissa perustuu painovoimaan. Sen sijaan että siirrettäisiin vettä, niin aineena voisi olla jokin muu, kuten esimerkiksi kiviaines, jota siirrettäisiin. Siitä kuinka realistista tällaisin painovoimavaraston toteuttaminen käytännössä olisi, voi olla montaa mieltä. Asiaa on joka tapauksessa pohdittu ja siitä on tehty jopa alustavia laskelmia. Tarvittavaa ainesta pitäisi kuitenkin olla hyvin suuria määriä ja tämä voi tuottaa prosessiin omat haasteensa. Toimintaperiaate tällaisella prosessilla on pääasiassa sama kuin pumppuvoimalaitoksella. Akkuteknologioista mikä tahansa voi kehittyä ja niitä voidaan ehkä hyödyntää paremmin tulevaisuudessa. Mahdollisesti tulevaisuudessa voisi jollain tietyillä materiaaleilla yhdistää aurinkosähkön tuotanto ja sähkön varastointi. Tutkimuksia on jo tehty siitä, että aurinkoenergian avulla voitaisiin tulevaisuudessa suoraan tuottaa vettä esim. aurinkokennoissa. Tällä ratkaisulla pudotettaisiin järjestelmästä yksi välivaihe, eli elektrolyysi pois, joka hukkaa noin kolmanneksen energiasta hukkalämmön muodossa. Näiden ratkaisujen kannattavuutta on vielä tässä vaiheessa hankala arvioida.

## **Millaisena näette sähkön varastoinnin kehityksen tulevaisuudessa? Korostuuko sen merkitys ja millä tavalla?**

Sähkön varastointi tulee korostumaan ja erittäin paljon. Se on ratkaisevassa asemassa osana energijärjestelmämme toimivuutta. Energijärjestelmämme on pakko perustua uusiutuviin energianlähteisiin eli tuuli, aurinko- ja vesivoimaan, jotka ovat luonteeltaan vaihtelevia. Sähköä ei voida kuluttaa pelkästään silloin kun sitä on saatavilla mikä myös tarkoittaa sitä, että sähköä on pakko pystyä varastoimaan. Varastoinnin rooli kasvaa ja se on aivan olennainen osa tulevaisuuden energijärjestelmää. Erilaiset varastointiratkaisut, jotka tulevat hallitsemaan jatkossakin ovat todennäköisimmin lyhyen aikavälin varastoinnissa sähköakut ja polttoaineiden tuotannossa sekä kausivarastoinnissa vety. Varmaa on kuitenkin se, että tulevaisuuden energijärjestelmämme rakentuu pitkälti uusiutuviin energianlähteisiin ja siitä johtuviin muutoksiin on pystyttävä reagoimaan.

## 6.2 Tulosten analysointi

Aihepiirinä energian varastointi on erittäin laaja alue, joten kysymysten laatiminen tuotti aluksi hieman vaikeuksia. Tavoitteena oli valmistautua haastatteluun hyvin ja pyrkiä saamaan haastattelutavalta mahdollisimman kattavat vastaukset jokaiseen kysymykseen. Tässä korostui kysymysten muotoilu siten, että niihin olisi haastateltavan mahdollisimman helppo vastata. Haastattelu toteutettiin teemahaastatteluna. Olin valinnut etukäteen tutkimuksen kannalta keskeiset teemat, joista muodostin haastattelukysymykset. Teemahaastattelun mukaisesti kysymysten muotoilu saattoi ajoittain muuttua haastattelun edetessä. (Hyvärinen, Suoninen & Vuori 2021). Esitin haastattelun aikana myös muutamia tarkentavia lisäkysymyksiä kulloinkin käsiteltävään aiheeseen liittyen. Haastattelukysymyksiä oli alkujaan hieman enemmän, mutta päätin lopulta rajata haastattelurungon kymmeneen mielestäni tärkeimpään kysymykseen. Ennen kaikkea pyrin saamaan haastattelun kautta vastauksia tutkimuksen alussa asettamiini kolmeen tutkimuskysymykseen. Näitä keskeisiä kysymyksiä käytin hyödyksi myös haastattelurungon laatimisessa.

Haastateltavan henkilön olin valinnut huolella ja miettinyt mikä olisi aihepiirin sekä lopputuloksen kannalta paras mahdollinen vaihtoehto. Haastateltava valikoituikin pääasiassa hänen kirjoittamiensa asiantuntevien artikkeleiden pohjalta. Alkuperäisenä tavoitteenani oli haastatella opinnäytetyötäni varten useampaa eri henkilöä, mutta tässä kohtaa aikarajat tulivat valitettavasti vastaan. Vaikka kyseessä onkin yksittäisen henkilön subjektiivinen näkökanta, niin haastattelun tulokset ovat mielestäni erittäin hyvin linjassa yleisen tiedossa olevan tutkimustiedon kanssa. Haastattelu oli lopulta hyvin kattava ja olen lopputulokseen enemmän kuin tyytyväinen. Sain jokaiseen kysymykseen asiantuntevan vastauksen ja sain samalla paljon uutta tietoa sähkön varastoinnista sekä eri teknologioiden tuomista mahdollisuuksista. Yksi päätavoitteistani oli myös pitää haastattelu siinä muodossa, että käsiteltävät aiheet koskisivat ensisijaisesti kotimaisia energian varastointiratkaisuja. Tarkoituksena ei ollut käsitellä sähkön varastointia niinkään globaalissa mittakaavassa, vaan keskittyä erityisesti Suomen olosuhteisiin. Tässäkin tavoitteessa onnistuttiin mielestäni oikein hyvin.

Lopputuloksena syntyi mielestäni erittäin hyödyllinen ja monipuolinen katsaus sähkön varastoinnin tulevaisuuden näkyymiin sekä eri teknologioihin ja haasteisiin. Erityisen mielenkiintoista oli kuulla sähköautojen merkityksestä osana tulevaisuuden energiajärjestelmää. Oli myös mukava saada lisätietoa eri akkuteknologioista ja niiden käyttömahdollisuuksista energianvarastoinnissa.

Yllätyksenä tuli se, että sähkön kausivarastoinnin kannalta vedyllä voi olla tulevaisuudessa hyvinkin merkittävä rooli. Vetytaloudesta on puhuttu jo vuosia ja nähtävästi sen vaikutus tulee entisestään kasvamaan jatkossa. Mielestäni viimeisen kysymyksen vastauksessa kiteytyy varsin hyvin koko energianvarastoinnin merkitys ja miksi se on niin tärkeää tulevaisuuden kannalta. Kasvava uusiutuvien energiamuotojen käyttö vaatii energiajärjestelmältämme jatkuvaa joustoa ja sähkön varastoinnilla siihen pystytään jatkossakin vastaamaan.

## 7 Pohdinta

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia sähkön varastoinnin tulevaisuuden ratkaisuja sekä siihen liittyviä haasteita ja mahdollisuuksia. Tavoitteiden saavuttamiseksi tuli luoda kirjallisuuskatsaus aiheeseen ja luoda kattava kuvaus eri sähkönvarastointiteknologioista ja sovelluksista. Tämän lisäksi tuli tutkia nykyisiä sekä tulevia haasteita, kuten kustannuksia, kestävyyttä ja varastoinnin hallintaa. Asiantuntijahaastattelun avulla pyrittiin saamaan tämänhetkistä tietoa sähkönvarastoinnista ja sen mahdollisista tulevaisuuden suuntauksista. Opinnäytetyöllä saatiin vastaukset tutkimuksen alussa määritettyihin kolmeen tutkimuskysymykseen.

Vaikka opinnäytetyön pääpaino olikin tulevaisuuden ratkaisuisa, oli aiheen ymmärtämiseksi ensin luotava riittävä teoriapohja ja katsaus nykyään käytössä oleviin energian varastointiratkaisuihin. Huolellisen aineiston keruun avulla saatiin muodostettua kattava tietoperusta, jossa käsitellään yleisimmät tänä päivänä käytössä olevat varastointiratkaisut Suomessa sekä maailmalla. Näiden teknologioiden ominaisuuksia verrattiin toisiinsa, perehdyttiin eri vaihtoehtoihin ja käyttötarkoituksiin. Tämän lisäksi esiteltiin muutamia yksittäisiä sähkönvarastointiratkaisuja niin globaalisti kuin Suomenkin olosuhteissa. Erilaisia haasteita ja mahdollisuuksia tutkittiin kustannusten, kestävyiden sekä varastoinnin hallinnan osalta. Haastattelun kautta saatiin myös erinomaisia vastauksia näihin kysymyksiin liittyen. Tutkimuksen avulla pystyttiin määrittelemään mitkä sähkönvarastointiratkaisut vaikuttavat tulevaisuuden kannalta houkuttelevimmilta vaihtoehdoilta. Näitä asioita punnittiin niin kustannusten kuin teknologioista saavutettavan hyötysuhteenkin perusteella. Haastavin osuus opinnäytetyössä oli tarvittavan kirjallisen tiedon tiivistäminen helposti ymmärrettävään muotoon. Aihepiiristä löytyy valtavasti tietoa ja oleellinen informaatio oli kyettävä kiteyttämään riittävän tiiviiseen pakettiin. Näissä tavoitteissa lopulta onnistuttiin mielestäni kohtalaisen hyvin.

Saatujen tutkimustulosten pohjalta voidaan muodostaa päätelmiä siitä mitkä energian varastointiratkaisut ovat tulevaisuuden kannalta järkevimpiä. Erityisesti Suomen olosuhteissa vesivoima, lämpövarastot ja akkuvarastot vaikuttavat varsin kannattavilta vaihtoehdoilta. Vedyn varastoinnilla ja vetytaloudella kokonaisuutena on suurta potentiaalia haastaa tulevaisuudessa muita varastointiratkaisuja. Sähköautojen yleistyminen tulee myös jatkossa vaikuttamaan siihen, kuinka niiden käyttämää akkuteknologiaa voidaan hyödyntää. Maailmanlaajuisesti pumppuvoimalaitokset tulevat todennäköisesti pysymään pitkään suosittuna energian varastointimuotona. Muita mahdollisuuksia ovat esimerkiksi suurten paineilmaparastojen yleistyminen.

Sähkön varastointi on yhteiskunnallisesti merkittävä aihe ja globaalissa mittakaavassa hyvin tärkeä tekijä. Kysymyksessä on ennen kaikkea erittäin ajankohtainen aihe. Energia-ala on jatkuvassa murroksessa ja tavoitteet hiilineutraaliuden puolesta vauhdittavat eri sähkönvarastointiteknologioiden kehitystä. Tulevaisuuden energiajärjestelmä tulee hyvin vahvasti perustumaan uusiutuvien energianlähteiden käyttöön. Mikäli energian varastointia halutaan mahdollisimman tehokkaasti hyödyntää, on kyettävä tekemään suuria päätöksiä ja näiden päätösten pitäisi syntyä EU-tasolla. EU-maiden tulisi arvioida energian varastointitekniikoiden kapasiteettitarpeita ja erityisesti tukea rahallisesti uusia innovaatioita ja tutkimuskohteita. Etenkin energian pitkäaikaiseen varastointiin kaivattaisiin uusia ratkaisuja. EU-tasolla tulisi myös tukea sellaisia maita energiavarastojen käyttöön otossa, joissa verkkokapasiteetti on riittämätön tai epävakaa. Näillä toimenpiteillä pystyttäisiin merkittävästi parantamaan sähköverkkojen kestävyttä koko EU-alueella. Suomen valtion tulisi puolestaan tukea rahallisesti uusia pumppuvoimalaitoshankkeita ja pyrkiä näin edistämään uusiutuvan energian käyttöä entisestään. Myös muihin varastointiteknologioihin, kuten akkuvarastojen rakentamiseen tarvittaisiin lisätukea.

Tulevaisuuden energiajärjestelmässä kaikki kytkeytyvät yhteen, niin sähkön tuotanto kuin varastointikin. Järjestelmän kehityksen kannalta asioita tulisi aina miettiä suuremmassa mittakaavassa eikä keskittyä vain yhteen tiettyyn osa-alueeseen. Tärkeintä olisi miettiä mikä on kokonaisuuden kannalta järkevää. Varmaa on kuitenkin se, että fossiilisista polttoaineista on kyettävä luopumaan ennemmin tai myöhemmin. Tämä puolestaan johtaa entistä suurempaan uusiutuvien energiamuotojen käyttöön ja silloin tarvitaan myös paljon energianvarastointikapasiteettia. Tulevaisuuden joustavalle ja mukautuvalle energiajärjestelmälle on jo pohjatyö tehty. Kyse on vain siitä, kuinka pystymme sitä jatkossa ylläpitämään.

## Lähteet

Akut. 2020. Motivan verkkosivu. Viitattu 8.11.2023. [https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava liikenne ja liikkuminen/valitse auto viisaasti/ajoneuvotekniikka/akut](https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava-liikenne-ja-liikkuminen/valitse-auto-viisaasti/ajoneuvotekniikka/akut)

Alanärä, A. 2020. Sähköenergian varastointi veden potentiaalienergiaan. Kandidaatin työ. Tampereen yliopisto. Viitattu 24.10.2023. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202005145331>

Anteroinen, S. 2020. Pohjoismaiden suurin akkuvarasto nousee Yllikkälään. Artikkelit Fingrid-lehden verkkosivulla 17.6.2020. Viitattu 5.2.2024. <https://www.fingridlehti.fi/pohjoismaiden-suurin-akku-varasto-nousee-yllikkalaan/>

Anteroinen, S. N.d. Älykkäiden verkkojen aika on nyt. Artikkelit Enertec-lehden verkkosivulla. Viitattu 12.4.2024. <https://www.enertec.fi/natiivi/3679/Alykkaiden-verkkojen-aika-on-nyt>

Bath County Pumped Storage Station. 2022. Dominion Energy. Viitattu 20.2.2024. <https://www.dominionenergy.com/projects-and-facilities/hydroelectric-power-facilities-and-projects/bath-county-pumped-storage-station>

Blain, L. 2022. China turns on the world's largest compressed air energy storage plant. New Atlas 4.10.2022. Viitattu 20.2.2024 <https://newatlas.com/energy/china-100mw-compressed-air/>

Blomqvist, K., Härkönen, J. & Makkonen, T. 2017. Sähkön varastointitekniikat- ja markkinat. Viitattu 21.10.2023. <https://vanha.karelia.fi/mobiilisahkovarastot/wp-content/uploads/2018/02/Sahkon-varastointitekniikat-ja-markkinat.pdf>

Dispatchable Renewals. N.d. How sustainable are storage solutions? Viitattu 22.2.2024. <http://www.dispatchablerenewables.entura.com/how-sustainable-are-storage-solutions/>

Enas, T. S., Abdul, G. O., Alami, A. H., Radwan, A., Mdallal, A., Rezk, A., & Mohammad, A. A. 2023. Renewable energy and energy storage systems. Scholary Journal. Viitattu 20.2.2024. <https://doi.org/10.3390/en16031415>

Grid-scale Storage. N.d. IEA – International Energy Agency verkkosivu. Viitattu 20.1.2024. <https://www.iea.org/energy-system/electricity/grid-scale-storage>

Halttunen, J. N.d. Osaaminen kilpailukyvyksi. Jyväskylän ammattikorkeakoulun strategia 2020–2030. Viitattu 4.12.2023. <https://www.jamk.fi/fi/file/osaaminen-kilpailukyvyksi-jyvaskylan-ammattikorkeakoulun-strategia-2020-2030>

Helen. 2020. Mustikkamaan lämpöluolia aletaan täyttää vedellä. Uutinen Helen Oy:n verkkosivulla 7.12.2020. Viitattu 20.2.2024. <https://www.helen.fi/uutiset/2020/mustikkamaa>

Helen. 2021. Mustikkamaan jättimäiset lämpöluolat ovat nyt täynnä vettä. Uutinen Helen Oy:n verkkosivulla 11.3.2021. Viitattu 20.2.2024. <https://www.helen.fi/uutiset/2021/ilmastoteko-jalkojemme-alla-mustikkamaan-jattimaiset-lampoluolat-ovat-nyt-taynna-vetta>

Hepolampi, N. 2021. Energiavarastoprojektit Suomessa ja maailmalla. Kandidaatintyö. Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto. Viitattu 19.1.2024. <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2021051730116>

Hyvärinen, M., Suoninen, E. & Vuori, J. 2021. Haastattelut. Laadullisen tutkimuksen verkkokäsikirja. Tampere. Yhteiskuntatieteellinen tietoarkisto. Viitattu 13.5.2024. <https://www.fsd.tuni.fi/fi/palvelut/menetelmaopetus/kvali/laadullisen-tutkimuksen-aineistot/haastattelut/>

Inkinen, P. & Tuohi, J. 2006. Momentti. 1, Insinöörifysiikka. 4. p. Helsinki: Kustannusosakeyhtiö Otava.

Iberdrola. N.d. Cortes - La Muela, Europe's largest hydroelectric power complex in Spain. Viitattu 20.2.2024. <https://www.iberdrola.com/about-us/what-we-do/hydroelectric-power/hydro-plant-cortes-la-muela>

IRENA. 2017. Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030. International Renewable Energy Agency. Viitattu 24.11.2023. [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA\\_Electricity\\_Storage\\_Costs\\_2017.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017.pdf)

JAMK. N.d. Jyväskylän Ammattikorkeakoulun verkkosivu. Viitattu 4.12.2023. <https://www.jamk.fi/fi/jamk>

Jeter, J. 2021. Flywheel Energy Storage System Basics. Industry Article. EE Power. Viitattu 24.10.2023. <https://eepower.com/industry-articles/flywheel-energy-storage-system-basics/>

Juhila, K. 2021. Laadullisen tutkimuksen ominaispiirteet. Laadullisen tutkimuksen verkkokäsikirja. Tampere. Yhteiskuntatieteellinen tietoarkisto. Viitattu 20.10.2023. <https://www.fsd.tuni.fi/fi/palvelut/menetelmaopetus/kvali/mita-on-laadullinen-tutkimus/laadullisen-tutkimuksen-ominaispiirteet/>

Kiiski, H., Juujärvi, R. & Satpute, S. 2023. Pumppuvoimalaitokset – Tehokas ja kestävä energiavarausto uusiutuvalle energialle. Energiaa-verkkolehti. Viitattu 24.10.2023. <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2023062257933>

Korpelainen, L. 2023. Kankaanpään hiekka-akku on vuoden innovaatio – keksintö toi BBC:n kuvausryhmänkin Pohjois-Satakuntaan. Uutinen Ylen verkkosivulla 31.10.2023. Viitattu 19.2.2024. <https://yle.fi/a/74-20057818>

Lewis, M. 2023. The world's largest battery storage system just got even larger. Electrek 3.8.2023. Viitattu 20.2.2024. <https://electrek.co/2023/08/03/worlds-largest-battery-storage-system-just-got-even-larger/>

Miten EU edistää uusiutuvaa energiaa. 2023. Euroopan parlamentin verkkosivu. Viitattu 15.11.2023. <https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/society/20221128STO58001/miten-eu-edistaa-uusiutuvaa-energiaa>

Mitä on sähkön varastointi? 2020. Fortumin verkkosivu. Viitattu 18.10.2023. <https://yhdedssa.fortum.fi/mita-on-sahkon-varastointi>

Mononen, A. 2024. Lämpöä kannattaa varastoida. Enertec 1/2024, 13. Viitattu 19.2.2024. <https://www.publicomedia.com/magazine/pdf/996.pdf>

Mutanen, A., Saarela, P. 2020. Energian säilöjät. Dynaaminen artikkeli. Helsingin Sanomat. Viitattu 24.10.2023. <https://dynamic.hs.fi/a/2020/energia/>

Musawi, O. 2017. Sähköenergian varastointitekniikat ja varastoinnin hyödyntäminen kotitalouksissa. Insinööriyö, AMK. Metropolia Ammattikorkeakoulu, Sähkö- ja automaatiotekniikka. Viitattu 8.11.2023. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2017112117502>

Oskar. 2024. Energian Varastointi Startup-Yritykset Muokkaavat Sähkön Tulevaisuutta. Artikkelit TTY:n verkkosivulla 19.3.2024. Viitattu 4.5.2024. <https://tty.fi/energia-varastointi-startup-yritykset-muokkaavat-sahkon-tulevaisuutta/>

Passoja, A. 2024. Jokiyhtiö kaavailee pumppuvoimalaa tunturin sisään – hallitus näyttää vihreää valoa. Uutinen Ylen verkkosivulla 14.1.2024. Viitattu 1.2.2024. <https://yle.fi/a/74-20069141>

Pyhäsalmen kaivokseen pumppuvoimalaitos. N.d. EPV Energia Oy:n verkkosivu. Viitattu 20.1.2024. <https://www.epv.fi/project/pyhasalmen-kaivokseen-pumppuvoimalaitos/>

Sahoo & Umakanta. 2021. Energy Storage. John Wiley & Sons, 84-86. Viitattu 15.11.2023. <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpES00001S/energy-storage/energy-storage>

Sallam, Abdelhay A., Malik & Om P. 2021. Power Grids with Renewable Energy - Storage, Integration and Digitalization. Institution of Engineering and Technology (The IET). Viitattu 24.10.2023. <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpGRESID3/power-grids-with-renewable/power-grids-with-renewable>

Sallinen, P. 2023. Energian varastointi ratkaisee? Artikkelit Energiauutiset - verkkosivulla 22.8.2023. Viitattu 21.2.2024. <https://www.energiuutiset.fi/kategoriat/markkinat/energia-varastointi-ratkaisee.html>

Strandström, K. & Vesanto, P. 2018. Ylijäämälämmön talteenotto ja varastointi. Raportti. Novox Oy. Viitattu 15.11.2023. <https://sykli.fi/wp-content/uploads/2018/05/2018-02energiavaylalyijaa-malammontalteenottojavarastointi-final1-1.pdf>

Sähkön ja Energian varastointi. 2023. DS New Energyn verkkosivu. Viitattu 18.10.2023. <https://fi.dnsolar.com/info/electricity-and-energy-storage-80694252.html>

Sähkön varastointi – Mitä se on ja milloin energian varastointi kannattaa? 2024. Artikkelit CACTOS:n verkkosivulla 8.2.2024. Viitattu 1.3.2024. <https://www.cactos.fi/artikkelit/sahkon-varastointi>

Sähkövirtaa kaikkina vuorokaudenaikoina. N.d. WAGO:n verkkosivu. Viitattu 20.3.2024. <https://www.wago.com/fi/saehkoevoimatekniikka/energia-varastointijaerjestelmaet>

Säätövoima. N.d. Energiateollisuuden verkkosivu. Viitattu 1.2.2024. <https://energia.fi/energiatie-toa/energiantuotanto/sahkontuotanto/saatovoima/>

Siironen, S. 2017. Helsinki kätkee alleen maanalaisen kaupungin – kokosimme 11 yllättävää paikkaa: tekojärviä, haamumetroasemia. Uutinen Ylen verkkosivulla 29.5.2017. Viitattu 20.2.2024. <https://yle.fi/a/3-9636956>

Solovev, A. 2021. BESS: Proaktiivinen energianhallintaratkaisu. Artikkelit DigiKeyn verkkosivulla 28.9.2021. Viitattu 4.3.2024. <https://www.digikey.fi/fi/articles/bess-a-solution-to-manage-energy-proactively>

Tanskanen, J. 2023. Ilmaisen pörssisähkön päivät harvenevat – Suomeen suunnitellaan jättimäisiä akkuvarastoja, jotta sähköä ei tarvitse myydä liian halvalla. Uutinen Ylen verkkosivulla 13.11.2023. Viitattu 12.4.2024. [https://yle.fi/a/74-20059480?utm\\_source=social-media-share&utm\\_medium=social&utm\\_campaign=yilefiapp](https://yle.fi/a/74-20059480?utm_source=social-media-share&utm_medium=social&utm_campaign=yilefiapp)

The Future of Energy Storage. 2022. An Interdisciplinary MIT Study. Massachusetts Institute of Technology. Viitattu 28.4.2024. <https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2022/05/The-Future-of-Energy-Storage-Executive-Summary.pdf>

Tuulivoimalaitoksen ja siihen liitetyn energiavaraston liiketoimintamalli. 2014. Ramboll Finland Oy, 14. Viitattu 21.5.2024. <https://enontekio.fi/web2017/wp-content/uploads/2017/01/enontekion-tuulivoimalaitoksen-ja-siihen-liitetyn-energiavaraston-liiketoimintamalli.pdf>

Uusiutuvan energian RED II -direktiivi. 2022. Motivan verkkosivu. Viitattu 15.11.2023. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/ohjauskeinot/direktiivit/uusiutuvan-energian-red-ii-direktiivi>

Vaasan Voima. 2023. Suomen suurin sähkökattila-lämpövarastoyhdistelmä käyttöön Vaasassa. Uutinen Vaasan Voima Oy:n verkkosivulla 17.11.2023. Viitattu 10.2.2023. <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/blogi/forthedoers-blogi/vetytalous-tulee-ennemmin-tai-myohemmin>

Vartiainen, E. 2020. Vetytalous tulee – ennemmin tai myöhemmin. ForTheDoers-blogi. Fortumin verkkosivu. Viitattu 9.11.2023. <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/blogi/forthedoers-blogi/vetytalous-tulee-ennemmin-tai-myohemmin>

Virolainen, A. 2019. Syvälle Espan puiston alle on louhittu hyinen tekojärvi – 26 miljoonaa litraa jääkylmää vettä auttaa taistelussa ilmastonmuutosta vastaan. Ilta-Sanomat 16.8.2019. Viitattu 20.2.2024. <https://www.is.fi/kotimaa/art-2000006206233.html>

Väisänen, R. 2023. Ranskalaisyhtiö rakentaa Suomen itärajan tuntumaan toisen ja edeltäjänsä suuremman akkuvaraston. Uutinen Ylen verkkosivulla 27.12.2023. Viitattu 5.2.2024. <https://yle.fi/a/74-20066714>

## Liitteet

### Liite 1. Haastattelurunko

#### Asiantuntijahaastattelun kysymykset

1. Millaisia sähkön varastointiratkaisuja Fortumilla on tällä hetkellä käytössä?
2. Onko jokin tietty varastointimenetelmä, jota pidät selkeästi kannattavampana kuin muita?  
Jos on niin miksi?
3. Onko edustamallanne yrityksellä mahdollisesti kehitteillä jokin uusi ratkaisu sähkön varastointiin?
4. Miten kotitaloudet voisivat hyötyä sähkönvarastoinnista?
5. Onko kannattavampaa myydä esim. aurinkoenergialla tuotettu ylijäämä sähköyhtiölle vai varastoida akkuihin ja käyttää itse?
6. Sähköautojen merkitys sähkön varastoinnissa? Mitä hyötyjä näet esim. kaksisuuntaisessa latauksessa?
7. Millaisena näette akkuteknologioiden kehityksen tulevaisuudessa? Onko jotain uusia tehokkaampia ratkaisuja tulossa? (Suola-akku vs. Li-ion akku)
8. Vedyn varastointi. Kuinka kannattavaa se on tulevaisuudessa verrattuna muihin varastointimenetelmiin? Millaisia haasteita ja mahdollisuuksia siihen liittyy? Käyttökohteet esim. liikenteessä (polttokennoauto)?
9. Onko jokin tietty varastointitekniikka, jota voisi hyödyntää tulevaisuudessa vielä entistä tehokkaammin?
10. Millaisena näette sähkön varastoinnin kehityksen tulevaisuudessa? Korostuuko sen merkitys ja millä tavalla?