

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
School of Energy Systems  
Energiatekniikka  
BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

**ENERGIAVARASTOPROJEKTIT SUOMESSA JA MAAILMALLA**  
**ENERGY STORAGE PROJECTS IN FINLAND AND ABROAD**

Työn tarkastaja: TkT Markku Nikku  
Työn ohjaaja: TkT Markku Nikku  
Lappeenrannassa 15.5.2021  
Niko Hepolampi

## **TIIVISTELMÄ**

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Niko Hepolampi

### **Energiavarastoprojektit Suomessa ja maailmalla**

Kandidaatintyö 2021

Tarkastaja: TkT Markku Nikku

Ohjaaja: TkT Markku Nikku

35 sivua ja 13 kuvaa

Hakusanat: energiavarastot

Keywords: energy storage

Tässä kandidaatintyössä tutustutaan energian varastoinnin nykytilaan ja tulevaisuuteen kolmen kansainvälisen ja kolmen kotimaisen energiavarastoprojektin avulla. Työssä tarkastellaan energian varastoinnin tarvetta, ansaintamekanismeja ja varastointiratkaisuja sekä pohditaan Suomen toimintaympäristöön soveltuvia ratkaisuja.

Energiavarastot ovat oleellinen osa tulevaisuuden hiilineutraalia energiajärjestelmää. Aurinko- ja tuulivoima ovat edullisimmat energian tuotantomuodot useimmissa maissa. Vaihtelevan tuotannon yleistymisen hankaloittaa energian tuotannon ennustamista ja heikentää sähköverkon tehotasapainoa. Energiavarastoja käytetään tuotannon ja kulutuksen tasaamiseen varastoimalla energiaa, kun sen kysyntä on vähäistä ja purkamalla varastoa kulutushuipun aikana. Pumppuvoimalaitos on tällä hetkellä käytetyin energian varastointitekniikka yli 95 % osuudella globaalista varastointikapasiteetista. Muiden varastointimenetelmien kapasiteetin odotetaan kasvavan 110-kertaiseksi vuoteen 2040 mennessä. Suomeen soveltuvia varastointimenetelmiä ovat tällä hetkellä lämmön kausivarastot, entisiin kaivoksiin rakennettava pumppuvoima ja akkuvarastot. Varastointimenetelmien kehittyessä myös LAES, virtausakut ja synteettiset polttoaineet ovat varteenotettavia vaihtoehtoja energian pitkäaikaiseen- ja vauhtipyörät lyhytaikaiseen varastointiin.

# SISÄLLYS

## TIIVISTELMÄ

## SISÄLLYSLUETTELO

## SYMBOLILUETTELO

1 JOHDANTO.....	5
2 ENERGIAJÄRJESTELMÄN MUUTOS.....	6
2.1 Uusiutuva energia .....	6
2.1.1 Aurinkovoima .....	7
2.1.2 Tuulivoima.....	8
2.2 Liikenteen sähköistyminen .....	9
2.3 Hajautettu tuotanto.....	10
3 ENERGIAN VARASTOINNIN ANSAINTAMALLIT.....	11
3.1 Taajuuden vakautusreservi.....	11
3.2 Taajuuden palautusreservi.....	12
3.3 Kausivarastot.....	12
4 ENERGIAN VARASTOINTIRATKAISUT.....	13
4.1 Mekaaniset energiavarastot.....	13
4.1.1 Pumppuvoimalaitokset.....	14
4.1.2 Paineilmavarastot.....	15
4.2 Lämpövarastot.....	17
4.3 Sähkökemialliset varastot .....	18
4.4 Kemialliset varastot.....	20
5 ENERGIAVARASTOPROJEKTIT MAAILMALLA .....	22
5.1 Bath County Pumped Storage Station .....	23
5.2 Huntorf CAES Plant.....	24
5.3 Bokpoort CSP.....	26
6 ENERGIAVARASTOPROJEKTIT SUOMESSA.....	29
6.1 Batcave-akkuprojekti.....	29
6.2 Vaskiluodon luolalämpövarasto .....	30
6.3 Turun Toriparkki.....	32
7 SUOMEEN SOVELTUVAT ENERGIAVARASTOT.....	33
8 YHTEENVETO.....	35
LÄHTEET.....	36

## LIITTEET

Liite 1. TRL-asteikko

## SYMBOLILUETTELO

### Roomalaiset

$c_p$	ominaislämpökapasiteetti	J/kg K
$g$	putoamiskiihtyvyys	m/s <sup>2</sup>
$H$	nostokorkeus	m
$I$	intensiteetti	W/m <sup>2</sup>
$m$	massa	kg
$P$	teho	W
$Q$	tilavuusvirta	m <sup>3</sup> /s
$T$	lämpötila	°C

### Kreikkalaiset

$\eta$	hyötysuhde	-
$\rho$	tiheys	kg/m <sup>3</sup>

### Lyhenteet

AM	ilmamassa (Air Mass)
CAES	paineilmavarasto (Compressed Air Energy Storage)
CHP	yhdistetty sähkön- ja lämmön tuotanto (Combined Heat and Power)
CSP	keskitetty aurinkovoima (Concentrated Solar Power)
DAC	suora ilman talteenotto (Direct Air Capture)
EU	Euroopan unioni (European Union)
HTF	lämmönsiirtofluidi (Heat Transfer Fluid)
IEA	Kansainvälinen energiajärjestö (International Energy Agency)
IoT	esineiden internet (Internet of Things)
IPP	yksityinen energiantuottaja (Independent Power Producer)
LAES	nestemäisen ilman varasto (Liquid Air Energy Storage)
PEM	polymeerielektrolyyttikalvo (Polymer Electrolyte Membrane)
SNG	synteettinen maakaasu (Synthetic Natural Gas)
TRL	teknologian valmiusaste (Technology Readiness Level)

## 1 JOHDANTO

Maailman energiajärjestelmä on kokemassa suuria muutoksia. Fossiilisista polttoaineista ollaan luopumassa ilmastonmuutoksen torjunnan myötä ja tilalle on tulossa uusiutuvaa energiaa. Liikenne sähköistyy kiihtyvällä tahdilla, tekoäly ja IoT-ratkaisut yleistyvät. Samaan aikaan 770 miljoonaa ihmistä on vielä ilman sähköä (IEA 2020a). Näihin muutoksiin vastaaminen edellyttää uudenlaisia ratkaisuja. Uusiutuvan energian yleistyminen lisää sähköntuotannon vaihtelevuutta, jolloin joustavan tuotannon ja kulutuksen merkitys kasvaa. Liikenteen sähköistyminen voimistaa kulutushuippuja, johon on kyettävä vastaamaan älykkäällä sähköverkolla. Syrjäisen asutuksen sähköistämiseen ja säävarman verkon rakentamiseen tarvitaan hajautettua tuotantoa, jossa tuotettu energia kulutetaan paikallisesti.

Energiajärjestelmän muutoksiin voidaan vastata energian varastoinnilla. Energiaa voidaan varastoida esimerkiksi sähkönä, lämpönä tai kemiallisena energiana vaihtelevilla varastointiajoilla ja purkutehoilla. Vesivoimaa ja lämpöä varastoidaan usein suuria määriä ja varastointiaika vaihtelee muutamista päivästä vuosiin. Uusiutuvaa aurinko- ja tuulivoimaa puolestaan varastoidaan usein vain muutamiksi tunneiksi tuotannon päivittäisen vaihtelun vuoksi. Energian varastointi vähentää vaihtelevan tuotannon sääriippuvuutta ja parantaa sähköverkon tehotasapainoa. Samalla tasataan sähkön hinnanvaihtelua ja vältetään ylituotannosta aiheutuvilta sähkön negatiivisilta hinnoilta. Energian varastointi hajautetun tuotannon alueella vähentää alueen riippuvuutta kantaverkosta ja mahdollistaa asutuksen pysymisen sähköistettynä lyhyistä siirtoverkon katkoksista huolimatta.

Energiaa varastoinnin tarve on jatkuvassa kasvussa ja markkinoille on tulossa monenlaisia uusia varastointiratkaisuja. Tässä työssä tutustutaan suuren kokoluokan projekteihin Suomessa ja maailmalla. Työn tavoitteena on luoda katsaus energiavarastoihin ympäri maailmaa ja esitellä yleisimpiä varastointimenetelmiä. Työssä tarkastellaan energian varastoinnin tarvetta, ansaintamekanismeja sekä menetelmiä ja tutustutaan tarkemmin kolmeen kansainväliseen ja kolmeen kotimaiseen energiavarastoprojektiin. Projektit hyödyntävät erilaisia ratkaisuja ja varastointiajat vaihtelevat muutamista minuuteista useisiin kuukausiin. Lopuksi pohditaan Suomen toimintaympäristöön sopivia energiavarastoja ja niiden potentiaalia suomalaisiksi vientituotteiksi. Työssä käytetään energiavarastoista saatavilla olevaa tutkimustietoa, lehtiartikkeleita ja projekteissa osallisina olevien yritysten verkkosivuja.

## 2 ENERGIAJÄRJESTELMÄN MUUTOS

Globaali energianjärjestelmä on muutoksessa neljännen teollisen vallankumouksen myötä. Termillä tarkoitetaan järjestyksessään neljättä koko maailmaa mullistavaa taloudellista ja teknologista muutosta. Ensimmäinen teollinen vallankumous sai alkunsa 1760-luvun Britanniasta kivihiilen ja höyryvoiman myötä, toinen teollinen vallankumous 1860-luvulla toi mukanaan sähkön. Kolmas- eli teknologinen vallankumous alkoi 1970-luvulla elektroniikan ja ydinvoiman yleistymisen myötä. Nyt käynnissä oleva neljäs- eli digitaalinen vallankumous pohjautuu aikaisempiin yhdistämällä biologista ja digitaalista maailmaa tekoälyn ja esineiden internetin avulla. Digitalisaatio mahdollistaa tuotannon ja kulutuksen reaaliaikaisen seurannan ja säätämisen, mikä edesauttaa irtaantumista fossiilisista polttoaineista. (Dogaru 2020, 398) Tässä luvussa käsitellään energiasektorissa tapahtuvia muutoksia uusiutuvasta energiasta liikenteen sähköistymiseen ja hajautettuun tuotantoon.

### 2.1 Uusiutuva energia

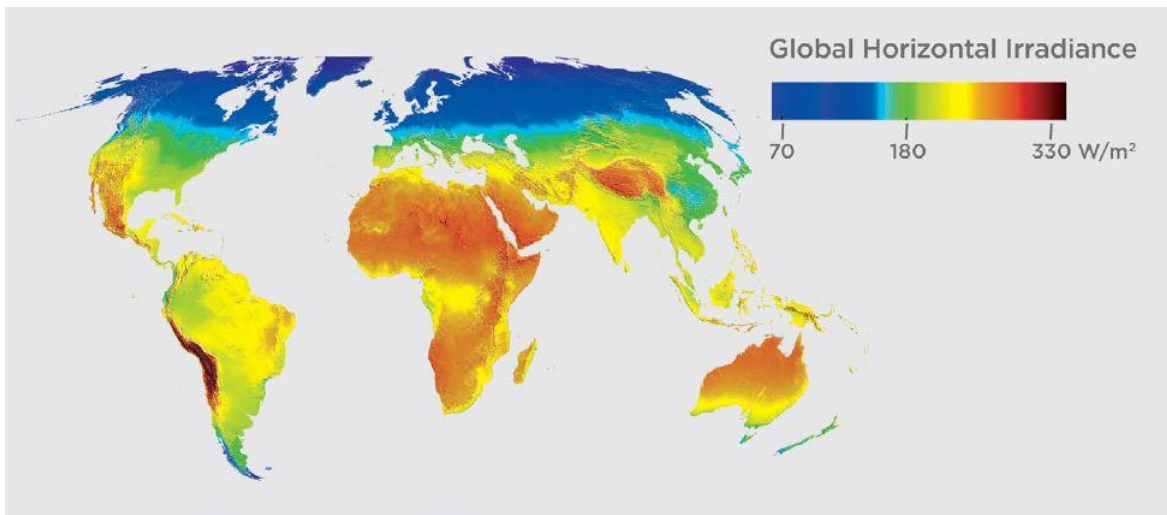
Vuonna 2015 solmitun Pariisin ilmastopöytäkirjan tarkoitus on rajata maapallon keskilämpötilan nousu 1,5 °C esiteolliseen aikaan verrattuna. Sopimuksen allekirjoitti 196 osapuolta, jotka määrittävät itse päästötavoitteensa ilmastomuutoksen hillitsemiseksi ja raportoivat niiden edistymisestä. Tuloksia tarkastellaan viiden vuoden välein ja maille suositellaan uusia ilmastotoimia. (United Nations 2015) Joulukuussa 2020 Kiina ilmoitti leikkaavansa bruttokansantuotekohtaisia hiilidioksidipäästöjään vähintään 65 % vuoden 2005 vertailutasosta ja lisäävänsä fossiilittomien polttoaineiden osuuden 25 prosenttiin primäärienergiankulutuksesta vuoteen 2030 mennessä (Reuters 2020). Euroopan komission esityksen mukaan EU vähentää kasvihuonepäästöjään ainakin 55 prosentilla vuoden 1990 tasosta vuoteen 2030 mennessä ja on hiilineutraali vuonna 2050 (European Commission 2020).

Maailman kokonaisenergiankulutus on kasvanut noin 63 % vuodesta 1990. Vuonna 2018 energian käytettiin noin 166 PWh. Tuuli- ja aurinkoenergia ovat edullisimmat tavat lisätä sähköntuotantoa useimmissa maissa. Uusiutuvien energianlähteiden odotetaan nousevan kivihiilen ohi merkittävimmäksi sähköntuotantomuodoksi vuonna 2025 tuottaen kolmanneksen maailman sähköstä. Noin puolet uusiutuvasta sähköstä tuotetaan tällöin vesivoimalla ja suurin osa jäljelle jäävästä osuudesta tuuli- ja aurinkovoimalla. Vuosittain verkkoon liitettävästä uusiutuvan energian kapasiteetista 60 % on aurinkovoimaa ja 30 % tuulivoimaa. (IEA 2020c)

Tuuli- ja aurinkovoima tukevat toisiaan, sillä niiden suurimmat tuotantohuiput eivät usein osu päällekkäin. Aurinkovoimaa tuotetaan parhaiten kesällä ja päiväsaikaan, kun tuulivoimaa voidaan tuottaa myös talvella ja öisin. Haasteena on silti tuotannon vaikea ennustettavuus, sillä aurinkoenergian teho riippuu muun muassa pilvisyydestä ja aina ei tuule. Tällöin sähköverkossa tulee olla riittävästi tasaista perustuotantoa ja säätövoimaa. Säätövoimana voidaan käyttää olemassa olevaa joustavaa tuotantoa tai energiavarastoja. Energiavarastot tasaavat vaihtelevaa tuotantoa varastoimalla energiaa sähkönä tai lämpönä, kun tuotantoa on ylimäärin ja syöttämällä energiaa takaisin jakeluverkkoon suuremman kysynnän aikana. (Vartiainen 2020)

### 2.1.1 Aurinkovoima

Aurinkovoimalat käyttävät energianlähteenään auringon sähkömagneettista säteilyä. Säteily voidaan ottaa talteen lämpönä aurinkokeräimissä tai sähkönä aurinkopaneelissa. Auringon säteilyn vuontiheys eli aurinkovakio on ilmakehän ulkorajalla noin  $1368 \text{ W/m}^2$ . Osa auringon säteilystä kuitenkin heijastuu takaisin avaruuteen tai absorboituu ilmakehään. Maahan tulevan säteilyn voimakkuus riippuu vallitsevista sääoloista sekä auringon ja tarkastelupisteen välisen ilmakehän suhteellisesta paksuudesta, jota kuvataan AM-luvulla. Säteily läpäisee ilmakehän parhaiten, kun aurinko on suoraan tarkastelupisteen yläpuolella eli zeniitissä. (Lavine et al. 2017, 763–765) Maahan saakka tulevan säteilyn keskimääräinen irradianssi vaakasuoralle pinnalle on esitetty kuvassa 1. Todellisuudessa auringon säteilyresurssit vaihtelevat vuorokauden- ja vuodenajan mukaan. Suurin osa Suomen vuotuisesta aurinkoenergian tuotannosta ajoittuu ajanjaksolle toukokuun alusta elokuun puoliväliin, jolloin aurinko on kravun kääntöpiirin yläpuolella. Tällöin päivän pituus voi olla yli 16 tuntia ja maahan tulevan säteilyn vuontiheys suurimmillaan noin  $700 \text{ W/m}^2$ .



**Kuva 1.** Auringon säteilyresurssien vuosikeskiarvo vaakasuoralle pinnalle (Vaisala 2020)

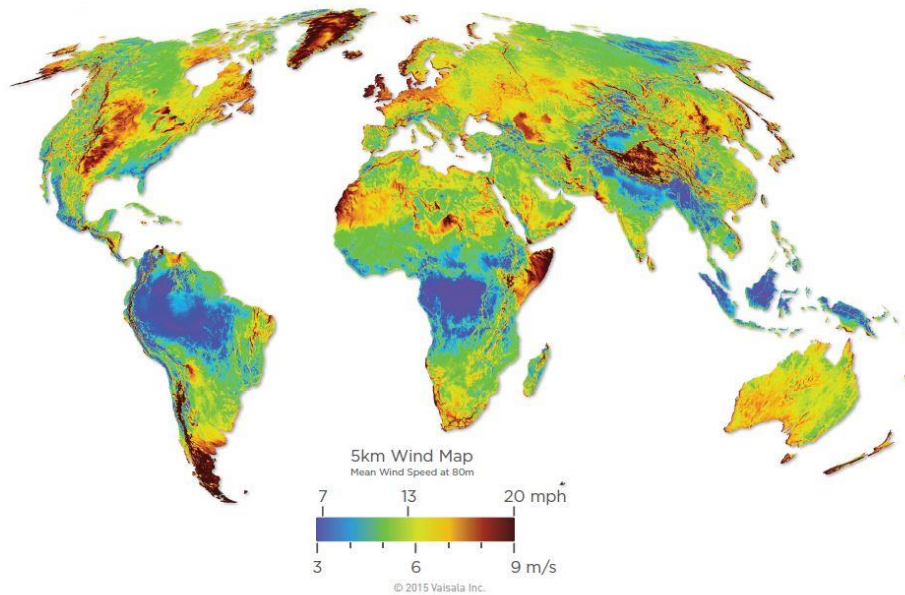
Tuotetun sähköenergian määrä riippuu säteilyresurssien lisäksi myös paneelien hyötysuhteista ja kennojen toimintalämpötiloista. Kaupallisten aurinkopaneelien hyötysuhteet ovat standardioloissa (25 °C, 1000 W/m<sup>2</sup>, 1,5 AM) noin 15–22 %. Paneelin pintalämpötilan noustessa sähköntuotto hyötysuhde heikkenee noin 0,5 %/°C, sillä osa auringon säteilystä muuttuu sähkön sijasta lämmöksi (Siecker et al. 2017, 192). Kehitteillä on myös uudenlaisia teknologioita, jotka parantavat paneelien hyötysuhteita. Yhdysvaltalainen uusiutuvan energian tutkimuslaboratorio NREL on kehittänyt kuusikerroksisen, useaa puolijohderajapintaa hyödyntävän paneelin, joka ylsi testeissä 39.2 % hyötysuhteeseen ilman säteilyn keskittämistä. Paneelin ajatuksena on kerätä auringon säteilyä aallonpituusalue kerrallaan. (NREL 2020) Aurinkokeräimissä lämmöntuoton hyötysuhde voi olla yli 70 %, mutta koko keräinjärjestelmän hyötysuhde on käytännössä tätä heikompi (Motiva 2020a).

### **2.1.2 Tuulivoima**

Tuuli saa alkunsa, kun auringosta maahan tulevan säteilyn aiheuttamat lämpötila- ja paine-erot pyrkivät tasoittumaan. Paikalliset tuuliolosuhteisiin vaikuttaa lisäksi maanpinnan muoto ja karheus sekä lämpötilaero maan ja meren välillä. Maanpinta hidastaa alimpien ilmakerrosten virtausta, jolloin tuulen pystysuuntainen nopeusgradientti kasvaa maanpinnalta ylöspäin mentäessä. Tämän vuoksi tuulivoimaloiden napakorkeuksia on kasvatettu viimeisen 20 vuoden aikana. (Tuuliatlas 2021) Maapallon keskituulennopeuksien jakautuminen 80 m korkeudessa on esitetty kuvassa 2. Kuvasta voidaan havaita, että keskituulennopeudet ovat suurimmillaan vuoristoissa ja rannikoilla, joissa maanpinnan karheus on pienimmillään. Pienimmät keskituulennopeudet ovat puolestaan päiväntasaajan ympäristössä, jossa vallitsee pysyvä matalapaine. Matalapainevyöhyke muodostuu, kun auringon lämmittämä ilma nousee ylöspäin.



# VAISALA



**Kuva 2.** Keskituulennopeudet 80 m korkeudessa. (Vaisala 2017)

Tuulivoiman investointikustannukset ovat laskeneet nimellistehon ja huipunkäyttöajan kasvaessa. Maalle rakennettavien tuulivoimaloiden investointikustannukset olivat vuonna 2015 noin 1560 \$/kW ja merelle rakennettavan tuulivoiman 4650 \$/kW. Kustannusten odotetaan laskevan maalla 12 % ja merellä 15 % vuoteen 2025 mennessä. Merelle rakennettavien tuulivoimaloiden etuna on tasaisemmasta maastosta johtuva suurempi keskituulennopeus. (IRENA 2016, 10) Tuulivoimaloita ajetaan yleensä 4–25 m/s tuulen nopeuksilla. Suuremmilla nopeuksilla laitevaurioiden riski kasvaa ja voimala pysäytetään. Tuulivoimalan nimellisteho saavutetaan tyypillisesti noin 10–15 m/s nopeuksilla. (Motiva 2020b) Nykyisten maalle pystytetyn tuuliturbiinin nimellisteho vaihtelee 2–6 MW välillä, kun suurimmat merelle rakennetut turbiinit ovat teholtaan 14 MW.

## 2.2 Liikenteen sähköistyminen

Maa- ja meriliikenteen hiilidioksidipäästöt kattavat noin viidenneksen globaaleista fossiilisten polttoaineiden ja sementin yhteenlasketuista päästöistä (Statista 2020). Ilmastotavoitteiden toteuttamiseksi myös nämä päästöt on saatava nolnaan vuoteen 2050 mennessä. Useat valtiot ovatkin jo asettaneet rajoituksia polttomoottoriautoille. Esimerkiksi Norja ja Britannia kieltävät bensiini- ja dieselkäyttöisten henkilö- ja pakettiautojen myynnin vuosina 2025 ja 2030. Intia on

kieltämässä suurien polttomoottorikäyttöisten moottoripyörien ja skootterien valmistamisen vuodesta 2025 alkaen. Saksassa vanhoilla diesel autoilla ei saa ajaa kaupunkien keskustoissa. Kiinan autoalan virkamiehen mukaan puolet uusista myydyistä ajoneuvoista tulee käyttämään uusia energianlähteitä vuonna 2035. (Reuters 2020)

Sähköautojen energiankulutus tulee ylittämään 550 TWh ilmoitettujen toimien perusteella vuoteen 2030 mennessä, mikä tarkoittaa ajoneuvokannan kuusinkertaistumista vuodesta 2019. Tämä tarkoittaisi noin 4 % kasvua Euroopan nykyiseen sähkönkulutukseen. Kestävän kehityksen mallin mukaan sähkönkulutus voi nousta lähes 1000 terawattituntiin. (IEA 2020d) Energiankulutusta suurempi haaste on sähköautojen yhtäaikaisen latauksen vaatima suuri teho, mikä voisi aiheuttaa sähköverkkoihin paikallisia häiriöitä ja järjestelmän heilahtelua. Ratkaisuksi kaavaillaan älykkäitä sähköverkkoja, jotka ohjaisivat tehoreservejä reaaliajassa. Energiavarastot ovat tässä avainasemassa. Myös sähköautojen kaksisuuntaista energiansyöttöä tutkitaan. Tällöin sähköautoista voitaisiin ottaa tehoa takaisin sähköverkkoon, mikäli jokin suuri voimalaitos irtoaa äkillisesti verkosta. (Fingrid 2016)

### **2.3 Hajautettu tuotanto**

Hajautettu tuotanto on sähkön ja lämmön paikallista tuotantoa lähellä kuluttajaa. Hajautetun tuotannon etuja ovat siirtojärjestelmän pienemmät häviöt, parempi huoltovarmuus ja pienemmät investointikustannukset. Uusiutuvan energian yleistymisen myötä yhä useampi voi olla sähkön tuottaja ja myydä ylijäämäsähköään julkiseen jakeluverkkoon. Hajautettu sähköntuotanto on yleensä alle 1 MW pientuotantoa, jota oli Suomessa Energiaviraston vuoden 2015 selvityksen mukaan 120 MW. Kapasiteetti koostui suurimmaksi osaksi vesi- ja tuulivoimasta. Pientuotannon kapasiteetin odotetaan kasvavan merkittävästi vuoteen 2030 mennessä. Konsulttitoimisto Pöyryn arvion mukaan katoille asennettavan aurinkopaneelikapasiteetti Suomessa kasvaa lähes 700 megawattiin. Hajautetulla lämmöntuotannolla tarkoitetaan esimerkiksi lähellä tuotettua kaukolämpöä tai asuinalueiden yhteisiä maalämpöyksiköitä. (Pöyry Oy 2017, 7–30) Hajautetun tuotannon yleistymisen tarjoaa mahdollisuuksia energian varastoinnille sekä sähkön että lämmön osalta. Sähkön varastointi mahdollistaa alueiden pysymisen sähköistettynä kantaverkosta riippumatta. Tätä voidaan soveltaa esimerkiksi syrjäisen asutuksen sähköistämisessä.

### 3 ENERGIAN VARASTOINNIN ANSAINTAMALLIT

Jotta energian varastointiratkaisut yleistyisivät, tulee niiden olla myös taloudellisesti kannattavia. Tässä luvussa käsitellään sähkökaupan ja kausivarastojen ansaintamekanismeja. Energiavarastot hyödyntävät sähkön kysynnän jaksottaista vaihtelua ja siitä johtuvia hintaeroja varastoimalla edullista energiaa ja myymällä sitä kalliimmalla takaisin sähköverkkoon. Sähkökauppaan liittyy keskeisesti sähköverkon tehotasapainon säätely sekä taajuuden ylläpito. Pohjoismaisen sähköverkon taajuus pyritään pitämään 49,9–50,1 Hz välillä energian tuotantoa ja kulutusta säätelemällä. Suomen alueella sähköverkon taajuuden ylläpidosta vastaa valtion kantaverkkoyhtiö Fingrid omien reservimarkkinoidensa avulla. Reservimarkkinoiden tuotteet jaetaan kolmeen osaan taajuuden vakautus- ja palautusreserveihin sekä korvaaviin reserveihin. Korvaavia reservejä ei käytetä Pohjoismaissa. Käytössä on lisäksi nopeaa taajuusreserviä, joka aktivoituu pienen inertian käyttötilanteissa noin sekunnissa. (Fingrid 2021a)

#### 3.1 Taajuuden vakautusreservi

Taajuuden vakautusreservi koostuu taajuusohjatusta häiriö- ja käyttöreservistä. Reservituotteista käydään kauppaa sekä vuosi- että tuntimarkkinoilla. Vuosireservien hinta määräytyy tarjouskilpailussa kerran vuodessa korkeimman hyväksytyt tarjouksen mukaan. Tuntimarkkinoilla hinta määräytyy tuntikohtaisesti ja tarjouskilpailu käydään aina edellisenä päivänä. Reservit ovat erillisiä, joten vuosimarkkinoille hyväksytyä reserviä ei voi tarjota tuntimarkkinoille. Taajuusohjattua häiriöreserviä on Suomessa 300 MW ja sillä vastataan verkon suuriin taajuuspoikkeamiin. Reservin minimitarjous on 1 MW ja vaadittu aktivointinopeus 50 % 5 sekunnissa ja 100 % 30 sekunnissa. Kauppaa käydään tällä hetkellä vain ylössäätötuotteilla, mutta alassäätötuotteet tulevat markkinoille vuoden 2022 alusta. Ylössäätö tarkoittaa voimalaitosten osalta tehonlisäystä ja kuormilla tehonpudotusta ja alassäätö on tämän vastakohta. Tuotteista saadaan korvausta vuosimarkkinoilla noin 2 €/MW/h. Taajuusohjatulla käyttöreserviä on Suomessa 123 MW ja sillä säädetään verkon taajuutta symmetrisesti normaalitilanteessa. Markkinoille hyväksytyt toimijat saavat korvausta ylläpidetystä kapasiteetista ja nettoenergiasta vuosimarkkinoilla noin 13 €/MW/h. Minimitarjouskoko on 0,1 MW ja kapasiteetin vaadittu aktivointinopeus 3 minuuttia. Tuntimarkkinoiden korvaus vaihtelee molemmissa reserveissä muutamasta eurosta kymmeneen euroihin. Energiavarastot toimivat markkinoilla sekä kuluttajina että tuottajina. (Fingrid 2021b)

### 3.2 Taajuuden palautusreservi

Taajuuden palautusreservi koostuu automaattisesta taajuudenhallintareservistä ja manuaalisista säätösähkömarkkinoista. Automaattista taajuudenhallintareserviä on Suomessa 60–80 MW ja sillä voidaan säätää voimalaitosten ja kulutuskohteiden tehoa noin viidessä minuutissa. Markkinoille tarjotaan tuntikohtaisesti joko alas- tai ylössäätötehoa ja korvausta saadaan valmiudessa olevasta kapasiteetin ja säädetyn energian mukaan. Kapasiteetista maksetaan kymmeniä euroja/MW/h ja säädetystä energiasta lisäksi markkinoiden mukainen hinta. Taajuudenhallintareserviä hankitaan kuitenkin vain osalle vuorokauden tunneista. Säätösähkömarkkinoilla reserviä hankitaan tuntikohtaisesti tarpeen mukaan. Tarjoukset jätetään viimeistään 45 min ennen käyttötuntia ja kapasiteetti aktivoidaan 15 minuutissa. Toimijat voivat jättää markkinoille sekä ylös- että alassäätötarjouksia. Korvausta maksetaan tilatun energian ja kalleimman ylössäätö- tai halvimman alassäätötunnin mukaan. Ylössäätöhinta on kuitenkin aina vähintään sähkömarkkinoiden spot-hinta ja alassäätöhinta korkeintaan spot-hinnan suuruinen. Minimitarjouskoko on 10 MW tai 5 MW tilausjärjestelmästä riippuen. (Fingrid 2021b)

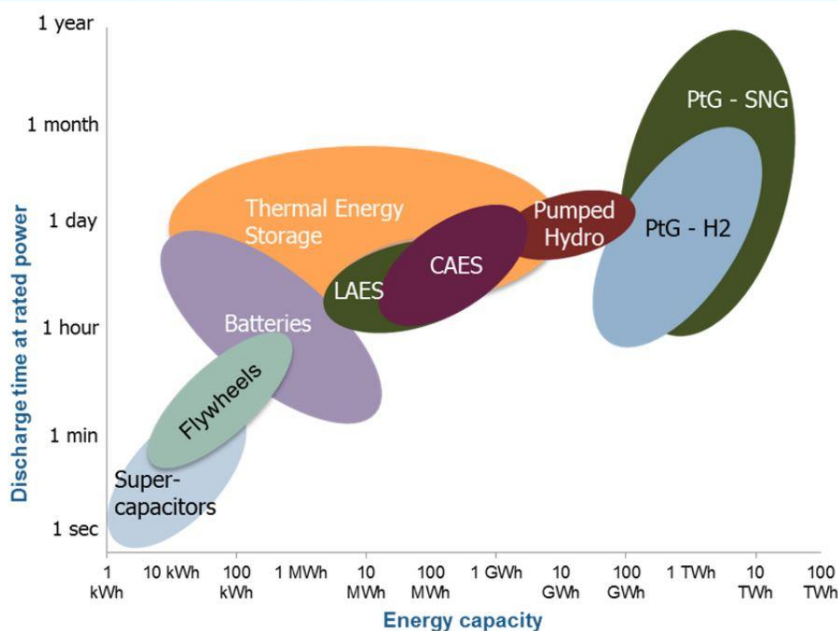
### 3.3 Kausivarastot

Kausivarastoinnissa energiaa varastoidaan suuria määriä myöhempää käyttöä varten. Lämmön varastoinnissa tällä tarkoitetaan usein kesän aikana saatavilla olevan hukkalämmön varastointia talvikauden varalle. Rakennusten lämmitys kattaa noin neljäsosan Suomessa vuosittain käytettävästä energiasta. Lämmityshuiput ajoittuvat talviaikaan, jolloin auringon säteilyteho on pienimmillään. Kaukolämmön kysyntä on pienimmillään kesällä, jolloin ylijäämä-, hukka-, ja ilmaislämpöä on saatavilla suuria määriä edullisesti. Jos kesän hukkalämpöä varastoidaan talviajalle, siitä saadaan parempi tuotto ja säästetään energian tuotantokustannuksissa. Suurissa rakennuksissa lämmön kausivarastoinnilla saadaan selkeitä säästöjä, sillä lämpövarasto tasaa vuoden lämpötilaeroja. Varastoitu lämpö säästää rakennuksen lämmityskuluissa talvella ja viilennyskuluissa kesäaikaan, kun varastoa täytetään. (Rakennustieto Oy 2019, 1–2) Vesivoiman osalta kausivarastolla tarkoitetaan veden potentiaalienergian varastoimista suuriin patoaltaisiin esimerkiksi kevään tulvien tai sadekauden aikana. Patoaltaissa olevaa vettä juoksutetaan turbiinien läpi, kun siitä saadaan paras tuotto. Vesivoiman kausivarastot toimivat Suomessa vuoden sykleissä, sillä seuraavana keväänä patoaltaan pinnan tulisi olla alhaisimmillaan suurimman taloudellisen hyödyn saavuttamiseksi.

## 4 ENERGIAN VARASTOINTIRATKAISUT

Energiavarastot voidaan jakaa varastoituvan energian tyypin mukaan viiteen kategoriaan, mekaanisiin varastoihin, lämpövarastoihin, sähkökemiallisiin varastoihin, kemiallisiin varastoihin ja sähkövarastoihin. Jokaisella energiavarastolla on niille ominaiset kapasiteetit ja purkuajat, jotka on esitetty kuvassa 3. Lyhytaikaisilla ja pienen kapasiteetin energiavarastoilla tuetaan sähköverkon tehotasapainoa. Pidemmän purkuajan ja suuren kapasiteetin varastoilla voidaan puolestaan tasata uusiutuvan energian tuotannon pidempiäaikaista vaihtelua ja varautua energian kysynnän jaksottaiseen vaihteluun. (World Energy Council 2016, 12) Teknologian kaupallista valmiutta arvioidaan liitteessä 1 esitetyllä IEA:n valmiustaso eli TRL-asteikolla 1–11. Tasolla 1 menetelmän perusidea on määritelty ja tasolla 11 menetelmä on todistettu toimivaksi ja se on laajassa kaupallisessa käytössä. (IEA 2020e)

Source: PwC, 2015, following Sterner et al. 2014



Kuva 3. Energian varastointiratkaisuja kapasiteetin ja purkuajan mukaan. (World Energy Council 2016, 11)

### 4.1 Mekaaniset energiavarastot

Mekaanisia energiavarastoja ovat esimerkiksi pumppuvoimalaitokset, CAES eli paineilmaparastot, LAES eli nesteytetyn ilman varastot sekä vauhtipyörät. Pumppuvoimalaitokset ovat IEA:n valmiustasolla 11, CAES tasolla 8 ja vauhtipyörät sekä LAES tasolla 9. Vauhtipyörät varastoivat sähköenergiaa moottorin avulla tyhjiössä magneettilaakereiden päällä nopeasti pyörivän kiekon liike-energiaksi. Kiekkoon varastoitunut energia voidaan purkaa generaattorin avulla 90–95 % kokonaishyötysuhteella. Vauhtipyörät toimivat nopealla vasteajalla, mutta matalan ominaistehon vuoksi ne rajoittuvat lyhytaikaiseen

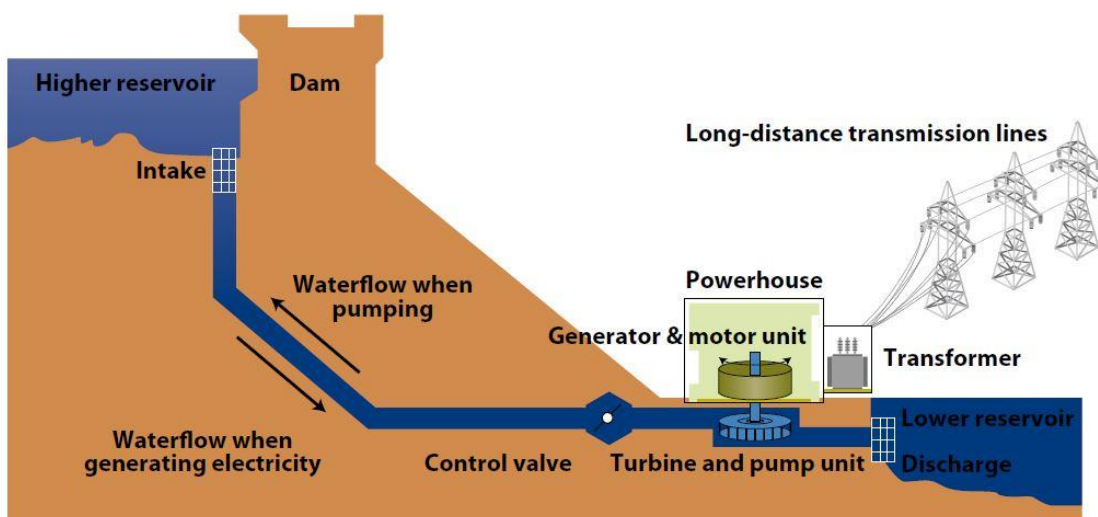
energian varastointiin. LAES menetelmässä sähköenergia varastoidaan matalapaineiseen nestemäiseen ilmaan, jota säilytetään lämpöeristetyissä tankeissa. Varasto puretaan pumpaamalla nestemäinen ilma korkeampaan paineeseen, jossa se höyrystyy takaisin kaasuksi. Laajeneva kaasu tekee työtä, josta saadaan sähköä turbiinin ja generaattorin avulla. Varaston hinta on 250–600 €/kWh, mutta sen odotetaan laskevan noin 40 % vuoteen 2030 mennessä. (IEA 2020e) LAES-varaston etuja ovat korkea energiatiheys ja edulliset komponentit. Prosessihyötysuhde on noin 50–60 %. (Tholander & Högberg 2018, 2)

#### 4.1.1 Pumppuvoimalaitokset

Pumppuvoimalaitokset ovat globaalisti merkittävin energian varastointimuoto lähes 96 % markkinaosuudella ja 150 GW tehokapasiteetilla (IEA 2020e). Pumppuvoimalaitoksissa sähköenergiaa varastoidaan ylemmän- ja alemman patoaltaan väliseksi veden potentiaalienergiaksi. Tyypillisen pumppuvoimalaitoksen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 4. Erona tavalliseen vesivoimalaitokseen on vain pumpuksi käännettävissä oleva vesiturbiini, jonka avulla ylemmää patoallasta voidaan täyttää ulkopuolisella energialla. (IRENA 2017, 50–51) Vesivoimalaitoksen toiminta perustuu veden potentiaalienergian muuntamiseen turbiinin liike-energiaksi ja edelleen sähköksi turbiiniin kytketyn generaattorin avulla. Voimalaitoksen tuottamaa tehoa  $P$  voidaan arvioida yhtälöllä 1.

$$P = QH\rho g\eta \quad (1)$$

Jossa  $Q$  on veden tilavuusvirta [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],  $H$  on putouskorkeus [ $\text{m}$ ],  $\rho$  on veden tiheys [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $g$  on putoamiskiihtyvyys [ $\text{m}/\text{s}^2$ ] ja  $\eta$  on turbiinin hyötysuhde. (Huhtinen, et al. 2008, 265)



Source: Luo et al., 2015.

Kuva 4. Pumppuvoimalaitoksen toimintaperiaate. (IRENA 2017, 50)

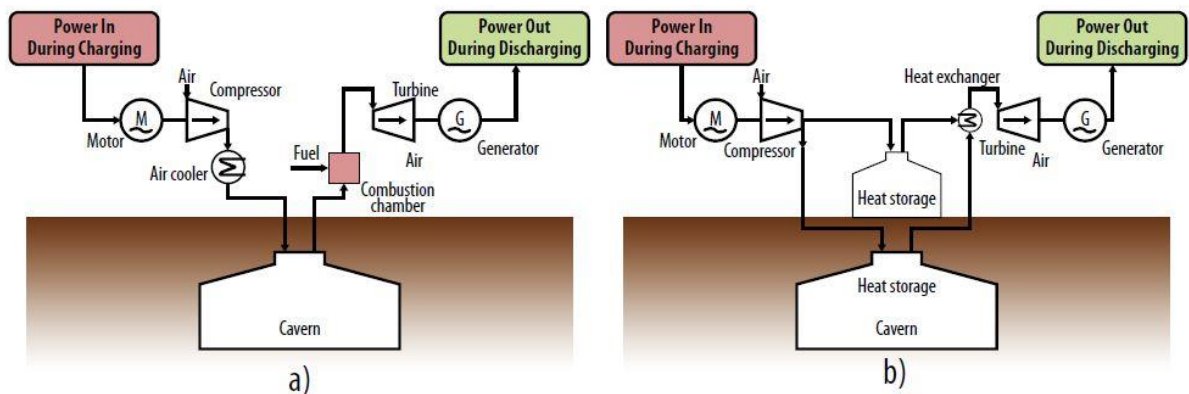
Pumppuvoimalaitosten etuja ovat vakiintunut ja yksinkertainen tekniikka, pitkäikäisyys, korkea 70–84 % hyötysuhde sekä suuri, pitkäkestoinen ja edullinen varastointikapasiteetti. Tekniikan heikkouksia ovat puolestaan pieni energiatiheys, suuret investointikustannukset ja maankäytölliset ympäristövaikutukset. Ympäristövaikutuksia pyritään pienentämään kiristyvillä säädöksillä. Aiempana potentiaalina käytetään usein suurta järveä tai jokea, jolloin välttyään alemman patoaltaan rakennuskustannuksilta ja ympäristövaikutuksilta. Uutena kehityssuuntana erityisesti Euroopassa on pumppuvoimalaitosten rakentamista käytöstä poistettuihin maanalaisiin kaivoksiin, jolloin ei tarvita suuria luonnollisia korkeuseroja ja maankäytöstä aiheutuvat haitat jäisivät pienemmiksi. (IRENA 2017, 51–52)

Pumppuvoimalaitokset jaetaan käyttötarkoituksen ja kokonsa mukaan kategorioihin sähkön tuntimarkkinoille osallistuvista  $10^6$ – $10^9$  m<sup>3</sup> vesialtaista aina useiden vuosien 5–100 km<sup>3</sup> yhdistettyihin energia- ja vesivarastoihin. Useimmat pumppuvoimalaitokset toimivat tuntimarkkinoilla ja hyödyntävät halvempaa yö sähköä tai uusiutuvan energian ylituotantoa veden pumppaamiseen. Myös viikoittaista energian hinnanvaihtelua hyödyntävät laitokset ovat yleistymässä. Ne tasaavat uusiutuvan energian jaksottaista tuotannon vaihtelua ja hyödyntävät halpaa viikonloppusähköä, kun suuri osa teollisuudesta ei ole toiminnassa. (Hunt et al. 2020, 3)

#### **4.1.2 Paineilmavarastot**

Paineilma- eli CAES voimalaitokset yhdistävät paineistetun ilman varastoinnin ja perinteisen kaasuturbiinivoimalan. Kaasuturbiinivoimaloista poiketen palamisilman puristus ja paisutus toteutetaan eriaikaisesti. Tavallinen kaasuturbiinivoimala kuluttaa noin 2/3 tuottamastaan energiasta palamisilman paineistamiseen (Crotogino et al. 2001, 1). CAES voimalassa ilma puristetaan kompressorissa ulkopuolisella energialla 4–8 MPa paineeseen ja varastoidaan maanalaisiin suolaluoliin tai maanpäällisiin paineilmasäiliöihin. Varastoitu ilma paisutetaan ilmakehän paineeseen, jolloin laajeneva ilma tekee työtä. (IRENA 2017, 54) Näin turbiinin tuottama teho voidaan hyödyntää kokonaan ja kasvihuonepäästöt vähenevät 60–70 %. Samalla välttyään perinteisen kaasuturbiinin lämpötilariippuvuudelta, joka laskee turbiinin hyötysuhdetta prosentilla ja tuotettua tehoa viidellä prosentilla ympäröivän ilman lämpötilan noustessa kymmenellä asteella (De Sa & Al Zubaidy 2011, 2738). Hyötysuhteen heikkeneminen johtuu lämpimän ilman pienemmästä tiheydestä ja siitä aiheutuvasta turbiinin pienemmästä massavirrasta. (Kuczyński et al. 2015, 25)

Diabaattisessa prosessissa kompressorin tuottamaa hukkalämpöä ei oteta talteen, vaan varastoitava ilma jäädytetään ja lämpö vapautuu ympäristöön. Kun varastoon paineistettu ilma paisuu, sen lämpötila laskee, jolloin ilma on uudelleenlämmitettävä tuotetun tehon laadun parantamiseksi. Diabaattisessa voimalaitoksessa uudelleenlämmitys toteutetaan sekoittamalla ilman joukkoon maakaasua palotilassa. Savukaasujen lämpöenergiaa voidaan ottaa talteen prosessihiötysuhteen parantamiseksi. Kehittyneessä adiabaattisessa AA-CAES prosessissa kompressorin hukkalämpö varastoidaan erilliseen lämmönvarastosysteemiin, jonka lämmöllä laajeneva ilma kuumennetaan lämmönvaihtimessa. Tällöin vältytään maakaasun polton hiilidioksidipäästöiltä. Molempien menetelmien kytkentäkaaviot on esitetty kuvassa 5. (IRENA 2017, 54) Olemassa on myös adiabaattinen täysin lämpöeristetty systeemi. A-CAES voimalassa ei käytetä erillistä hukkalämpövarastoa vaan kompressorien hukkalämpö varastoidaan lämpöeristettyihin keraamisiin siiloihin, joiden läpi suolaluoliin varastoituu ilma kulkee.



Source: International Renewable Energy Agency, based on ISEA, 2012.

**Kuva 5.** Paineilmavaraston kytkentäkaaviot a) diabaattinen systeemi b) AA-CAES systeemi. (IRENA 2017, 55)

Paineilmavarastoihin voidaan varastoida satoja megawatteja sähkötehoa useiksi tunneiksi. Uuden sukupolven AA-CAES voimaloilla voidaan ylittää noin 70 % hyötysuhteisiin, kun diabaattinen prosessihiötysuhde on noin 50 %. Suuri osa laitoksen investointikustannuksista kuluu suolaluolan valmisteluun. Paineilmavaraston tuottavuus on tästä syystä riippuvainen maaperästä, sillä luolan kaivaminen kallioon voisi nostaa projektin kustannuksia jopa 80 %. CAES varastojen kustannusten odotetaan laskevan 17 % nykyisestä 53 \$/kWh vuoteen 2030. (IRENA 2017, 55–56)



## 4.2 Lämpövarastot

Lämpöenergiavarastot jaetaan kolmeen ryhmään: tuntevan lämmön varastoihin, latenttilämpöön ja lämpökemiallisiin varastoihin. Tuntevan lämmön varastoissa energia varastoidaan materiaalin lämpöenergiaksi, jolloin sen lämpötila kasvaa. Latenttilämpövarastoissa energia varastoituu aineen faasimuunnoksiin lämpötilan pysyessä lähes vakiona. Lämpökemiallisissa varastoissa energia varastoituu palautuviin korkean reaktioentalpian omaavien kemikaalien kemialliseksi sisäentalpiaksi. (Cabeza 2015, 3–8) Tuntevan energian varastot ovat lähtökohtaisesti korkealla valmiustasolla. Energian varastointi kuumaan veteen on TRL-asteikolla tasolla 11 ja maaperä- sekä pohjavesivarastot tasolla 9. Latenttilämmön varastointi on käytetystä varastomateriaalista riippuen tasolla 4–9 ja lämpökemialliset varastot ovat vasta varhaisten prototyyppien vaiheessa tasolla 4. (IEA 2020e)

Tuntevan lämmön varastoinnissa materiaalin tärkeimmät ominaisuudet ovat sen tiheys, ominaislämpökapasiteetti ja lämmönjohtavuus. Varastoituneen lämpöenergian suuruus voidaan laskea yhtälöllä 2. Materiaalin lämmönjohtavuus vaikuttaa varaston vasteaikaan, jolloin riittävä lämmönjohtavuus on varastoinnin edellytys. Vesi on käytetyin lämpövarastomateriaali 4,19 kJ/kg K ominaislämpökapasiteetilla ja noin 1000 kg/m<sup>3</sup> tiheydellä. Vesi on myrkytöntä ja sitä helposti saatavissa. Vettä käytetäänkin lähes kaikissa lämpövarastoissa, joiden toimintalämpötila on 0–100 °C. Lämpöä voidaan varastoida myös esimerkiksi kallioon ja saveen. (Cabeza 2015, 3–31) Graniitin ominaislämpökapasiteetti on 300 K lämpötilassa on 0,78 kJ/kg K, tiheys 2630 kg/m<sup>3</sup> ja lämmönjohtavuus 2,79 W/m K. Vastaavat arvot savelle ovat 0,88 kJ/kg K, 1460 kg/m<sup>3</sup> ja 1,3 W/m K. (Lavine et al. 2017, 923–924)

$$Q = mc_p \Delta T \quad (2)$$

Jossa  $m$  on energiaa varastoivan materiaalin massa [kg],  $c_p$  on ominaislämpökapasiteetti [J/kg K] ja  $\Delta T$  on materiaalin lämpötilanmuutos [K]. (Cabeza 2015, 3)

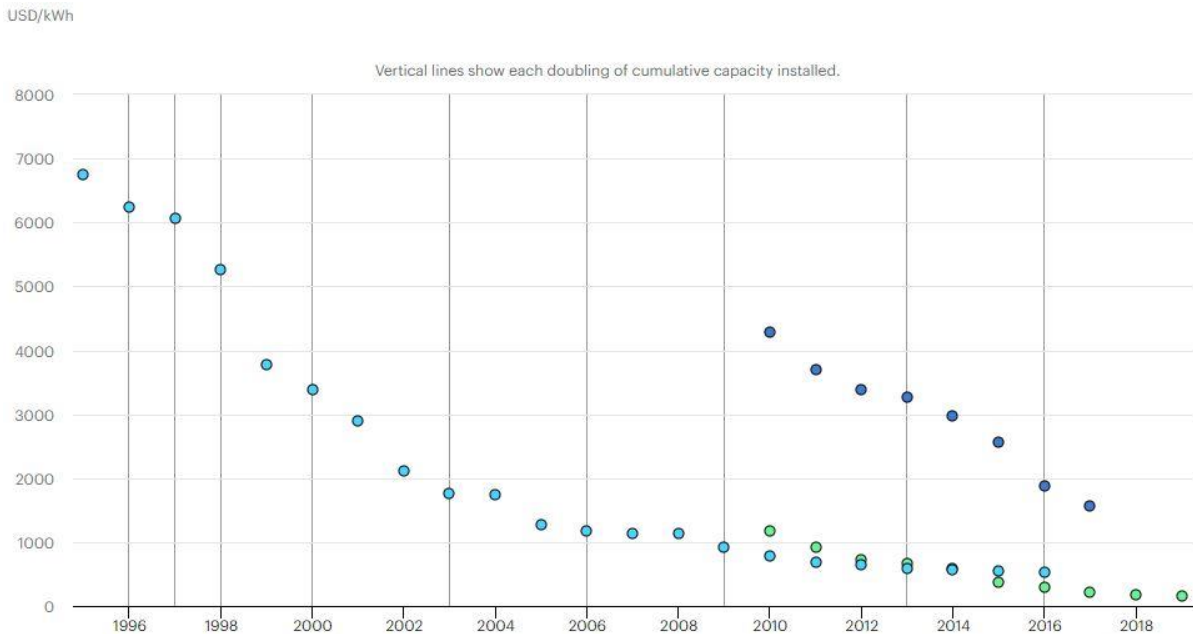
Lämpövarastot voidaan sijoittaa joko maanpäällisiin ja maanalaisiin tankkeihin tai suoraan lämmön varastoinnin kannalta sopivaan maaperään. Oleellista on minimoida lämpövarastosta ympäristöön karkaava hukkalämpö, minkä vuoksi lämpövarastot eristetään. Maaperän kausilämpövarastoissa lämpöhäviöiden määrä minimoidaan suurella varastointitilavuudella, jolloin lämpöä ei ehdi karata merkittäviä määriä muutamassa kuukaudessa (Motiva 2020c). Muita tuntevan lämmön varastointiin soveltuvia materiaaleja ovat esimerkiksi sulasuolat ja

öljyt. Sulasuola on erityisesti aurinkolämpövoimaloissa yleisesti käytetty lämmön varastointi- ja kiertoaine. Kiertoaineilta edellytetään korkean lämpökapasiteetin lisäksi laajaa lämpöstabiliusaluetta nestemäisessä olomuodossa ja matalaa höyrystymispainetta. Monet suolayhdisteet ovat edullisia valmistaa ja niihin voidaan varastoida energiaa jopa 15 tunniksi. (Cabeza 2015, 55)

Materiaalit vaihtavat olomuotoaan saavuttaessaan tietyn lämpötilan. Latenttilämpövarastoissa käytettävät faasimuutosmateriaalit varastoimaan suuren määrän energiaa olomuodon muutoksen yhteydessä. Varastomateriaalin tärkeimmät ominaisuudet ovat korkea sulamisentalpia ja sopiva olomuodonmuutoslämpötila. Tällaisia materiaaleja ovat esimerkiksi alkoholit, esterit ja erilaiset suolayhdisteet. Latenttilämpövarastojen etuja ovat suuri energiatiheys ja tasainen lämmöntuotto. Haasteena ovat heikko lämmönjohtavuus, epätasainen sulaminen ja pitkän aikavälin stabiliteetti. Tällä hetkellä latenttilämpövarastoja käytetään lähinnä rakennusten lämmönvaihtelun tasaamiseen. Lämpökemiallisissa varastoissa lämpöenergia varastoidaan palautuvien endo- ja eksotermisten reaktioiden kemialliseksi energiaksi. Reaktioon tarvitaan vähintään kaksi lähtöainetta, joiden tasapainoa reaktiotuotteiden välillä säädellään muuttamalla prosessin lämpötilaa ja reagoivien aineiden määrää. Toteutuessaan lämpökemiallisiin varastoihin voitaisiin varastoida suuria määriä energiaa pitkiksi ajoiksi. (Cabeza 2015, 201–359)

### **4.3 Sähkökemialliset varastot**

Akkujen kysyntä on jatkuvassa kasvussa sähköautojen ja aurinkoenergiajärjestelmien yleistymisen vuoksi. Litiumioniakku tällä hetkellä käytetyin akkutyyppeistä sen suorituskyvyn, pitkän käyttöiän ja suuren tuotantokapasiteetin vuoksi, jonka vaikutus hintoihin on nähtävillä kuvassa 6. Ongelmaksi saattaa kuitenkin muodostua nykyisissä akuissa käytettävien harvinaisten metallien heikko saatavuus. Kehitteillä on myös runsaasti uudenlaisia teknologioita perinteisemmistä akkumateriaaleista orgaanisiin. (VTT 2021)



**Kuva 6.** Li-ion-akkujen hintakehitys vuosien 1995–2019 aikana. Vaaleansiniset pisteet kuvaavat kuluttajakennoja, vihreät pisteet sähköautojen akkupaketteja ja tummansiniset pisteet akkuvarastoja. (IEA 2020f)

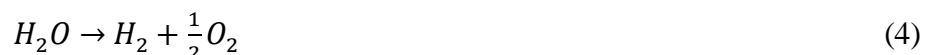
Litium-ion akut ovat TRL-asteikolla tasolla 9, mikä tekee niistä käytetyimmän sähkökemiallisen energian varastointimenetelmän sähköverkkosovelluksissa (IEA 2020e). Li-ion akut koostuvat kahdesta kiinteästä elektrodista, yleensä grafiitista valmistetusta anodista ja litiumoksidi katodista, joiden välissä on yleensä neste tai geelimäinen sähköä johtava elektrolyytti. Kun akku kytketään navoistaan virtapiiriin, negatiivisesti varautuneen hapettuvan anodin pinnalta vapautuu elektroneja, jotka kulkevat virtapiiriin kautta pelkistyvälle katodille aiheuttaen sähkövirran. (Motiva 2020d) Li-ion-akku on yleisnimitys suurelle joukolle erilaisia materiaalitratkaisuja. Niiden etuja muihin akkuteknologioihin verrattuna ovat korkea ominaisenergia, tehotiheys ja 92–96 % hyötysuhde. Parannettavaa on kuitenkin lämpöstabiiliteetissa ja käyttöturvallisuudessa. Yksi kehityssuunta on kiinteän elektrolyytin akut, jotka voisivat mahdollistaa entistä paremman energiatihedden, stabiiliteetin ja latausajan. (IRENA 2017, 63–74)

Toinen lupaava suuren kokoluokan sähkökemiallisen energian varastointiratkaisu on TRL-asteikolla tasolla 8 oleva virtausakku. Virtausakut koostuvat kahdesta elektrolyyttitankista ja kennotilassa elektrolyyttinesteiden välissä olevasta ioniselektiivisestä membraanikalvosta. Elektrolyyttinesteet pumpataan kennotilaan, kun virtausakkua ladataan tai puretaan. Muilta osin virtausakun toimintaperiaate on monilta osin sama kuin perinteisissä akuissa. Erilliset

elektrolyyttitankit mahdollistavat energiakapasiteetin skaalattavuuden. Muita etuja ovat tavallisia akkuja selvästi pidempi käyttöikä ja matala purkukauden syvyys (DoD), joka kuvaa akun tehokapasiteetin heikkenemistä. Energiatiheys on kuitenkin li-ion akkuja heikompi. (IEA 2020e) Haasteena on myös virtausakuissa yleisesti käytetyn vanadiinin harvinaisuus ja myrkyllisyys. Linköpingin yliopiston tutkijat ovat kuitenkin kehittäneet täysin orgaanisen ja kierrätettävän virtausakun, joka on valmistuskustannuksiltaan selvästi perinteistä virtausakkua edullisempi. Energiatiheys on kuitenkin vanadiiniversiota heikompi. (LiU 2020)

#### 4.4 Kemialliset varastot

Power-to-X on yhteisnimitys teknologioille, joissa uusiutuvasti tuotetusta sähköenergiasta valmistetaan synteettisiä polttoaineita, kemikaaleja tai muita materiaaleja. P2X teknologioiden perustana on veden elektrolyysi, joka tuottaa vetyä ja happea reaktioyhtälön 4 mukaisesti. Vedyn lämpöarvo massayksikköä kohti on suurempi kuin millään muulla polttoaineella, mikä tekee siitä erinomaisen energiavaraston. Vedyn polttaminen on lisäksi täysin päästötöntä, sillä reaktiotuotteena on vain vesihöyryä. Elektrolyysiprosessi tarvitsee toimiakseen runsaasti energiaa. Tuotettu vety voidaan käyttää sellaisenaan esimerkiksi polttokennoissa tai se voidaan jatkojalostaa neste- tai kaasumaisiksi polttoaineiksi synteesireaktiossa hiilidioksidin kanssa. Tällöin saadaan synteettisiä polttoaineita, joita voidaan käyttää jo olemassa olevaan infrastruktuuriin, kuten liikenteen, lämmityksen ja teollisuuteen. (Neste 2021)



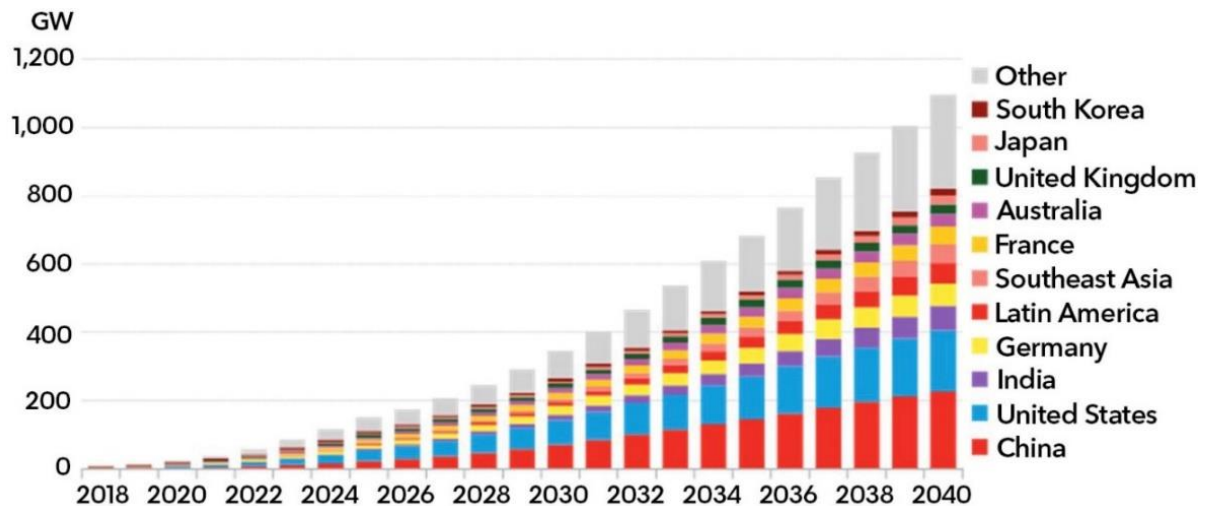
Veden hajottamiseen on kaksi menetelmää, perinteinen alkalinen menetelmä ja uudempi polymeerielektrolyyttikalvo menetelmä PEM. Alkalinen menetelmä on TRL-asteikolla tasolla 9 ja PEM tasolla 8. PEM prosessin etuja ovat parempi joustavuus, nopeampi vasteaika ja pienemmät ympäristövaikutukset. PEMillä on myös suurempi kustannustenleikkauspotentiaali tekniikan yleistyessä. Alkalisessa menetelmässä elektrolyytinä on emäsluos, johon anodi ja katodi upotetaan. PEM elektrolyysissä käytetään polymeerikalvoa, joka läpäisee protoneita. Protonit kulkeutuvat kohti katodia, missä ne vastaanottavat elektronin ja muodostavat vetyä. (IEA 2020e) Reaktion syntymiseen tarvitaan elektrodien välille 1,48 V tai lisälämmön kanssa 1,23 V jännite. Yhden vetykilon tuottaminen ilman ulkopuolista lämpöä vaatii 39,4 kWh sähköenergiaa ja prosessihyötysuhde on 82 %. Suurimmat PEM prosessia käyttävät laitteistot

toimivat megawattien suuruusluokassa. Teknologian yleistymistä hidastaa laitteiston korkea hinta ja lyhyt käyttöikä. (Vázquez et al. 2018, 236)

Hiilidioksidia voidaan kerätä suoraan ilmasta DAC-menetelmillä. Menetelmien valmiusaste on tällä hetkellä tasolla 6. (IEA 2020e) Prosessiin kuluu runsaasti energiaa, sillä hiilidioksidipitoisuus ilmassa on vain noin 0,04 %. Prosessihyötysuhdetta voitaisiin kuitenkin parantaa hyödyntämällä teollisuuden ja voimalaitosten sivuvirtojen hiilidioksidia, joissa CO<sub>2</sub>-pitoisuus on noin 10–30 %. (Laaksonen et al. 2020, 6) Metanolin valmistus hiilidioksidista ja vedystä on TRL-asteikolla tasolla 7 ja prototyypilaitoksia on jo toiminnassa esimerkiksi Japanissa, Islannissa ja Saksassa (IEA 2020e). Hiilipohjaisia polttoaineita valmistetaan kaksiosaisella synteesisprosessilla, jonka ensimmäisessä vaiheessa hiilidioksidia hajotetaan hiilimonoksidiksi yli 600 °C lämpötilassa. Toisessa vaiheessa CO ja H<sub>2</sub> yhdistetään katalyytin avulla 20–30 baarin paineessa ja 180–250 °C lämpötilassa. Prosessissa tuotetun polttoaineen koostumus riippuu käytetystä katalyytistä ja prosessiolosuhteista. (Vázquez et al. 2018, 237)

## 5 ENERGIAVARASTOPROJEKTIT MAAILMALLA

Globaalien energiavarastojen kasvu on ollut vielä 2020-luvulle tultaessa maltillista, mutta sen odotetaan kiihtyvän seuraavien vuosikymmenten aikana. Yhdysvaltojen energiaministeriön ylläpitämän lähes 1700 projektia sisältävän tietokannan mukaan vuoden 2020 lopussa globaali energiavarastojen tehokapasiteetti oli 192 GW, josta noin 95 % oli pumppuvoimalaitoksia ja 10 GW muita varastointiteknologioita. (Department of Energy 2020) BloombergNEF:n arvion mukaan vuonna 2040 uusiutuvalla energialla tuotetaan 40 % maailman sähköstä. Energiavarastokapasiteetin arvioitu kehitys ilman pumppuvoimalaitoksia on esitetty kuvassa 7. Arvio kattaa kahdeksan kiinteää energiavarastosovellusta, joiden yhteenlaskettu investointikustannus olisi noin 662 miljardia dollaria. Kehitystä ajavat li-ion akut, joiden hintojen odotetaan puolittuvan seuraavan vuosikymmenen aikana. (BloombergNEF 2019)



**Kuva 7.** Globaalin energiavarastokapasiteetin arvioitu kehitys ilman pumppuvoimaloita vuoteen 2040. (BloombergNEF 2019)

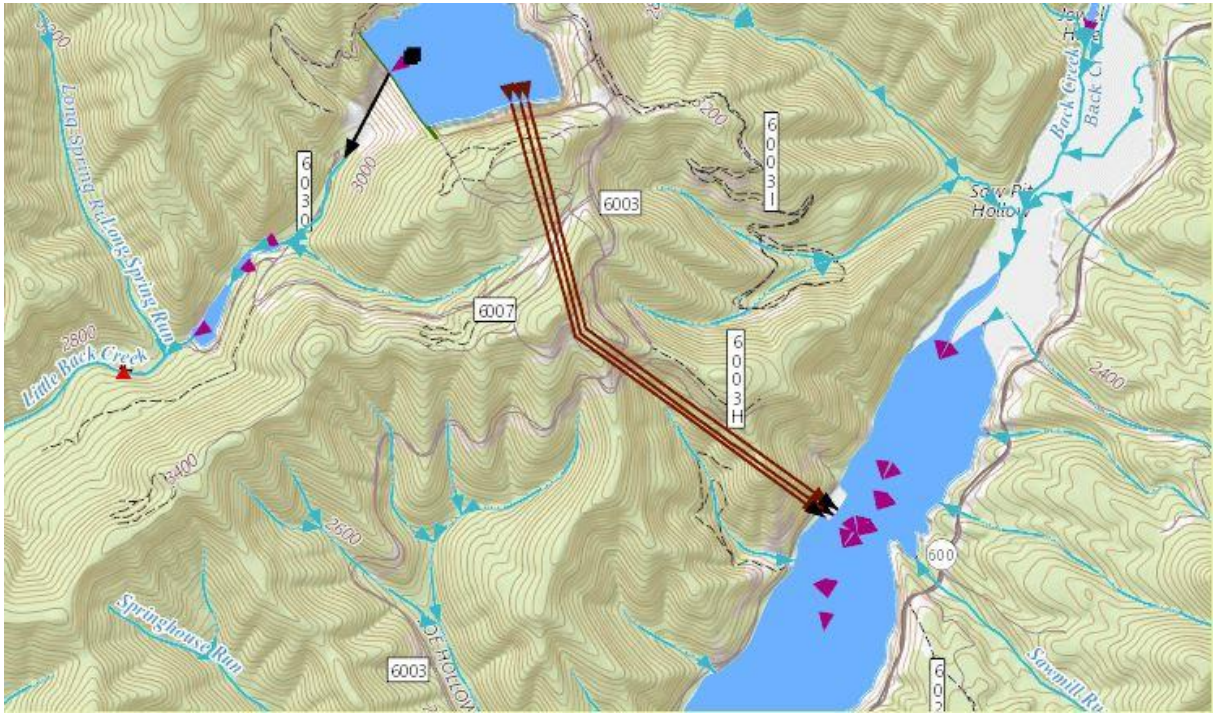
Pumppuvoimalaitokset pysyvät merkittävimpana energian varastointimuotona vielä pitkään, mutta muut teknologiat yleistyvät kiihtyvällä tahdilla. Lupaavimpia varastointiratkaisuja ovat tällä hetkellä muun muassa tuntuva lämmön varastot, LAES ja CAES. Toisaalta esimerkiksi virtausakut ja Power-to-X voivat tarjota tulevaisuudessa mahdollisuuksia pitkäaikaiseen energian varastointiin. Energiavarastoratkaisujen kysynnän kasvaessa markkinoille on tarjolla myös uudenlaisia ratkaisuja kuten pumpattavaa vesivoimaa toimintaperiaatteeltaan muistuttava pinottujen lohkojen (engl. stacked blocks) menetelmä, jossa painavien betonilohkareiden potentiaalienergiaa varastoidaan pinoamalla niitä torniksi nostokurkijärjestelmän avulla (Energyvault 2021). Mikään yksittäinen menetelmä ei näillä näkymin ratkaise kasvavaa

energian varastoinnin tarvetta, vaan parhaaseen lopputulokseen päästään yhdistämällä alueellisiin tarpeisiin ja toimintaympäristöön parhaiten soveltuvia menetelmiä. Tässä luvussa käsitellään kolme kansainvälistä energianvarastoprojektia eripuolilta maailmaa.

## 5.1 Bath County Pumped Storage Station

Bath County Pumped Hydro Storage Station on Yhdysvalloissa Virginian osavaltiossa sijaitseva pumppuvoimalaitos, joka aloitti toimintansa vuonna 1985. Paikallisten energiayhtiöiden yhteisomistama yli 3000 MW energiavarasto tuottaa sähköenergiaa noin 750 000 talouteen kuudella vesiturbiinilla. Laitos operoi kahden patoaltaan välillä, joita yhdistää kolme maanalaista vesitunnelia, joissa vesi virtaa sähköä tuottaessa  $850 \text{ m}^3/\text{s}$  ja varastoitaessa  $800 \text{ m}^3/\text{s}$  tilavuusvirralla. Laitossa ajettaessa ylemmän  $1,1 \text{ km}^2$  patoaltaan vedenpinnan korkeus vaihtelee 32 metrillä. Alemman patoaltaan pinta-ala on noin  $2,2 \text{ km}^2$  ja vedenpinnan korkeus muuttuu käytön aikana 18 metrillä. Energiaa tuotetaan tavallisesti kahdesti päivässä. Ensimmäinen huippu ajoittuu aamuun, kun paikalliset aloittavat aamutoimet. Toinen huippu on illalla työssäkävien ihmisten palatessa töistä. (Dominion Energy 2021a)

Patoaltaiden välinen etäisyys on linnuntietä noin 2,4 km ja niiden vedenpintojen välillä on 385 m korkeusero. Varsinainen pumppuvoimalaitos sijaitsee patoaltaiden välisen vuoren Little Mountainin sisällä. Karttakuva voimalaitoksesta ja punaisina viivoina näkyvistä vesitunneleista on esitetty kuvassa 8. Veden luontaista virtaussuuntaa kuvataan nuolilla. Ylemmän patoaltaan ja pumppuvoimalaitoksen yhdistää kolme halkaisijaltaan 8,7 m ja pituudeltaan noin 1150 m mittaista vesitunnelia, joiden päässä on yhteensä kuusi 500 MW Francis-turbiinia. Turbiinit saavuttavat täyden tehonsa noin 5–10 minuutissa ja niiden pyörimissuuntaa voidaan muuttaa, jolloin vesi virtaa takaisin ylempään patoaltaaseen 80 % hyötysuhteella. (Virginiaplaces 2021) Energiantuoton hyötysuhde voidaan arvioida luvussa 4.1.1 esitetyllä yhtälöllä 1, jolloin tulokseksi saadaan noin 94 %. Laitos toimii tällöin noin 75 % kokonaisyötysuhteella.



**Kuva 8.** Bath County Pumped Storage Station kartalla. (Virginiaplaces 2021)

Laitos kykenee varastoimaan 24 GWh edestä sähköenergiaa ylempään pataltaaseen, mikä riittää ominaisteholla 11 tunnin yhtäjaksoiseen sähköntuotantoon. Laitos osallistuu päivittäiseen tehotasapainon ylläpitoon hyödyntämällä edullista yö- ja viikonloppusähköä, jonka hinta on edullisimmillaan kuluttajalle noin 8 ¢/kWh. Laitos tuottaa energiaa korkeamman kulutuksen aikaan, jolloin energian hinta voi olla noin 20 ¢/kWh (Dominion Energy 2021b). Näillä hinnoilla laitos voisi tuottaa täydellä varastolla teoriassa noin 2,25 miljoonaa dollaria yhden syklin aikana. Bath Countyn pumppuvoimalaitos on teholtaan toistaiseksi suurin rakennettu pumppuvoimalaitos, mutta kaksi suurempaa 4000 ja 6000 MW projektia on jo suunnitteilla Kanadaan ja Australiaan. (Virginiaplaces 2021)

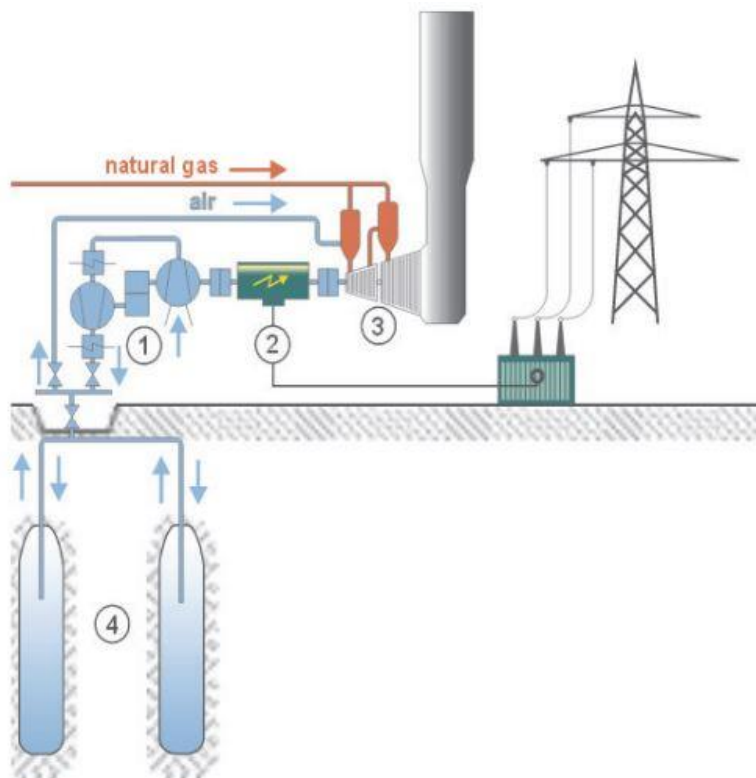
## 5.2 Huntorf CAES Plant

Huntorf CAES Plant on saksalainen vuonna 1978 perustettu 290 MW paineilmovala. Voimala suunniteltiin varastoimaan lähialueen ydin- ja hiilivoimaloiden perustuotantoa paineilmana matalan kysynnän aikaan ja toimimaan muiden voimalaitosten pimeäkäynnistys tehana. Vuonna 2011 tehdyn valtakunnallisen ydinvoiman alasajopäätöksen ja uusiutuvan energian lisääntymisen vuoksi laitos on kuitenkin siirtynyt varastoimaan tuulivoimaloiden ylituotantoa. Huntorfin CAES voimala toimii perinteisellä kuvassa 5a esitetyllä diabaattisella



periaatteella 42 % hyötysuhteella. Prosessin tukena käytetään maakaasua, jotta lämpötila saataisiin riittävälle tasolle ennen turbiinia. (Kuczyński et al. 2015, 25) Niedersachsenin piirikunnassa Pohjois-Saksassa sijaitsevan Uniper Kraftwerke GmbH:n omistavan laitoksen lisäenergian vaihtamista maakaasusta elektrolyyttisesti tuotetuksi vedyksi tutkittiin projektissa Hundorf2020 yhdessä Clausthalin yliopiston kanssa. Muutos tekisi prosessista hiilineutraalin ja parantaisi tuotannon joustavuutta. (Fries et al. 2018)

Hundorfin voimalaitos koostuu kompressorista, generaattorista ja kaksiosaisesta maakaasuturbiinista sekä kahdesta 650–800 metrin syvyyteen ja 220 metrin etäisyydelle toisistaan kaivetusta ilmatiiviistä suolaonkalosta, joiden yhteistilavuus noin 310 000 m<sup>3</sup>. Kahden erillisen suolaonkalon ajatuksena on parantaa laitoksen toimintavarmuutta ja helpottaa laitoksen uudelleenkäynnistyksessä huollon jälkeen, sillä laitoksen kompressorin tarvitsee ainakin 13 baarin paineen vähintään toisessa luolassa käynnistyäkseen. Voimalaitoksen kompressorin paineistaa ilmaa 43–70 baarin paineeseen 60 MW teholla ja 108 kg/s massavirralla, jolloin varasto voidaan täyttää alle 12 tunnissa. Turbiinin massavirta täydellä 290 MW teholla on 417 kg/s, jolloin varasto tyhjenee noin kolmessa tunnissa. (Crotogino et al. 2001, 2–3) Hundorfin CAES-voimalan komponentit ja kytkentä on esitelty kuvassa 10.



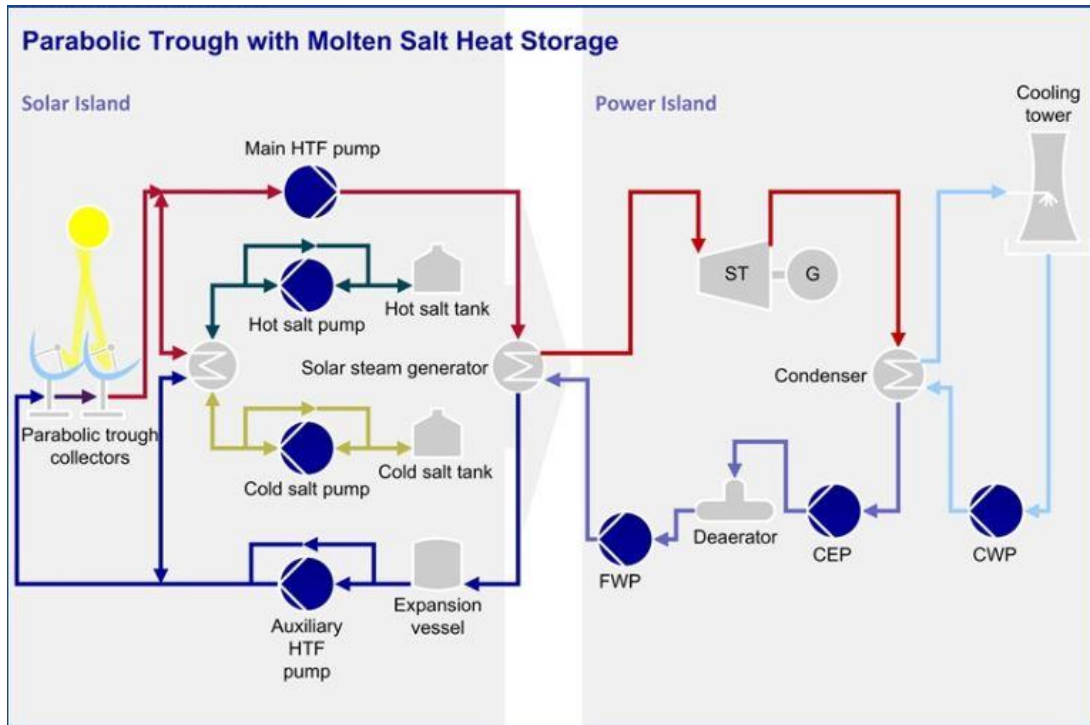
**Kuva 9.** Hundorfin CAES-voimalan komponentit ja kytkentä. 1. kompressorin, 2. generaattori, 3. kaasuturbiini, 4. suolaoluola. (Kuczyński et al. 2015, 26)

Huntorf CAES on edelleen suurin toiminnassa oleva paineilmaparasto. Uusia voimalahankkeita on kuitenkin aloitettu viime vuosina erityisesti Pohjois-Amerikassa ja Euroopassa. Uudet laitokset käyttävät kehittyneempää AA-CAES prosessia, jolloin prosessihyötysuhde on noin 70 % ja fossiilista maakaasua ei tarvita. Esimerkkejä uusista hankkeista ovat Kanadalaisen Hydrostorin vuonna 2019 valmistunut 1,75 MW voimala Goderichissa ja vuonna 2024 valmistuva 500 MW voimalaitos Rosamondissa, jonka energiakapasiteetti riittäisi 12 tunniksi (Hydrostor 2021). EU rahoittaa Itävallassa sijaitsevaa RICAS2020-tutkimushanketta, jonka tarkoituksena on kehittää edullista maaperästä riippumatonta AA-CAES voimalatekniikkaa, jolloin paineilmaparastojen käyttöä voitaisiin laajentaa uusille alueille. (RICAS 2021)

### 5.3 Bokpoort CSP

Bokpoort CSP on Khi- ja KaXu Solar Onen ohella yksi Etelä-Afrikan kolmesta suuresta aurinkoenergiaa ja lämpövarastoja yhdistävistä voimalaitoksista. Bokpoort CSP on 50 MW Saudi-Arabialaisen energiayhtiö ACWA Powerin rakennuttama parabolisia aurinkokeräimiä hyödyntävä keskitettävän aurinkoenergian (CSP) voimalaitos. Vuonna 2016 toimintansa aloittanut voimala sijaitsee Pohjois-Kapin provinssissa. Erikoisuutena muihin samankaltaisiin projekteihin verrattuna on yli 9 tunnin varastointikapasiteetti, jolla voimalaitos voi toimia hyvissä olosuhteissa ympäri vuorokauden. Bokpoort CSP on osa Etelä-Afrikan valtakunnallista uusiutuvan energian IPP-ohjelmaa ja sen rakentaminen maksoi 517 miljoonaa dollaria. Ohjelman tarkoituksena on helpottaa yksityisen sektorin investointeja uusiutuviin energianlähteisiin tarjouskilpailun avulla. (ACWA Power 2021)

Bokpoort CSP kerää auringon energiaa 8600 parabolisen kaukalon muotoisella aurinkokeräimellä 65,8 hehtaarin pinta-alalta. Keräimet koostuvat kymmenistä peileistä, jotka keskittävät auringon säteilyn polttopisteeseen sijoitettuun putkeen. Putkessa virtaa lämmönsiirtofluidia (HTF), joka lämpenee auringon säteilyn vaikutuksesta jopa 393 °C lämpötilaan. Fluidi pumpataan höyrytimeen, jossa se höyrystää sekundääripiirin vettä. Tuotettu vesihöyry ajetaan turbiinin läpi, jolloin siitä saadaan generaattorin avulla sähköä. Laitokseen kuuluu myös kaksi sulasuolatankkia (kuuma ja kylmä), jotka varastoivat 1300 MWh energiaa tuntuvana lämpönä. (Heliocsp 2015) Tyypillisen energian varastointia hyödyntävän CSP-laitoksen kytkentäkaavio on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10. Sulasuola voimalaitoksen kytkentäkaavio lämpövarastolla. (Sulzer Ltd 2021)

Kuvassa 1 esitetyn Vaisalan säteilyresurssikartan mukaan Etelä-Afrikan pohjoisosa on aurinkovoiman näkökulmasta otollista aluetta noin  $260 \text{ W/m}^2$  keskimääräisillä säteilyresursseilla. Voimalan keräinpinta-ala hyödynnetään korkealla hyötysuhteella, sillä aurinkokeräimien suuntaa käännetään päivän mittaan osoittamaan kohti aurinkoa. Tällöin laitoksen sähköntuottohyötysuhde  $\eta_{el}$  keskimääräisellä irradianssilla arvioidaan yhtälöllä 5, jolloin tulokseksi saadaan noin 29 %. Arvio ei huomioi voimalan kuormituskerrointa, joka kuvaa laitoksen tuotannon suhdetta nimellistehoon. Bokpoort CSP saavutti ennätöksensä vuoden 2020 lokakuussa tuottamalla 13 GWh sähköenergiaa 312 tunnin yhtäjaksoisen toiminnan aikana 83 % kuormituskertoimella (Esi-Africa 2020).

$$\eta_{el} = \frac{P_{el,net}}{I_{rad}A} \quad (5)$$

Missä  $P_{el,net}$  on tuotettu sähköteho,  $I_{rad}$  auringon säteilyn intensiteetti ja  $A$  aurinkokeräinten pinta-ala

Laitoksella on 20-vuotinen tuotantosopimus paikallisen verkkoyhtiön Escomin kanssa. Etelä-Afrikka tukee CSP-voimalaitoksia kaksiosaisella tariffilla. Ensimmäisessä osassa tuottajalle maksetaan energiapohjaista tukea sähkön perustuotannosta ja toisessa osassa erikseen

tuotannosta kulutushuippujen aikaan. Suurimman kulutuksen aikana sähkön hinta markkinoilla nousee perustasosta jopa 270 %. Tariffeilla valtio pyrkii tukemaan uusiutuvan energian kasvua ja kannustamaan tuottajia sähköverkon kannalta kestäviin ratkaisuihin. (Craig et al. 2017, 17) Vuoden 2019 lopussa Etelä-Afrikka teki yksityisille uusiutuvan energian tuottajille vapaaehtoisen tarjouksen pienemmistä tariffituista. Vastineeksi leikkauksista valtio tarjoaa pidennettyjä tuotantosopimuksia. Uuden tarjouksen tavoitteena on kasvattaa uusiutuvan energian kapasiteettia ja luotettavuutta mahdollistamalla voimaloiden lisäinvestoinnit pidemmällä aikavälillä. (PV Magazine 2019)

Saksan energiavarastoliiton BVES:n mukaan sulasuolalämpövarastot toimivat lämpöeristyksestä riippuen 90–99 % hyötysuhteella ja menettävät lämpöenergiastaan päivittäin vain 1–5 %. Sulasuolan lämpökapasiteetti on koostumuksesta riippuen 75–200 kWh/m<sup>3</sup> ja hinta vaihtelee noin 25–70 €/kWh<sub>th</sub> välillä, mikä tekee sulasuolan energiakapasiteetista jopa 33 kertaa litiumioni akkuja edullisempaa. Sulasuola toimii laajalla 150–560 °C toiminta-alueella ja lämpövarastoa voidaan ladata ja purkaa noin 10 000 kertaa, mikä vastaa noin 20 vuoden toiminta-aikaa. Tuntuvan lämmön varastojen lämpökapasiteetit kehittyvät edelleen, mikä laskee varastoinnin kWh-kustannuksia. Esimerkiksi saksalaisyhtiö Storasol on kehittämässä yli 600 °C lämpövarastoa, jossa lämpöenergia varastoidaan hiekkaan tai pienikokoiseen soraan ja lämmön varastointipetiä sekoitetaan alhaaltapäin syötetyllä paineilmalla. Ratkaisu voisi laskea energiakapasiteetin hinnan 15–25 euroon kilowattitunnilta. (SolarThermalWorld 2018) Hiekka olisi hyvä lämpövarasto materiaali 800 J/kg K lämpökapasiteetilla ja 1515 kg/m<sup>3</sup> tiheydellä, mutta 0,27 lämmönjohtavuus ei ole riittävä ilman tehostettua lämmönsiirtoa (Lavine et al. 2017, 924). Keskitetyn aurinkoenergian lisäksi sulasuolaa käytetään esimerkiksi uusissa kehittyneissä adiabaattisissa paineilmavarastoissa.

## 6 ENERGIAVARASTOPROJEKTIT SUOMESSA

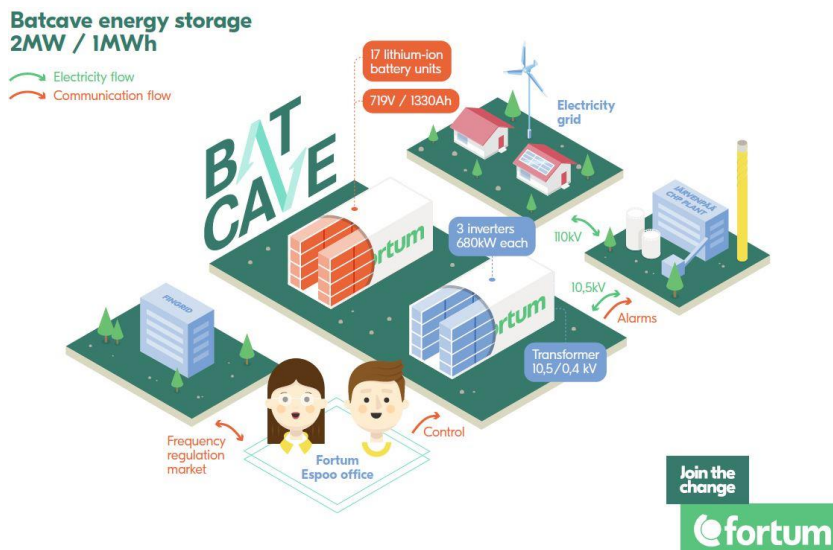
Suomessa tehotasapainon ylläpito toteutetaan pääasiassa säädettävällä vesivoimalla. Suuren mittakaavan energian varastointi on alkanut vasta muutama vuosi sitten. Suomessa energian varastointikapasiteetti koostuu pääasiassa kaukolämpöverkkoihin liitetystä tuntevan lämmön varastoissa ja sähköverkon lyhyen aikavälin taajuudensäätöön osallistuvista akkuvarastoista. Lisäksi uusissa kauppakeskuksissa käytetään lyhytaikaisia energiavarastoja samanaikaisen lämmitys- ja jäähdytystarpeen vuoksi (Motiva 2020c). Pyhäjärven entiseen kaivokseen on rakenteilla 75 MW pumppuvoimalaitos, joka toteutetaan kahdessa vaiheessa (Selänne-lehti 2019). Suomi on akkuteollisuuden näkökulmasta kansainvälisesti kiinnostava kohde mineraalirikkaan maaperän, hyvien verkkoyhteyksien ja alan korkean osaamisen vuoksi. Lämmön kausivarastointi on Suomessa kannattavaa pohjoisesta sijainnista johtuvan korkean lämmitystehotarpeen vuoksi. Tässä luvussa tutustutaan kolmeen kotimaiseen energiavarastoprojektiin Batcave-akkuvarastoon, Vaskiluodon luolalämpövarastoon ja Turun Toriparkin lämmön kausivarastoon.

### 6.1 Batcave-akkuprojekti

Batcave on Fortumin omistama 2 MW litium-ion-akkuvarasto, joka aloitti toimintansa Järvenpäässä vuonna 2017. Ranskalaiselta SAFT:iltä tilatun akkukontin investointikustannukset olivat 1,6 miljoonaa euroa, josta työ- ja elinkeinoministeriö maksoi 30 %. Akkuvarasto toimii Fortumin Järvenpään biovoimalan yhteydessä eräänlaisena tutkimusprojektina, jonka ajatuksena on tutkia akkuvaraston optimaalista ohjaamista yhdessä muun säätövoiman kanssa. Akkuvarasto on osa Pohjoismaista nopeaa taajuusreserviä, jolla säädetään sähköverkon taajuutta sekunti- ja minuuttitasolla. (Fortum 2017a) Akkuvarastoa voidaan ladata tai purkaa sekunneissa ja sen lyhytaikainen käyttö tulee vesivoiman nopeaa tehonsäätöä halvemmaksi. Kun lyhytaikainen taajuudensäätö tehdään akkuvarastoilla vesivoiman sijaan, säästytään vesivoimaloiden koneiston kulumiselta ja siten ennen aikaisilta huoltokustannuksilta. Näin vesivoimaa säästetään sähköverkon pidempiaikaiseen tehonsäätöön. (Fortum 2017b)

Batcave-akkuvarasto koostuu 6600 litium-ioni-kennosta ja kolmesta 680 kW invertteristä, jotka muuttavat vaihtovirtaa akkujen kemialliseksi energiaksi ja akkujen tasavirtaa takaisin vaihtovirraksi. Akkukontin energiakapasiteetti on 1 MWh, joten varastoitu energia riittää

täydellä teholla purettaessa 30 minuutiksi. (Fortum 2020a) Akkuvaraston toimintaperiaate on esitetty kuvassa 11. Fortum pyrkii kaupallistamaan projektista kerättävää kokemusta maihin, joilla ei ole Suomen sähköverkon kaltaista tehonsäätökapasiteettia (Fortum 2017b). Batcave oli valmistuttuaan Pohjoismaiden suurin akkuvarasto, mutta Tuuliwatti Oy:n Viinamäen tuulipuiston yhteyteen rakennuttama 6 MW akku ohitti Batcaven vuonna 2019. Ranskalaisyhtiö Noen on rakentamassa uutta 30 MW ja 30 MWh akkuvarastoa Lappeenrannan Yllikkälään. Vuonna 2021 valmistuva li-ion-akkuvarasto rakennetaan yhteistyössä suomalaisen kantaverkkoyhtiö Fingridin kanssa ja se liitetään suoraan osaksi Suomen kantaverkkoa. Valmistuttuaan Yllikkälä Power Reserve One tasaa tuulivoiman tuotannon vaihtelua ja on merkittävä lisä Suomen nopeaan taajuusreserviin. (Yle 2020)



Kuva 11. Batcave-akkuprojektin toimintaperiaate (Fortum 2017b)

## 6.2 Vaskiluodon luolalämpövarasto

Vaskiluodon luolalämpövarasto on EVP Energian ja Vaasan Sähkön rakennuttama kaukolämmön kausivarasto. Vuonna 2020 valmistunut ja 5 miljoonaa euroa maksanut lämpövarasto rakennettiin Vaskiluodon voimalaitoksen alla sijaitseviin entisiin öljyluoliin, jotka poistuivat käytöstä 1990-luvun lopulla. Lämpövarastot sijaitsevat 30 m syvyydessä kahdessa erillisessä luolassa. Suurempaan, tilavuudeltaan 150 000 m<sup>3</sup> kokoiseen luolaan varastoidaan lämmintä vettä ja pienempi 60 000 m<sup>3</sup> luola toimii veden paisuntasäiliönä. Lämpövaraston tehokapasiteetti on 100 MW ja energiakapasiteetti 7–9 GWh, mikä riittää purkutehosta riippuen noin 4–20 vuorokaudeksi. Lämpövaraston käyttöönotto vähensi Vaasan Sähkön fossiilisen kivihiiilen käyttöä yli 30 %, vähentämällä voimalaitoksen huipputehon tarvetta. (Vaasan Sähkö 2019) Lämpövaraston rakenne toimintaperiaate on esitetty kuvassa 12. Kaukolämpöverkon jäähtynyt vesi palautuu voimalaitokselle, jossa se lämmitetään uudelleen.



**Kuva 12.** Vaskiluodon luolalämpövarasto (Vaasan Sähkö 2019)

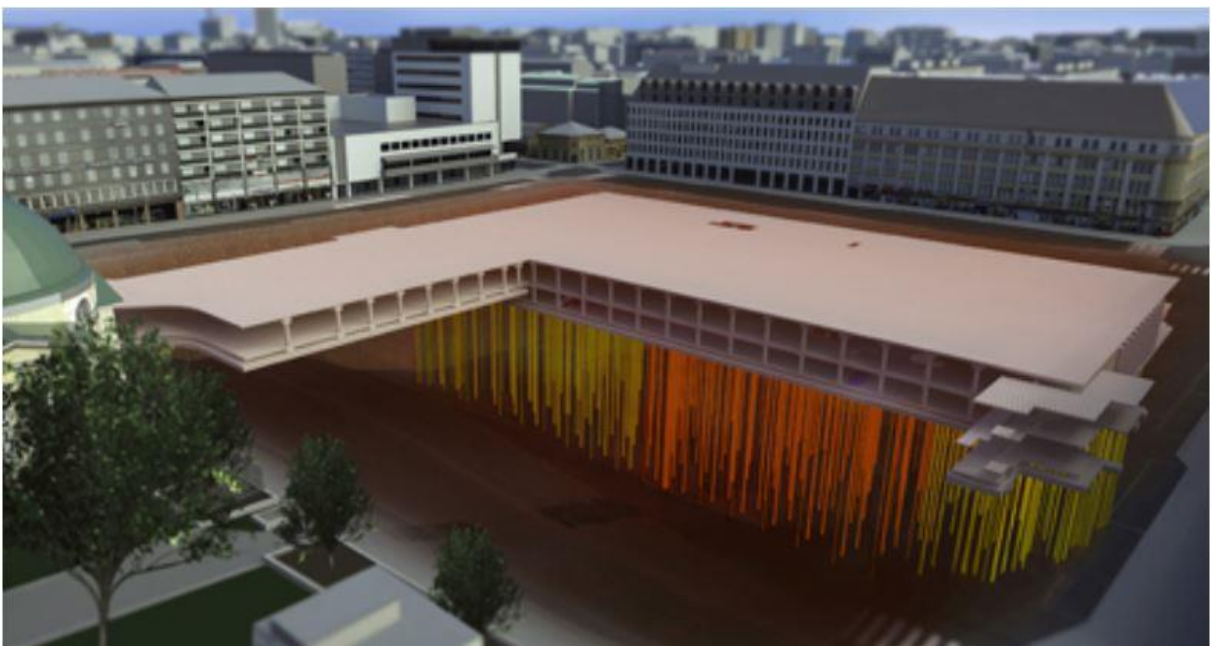
Lämpövaraston yhdistäminen CHP-voimalaitokseen mahdollistaa kaukolämmöntuotannon paremman joustavuuden. Yleisesti Suomessa käytettyjen yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon vastapainevoimalaitosten rakennusasteen eli tuotetun lämmön ja sähkön suhteeseen ei voida juuri vaikuttaa. Tuotantoa voidaan tässä tapauksessa säätää vain ajamalla laitosta osakuormalla, jolloin myös sähköntuotto kärsii. Ylijäämälämmön varastoinnilla voimalaa voidaan käyttää tasaisella kuormalla ja tuottavuus paranee. (Hiltunen 2019, 13) Pääasiassa kivihiiltä käyttävä Vaasan voimalaitos on tyypiltään Benson-läpivirtauskattila, jota voidaan ajaa pienellä tuotantoteholla kaasutetulla biomassalla (Vaskiluodon Voima 2021).

Vaskiluodon lämpövarasto oli valmistuessaan Suomen suurin, mutta Helsingin Mustikkamaan vuonna 2021 valmistuva vastaava lämpöluolaratkaisu on kooltaan vielä suurempi. Mustikkamaan lämpöluolan tehokapasiteetti on 120 MW, tilavuus 260 000 m<sup>3</sup> ja energiakapasiteetti 11,6 GWh. Täydellä purkuteholla varaston lämpö riittää neljäksi päiväksi. (Helen 2018) Vantaan Kuusikonmäkeen on suunnitteilla maailman suurin, miljoonan kuution kausilämpövarasto, joka valmistuisi vuonna 2026. Lämpövarastoon varastoiisiin teollisuuden hukkalämpöä sekä aurinkoenergian ja jätteen energiakäytön kesäajan ylijäämälämpöä. Lämpövarasto kaivettaisiin peruskallioon 50–60 m syvyyteen ja täytettäisiin luonnonvaraisella vedellä. Varastoitu lämpöenergia käytettäisiin talven pakkaskausilla, jolloin fossiilista huipputehoa ei tarvita. (Vantaan Energia 2021)

### 6.3 Turun Toriparkki

Turun Toriparkki on tiettävästi Euroopan ensimmäinen nollaenergiaparkki. Joulukuussa 2020 avattu 600 paikkainen parkkihalli saavuttaa energiaomavaraisuuden arviolta viiden vuoden kuluttua, kun lämpövarasto saavuttaa täyden tehonsa. Siihen saakka lämmitysjärjestelmää avustetaan paikallisella kaukolämmöllä. Suomalaisen energiatehokkuuden konsulttitoimisto nollaE:n suunnittelema kausivarasto kerää lämpöä kesäaikaan torin kivetyksen alla kulkevan putkiston avulla ja varastoi sen perustuksen energiapaalujen avulla savimaahan. Talviaikaan varastoitua lämpöä pumpataan takaisin pintaputkistoon, jolloin parkkihalli pysyy lämpimänä ja torikansi sulana. Kesällä parkkihalli pysyy normaalia viileämpänä, koska ylimääräinen lämpö varastoituu hallin perustuksiin. Lämpövaraston kapasiteetti on 6,6 MW ja varastoidun lämpöenergian määrä 11,2 GWh. (nollaE Oy 2021)

Parkkihallin lämmönsiirto on toteutettu putkistoissa ja energiapaaluissa virtaavan lämmönsiirtofluidin avulla. Energiapaalut on painettu keskimäärin 40 m syvyyteen parkkihallin alapuoliseen savimaahan. Lämmön kausivarasto vähentää parkkihallin hiilidioksidipäästöjä 950 tonnia vuodessa ja varastoi lämpöä 560 omakotitalon vuosikulutuksen verran. (nollaE Oy 2021) Ideakuva Turun Toriparkin energiapaaluista on esitetty kuvassa 13. Savimaa soveltuu energian varastointiin hyvien lämpöominaisuuksiensa vuoksi. Savimaan päälle rakennettaessa perustukset tulee joka tapauksessa paaluttaa, jolloin energian kausivarastointijärjestelmä on mahdollista rakentaa pienillä lisäkustannuksilla. (Ojala 2014, 38)



**Kuva 13.** Turun Toriparkin energiapaalujen ideakuva (nollaE 2021)



## 7 SUOMEEN SOVELTUVAT ENERGIAVARASTOT

Energian varastoinnin kannalta Suomen toimintaympäristön ominaispiirteitä ovat korkea lämmitysenergian tarve, vesivoiman taajuudensäätökyky sähköntuotannossa sekä biomassan teollisuus- ja energiakäyttö. Suomessa on myös suuri tuulivoiman tuotantopotentiaali ja maaperässä on runsaasti akkuteollisuudelle tärkeitä metalleja. Tällä hetkellä kotimainen energiantuotanto ei riitä kattamaan sähkönkulutusta kilpailukykyisillä hinnoilla ja 18,5 % käytetystä sähkötehosta tuodaan naapurimaista. (Energiateollisuus 2021). Tässä luvussa tarkastellaan Suomen toimintaympäristöä energian varastoinnin näkökulmasta ja pohditaan, millaiset varastointiratkaisut edesauttaisivat energiasektorin toimintaa tulevaisuuden hiilineutraalissa yhteiskunnassa. Lisäksi kartoitetaan Suomen uusia mahdollisia vientituotteita.

Suomen kokonaisenergiankulutuksesta 26 % eli 77,5 TWh kului vuonna 2019 rakennusten lämmitykseen (Motiva 2020e). Valtaosa kaukolämmöstä tuotetaan aikavälillä marraskuusta maaliskuuhun, jolloin lämmöntarve on suurimmillaan. Tästä syystä kaukolämpöverkon ja suurten rakennusten kausilämpövarastot olisivat tärkeitä investointeja. Vantaan Kuusikkomäen kausilämpövarasto toimisi tässä pilottihankkeena. Suomessa on myös useita entisiä öljyluolia, joita voitaisiin hyödyntää Vaskiluodon ja Mustikkamaan tapaan lyhyempiäaikaisina lämpövarastoina, jolloin huippukuormavoimallaitoksia tarvitaan harvemmin. Lämpövarastojen avulla teollisuuden ja datakeskusten tuottama hukkalämpö olisi mahdollista käyttää entistä tehokkaammin. Lämpöominaisuuksiensa vuoksi vesi soveltuu erinomaisesti alle 100 °C kaukolämmön varastointiin. Kaukolämpövarastojen lisäksi suurten julkisten ja yksityisten rakennusten kausilämpövarastoilla säästettäisiin sekä lämmitys- että jäähdytyskustannuksissa.

Vuonna 2020 Suomen 66 TWh sähköntuotannosta 85 % oli hiilineutraalia ja 51 % uusiutuvaa. Sähkön perustuotanto koostuu ydinvoimasta, CHP-voimaloista ja jatkuvasti juoksutettavasta vesivoimasta. Tuulivoima on suurin vaihtelevan sähköenergian tuotantomuoto 11,8 % osuudella kokonaistuotannosta. (Energiateollisuus 2021) Vesivoima on Suomessa ylivoimaisesti käytetyin säätötehon muoto. Keskimäärin 85 % aktivoitusta ylössäätötehosta ja 98 % alassäätötehosta suoritetaan vesivoimalla. Suomessa on 220 vesivoimalaitosta, joiden yhteenlaskettu nimellisteho on 3100 MW. Säädetävän vesivoiman nimellisteho on 2100 MW. Vesivoiman tuotanto vaihtelee vuosittain ja vesivoiman säätökyky vuodenajan mukaan.

Vesivoimavarastot ovat suurimmillaan kevättulvien aikaan ja pienimmillään kevättalvella, kun varastot tyhjenetään tulvaveden varastoimiseksi. (Åf-Consult Oy 2019)

Suomen vaihtelevan tuotannon osuus on kasvussa. Konsulttitoimisto Pöyryn arvion mukaan katoille asennettavan aurinkovoiman kapasiteetti ylittää 700 MW vuoteen 2030 mennessä. Uusia tuulivoimahankkeita on suunnitteilla 21,4 GW edestä, josta 87 % on maatuulivoimahankkeita. Tuulivoimahankkeiden investointipäätösten perusteella vuosituotanto tuplaantuu vuoteen 2024 mennessä lähes 16 terawattituntiin. (Suomen Tuulivoimayhdistys 2021) Kun otetaan huomioon Suomen aurinkovoimantuotannon ajoittuminen pääasiassa kesäaikaan, aurinko- ja tuulivoiman välistä synergiaetua eriaikaisista tuotantohuipuista ei juuri saada. Sähkönkulutus on lämmitystarpeen vuoksi suurinta kevättalvella, jolloin vesivoimavarastot ovat usein pienimmillään. Tästä syystä Suomi hyötyisi myös pidempiaikaisesta energian varastoinnista. Lyhyen aikavälin nopea taajuudensäätö tehdään nopealla taajuusreservillä, johon voidaan käyttää esimerkiksi li-ion-akkuvarastoja tai vauhtipyöriä. Suomi olisi akkuvarastojen käytön kannalta hyvä kohdemaana suurien akkumineraalivarantojen, korkean osaamisen ja toimivan energiansiirtojärjestelmän vuoksi.

Suomessa on neljä Euroopan suurinta ja 14/20 Euroopan suurimmista tunnetusta kobolttiesiintymistä (Latitude 66 Cobalt 2021). Uudessakaupungissa kasataan sähköautojen akkuja, Sotkamoon on rakenteilla uusi akkukemikaalitehdas ja Harjavalaan metallisulfaattien jalostuslaitos. (Helsingin Sanomat 2021). Suomi voisikin tulevaisuudessa kaupata akkuvarastoja ja alan osaamista ulkomaille. Pidempiaikaisessa energian varastoinnissa synteettisten biopohjaisten polttoaineiden kehitykselle on Suomessa hyvät edellytykset. Kun monessa maassa hiilidioksidia suunnitellaan kerättäväksi suoraan ilmasta, voitaisiin Suomessa käyttää metsäteollisuuden sivuvirtoja, joista vastaava hiilidioksidimäärä saataisiin neljä kertaa pienemmällä energialla. ST1:n ja LUTin yhteinen pilottihanke synteettisten polttoaineiden valmistuksesta on jo käynnissä Joutsenossa. Hyödyntämällä 85 % teollisuuden biopohjaisista CO<sub>2</sub>-virroista voitaisiin tuottaa 160 % Suomessa käytetyistä polttoaineista ja hiilineutraaleja polttoaineita riittäisi vientituotteiksi. Tämä vaatisi Suomen nykyisen energiantuotannon lisäämistä 240 terawattitunnilla. (Laaksonen et al. 2020, 10–11) Muita Suomeen soveltuvia pidemmän aikavälin sähkövarastoja olisivat entisiin kaivoksiin rakennettavat pumppuvoimalat, virtausakut ja nestemäisen ilman varastot, joiden toiminta ei riipu ympäristöolosuhteista.

## 8 YHTEENVETO

Globaali energiajärjestelmä on kokemassa suuria muutoksia ilmastonmuutoksen torjunnan myötä. Maailman tulisi olla hiilineutraali vuoteen 2050 mennessä, jotta ilmastonmuutoksen vakavimmilta seurauksilta vältyttäisiin. Energiasektorin hiilidioksidipäästöjä vähennetään lisäämällä uusiutuvaa energiaa ja sähköistämällä liikennettä. Aurinko- ja tuulivoima vaikeuttavat tuotannon ennustamista ja heikentävät sähköverkkojen tehotasapainoa. Ongelmaan on pyritty vastaamaan lisäämällä hiilineutraalia perustuotantoa sekä säätelemällä energian tuotantoa ja kulutusta reaaliajassa. Sähköverkon taajuuden säätöön voidaan käyttää myös energiavarastoja, jotka ovat vahvassa kasvussa. Energiaa voidaan varastoida eri muodoissa mekaanisista varastoista kemiallisiin ja varastojen kapasiteetit ja vasteajat riippuvat käytetystä menetelmästä.

Maailman energiavarastojen tehokapasiteetti on tällä hetkellä noin 192 GW, josta yli 95 % on pumppuvoimalaitoksia. BloombergNEF:n arvion mukaan 40 % maailman sähköenergiasta tuotetaan vuoteen 2040 mennessä uusiutuvalla energialla ja energian varastointikapasiteetti ilman pumppuvoimalaitoksia ylittää 1100 GW. Tässä työssä käytiin läpi kolme kansainvälistä ja kolme kotimaista energianvarastointiprojektia. Kansainvälisiä projekteja olivat Bath Countyn pumppuvoimalaitos, Hundorfin CAES voimala ja Bokpoortin aurinkolämpövoimala. Suomen osalta tutustuttiin Batcave akkuvarastoon, Vaskiluodon luolalämpövarastoon ja Turun Toriparkin kausilämpövarastoon. Mikään yksittäinen menetelmä ei kuitenkaan täytä kansainvälistä energiavarastointitarvetta, vaan käytetty menetelmä tulee aina valita käyttötarkoituksen, varastoitavan energian muodon ja paikallisten olosuhteiden mukaan.

Merkittävä osa Suomessa käytetystä energiasta kuluu talvikautena lämmitykseen, jolloin lämmön kausivarastointi olisi kannattavaa. Suuri osa sähköenergiasta tullaan tuottamaan tuulivoimalla, joka on edullisin sähköntuotannon muoto Suomessa. Tuulivoimaa voidaan varastoida lyhyellä aikavälillä esimerkiksi akkuvarastoihin, joiden valmistukseen ja operointiin on Suomessa hyvät edellytykset. Pitkän aikavälin varastointiratkaisuista synteettisten polttoaineiden valmistus biovoimaloiden hiilidioksidista ja elektrolyytisesti hajotetusta vedestä vaikuttaa potentiaaliselta ratkaisulta liikenteen päästöjen vähennykseen. Suomen oloihin soveltuvia sähköenergian varastointimenetelmiä voisivat olla entisiin kaivoksiin rakennettavat pumppuvoimalaitokset, biopohjaiset virtausakut, vauhtipyörät ja LAES.

## LÄHTEET

- AWCA Power. 2021. Bokpoort CSP IPP. [verkkoaineisto]. [viitattu 12.4.2021]. Saatavissa: <https://www.acwapower.com/en/projects/bokpoort-csp-ipp/>
- BloombergNEF. 2019. Energy Storage Investments Boom as Battery Costs Halve in the Next Decade. [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://about.bnef.com/blog/energy-storage-investments-boom-battery-costs-halve-next-decade/>
- Cabeza L.F. 2015. Advances in thermal energy storage systems: methods and applications. Cambridge, England: Woodhead Publishing.
- Craig T., Brent A. & Dinter F. 2017. Concentrated solar power (CSP) innovation analysis in South Africa. South African Journal of Industrial Engineering. 28(2), pp 14–27. Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/319875894\\_Concentrated\\_solar\\_power\\_CSP\\_innovation\\_analysis\\_in\\_South\\_Africa](https://www.researchgate.net/publication/319875894_Concentrated_solar_power_CSP_innovation_analysis_in_South_Africa)
- Crotogino F., Mohmeyer K.U. & Scharf R. 2001. Huntorf CAES: More than 20 Years of Successful Operation. The Solution Mining Research Institute Spring Meeting, Orlando.
- Department of Energy. 2020. DOE OE Global Energy Storage Database. [verkkoaineisto]. [viitattu 10.4.2021]. Saatavissa: <https://www.sandia.gov/ess-ssl/global-energy-storage-database-home/>
- De Sa A. & Al Zubaidy S. 2011. Gas turbine performance at varying ambient temperature. Applied Thermal Engineering, 31(14), pp. 2735–2739.
- Dogaru L. 2020. The Main Goals of the Fourth Industrial Revolution. Renewable Energy Perspectives. Procedia Manufacturing. 46, pp. 397–401.
- Dominion Energy. 2021a. Bath County Pumped Storage Station. [verkkoaineisto]. [viitattu 11.4.2021]. Saatavissa: <https://www.dominionenergy.com/projects-and-facilities/hydroelectric-power-facilities-and-projects/bath-county-pumped-storage-station>
- Dominion Energy. 2021b. Off-Peak Plan. [verkkoaineisto]. [viitattu 11.4.2021]. Saatavissa: <https://www.dominionenergy.com/virginia/rates-and-tariffs/off-peak-plan>
- Energiateollisuus. 2021. Energiavuosi 2020 Sähkö. Saatavissa: [https://energia.fi/files/4428/Sahkovuosi\\_2020\\_netti.pdf](https://energia.fi/files/4428/Sahkovuosi_2020_netti.pdf)
- Energyvault. 2021. [verkkoaineisto]. [viitattu 10.4.2021]. Saatavissa: <https://energyvault.com/>
- ESI Africa. 2020. CSP plant breaks African record for around the clock operation. [verkkoaineisto] Saatavissa: <https://www.esi-africa.com/industry-sectors/generation/solar/csp-plant-breaks-african-record-for-around-the-clock-operation/>
- European Commission. 2020. Stepping up Europe’s 2030 climate ambition. Investing in a climate-neutral future for the benefit of our people. Saatavissa: [https://ec.europa.eu/clima/sites/default/files/eu-climate-action/docs/com\\_2030\\_ctp\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/clima/sites/default/files/eu-climate-action/docs/com_2030_ctp_en.pdf)
- Fingrid. 2016. 250 000 sähköautoa tulee – kaatuuko kantaverkko? [verkkojulkaisu]. Saatavissa: <https://www.fingridlehti.fi/250-000-sahkoautoa-tulee-kaatuuko-kantaverkko/>

- Fingrid. 2021a Reservimarkkinat. [verkkoaineisto]. [viitattu 5.4.2021]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/#reservilajit>
- Fingrid. 2021b Reservituotteet ja reservien markkinapaikat. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-reservien-markkinapaikat.pdf>
- Fortum. 2017a. Pohjoismaiden suurin akku otettiin käyttöön Järvenpäässä. [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://www.fortum.fi/media/2017/03/pohjoismaiden-suurin-akku-otettiin-kayttoon-jarvenpaassa>
- Fortum. 2017b. Maailman vanhin ja uusin energiavarasto rinnakkain: akut ja vesivoima. [blogikirjoitus]. Saatavissa: <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/blogi/forthedoers-blogi/maailman-vanhin-ja-uusin-energiavarasto-rinnakkain-akut-ja-vesivoima>
- Fries A. et al. 2018. Huntorf 2020 - Improvement of Flexibility and Efficiency of a Compressed Air Energy Storage Plant based on Synthetic Hydrogen. NEIS 2018; Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems, Hamburg, Germany, pp. 1-5.
- Helen. 2018. Jättimäinen luolalämpövarasto toteutetaan Helsingin Mustikkamaalle. [verkkoaineisto]. Saatavissa: [https://www.helen.fi/uutiset/2018/mustikkamaa\\_toteutus](https://www.helen.fi/uutiset/2018/mustikkamaa_toteutus)
- HELIO SCSP. 2015. Bokpoort concentrated solar power (CSP) plant project, South Africa. [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://helioscsp.com/bokpoort-concentrated-solar-power-csp-plant-project-south-africa/>
- Helsingin Sanomat. 2021. Syntykö Suomeen viimein akkutehtaita? TEM julkisti valtion akkustrategian. [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://www.hs.fi/talous/art-2000007763564.html>
- Hiltunen S. 2019. Suuret biomassakäyttöiset höyryvoimalaitokset. [kandidaatintyö].
- Huhtinen M. et al. 2008. Voimalaitostekniikka. Helsinki: Opetushallitus.
- Hunt J.D. et al. 2020. Existing and new arrangements of pumped-hydro storage plants. Renewable & sustainable energy reviews, 129, pp. 109914.
- Hydrostor. 2021. Our projects. [verkkoaineisto]. [viitattu 11.4.2021]. Saatavissa: <https://www.hydrostor.ca/projects/>
- RICAS. 2021. Project. [verkkoaineisto]. [viitattu 11.4.2021]. Saatavissa: <http://www.ricas2020.eu>
- IEA. 2020a. SDG7: Data and Projections. IEA, Paris. [verkkoaineisto]. [viitattu 11.1.2021]. Saatavissa: <https://www.iea.org/reports/sdg7-data-and-projections>
- IEA. 2020b. World Energy Balances: Overview. IEA, Paris. [verkkoaineisto]. [viitattu 2.4.2021]. Saatavissa: <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview>
- IEA. 2020c. Renewables. IEA, Paris. [verkkoaineisto]. [viitattu 2.4.2021]. Saatavissa: <https://www.iea.org/reports/renewables-2020>

- IEA. 2020d. Global EV Outlook. IEA, Paris. [verkkoaineisto]. [viitattu 4.4.2021]. Saatavissa: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>
- IEA. 2020e. ETP Clean Energy Technology Guide. IEA, Paris. [verkkoaineisto]. [viitattu 7.4.2021]. Saatavissa: <https://www.iea.org/articles/etp-clean-energy-technology-guide>
- IEA. 2020f. Evolution of Li-ion battery price, 1995–2019. IEA, Paris. [verkkoaineisto]. [viitattu 7.4.2021]. Saatavissa: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/evolution-of-li-ion-battery-price-1995-2019>
- IRENA. 2016. The Power to Change: Solar and Wind Cost Reduction Potential to 2025. Saatavissa: <https://www.irena.org/publications/2016/Jun/The-Power-to-Change-Solar-and-Wind-Cost-Reduction-Potential-to-2025>
- IRENA. 2017. Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. Saatavissa: <https://www.irena.org/costs/Electricity-Storage>
- Kuczyński S. et al. 2015. Compressed air energy storage as backup generation capacity combined with wind energy sector in Poland – Implementation possibilities.
- Laaksonen P. et al. 2020. Hiilineutraali Suomi. Saatavissa: <https://www.lut.fi/documents/10633/586301/Hiilineutraali+Suomi+raportti+18.9.2020.pdf/4e334624-3b24-4da4-b98c-59eb36c5da73>
- Latitude 66 Cobalt. 2021. Latitude 66 Cobaltin varantoarvio: Juomasuo Euroopan neljänneksi suurin tunnettu kobolttiesiintymä. [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://lat66.com/ajankohtaista/latitude-66-cobaltin-varantoarvio-juomasuo-euroopan-neljanneksi-suurin-tunnettu-kobolttiesiintyma/>
- Lavine A.S., Dewitt D.P., Incropera F.P. & Bergman T.L. 2017. Incropera's principles of heat and mass transfer. Wiley-Blackwell.
- LiU. 2020. LiU researchers first to develop on organic battery. [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://liu.se/en/news-item/de-har-tagit-fram-det-forsta-organiska-batteriet->
- Motiva. 2020a. Aurinkokeräinten hyötysuhteet. [verkkoaineisto]. [viitattu 3.4.2021]. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/aurinkolampo/aurinkolampojarjestelmat/aurinkokerainten\\_hyotysuhteet](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkolampo/aurinkolampojarjestelmat/aurinkokerainten_hyotysuhteet)
- Motiva. 2020b. Tuulivoimateknologia. [verkkoaineisto]. [viitattu 3.4.2021]. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/tuulivoima/tuulivoima\\_suomessa/tuulivoimateknologia](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima/tuulivoima_suomessa/tuulivoimateknologia)
- Motiva. 2020c. Kausivarastointi. [verkkoaineisto]. [viitattu 8.4.2021] Saatavissa: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/aurinkolampo/aurinkolampojarjestelman\\_kaytto/aurinkolammon\\_varastointi/kausivarastointi](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkolampo/aurinkolampojarjestelman_kaytto/aurinkolammon_varastointi/kausivarastointi)
- Motiva. 2020d. Akut. [verkkoaineisto]. [viitattu 9.4.2021]. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava\\_liikenne\\_ja\\_liikkuminen/nain\\_liikut\\_viisaasti/valitse\\_auto\\_viisaasti/ajoneuvotekniikka/akut](https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/nain_liikut_viisaasti/valitse_auto_viisaasti/ajoneuvotekniikka/akut)

- Motiva. 2020e. Energian loppukäyttö. [verkkoaineisto]. [viitattu 13.4.2021]. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiankaytto\\_suomessa/energian\\_loppukaytto](https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiankaytto_suomessa/energian_loppukaytto)
- Neste. 2021. Power-to-X: polttoaineita vedestä ja hiilidioksidista. [verkkoaineisto]. [viitattu 9.4.2021]. Saatavissa: <https://www.neste.fi/vastuulliset-ratkaisut/tuotteet/raaka-aineet/tulevaisuuden-raaka-aineet/vesi-ja-hiilidioksidi>
- nollaE Oy. 2021. Turun Toriparkki edustaa tulevaisuuden energiaratkaisuja. [verkkoaineisto]. [viitattu 13.4.2021]. Saatavissa: <https://www.nollae.fi/turun-toriparkki-edustaa-tulevaisuuden-energiaratkaisuja/>
- NREL. 2020. News Release: NREL Six-Junction Solar Cell Sets Two World Records for Efficiency. [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://www.nrel.gov/news/press/2020/nrel-six-junction-solar-cell-sets-two-world-records-for-efficiency.html>
- Ojala M. 2014. Aurinkolämmön varastointi Östersundomin aluerakennuskohteessa. [diplomityö] Saatavissa: <http://jultika.oulu.fi/files/nbnfioulu-201405281518.pdf>
- Pöyry Oy. 2017. Hajautuvan uusiutuvan energiantuotannon potentiaali, kannattavuus ja tulevaisuuden näkymät Suomessa. Saatavissa: <https://vnk.fi/julkaisu?pubid=16603>
- PV Magazine. 2019. South Africa proposes voluntary reduction of tariffs awarded in first three REIPPPP rounds. [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://www.pv-magazine.com/2019/10/01/south-africa-proposes-voluntary-reduction-of-tariffs-awarded-in-first-three-reipppp-rounds/>
- Rakennustieto Oy. 2019. Lämpöenergian kausivarastointi. Saatavissa: [https://www.rakennustieto.fi/material/attachments/5fIPeDhrH/HHdScr75P/RTS\\_19\\_38\\_Lampoenergian\\_kausivarastointi.pdf](https://www.rakennustieto.fi/material/attachments/5fIPeDhrH/HHdScr75P/RTS_19_38_Lampoenergian_kausivarastointi.pdf)
- Reuters. 2020. China's Xi targets steeper cut in carbon intensity by 2020. [verkkoaineisto] Saatavissa: <https://www.reuters.com/article/climate-change-un-china/chinas-xi-targets-steeper-cut-in-carbon-intensity-by-2030-idUSKBN28M0ND>
- Reuters. 2020. Factbox: Fossil fuel-based vehicle bans across the world. [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://www.reuters.com/article/uk-climate-change-britain-factbox-idUSKBN27Y19L>
- Selänne-lehti. 2019. Sopimus allekirjoitettu – Pyhäjärven kaivokseen rakennetaan pienimuotoinen pumppuvoimala – ”isompi tehdään, kun pilotti valmistuu”, Callion johtaja Sakari Nokela kertoo. [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://www.selanne-lehti.fi/uutinen/585668>
- Siecker J., Kusakana K. & Numbi B.P. 2017. A review of solar photovoltaic systems cooling technologies. Renewable & sustainable energy reviews. 79, pp. 192–203.
- SolarThermalWorld. 2018. Molten salt storage 33 times cheaper than lithium-ion batteries. [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://www.solartermalworld.org/news/molten-salt-storage-33-times-cheaper-lithium-ion-batteries>
- Statista. 2020. Share of global carbon dioxide (CO2) emissions from fossil fuels and cement as of 2020, by economic sector. [verkkoaineisto]. [viitattu 4.4.2021]. Saatavissa:

<https://www.statista.com/statistics/1129656/global-share-of-co2-emissions-from-fossil-fuel-and-cement/>

Sulzer Ltd. 2021. Transferring the power of the sun into your cycle. [verkkoaineisto]. [viitattu 12.4.2021]. Saatavissa: <https://www.sulzer.com/en/shared/applications/molten-salt-circulation-pump>

Suomen Tuulivoimayhdistys. 2021. Tuulivoimahankkeet Suomessa 1/2021. Saatavissa: [https://tuulivoimayhdistys.fi/media/final-16.2.-julkaisuun-tuulivoimahankelista-1\\_2020.pdf](https://tuulivoimayhdistys.fi/media/final-16.2.-julkaisuun-tuulivoimahankelista-1_2020.pdf)

Tholander M. & Högberg T. 2018. Evaluation of Liquid air as an energy storage alternative. [kandidaatintyö] Saatavissa: <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1216213/FULLTEXT01.pdf>

Tuuliatlas. 2021. [verkkoaineisto]. [viitattu 3.4.2021]. Saatavissa: <http://www.tuuliatlas.fi/tuulisuus/index.html>

United Nations. 2015. Adoption of the Paris Agreement, 21st Conference of the Parties, Paris: United Nations. Saatavissa: <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>

Vaasan Sähkö. 2019. Massiivinen maanalainen energiavarasto Vaasan Vaskiluotoon. [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://www.stinfo.fi/tiedote/massiivinen-maanalainen-energiavarasto-vaasan-vaskiluotoon?publisherId=58661976&releaseId=69859866>

Vaisala. 2017. Free Wind and Solar Resource Maps. [verkkoaineisto]. Saatavissa: [https://www.vaisala.com/en/lp/free-wind-and-solar-resource-maps\\_2017](https://www.vaisala.com/en/lp/free-wind-and-solar-resource-maps_2017)

Vaisala. 2020. Vaisala Global Solar Dataset 2019 Release. [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/WEA-DIG-RE-Vaisala-SolarValidation-WP-8.5x11-v1.pdf>

Vantaan Energia. 2021. Vantaan Energian lämmön kausivarasto-hankkeeseen etsitään allianssikumppania, jonka kanssa muutetaan energia-alaa ja maailmaa. [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://www.vantaanenergia.fi/vantaan-energian-lammon-kausivarasto-hankkeeseen-etsitaan-allianssikumppania-jonka-kanssa-muutetaan-energia-alaa-ja-maailmaa/>

Vartiainen E. 2020. Tulevaisuuden energiajärjestelmässä varastointi on avainasemassa. Fortum. [blogikirjoitus]. [viitattu 2.4.2021]. Saatavissa: <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/blogi/forthedoers-blogi/tulevaisuuden-energiajarjestelmassa-varastointi-avainasemassa>

Vaskiluodon Voima. 2021. Voimalaitos. [verkkoaineisto]. [viitattu 13.4.2021]. Saatavissa: <https://www.vv.fi/voimalaitokset/>

Virginiaplaces. 2021. Pumped Storage in Bath County. [verkkoaineisto]. [viitattu 11.4.2021]. Saatavissa: <http://www.virginiaplaces.org/energy/bathpumped.html>

VTT. 2021. Akkuteknologiat. [verkkoaineisto]. [viitattu 9.4.2021]. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/fi/palvelut/akkuteknologiat>

Vázquez F.V. et al. 2018. Power-to-X technology using renewable electricity and carbon dioxide from ambient air: SOLETAIR proof-of-concept and improved process concept. Journal of CO2 utilization, 28, pp. 235–246.



World Energy Council. 2016. World Energy Resources E-storage: Shifting from cost to value. Wind and solar applications. Saatavissa: <https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Resources-E-storage-report-2016.02.04.pdf>

Yle. 2020. Ranskalaisyritys rakentaa itärajan pintaan Pohjoismaiden suurimman sähkövaraston – valtavat akut moninkertaistavat sähkön varastoinnin Suomessa. [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-11519166>

Åf-Consult Oy. 2019. Vesivoiman merkitys Suomen energiajärjestelmälle. Saatavissa: [https://energia.fi/files/3427/Vesivoimaselvitys\\_FINALrev1\\_20190206.pdf](https://energia.fi/files/3427/Vesivoimaselvitys_FINALrev1_20190206.pdf)

# LIITTEET

Liite 1. TRL-asteikko. (IAE, 2020e)

