

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

**Pumppuvoimalaitos Suomeen**  
**Pumped storage power plant in Finland**

Työn tarkastaja: Kari Luostarinen  
Työn ohjaaja: Kari Luostarinen  
Lappeenrannassa 27.8.2021  
Janina Ramula

## **TIIVISTELMÄ**

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikka

Janina Ramula

### **Pumppuvoimalaitos Suomeen**

Kandidaatintyö 2021

Tarkastaja: Kari Luostarinen

Ohjaaja: Kari Luostarinen

37 sivua, 10 kuvaa ja 1 taulukko

Hakusanat: pumppuvoimalaitos, energiavarasto, säätövoima

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on pohtia pumppuvoimalaitosten soveltuvuutta ja mahdollisuuksia Suomen energiantuotannossa.

Työssä käsitellään pumppuvoimalaitoksen rakennetta ja toimintaa, sekä sen roolia osana energiantuotantoa. Erilaisiin pumppuvoimalaitoksen toteutustapoihin tutustutaan laitostyypeistä kertovassa luvussa. Lisäksi tehdään lyhyt tarkastelu maailman tämän hetken tilanteeseen pumppuvoimalaitosten osalta. Työssä käsitellään myös pumppuvoimalaitosten kannattavuutta sekä mitä tulee huomioida uuden hankkeen alussa. Lopuksi esitellään Suomesta muutama vanha ja tällä hetkellä voimassa oleva hanke, minkä jälkeen pohditaan pumppuvoimalaitosten tulevaisuuden mahdollisuuksia Suomessa.

Työssä käy ilmi, että maanalaiset laitokset ovat yksi uusimmista ja ympäristöystävällisimmistä pumppuvoimalaitostyypeistä, sillä laitosrakenteet sijaitsevat pääosin maan uumenissa. Yhtäkään tällaista laitosta ei ole vielä toiminnassa, mutta voimassa olevia hankkeita ja paljon kiinnostusta on huomattavissa, mukaan lukien Suomessa.

# SISÄLLYS

## TIIVISTELMÄ

## SISÄLLYSLUETTELO

## SYMBOLILUETTELO

1	JOHDANTO .....	5
2	PUMPPUVOIMALAITOS ENERGIANTUOTANNOSSA .....	6
2.1	Rakenne .....	6
2.2	Toimintaperiaate .....	7
2.3	Pumppuvoimalaitos uusiutuvan energian tukena .....	8
2.3.1	Energian varastointi .....	8
2.3.2	Säätövoima .....	10
3	LAITOSTYYPIT .....	11
3.1	Järveä tai jokea hyödyntävä pumppuvoimalaitos .....	11
3.2	Merivesipumppuvoimalaitos .....	12
3.3	Maanalainen pumppuvoimalaitos .....	12
3.4	Paineilmapumppuvoimalaitos .....	13
4	PUMPPUVOIMALAITOKSET MAAILMALLA .....	13
4.1	Euroopan suurin pumppuvoimalaitos: Dinorwig .....	16
5	KANNATTAVUUS .....	18
5.1	Pumppuvoimalaitoksen edut ja haasteet .....	18
5.1.1	Tekniset ominaisuudet .....	18
5.1.2	Taloudelliset ominaisuudet .....	20
5.1.3	Ympäristövaikutukset .....	21
5.2	Hyötysuhde .....	21
5.3	Kustannukset .....	24
6	PUMPPUVOIMALAITOKSIEN SOVELTUVUUS SUOMESSA .....	24
6.1	Menneet hankkeet .....	25
6.1.1	Vaarunvuori .....	25
6.1.2	Kilpisjärvi .....	26
6.2	Nykyiset hankkeet .....	26
6.2.1	Pyhäsalmi .....	26
6.2.2	Ahvenanmaa .....	29
6.3	Mahdollisuudet .....	29
7	YHTEENVETO .....	31
	LÄHTEET .....	33

## SYMBOLILUETTELO

### Roomalaiset

$E_p$	potentiaalienergia	J
$g$	putoamiskiihtyvyys	m/s <sup>2</sup>
$h$	korkeusero	m
$m$	massa	kg
$V$	tilavuus	m <sup>3</sup>

### Kreikkalaiset

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

### Lyhenteet

CAES Compressed Air Energy Storage

LCOE Levelised Cost of Electricity

PHS Pumped Hydroelectric Storage

# 1 JOHDANTO

Pumppuvoimalaitokset ovat olleet maailmalla jo pitkään yleisin ja varmin keino varastoida energiaa. Niitä voidaan käyttää myös säätövoimana vesivoiman tapaan, kun tarvitaan reagoitakykyä äkillisiin energiantuotannon muutoksiin. Pariisin ilmastopimuksen ohjaamana monella maailman valtiolla on tavoitteena lisätä lähitulevaisuudessa uusiutuvan energian osuutta maansa energiantuotannossa, kuten myös Suomella, jotta kasvihuonekaasupäästöt saataisiin kuriin. Osa uusiutuvan energian muodoista, kuten aurinko- ja tuulivoima, ovat kuitenkin hyvin säästä riippuvaisia. Näin ollen uusiutuvan energian vahvistaessa asemaansa energianlähteenä, tarvitaan yhä enemmän varastointimahdollisuuksia energian tallettamiseen. Tätä varastoitua energiaa voidaan käyttää puolestaan säätövoimana sekä korvaamaan puuttuva energia tilapäisissä energiankulutushuipuissa. (Letcher 2016, s. 5, 25; Korpela 2018, s. 11.) Suomessa jo 1970-luvulta lähtien on ollut pyrkimyksiä aloittaa muutamia pumppuvoimalaitoshankkeita, mutta vasta hiljattain Pyhäsalmeilla ovat suunnitelmat alkaneet etenemään. Sinne on näillä näkymin rakentumassa vanhaa Euroopan syvintä metallikaivosta hyödyntävä ja samalla Suomen ensimmäinen pumppuvoimalaitos.

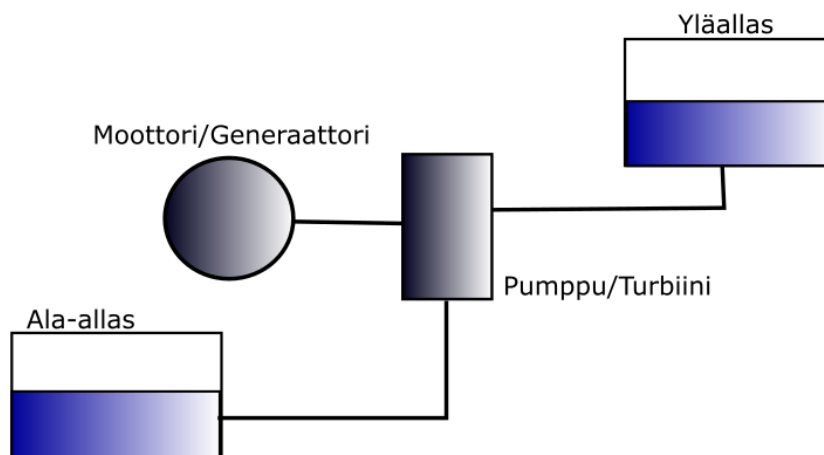
Tämän kandidaatintyön tavoitteena on tutkia pumppuvoimalaitosten potentiaalia suomalaisen energiantuotannon tueksi. Aluksi käydään läpi pumppuvoimalaitoksen perusrakennetta, toimintaa sekä perehdytään sen rooliin energiantuotannossa energiavarastona. Työssä tutustutaan myös erilaisiin pumppuvoimalaitoksen toteutustapoihin, joista osa on jo käytössä ja osan potentiaali on vielä tutkimuksien alla. Maailman pumppuvoimalaitoksien tilanteeseen tullaan tekemään lyhyt katsaus siitä, missä maailman laitospasiteetit tällä hetkellä sijaitsevat. Sen lisäksi tutustutaan vielä Euroopan suurimpaan Dinorwigin pumppuvoimalaitokseen. Kannattavuutta käsittelevässä luvussa pohditaan pumppuvoimalaitosten etuja ja haasteita teknisestä, taloudellisesta sekä ympäristön näkökulmista. Luvussa selvitetään myös laitoksen hyötysuhteeseen sekä kustannuksiin vaikuttavia tekijöitä. Lopuksi tullaan perehtymään muutamaa menneisiin ja nykyisiin suomalaisiin pumppuvoimalaitoshankkeisiin, minkä jälkeen arvioidaan pumppuvoimalaitosten mahdollisuuksia Suomen olosuhteissa.

## 2 PUMPPUVOIMALAITOS ENERGiantuotannossa

Pumppuvoimalaitos muistuttaa toiminnaltaan hyvin paljon vesivoimalaitosta. Energiantuotaminen perustuu tavallisesti veden mekaanisen energian muuntamiseen sähköenergiaksi. Vaikka pumppuvoimalaitoksella tuotetaan energiaa, sitä ei vesivoiman tapaan kuitenkaan lasketa energiantuotantomuodoksi. Itsenäisesti toimivan pumppuvoimalaitoksen energiantuotto on aina negatiivista, koska sen käyttöön kuluu enemmän energiaa kuin se tuottaa. (Letcher 2016, s. 25.) Näin ollen pumppuvoimalaitoksen rooli energiantuotannossa on toimia energiavarastona, eli tuottaa tarvittaessa energiaa jonkun energianlähteen alun perin siihen tuottamasta energiasta.

### 2.1 Rakenne

Pumppuvoimalaitos on rakenteeltaan kuin vesivoimalaitos, mutta pumppuvoimalaitoksella on lisäksi pumppu veden nostamista varten. Pumppuvoimalaitos koostuu tyypillisesti ala- ja yläaltaasta, altaiden välisistä vesilinjoista, pumpusta, turbiinista sekä moottorigeneraattori yksiköstä. Rakenne on havainnollistettu yksinkertaistettuna kuvassa 1. Joissakin voimalaitoksissa on käytössä myös pumpputurbiini systeemejä erillisen pumpun ja turbiinin sijaan. Tällaisissa systeemeissä tarvitaan vain yksi komponentti, joka toimii pumppuna, kun vettä halutaan pumpata yläaltaalle ja turbiinina, kun vesi päästetään takaisin ala-altaalle. Esimerkiksi Francis- ja Felton-pumpputurbiinit soveltuvat hyvin tähän tarkoitukseen.



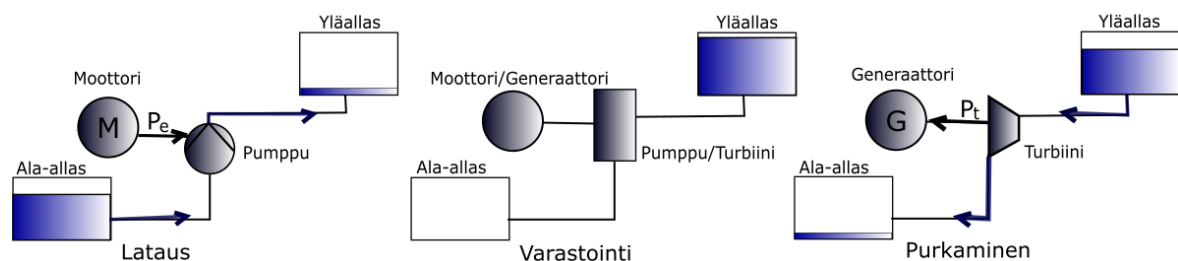
**Kuva 1.** Pumppuvoimalaitoksen yksinkertaistettu rakenne.

Pumpputurbiini systeemeissä voidaan säästää arviolta noin 30 % voimalaitoksen investointikustannuksissa, kun erilliseen pumpuun ja sen huoltokustannuksiin ei tarvitse investoida.

Kuitenkin pumpputurbiini systeemeissä on otettava huomioon, että laitoksen yleinen tehokkuus on alhaisempi verrattuna erillisellä pumpulla ja turbiinilla toimivaan systeemiin. (Ter-Gazarian 2020, s. 90, 92-93).

## 2.2 Toimintaperiaate

Pumppuvoimalaitoksen toimintaperiaate on melko yksinkertainen, joka perustuu kahden eri korkeudella sijaitsevan vesialtaan potentiaalieroon. Vesi pumpataan alemmalta altaalta ylempänä sijaitsevalle altaalle, kun sähkö on halpaa ja sen kulutus on vähäistä. Sähkön kysynnän kasvaessa sen hinta nousee, jolloin yläaltaan veteen varastoitu potentiaalienergia on kannattavaa purkaa turbiinin läpi ala-altaalle. Mitä suurempi on pumppaukseen käytetyn ja purkamisesta saadun sähkön hintaero, sitä suurempi on rahallinen voitto ja näin ollen pumppuvoimalaitoksen kannattavuus. Tyypillisesti vesi pumpataan yläaltaalle yöaikaan, kun sähkönkulutus alkaa vähenemään ja puretaan päivällä kysynnän ollessa suurempaa. (Letcher 2016, s. 25; Wolf 2018, s. 299.) Kuvassa 2 on esitettyä kuvasarja pumppuvoimalaitoksen toiminnan eri vaiheista.



**Kuva 2.** Pumppuvoimalaitoksen toiminnan eri vaiheet.

Latausvaiheessa moottorin pumpulle siirtämä sähköteho  $P_e$  käytetään veden nostamiseen ala-altaalta yläaltaaseen, eli muunnetaan systeemiin tuotu sähköenergia veden potentiaalienergiaksi. Varastointivaiheessa vesi on yläaltaalla odottamassa lähes häviöttömänä, kunnes seuraava purkaminen tapahtuu. Veteen varastoituneen energian määrään vaikuttavat yläaltaaseen varastoidun veden tilavuus sekä yläaltaan ja turbiinin välinen korkeusero. Säätoivoiman tai sähkönkäytön kulutushuippujen tasaamisen tarpeessa yläaltaan veden potentiaalienergia puretaan. Vesi lasketaan alas turbiinille, jonka pyörimisenergia muunnetaan generaattorilla tarvituksi sähköenergiaksi ja se syötetään sähköverkkoon. (Alami 2020, s. 51; Ter-Gazarian 2020, s. 89-91.)

## 2.3 Pumppuvoimalaitos uusiutuvan energian tukena

Energiankäytön tehostumisesta huolimatta maailman sähkön kokonaiskulutuksen kasvaminen jatkuu teollisuuden ja palveluiden kehittymisen, elintason nousun, väestökasvun sekä ikääntymisen myötä. Vaikka Suomessa sähkön kokonaiskulutus on viimeisen kymmenen vuoden aikana pysynyt melko samalla tasolla noin 85 TWh paikkeilla, tulee Suomenkin kulutus kasvamaan vähitellen yhteiskunnan lisääntyvän sähköistymisen vuoksi (Energiateollisuus 2020). Suomen sähkönkulutuksen on arvioitu olevan vuoteen 2030 mennessä 92,1 TWh ja vuoteen 2050 mennessä 100,1 TWh (TEM 2019a). Lisäksi uusiutuva energia on saamassa yhä enemmän jalansijaa energiantuotannossa ilmastonmuutoksen torjumisen takia. Poistuvien tuotantomuotojen sekä lisääntyvän sähkön kysynnän täyttämiseksi on tehtävä runsaita investointeja päästöttömiin tuotantomuotoihin. Esimerkiksi aurinko- ja tuulivoima ovat otaneet jo suuria teknisiä kehitysaskelleita. Niiden hintatasot ovat tulossa alas ja näin ollen lisärakentaminen olisi kannattavaa. (Sevänen 2020.) Suomessakin on suunnitteilla toteuttaa lähiaikoina mittavia tuulivoimahankkeita. Vuoden 2020 keväällä oli mahdollisia hankkeita kirjattu yhteensä jopa noin 18 500 MW, joista 2700 MW olisi merellä. Vuoden 2019 lopussa tuulivoimakapasiteettia oli Suomessa 2284 MW edestä. (Tuulivoimayhdistys 2020.)

Kuitenkin riippuvuus vaihtelevista sääolosuhteista tulee lisäämään tuotannon epävakaisuutta. Jos aurinko ei paista, eikä tuule haluttuna ajankohtana tai tuotantoa on liikaa, seuraa haasteita kysynnän ja tarjonnan optimaalisessa kohtaamisessa. Kulutus ja tuotanto täytyy pitää joka hetki tasapainossa sähköjärjestelmän toimintavarmuuden turvaamiseksi. Siksi tarve energian varastoinnille tulee lisääntymään kasvavan uusiutuvan energian kapasiteetin myötä. (Letcher 2016, s. 5.)

### 2.3.1 Energian varastointi

Pumppuvoimalaitokset ovat kaikkein yleisimmin käytetty suuren kokoluokan keino energian varastoimiseen. Maailman yhteenlaskettu vesipumppuvoimalaitoksien kapasiteetti on 158 GW luokkaa, joka on noin 94 % kaikesta asennetusta energian varastointikapasiteetista ja 96 % kaikesta sähköenergian varastointikapasiteetista. Loput 4 % muodostavat pääosin erilaiset akut, lämpövarastot, ilmapumppuvoimalaitokset sekä vauhtipyörät. (IHA 2020; Wolf 2018, s. 298.) Pääasiallisesti energiavarastot jaetaan neljään pääryhmään: mekaanisiin,

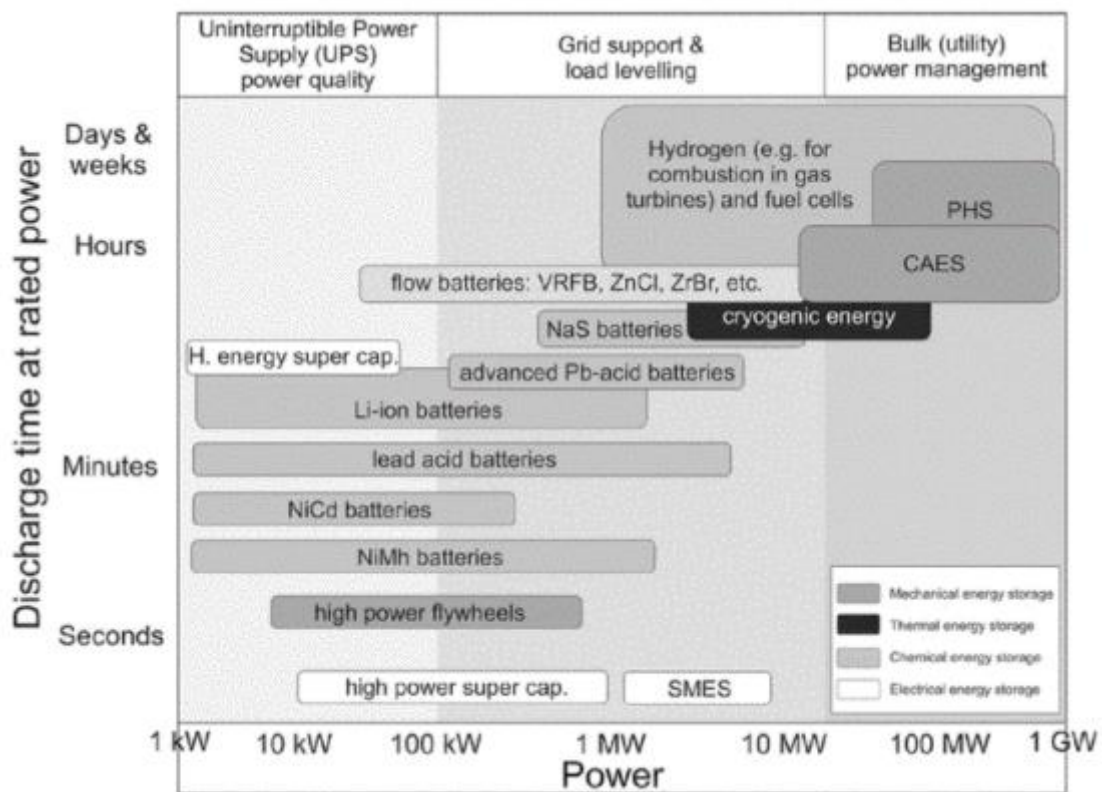


kemiallisiin, lämpö- sekä sähkökemiallisiin varastoihin (Alami 2020, s. 7). Kuvan 3 käsitekartta kokoaa yhteen energian varastoinnissa käytettävät teknologiat.



**Kuva 3.** Käsitekartta energiavarastoista. Pumppuvoimalaitokset kuuluvat mekaanisiin varastoihin. (Alami 2020, s. 7.)

Pumppuvoimalaitosten tehot ovat mitoitettu kymmenistä megawateista aina useisiin gigawatteihin saakka. Niiden varastoimaa energiaa voidaan purkaa useiden tuntien tai päivän ajan, ja siksi ne myös kuuluvat suuren kokoluokan energian varastointikeinoihin. Vertailun vuoksi kuvassa 4 puolestaan havainnollistetaan eri energiavarastojen tehoja ja purkamisaikoja.



**Kuva 4.** Energiavarastojen tehot ja purkamisajat (Harrison & Hester 2019, s. 44).

Pumppuvoimalaitokset ovat pysyneet toistaiseksi energian varastoinnin valta-asemassa yksinkertaisen toimintaperiaatteensa sekä suuressa kokoluokassa mitattavan kustannustehokkuutensa ansiosta (EERA 2016). Lisäksi pumppuvoimalaitosten käynnistysajat ovat varsin nopeita: ne vaihtelevat jopa muutamista sekunneista muutamiin minuutteihin riippuen siitä, onko pumppuvoimalaitos missä toimintatilassa kyseisenä hetkenä. Tyypillinen käynnistysaika on esimerkiksi yhdestä viiteen minuuttiin, kun tuotanto halutaan aloittaa laitoksen täydestä seisokista ja kahdesta kahteenkymmeneen minuuttiin, kun tuotannon tarve ilmenee pumppausvaiheen aikana. Näin ollen pumppuvoimalaitoksilla pystytään reagoimaan hyvin nopeasti muuttuvaan energiantarpeeseen. (Alami 2020, s. 57-59; Harrison & Hester 2019, s. 44.)

### 2.3.2 Säättövoima

Säättövoimalla tarkoitetaan tuotantokapasiteetin säätämistä energiantarpeen mukaan. Alun perin Euroopassa pumppuvoimalaitoksia rakennettiin täydentämään perusvoiman, kuten ydinvoiman tuotantoa sen yleistyessä 1960-luvulla. Tavallisesti pumppuvoimalaitoksia käytetään ottamaan yön halvempi sähköenergia talteen ja purkamaan se seuraavan päivän

kalliimpana ajan hetkenä, eli energiaa pyritään varastoimaan suurempaa energiantarvetta varten. Vastaavasti uusiutuvien energianlähteiden lisääntymisen myötä pumppuvoimalaitoksia voidaan hyödyntää ylituotetun energian varastointiin ja purkaa se, kun tuotantoa on liian vähän. Pumppuvoimalaitoksia voidaan käyttää sen nopean käynnistymisen ansiosta myös apuna tehotasapainon säätämiseen, jännitehuippujen ja kuoppien tasaamiseen sekä suojaamaan sähköjärjestelmää kaatumiselta. (Letcher 2016, s. 27-28.)

### **3 LAITOSTYYPIT**

Pumppuvoimalaitokselle on olemassa erilaisia tapoja siitä, miten ala- ja yläreservit toteutetaan. Yleensä pumppuvoimalaitoksella tarkoitetaan vesipumppuvoimalaitosta (PHES), jossa toiminnan kannalta tarvittava potentiaalienergia perustuu altainen korkeuseroon. Pumppuvoimalaitoksiin saatetaan joskus sekoittaa paineilmavarastot (CAES), joita kutsutaan joskus suomen kielessä myös ilmapumppuvoimalaitoksiksi. Vaikka niiden toteutusidea potentiaalienergian varastoinnista kahteen reserviin on hyvin samankaltainen vesipumppuvoimalaitosten kanssa, ne eivät varsinaisesti ole nimestään huolimatta pumppuvoimalaitoksia. Pumpun sijaan ilmapumppuvoimalaitoksissa käytetään kompressoria, jolla saatetaan ilma korkeampaan paineeseen. Siksi tässä luvussa keskitytään vain vesipumppuvoimalaitosten toteutustapoihin.

#### **3.1 Järveä tai jokea hyödyntävä pumppuvoimalaitos**

Kaikista tavallisimmin pumppuvoimalaitokset ovat rakennettu osaksi valmiita makean veden muodostumia, kuten järviä tai jokia. Järvi toimii tyypillisesti ala-altaana, josta vesi pumpataan tyhjään yläaltaaseen taloudellisesti kannattavana ajankohtana. Esimerkiksi Yhdysvalloissa Michiganin osavaltiossa vuonna 1973 käyttöön otettu Ludingtonin pumppuvoimalaitos hyödyntää Michiganjärveä ala-altaana ja öisin vesi pumpataan padottuun yläaltaaseen. Jokea käyttävän pumppuvoimalaitoksen toiminta perustuu taas siihen, että purojen ja jokien uurtamia laaksoja hyödynnetään ylemmän ja alemman patoaltaan rakentamiseen. Ylempi varastointiallas sijaitsee korkeammalla ylängöllä purolaaksossa kuin alempana jokilaaksossa sijaitseva varastointiallas. Esimerkiksi tämän hetken maailman suurin pumppuvoimalaitos Bath County Yhdysvalloissa Virginian osavaltiossa on toteutettu tällä tavalla. Pumppuvoimalaitoksen yläallas on rakennettu Little Back Creekin purolaaksoon ja ala-allas Back Creekin jokilaaksoon. (Stocks 2020.)

Jokipumppuvoimalaitos voi olla joskus rakennettuna myös osaksi vesivoimalaitosta, mutta ne ovat enemmän hybridivoimalaitoksia kuin pumppuvoimalaitoksia. Tällaisissa voimalaitoksissa tuotetaan energiaa vesivoimalla joen virtauksen liike-energiasta ja ohessa käytetään vesipumppuyksikköä pumpaamaan vettä takaisin yläaltaalle. Esimerkiksi Suomessa Kemijärvellä on tällainen pumppuasema Jumiskon vesivoimalaitoksen yhteydessä. Pumppuja on yhteensä kolme ja niiden nostokorkeus on 23 metriä. (Pohjolan Voima 2020.)

### **3.2 Merivesipumppuvoimalaitos**

Merivesipumppuvoimalaitoksissa hyödynnetään merta toisena varastoaltaana. Esimerkiksi Japanissa vuonna 1999 käyttöön otettu Okinawan pumppuvoimalaitos käyttää valtamerä ala-altaana ja pumpkaa merivettä 150 metriä ylempänä sijaitsevaan altaaseen. Laitos jouduttiin kuitenkin sulkemaan vuonna 2016 paikallisen sähkön kysynnän puutteen vuoksi (Harrison & Hester 2019, s. 49). Alankomaissa on taas suunnitteilla käyttää valtamerä puolestaan yläaltaana ja padota saarien väliin noin 50 metrin syvyinen ala-allas, johon merivesi laskeaan. (Letcher 2016, s. 35.) Meriveden käyttöön pumppuvoimalaitoksissa liittyy kuitenkin joitakin ongelmia. Suolainen vesi aiheuttaa ympäristön kuivumista, jos sitä pääsee vuotamaan pois varastoaltaasta. Se myös aiheuttaa korroosiota, eli kulumista pumppuvoimalaitoksen komponenteille. (Harrison & Hester 2019, s. 53.)

Toinen meriveteen liittyvä toteutustapa on merenalainen pumppuvoimalaitos. Se koostuu merenpohjaan asetetuista paineastioista, joista pumpataan vesi pois esimerkiksi merituulivoimalla tuotetulla sähköllä. Paineastioiden auetessa meriveden paineesta johtuen, vesi alkaa virtaamaan turbiinien läpi astioihin tuottaen tarvittuna ajankohtana sähköä. Meri toimii ikään kuin ylävarastointialtaana ja paineastiat alavarastointialtaina. Tällaista pumppuvoimalaitosta ei vielä ole missään käytössä tai rakentumassa. (Letcher 2016, s. 36.)

### **3.3 Maanalainen pumppuvoimalaitos**

Maanalainen pumppuvoimalaitos on yksi uusimmista pumppuvoimalaitoksen toteutustavoista. Ala-allas sijaitsee kovassa kallioperässä olevassa onkalossa ja yläallas maanpinnan tasolla. Koska hyödyksi saadun energian määrä on suoraan verrannollinen altaiden korkeuseroon, maanalaisella pumppuvoimalaitoksella korkeuseron sijaan rajoittava tekijä on usein pumpun nostokorkeus. Korkeusero voi olla jopa yli 1000 metriä, kun taas tyypillisesti se on 300 metriä tai vähemmän. Lisäksi maanalainen pumppuvoimalaitos ei tarvitse valmista

vesistöä läheisyyteensä, vaan se voidaan toteuttaa myös suljettuna kiertona, jolloin ympäristövaikutukset jäävät hyvin pieniksi. Maanalaisen pumppuvoimalaitoksen etu muihin laitos-tyyppisiin verrattuna on ympäristöystävällisyys, kun suuret laitosrakennelmat ovat suurimaksi osaksi maan sisällä. Näin vältetään myös mahdollisilta maisemahaitoilta. Tosin maanalaista pumppuvoimalaitosta ei ole taloudellisesti kannattavaa lähteä rakennuttamaan alkutekijöistä, sillä rakentamiskulut kasvaisivat liian suuriksi. Esimerkiksi vanhojen kaivosten rakenteiden hyödyntäminen uuden pumppuvoimalaitoksen rakentamisessa voisi olla kannattavaa. (Harrison & Hester 2019, s. 47; Ter-Gazarian 2020, s. 96.) Maailmalla on tehty joitakin vanhoihin kaivoskohteisiin liittyviä pumppuvoimalaitossuunnitelmia ja -tutkimuksia, kuten Kaakkois-Belgiassa Martelangessa sijaitsevalle vanhalle liuskekivikaivokselle ja Australiassa Queenslandin osavaltiossa sijaitseville vanhoille kultakaivoksille. Suomessa Pyhäjärvellä on taas toteutumassa mahdollisesti maailman ensimmäinen vanhaa kaivosta hyödyntävä pumppuvoimalaitos. (Pyhäjärven Callio 2021; Hendrick & al. 2020, s. 6; Colthorpe 2021.)

### **3.4 Paineilmapumppuvoimalaitos**

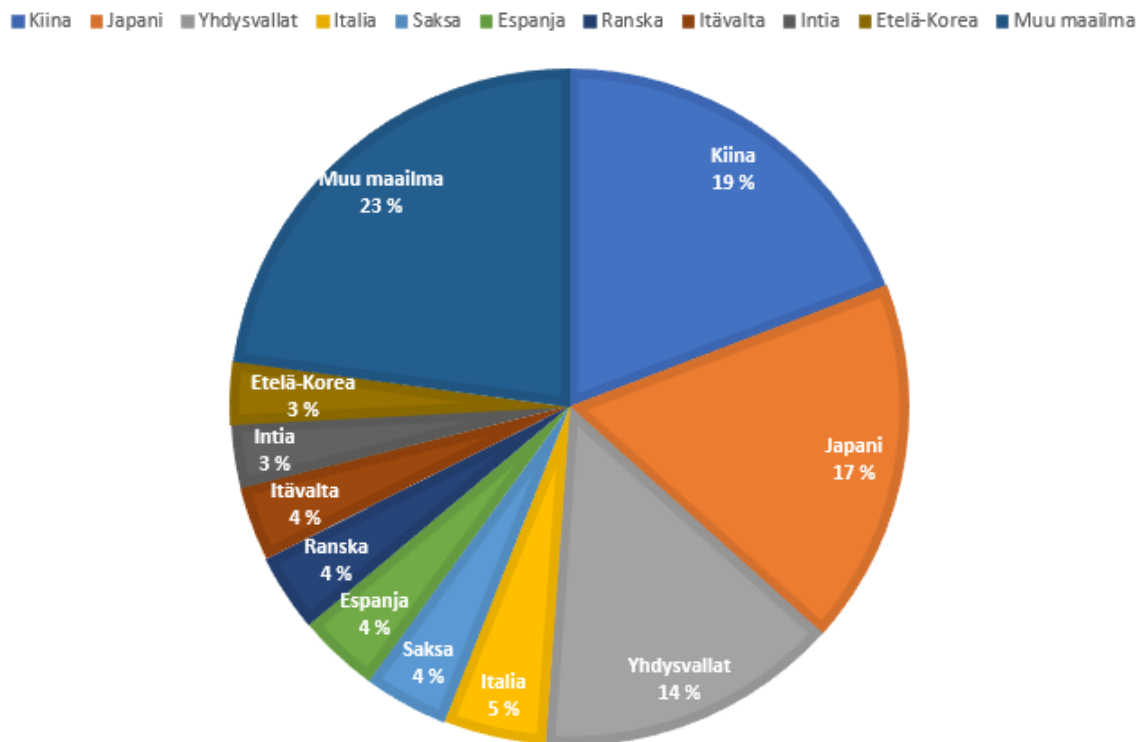
Toisin kuin aiemmissa tyypeissä, paineilmapumppuvoimalaitos perustuu paineistettuun ilmaan varastoituun potentiaalienergiaan. Se koostuu paineastiasta ja varastointialtaasta, josta pumpataan ylijäämä sähköllä vettä paineastiaan. Pumpatun veden myötä paineastian ilma puristuu pienempään tilaan ja sen paine kasvaa. Purkamisvaiheessa korkeapaineinen ilma työntää paineastiaan pumpatun veden turbiinin kautta takaisin varastointialtaaseen tuottaen sähköä. Laitostyyppin etuna on, että se ei ole sidonnainen maantieteelliseen sijaintiin. Tosin tällaista pumppuvoimalaitosta ei ole missään päin maailmaa käytössä, sillä idea on vielä hyvin uusi. (Letcher 2016, s. 35-36.)

## **4 PUMPPUVOIMALAITOKSET MAAILMALLA**

Alppien seuduilla Sveitsissä ja Italiassa rakennettiin maailman ensimmäiset pumppuvoimalaitokset 1890-luvulla tuotantoteollisuuden tarpeisiin. Pumppuvoimalaitoksia alettiin rakentamaan vesivoimalaitosten yhteyteen tarkoituksena talteenottaa yön aikana vesivoimalla yli tuotettu sähköenergia, joka käytettiin seuraavan päivän kulutushuipussa. Vielä ennen 1900-luvun puoliväliä suurin osa pumppuvoimalaitoksista sijaitsi Euroopan alueella, kunnes 1960-luvulla halpaa sähköä tuottava ydinvoima alkoi lisääntymään maailmalla perusvoiman

kattajana. Pumppuvoimalaitokset saivat näin ollen lisäroolia energiantuotannossa, kun halpaa perusvoimaa oli enemmän varastoitavana varsinkin öisin. (Ter-Gazarian 2020, s. 89, 91; Letcher 2016, s. 28.)

Nykyisin pumppuvoimalaitokset ovat maailmalla kaikista yleisimmin käytetty energian varastointimenetelmä, joiden yhteenlaskettu kapasiteetti on noin 158 GW. On arvioitu, että kapasiteetti tulee kasvamaan 240 GW saakka vuoteen 2030 mennessä. Vuonna 2019 Kiina, Japani ja Yhdysvallat omistivat yhteensä puolet koko maailman pumppuvoimalaitoskapasiteetista. Varsinkin Kiinan kasvu on ollut voimakasta: se on lisännyt kapasiteettia ainakin 15 GW vuodesta 2010 lähtien ja sen odotetaan lisäävän kapasiteettiaan yhä enemmän seuraavan 10 vuoden aikana. Loppuosa maailman kokonaiskapasiteetista jakautuu Alppimaiden, Intian, Etelä-Korean sekä muun maailman kesken, kuten on kuvassa 5. (IHA 2020.)



**Kuva 5.** Maailman pumppuvoimalaitoskapasiteetin jakautuminen (IHA 2020).

Maailman suurimmat pumppuvoimalaitokset sijaitsevat tällä hetkellä pääosin Yhdysvalloissa ja Kiinassa. Aiemmin edellisessä luvussa mainittu Bath County on toistaiseksi maailman suurin, jonka teho kuudella 500,5 MW turbiiniyksiköllä on 3003 MW ja varastointikapasiteetti 24 000 MWh. Toiseksi ja kolmanneksi suurimmat laitokset sijaitsevat puolestaan

Kiinassa ja neljänneksi suurin Japanissa. Taulukkoon 1 on listattu kymmenen maailman suurinta pumppuvoimalaitosta.

**Taulukko 1.** Maailman kymmenen suurinta pumppuvoimalaitosta (Letcher 2016, s. 30-34; Ter-Gazarian 2020, s. 97, 101; Stocks 2020; Snowy Hydro 2020; XFLEX HYDRO 2020).

<b>Maa</b>	<b>Pumppuvoimalaitoksen nimi</b>	<b>Teho [MW]</b>
1. Yhdysvallat	Bath County	3003
2. Kiina	Huizhou	2448
3. Kiina	Guangdong	2400
4. Japani	Okutataragi	1932
5. Yhdysvallat	Ludington	1872
6. Kiina	Tianhuangping	1836
7. Australia	Tumut-3	1800
8. Ranska	Grand'Maison Dam	1800
9. Iso-Britannia	Dinorwig	1728
10. Yhdysvallat	Raccoon Mountain	1652

Maailmalla, kuten erityisesti Kiinassa on kuluneen vuosikymmenen aikana kiinnitetty hyvin paljon huomiota uusiutuvan energian lisäämiseen. Kiinan tavoitteena on vuoteen 2030 mennessä lisätä uusiutuvan energian osuutta primäärienergian tuotannossa 25 %:iin, kun aiemmin tavoite oli 20 % (Myllyvirta 2020). Samoin Yhdysvaltojen 2030-vuotis tavoitteena on uusiutuvan energian osuuden lisääminen 27 %:iin primäärienergian tuotannossa (IRENA 2015). Uusiutuvan energian kasvu luo tarvetta energian varastoimiselle, kun energiantuotanto on entistä arvaamattomampaa. Kiina on päättänyt muun muassa näistä syistä rakentaa lisää varastointikapasiteettia tavoitteiden täyttymiseksi. Kiinassa on paljon ylänköistä jokimaastoa, mikä on maantieteellisesti optimaalista seutua pumppuvoimalaitosten valjastamisen kannalta. Kiinassa oli vuoden 2018 lopussa lähes 30 pumppuvoimalaitosta rakenteilla sekä useita muita suunnitteilla. Hubein provinssissa sijaitsevan Fengningin pumppuvoimalaitos tulisi olemaan uusi maailman suurin valmistuessaan vuonna 2022 ja 3600 MW teholla. (Zhu & Ma 2019, s. 2, 4-5.)

Vaikkei Australiassa ole vielä paljon omaa pumppuvoimalaitoskapasiteettia käytössä, siellä on Kiinan tavoin paljon sopivaa ylänköistä maastoa. Australian kansallisessa yliopistossa on laskelmoitu, että lupaavia paikkoja pumppuvoimalaitosten rakentamiselle olisi peräti 22 000 koko maassa. Niiden energian varastointikapasiteetti on yhdestä 200 GWh:iin saakka ja yhteensä 67 000 GWh edestä. Kunkin kohteen putouskorkeus olisi vähintään 200-300 metriä. (Anderson & al. 2017, s. 1.) Lisäksi koko maailmassa on arvioitu olevan potentiaalisia

pumppuvoimalaitoskohteita jopa 616 000 kappaletta 23 000 000 GWh:n varastointikapasiteetilla lukuun ottamatta jo valmiita sekä kaivoskohteita. Australian kansallisen yliopiston käyttämä paikkatietojärjestelmä GIS analyysillä arvioidut potentiaaliset kohteet ovat esitettynä kuvassa 6.



**Kuva 6.** Potentiaaliset pumppuvoimalaitoskohteet maailmankartalla (Blakers & al. 2021).

Kuvan 6 perusteella voidaan havaita, että potentiaalisia paikkoja on erityisesti Aasiassa Tiibetin ja Altain ylängöillä sekä Amerikan läntisillä reunoilla Andien ja Kalliovuorten kohdilla. Samoin Afrikastakin löytyy useita sopivia valjastamattomia paikkoja keski- ja rannikko-osista sekä Euroopasta eteläiseltä puolelta vuoristojen läheisyydestä, missä sijaitseekin jo suurin osa Euroopan valmiista pumppuvoimalaitoskapasiteetista. (Blakers & al. 2021.)

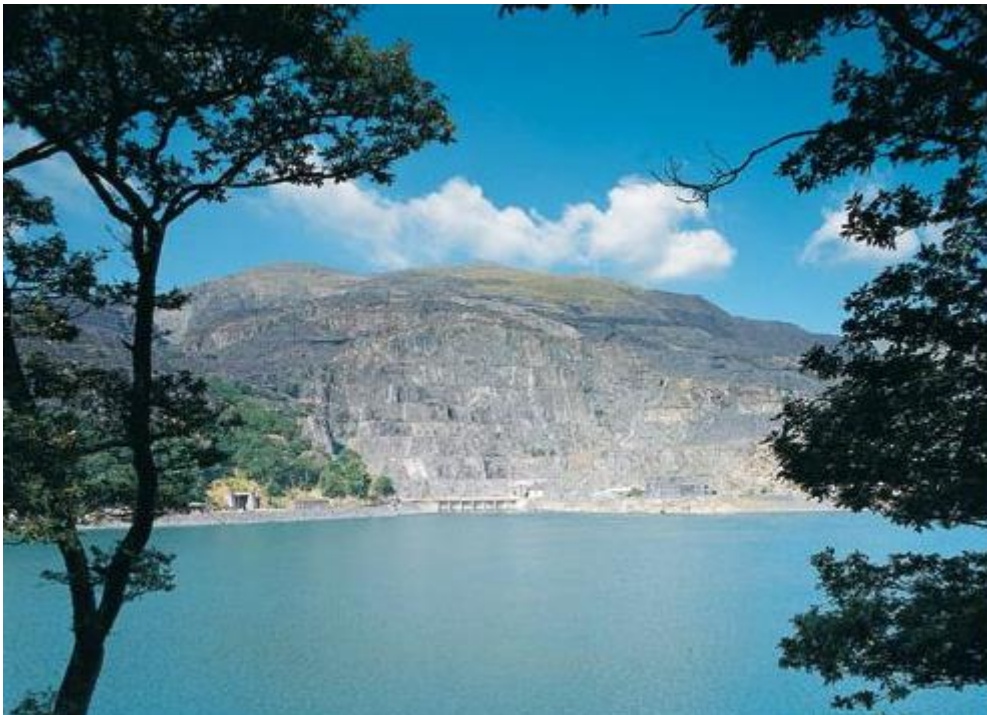
#### **4.1 Euroopan suurin pumppuvoimalaitos: Dinorwig**

Pohjois-Walesissa Iso-Britanniassa sijaitsee Dinorwigin voimalaitos, joka on tällä hetkellä yksi maailman suurimmista sekä samalla myös Euroopan suurin pumppuvoimalaitos 1728 MW teholla. Dinorwigin pumppuvoimalaitos avattiin entiseen liuskekilouhokseen Elidirin vuorelle vuonna 1984 ja on ollut siitä asti toiminnassa. Voimalaitos sijaitsee Snowdonian



kansallispuiston alueella, jonka vuoksi rakentaminen aloitettiin vuonna 1974 vuoren sisälle, jotta kansallispuiston maisema säilyisi. Ainakin 12 000 000 tonnia kiveä louhittiin luolien ja 16 kilometriä tunnelien rakentamiseksi. Taloudelliset kustannukset olivat noin 500 miljoonan euron luokkaa ja rakentaminen kesti noin 10 vuotta. (Newbery 2016, s. 10.)

Dinorwigin pumppuvoimalaitoksen varastoaltaat ovat molemmat jo olemassa olevia järviä. Llyn Marchlyn Mawr toimii yläaltaana, joka sijaitsee 503 metriä Llyn Peris ala-allasta korkeammalla. Dinorwigin pumppuvoimalaitos ja Llyn Peris ovat havaittavissa kuvassa 7.



**Kuva 7.** Dinorwigin pumppuvoimalaitos sekä ala-altaana toimiva järvi Llyn Peris (Electric Mountain 2021).

Itse voimalaitos sijaitsee noin 750 metriä vuoren syvyydessä ja turbiinihalli 71 metriä Llyn Perisin vedenpinnan alapuolella. Turbiinihallin pituus on 180 metriä, leveys 23 metriä ja korkeus 51 metriä. Turbiineja on yhteensä kuusi kappaletta käänteisiä Francis-turbiineja ja jokaisen teho on 288 MW. Dinorwigin pumppuvoimalaitos on tarkoitettu lyhytaikaiseksi energiavarastoksi toimimaan apuna äkillisissä kysynnän muutoksissa ja taajuuden hallinnassa. Se on suunniteltu käynnistymään lyhyellä varoitusajalla: laitoksen käynnistyminen täyteen tehoonsa kestää vain noin 16 sekuntia. Dinorwigin pumppuvoimalaitoksella on näin ollen maailman nopein laitoksen käynnistymisaika. Laitos ei tarvitse ulkoista

voimanlähdettä käynnistyäkseen, vaan pystyy aloittamaan toimintansa heti seisokista. Yläaltaan purkamisvaiheessa vesi päästetään virtaamaan 1695 metriä pitkää ja 10,5 metriä halkaisijaltaan olevaa matalapainetunnelia pitkin 9,5 metriä halkaisijaltaan olevaan korkeapainetunneliin, josta vesi virtaa turbiineille. Purkamisvaiheen kesto on noin viisi tuntia ja latausvaiheen kesto täysinäiseksi altaaksi kestää noin kuusi tuntia. Suurin virtaama yläaltaan purkamisen aikana on  $420 \text{ m}^3/\text{s}$  ja ladattaessa  $384 \text{ m}^3/\text{s}$ . Lisäksi laitos toimii noin 78 % hyötysuhteella, joka on pumppuvoimalaitoksille tunnusomainen arvo. Hyötysuhde voisi olla 85 % luokkaa, kuten vesivoimalla, mutta pumppauksen aikaiset komponenttihäviöt laskevat hieman sitä. (Electric Mountain 2021; Ter-Gazarian 2020, s. 97-100.)

## **5 KANNATTAVUUS**

Ennen pumppuvoimalaitoksen rakennuttamista tulee huomioida sen suunnittelussa rakennuskustannukset, kohteen ominaisuudet sekä komponenttien tehokkuuteen vaikuttavat tekijät, jotta osataan määrittää oikeanlainen laitosrakenne. Maantieteelliset tekijät, kuten pinnanmuodot ja korkeusero, lumi- ja maanvyörymäriskit sekä veden saatavuus ja sen määrä uudella kohteella on myös tärkeä selvittää. Mahdollisen laitospaikan tulee sijaita lisäksi riittävällä etäisyydellä sähkönsiirtoverkoista, jotta siirtokustannukset pysyisivät kohtuullisina. (Alami 2020, s. 55-56, 60.) Tässä luvussa tullaan keskittymään pumppuvoimalaitoksen rakennuttamiseen liittyviin etuihin ja haasteisiin, tehokkuuteen vaikuttaviin tekijöihin sekä kustannuksiin.

### **5.1 Pumppuvoimalaitoksen edut ja haasteet**

#### **5.1.1 Tekniset ominaisuudet**

Pumppuvoimalaitoksen parhaita teknisiä puolia on sen kyky energiavarastona toimia nopeasti sähkön kysynnän huippuhetkinä. Säättövoimaa tarvitaan jännitehuippujen ja -kuoppien tasaamiseen, tehotasapainon säätämiseen sekä estämään sähköjärjestelmää kaatumasta. Pumppuvoimalaitosten käynnistymisajat ovat maailman nopeimpien luokkaa. Käynnistymisen täyteen tuotantoon kestää vain muutamasta sekunnista muutama minuutti riippuen laitoksen rakenteesta. Pumppuvoimalaitoksen etuna on sen suuri kokoluokka, jonka ansiosta vettä voidaan valuttaa ja tuottaa siten sähköenergiaa useiden tuntien tai päivän ajan. Yläaltaaseen varastoitu vesi normaalioloissa ei juuri purkaudu itsestään ajan kuluessa, jolloin

häviöt tapahtuvat pääosin toimintatilassa johtuen komponenteista. Pumppuvoimalaitokset ovat myös pitkäikäisiä, sillä niiden elinkaaren on arvioitu olevan noin 40-80 vuotta. Tämä mahdollistaa pumppuvoimalaitoksille tärkeän roolin pitkäaikaisessa energianhuoltojärjestelmien hallinnassa ja suunnittelussa. (Letcher 2016, s. 27; EERA 2016; Harrison & Hester 2019, s. 49-50.)

Pumppuvoimalaitoksen haasteina on, että se tarvitsee suuren maapinta-alan ja sopivan sijainnin. Optimaalisinta pumppuvoimalaitokselle on jyrkkä tai vuoristoinen maasto, jossa on tarjolla riittävästi korkeuseroja. Tyypillinen pumppuvoimalaitos tarvitsee 200-300 metrin korkeuseron sekä varastointialtaat, joiden tilavuudet ovat noin  $10 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Samoin jo valmiiksi paikalla oleva vesimuodostuma, kuten järvi tai joki, helpottaa merkittävästi laitoksen rakennuttamista, sillä laitos tarvitsee huomattavan määrän vesivarantoa. Trooppisilla seuduilla tulee myös huomioida altaiden optimaaliset pinta-alat, sillä vettä voi haihtua ilmakehään, jos pinta-ala on kovin suuri. Joitakin innovatiivisia ratkaisuja on esitetty haihtumisen vähentämiseksi, kuten niin kutsutut varjopallot. Kuvassa 8 Kaliforniassa Silver Lake -järvellä laitettiin Ivanhoen varastoaltaan pinnalle kellumaan muovipalloja. Myöhemmin havaittiin muun muassa veden haihtumisen lieventyneen.



**Kuva 8.** Varjopallot Ivanhoen varastoaltaalla (Alami 2020, s. 57).

Haihtumisen lisäksi vesihäviöitä voi aiheutua maaperän halkeamien kautta. Geologisista olosuhteista riippuen voi varastoaltaiden vuoraaminen esimerkiksi savella olla tarpeellista. (Letcher 2016, s. 27; Alami 2020, s. 57.)

### 5.1.2 Taloudelliset ominaisuudet

Uusiutuvan energian käytön kasvu on nostanut uudelleen kiinnostusta pumppuvoimalaitosten rakentamista kohtaan. Pumppuvoimalaitoksen ollessa suuren kokoluokan varastointikeino sen taloudellisena etuna on käyttötilan aikaisten sekä huoltamiseen vaadittujen kustannusten alhaisuus. Se on myös energian varastointitavoista kaikista kustannustehokkain ratkaisu, koska sen LCOE (*levelised cost of electricity*) arvo on vain noin 120 €/MWh. Nikkelikadmiumakuilla vastaava arvo on taas noin 421 €/MWh. LCOE tarkoittaa laitoksen elinkaaren ajalle laskettua nettokustannusta energiayksikköä kohden, joka aiheutuu investoinneista, rakentamisesta, käytön ja huoltamisen kustannuksista sekä laitoksen purkamisesta. LCOE arvolla voidaan karkeasti vertailla eri tuotantomuotojen rakentamisen kannattavuutta. (Letcher 2016, s. 27; Harrison & Hester 2019, s. 50, 88-89.)

Pumppuvoimalaitoksen suurimpana taloudellisena haasteena on runsaan alkupääoman sijoittaminen. On arvioitu, että pääomakustannukset ovat keskimäärin noin 585-2340 € luokkaa jokaista asennettua kilowattia kohden pumppuvoimalaitoksen kapasiteetissa. Sen vuoksi laitoksen maantieteellisellä sijoittamisella on tärkeä osa kustannusten hillitsemiseksi. Esimerkiksi, jos laitoksen rakentamiskohteella joudutaan tekemään paljon louhimistyötä, uuden laitoksen hinta voi nousta korkeaksi. Aiemmassa luvussa esitellyn Dinorwigin pumppuvoimalaitoksen rakentamisessa jouduttiin louhimaan luolia ja useita kilometrejä tunnelia vuoren sisään, jolloin investointikustannukset olivat noin 500 miljoonaa euroa. Maailman viidenneksi suurimman Lundingtonin pumppuvoimalaitoksen investointikustannukset olivat vain noin 270 miljoonaa euroa vähäisemmän louhintatarpeen vuoksi (Dames & Moore 1981, s. 2.36). Toisaalta tulee huomioida, että investointikustannukset riippuvat siitä, milloin investointi on tehty. Eri vuosina rahan arvo voi vaihdella ja näin ollen aiheuttaa epätarkkuutta investointien arvioinnissa ja vertailussa.

Suurten alkuinvestointien johdosta laitoksen takaisinmaksuaika, eli kuinka nopeasti investointikustannukset on saatu kokonaan katettua, voi kestää vuosikymmenten ajan. Näin ollen epävarmuus pitkäaikaisessa rahallisessa tuotossa on suuri. Lisäksi pumppuvoimalaitoksilla on pitkä rakentamisaika, joka voi kestää vuosista yli vuosikymmeneen. Näistä syistä pumppuvoimalaitokset eivät ole välttämättä kaikista ihanteellisimpia investointeja kustannusten kattamiseksi nykyisissä markkinalähtöisissä energiajärjestelmissä. (Letcher 2016, s. 27; EERA 2016; Harrison & Hester 2019, s. 50.)

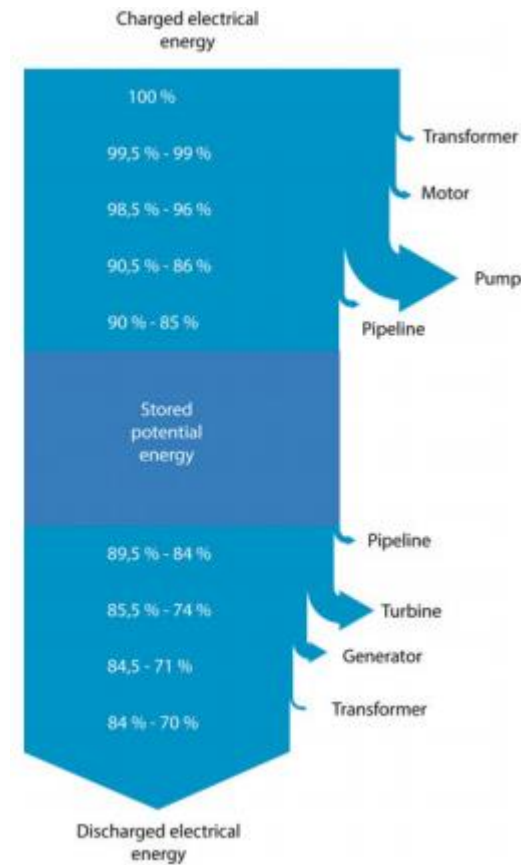
### 5.1.3 Ympäristövaikutukset

Potentiaalista pumppuvoimalaitoskohdetta harkittaessa tulee huomioida sen ympäristöön aiheuttamat vaikutukset. Pumppuvoimalaitoksia suunnitellaan usein rakennettavaksi luonnonkauniisiin sijainteihin vuoristoille, mistä voi aiheutua sosiaalisia ja ekologisia ongelmia. Siksi pumppuvoimalaitosten rakentamista varten on tehty tiukat ympäristöstandardit, jotka rakennusprojektin tulee täyttää ennen aloittamista. Tämän vuoksi monet laitoshankkeet ovat estyneet. Pumppuvoimalaitosten rakentamiseen kuuluu usein patoaltaiden muodostaminen, joka voi saada aikaan muutoksia joen ekosysteemeissä. Padottu jokiallas todennäköisemmin aiheuttaa tulvia, mikä voi johtaa pahimmillaan varsinkin kuivilla seuduilla jokea ympäröivän ekosysteemin tuhoon muutoksen takia. Vaikka asutus on pyritty pitämään aluesuunnittelulla riittävällä turvaetäisyydellä tulvimiselta, joskus tulviminen voi yllättää asutuksetkin ja aiheuttaa näin hankaluuksia asuinympäristöille. Veden pumppaamiseen liittyviä haasteita ovat taas veden lämpötilan nousu sekä altaan pohjasedimenttien sekoittuminen, mitkä heikentävät vedenlaatua. Samoin vedenlaatuun voi heikentävästi vaikuttaa laakerien voiteluaineiden käyttö, jos sitä pääsee vuotamaan veteen. Hyvällä teknisellä suunnittelulla voidaan kuitenkin yrittää hillitä näitä haasteita. Esimerkiksi veden lämpötilan noususta aiheutuvaa mahdollista happikatoa voidaan kompensoida hapen ruiskutusjärjestelmällä. Pohjasedimenttien sekoittumista voidaan puolestaan hallita vedenotto- ja ulostuloaukkojen rakennesuunnittelulla. Pumpatessa tulee ottaa huomioon myös kalojen kulkureitit, sillä kalat eivät selviydy todennäköisesti voimalaitosprosessin läpi. Tämän vuoksi on kehitelty joitakin teknisiä ratkaisuja, kuten kalojen pelotteita, jotka ajavat kalat pois vaarallisissa kohdissa. (Letcher 2016, s. 29; EERA 2016; Harrison & Hester 2019, s. 47.)

## 5.2 Hyötysuhde

Hyötysuhde kertoo, kuinka suuri osa syötetystä energiasta saadaan otettua käyttöön haluttuna energiana. Eli pumppuvoimalaitoksella se kertoo, kuinka suuri osa laitokselle syötetystä energiasta saadaan hyödynnettyä laitoksen energiantuotantona. Hyötysuhde lasketaan jakamalla tuotettu sähköenergia pumppaamiseen kuluvalla sähköenergialla. Pumppuvoimalaitosten hyötysuhteet ovat aikaisemmin vanhemmissa laitoksissa olleet vain alle 60 % luokkaa, mutta nykyisissä laitoksissa hyötysuhteet ovat noin 70-85 % uusien teknologioiden ansiosta. Latausvaiheessa kuluu siis enemmän energiaa kuin purkamisvaiheessa, mikä on

huomattavissa kuvan 9 perusteella. Kuvassa on havainnollistettuna kuinka paljon pumppuvoimalaitoksen komponentit aiheuttavat häviöitä.



**Kuva 9.** Pumppuvoimalaitosprosessin lataus- ja purkamisvaiheen häviöt (Sterner & Stadler 2019, s. 508).

Pumppuvoimalaitoksen kokonaishyötysuhde purkamis- sekä latausvaiheelle lasketaan kertomalla komponenttien hyötysuhteet keskenään yhtälöllä

$$\eta_{kok} = \eta_{putki} \eta_{P,T} \eta_{M,G} \eta_{muuntaja} \quad (1)$$

jossa  $\eta_{kok}$  on pumppuvoimalaitoksen kokonaishyötysuhde [-]

$\eta_{putki}$  on putkilinjojen hyötysuhde [-]

$\eta_{P,T}$  on pumpun/turbiinin hyötysuhde [-]

$\eta_{M,G}$  on moottorin/generaattorin hyötysuhde [-]

$\eta_{\text{muuntaja}}$  on muuntajan hyötysuhde [-]

Kaikista uudenaikaisimmilla pumppuvoimalaitoksilla voidaan päästä lähemmäs 85 % hyötysuhdetta. Merkittävimmät häviöt koko lataus- ja purkamisvaiheen aikana aiheutuvat pumpusta ja turbiinista. Jos näiden hyötysuhteita saadaan parannettua, voidaan parhaiten vaikuttaa hyötysuhteen nostamiseen. (Letcher 2016, s. 25; Harrison & Hester 2019, s. 50; Sterner & Stadler 2019, s. 508.)

Hyötysuhteeseen vaikuttaa komponenttien lisäksi myös pudotuskorkeus. Suuremmalla korkeuserolla ylemmällä varastointialtaalla on suurempi potentiaalienergia seuraavan yhtälön mukaisesti

$$E_p = \frac{mg\Delta h}{V} = \rho g\Delta h \quad (2)$$

jossa  $E_p$  on veden potentiaalienergia [J]

$m$  on varastoidun veden massa [kg]

$g$  on putoamiskiihtyvyys [ $\text{m/s}^2$ ]

$\Delta h$  on altaiden korkeusero [m]

$V$  on altaan veden tilavuus [ $\text{m}^3$ ]

$\rho$  on veden tiheys [ $\text{kg/m}^3$ ]

Varastoaltaiden korkeusero tulee olla vähintään 100 metriä ollakseen kannattava, jos pumppuvoimalaitos toimii pelkästään altaaseen varastoidulla vedellä. Joillakin laitoksilla korkeusero on jopa yli 1000 metriä. Tällöin kuitenkin tarvitaan erillinen pumppu ja turbiini tai monivaiheinen pumpputurbiini häviöiden kohtuullisena pitämiseen, sillä komponenttien ylikuormittaminen aiheuttaa lisähäviöitä. On myös laskettu, että parhaimmilla turbiineilla tarvitaan 400 000 kg vettä jokaista pystysuoraa metriä kohden. Huonommilla turbiineilla sama tarve voi olla 450 000 kg tai jopa enemmän. (Sterner & Stadler 2019, s. 508; Alami 2020, s. 55-56; Letcher 2016, s. 40.)

### 5.3 Kustannukset

Pumppuvoimalaitoksen suurin ja merkittävin kustannus on alussa tarvittava pääoma, kuten tässä pääluvussa jo mainittiin aiemmin. Se voi vaihdella laajasti rakennettavan kohteen mukaan. Tarvittavan pääoman määrittää laitoksen ja sen komponenttien suuruus, maantieteellinen sijainti sekä rakennetaanko laitos alkutekijöistä vai onko kohteella jo valmiiksi pinnanmuodollisesti suotuisat olosuhteet. Entiseen laitos- tai kaivoskohteeseen pumppuvoimalaitoksen rakentaminen on näin ollen kannattavampaa kuin täysin uuden laitoksen rakentaminen. Samoin kustannusten kannalta on merkitystä, rakennetaanko pienen vai suuren kokuokan pumppuvoimalaitos. Esimerkiksi Saksan suurimman pumppuvoimalaitoksen Goldisthalin hinta oli vain 600 euroa jokaista asennettua kilowattia kohden, kun taas joillakin Saksaan rakennetuilla pienillä täysin uusilla laitoksilla hinnaksi on tullut jopa 4000-5000 euroa kilowattia kohden. Kustannuksia voidaan hillitä myös komponenttien valinnoilla. Esimerkiksi, jos pumppuvoimalaitoksella käytetään erillisen pumpun ja turbiinin sijaan Francis-pumpputurbiinia, voidaan pääomakustannuksissa säästää parhaimmillaan 30 %. (Stern & Stadler 2019, s 509-510.)

Pumppuvoimalaitoksen käyttö- ja huoltokustannukset ovat alhaisimpia verrattuna muihin energian varastointimenetelmiin. On arvioitu, että ne ovat tyypillisesti noin 5 euron luokkaa jokaista megawattituntia kohden. Esimerkiksi, jos pumppuvoimalaitos tuottaa sähköä vuodessa 3000 tuntia, olisivat käyttö- ja huoltokustannukset 15 000 euroa vuodessa jokaista megawattia kohden, eli 15 euroa kilowattia kohden. (Letcher 2016, s. 52.)

## 6 PUMPPUVOIMALAITOKSIEN SOVELTUVUUS SUOMESSA

Suomessa ei ole tällä hetkellä yhtäkään pumppuvoimalaitosta. Ainoastaan Jumiskon vesivoimalaitoksen yhteyteen on rakennettu muutama pumppuyksikkö, mutta ne toimivat vesivoimalan yhteydessä. Aikoinaan muutamia pumppuvoimalaitosprojekteja on yritetty saada Suomessa käyntiin, mutta ne ovat kaatuneet joko kannattamattomuus- tai ympäristösyihin. Verrattuna esimerkiksi muihin Euroopan maihin, kuten Sveitsiin, Saksaan ja Norjaan, Suomessa ei ole niin paljon sopivaa maastoa pumppuvoimalaitosta ajatellen. Suomen suurimmat korkeuserot ja ylänköiset alueet sijaitsevat pääosin Lapissa, jossa taas on eteläiseen Suomeen verrattuna vähemmän asutusta ja tarvetta sähköenergian kulutukselle. Nykyään on kuitenkin



keksitty erilaisia toteutustapoja pumppuvoimalaitoksen rakentamiselle, jolloin vuoristoinen maasto ei ole enää ainut ehto suotuisalle laitoskohteelle. Lisäksi tarve energian varastoinnille on koko ajan kasvussa uusiutuvien energianlähteiden lisääntyneen käytön myötä.

Tässä luvussa tullaan käsittelemään esimerkkejä muutamista Suomessa olleista pumppuvoimalaitosprojekteista ja syitä, miksi hankkeet eivät toteutuneet. Samalla tarkastellaan Suomeen mahdollisesti toteutuvia pumppuvoimalaitosprojekteja ja tutkitaan niiden erityispiirteitä. Luvussa tullaan myös pohtimaan edellisten lukujen pohjalta mitä muita mahdollisuuksia Suomella voisi olla pumppuvoimalaitosten osalta.

## **6.1 Menneet hankkeet**

### **6.1.1 Vaarunvuori**

Jyväskylästä etelään Keski-Suomessa Korpilahden Vaarunvuorelle oli jo 1970-luvulla suunnitteilla Suomen ensimmäinen pumppuvoimalaitos. Imatran Voima Oy:n, eli nykyisen Fortumin oli tarkoituksena rakentaa Korospohjan pumppuvoimalaitos kasvavaan säätövoiman tarpeeseen, sillä uusia ydinvoimalaitoksia oletettiin rakentuvan vielä 1990-luvulla. Se olisi ollut kokoluokaltaan 500 MW, eli noin yhden Loviisan ydinvoimalaitosyksikön kokoinen. Rakentamisen investointikustannuksiksi oli arvioitu noin 250 miljoonaa euroa. Vettä olisi pumpattu öisin ydinsähköllä ala-altaana toimivasta Päijänteen Korospohjanlahdesta yli 100 metriä korkeammalla olevaan yläaltaaseen ja laskettu turbiinin kautta noin 540 m<sup>3</sup>/s virtaamalla seuraavana päivänä ala-altaalle. Luontoarvokas Särkijärven lehtokorpi sijaitsi kuitenkin Vaarunvuoren huipulla, mikä olisi peittynyt noin neliökilometrin kokoisen yläaltaan alle. Tunnelit, hissikuilut ja koneasema olisi suunniteltu louhittavaksi kallion sisään sekä rinteesseen olisi rakennettu tunnelien suuaukkoja, tiestöä, kytkinkenttä ja henkilöstölle tiloja. Tämä herätti paljon vastustusta Korospohjan pumppuvoimalaitoshanketta kohtaan, kun havaittiin harvinaisten ja uhanalaisten kasvien ja eliöstön elävän tulevan työmaan ympäristössä. (Metsähallitus 2009, s. 32-33; Ramboll Oy 2014, s. 18.)

Pumppuvoimalaitoksen rakennuslupaa haettiin vuonna 1974 ja vuonna 1982 korkein hallinto-oikeus antoi hankkeelle kaikesta huolimatta rakennusluvan seuraavaksi kymmeneksi vuodeksi. Se kuitenkin lykkääntyi ydinvoiman lisärakentamisen jäätyminen sekä luonnonarvoja suojelevan Vaarunvuori-liikkeen tekemän vastustamisen myötä. Vuonna 1993 hankkeelle haettiin uusi rakennuslupa, jolle korkein hallinto-oikeus myönsi uuden luvan vuoteen

2001 saakka. Hanke kuitenkin kaatui 1990-luvun lopulla, sillä pohjoismaisten sähkömarkkinoiden asteittainen avautuminen johti säättövoiman tarpeen vähenemiseen. Myöhemmin Vaarunvuoren alue päättyi Metsähallitukselle, kun valtio osti sen ensin vuonna 2001 luonnonsuojelua varten. (Metsähallitus 2009, s. 33.)

### **6.1.2 Kilpisjärvi**

Enontekiön kuntaan Kilpisjärvelle on ollut vuonna 2014 suunnitteilla Ramboll Oy:n toimesta uusi Suomen ensimmäinen pumppuvoimalaitos. Alun perin pohdittiin Kilpisjärven vaihtoehdoksi Ounasjärveä, joka on toinen suurempi järviällä Enontekiön kunnassa. Teknisten arviointien perusteella päädyttiin kuitenkin suunnittelemaan hanke Kilpisjärvelle, jolloin Kilpisjärvi toimisi ala-altaana ja yläällä sijaitseva Laassavaaralla noin 160 metriä korkeammalla. Pumppuvoimalaitoksen tarkoituksena olisi ollut toimia säättövoimana Lammassoivin tuulivoimapuistolle, joka olisi sijainnut noin 24 kilometrin päässä suunnitellusta kohteesta. Tätä varten Lammassoivin tuulivoimapuistoon kaavailtiin rakennettavaksi vielä kaksi uutta kolmen megawatin tuulivoimalaa kolmen jo aiemmin rakennetun tuulivoimalan joukkoon. Pumppuvoimalaitoshanke mitoitettiin niin, että sillä voisi tuottaa Kilpisjärvelle kolmen vuorokauden ajaksi sähköä. Näin voitaisiin turvata alueen häiriötön sähkönsaanti, vähentää hävikkiä johtuen pitkistä sähkönsiirtoyhteyksistä sekä hyödyntää oman kunnan alueella tuotettua sähköenergiaa. Lisäksi laitoksen ei pitäisi laskelmien perusteella aiheuttaa altainen vähäisen korkeuden vaihtelun vuoksi haittoja alueen vesitaloudelle, järven ekosysteemille ja maisemalle. (Ramboll Oy 2014, s. 1, 18.)

Kilpisjärven pumppuvoimalaitoksen investointikustannuksiksi arvioitiin noin 13 miljoonaa euroa. Jos tuulivoimapuiston laajennuksen kustannukset lasketaan vielä mukaan, nousivat investointikustannukset noin 20 miljoonaan euroon. Hanketta ei ole vielä kuitenkaan toteutettu sen taloudellisen kannattamattomuuden vuoksi. Hintaaero tuotetun ja myydyin sähkön välillä arvioitiin riittämättömäksi. (Ruokangas 2014; Holopainen 2015.)

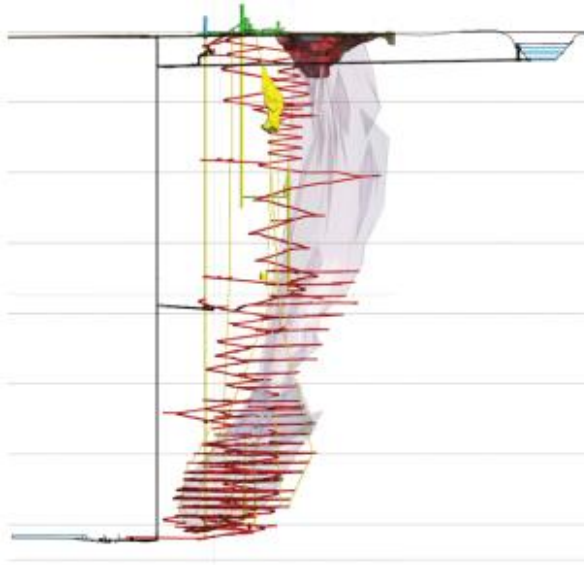
## **6.2 Nykyiset hankkeet**

### **6.2.1 Pyhäsalmi**

Pyhäjärvellä sijaitsevaan Pyhäsalmen vanhaan kaivokseen on ollut suunnitteilla vuodesta 2013 asti rakentaa Suomen ensimmäinen pumppuvoimalaitos. Se perustettaisiin Euroopan

syvimpään metallikaivokseen ja sillä olisi maailman suurin pudotuskorkeus, joka on 1400 metriä. Kaivoksesta arvioitiin malmin ehtyvän vuoteen 2019 mennessä, jolloin kaivos olisi valmis uuteen käyttötarkoitukseen. Pumppuvoimalaitoksen lisäksi vanhasta kaivoksesta kilpaili muun muassa datakeskus vakaiden olosuhteiden ja valmiin sähköinfrastruktuurin takia. Toisaalta vanhasta kaivoksesta olisi voinut tulla myös tutkimuskeskus. Esimerkiksi Cernin suunnittelema hiukkasilmaisoin oli vähällä päätyä Pyhäsalmen kaivokseen, koska sen arvioitiin olevan sille Euroopassa paras sijainti. Cernin hanke päättyi lopulta Yhdysvaltoihin. Samoin kaivoksen vakaista olosuhteista kiinnostuivat kasvien ja hyönteisten kasvattajat, jotka haluavat tutkia niiden kasvattamista maanalaisissa olosuhteissa. Pumppuvoimalaitos kuitenkin vei voiton kaikista vaihtoehdoista. (Lampila 2019; TEM 2019b, s. 382-383.)

Pumppuvoimalaitoshanke on melkein jo kerran kaatunut vuonna 2015, koska kannattavuuslaskelmat eivät puoltaneet hankkeeseen investoimista (Holopainen 2015). Pyhäsalmen kaivokseen suunniteltiin rakennettavaksi alustavasti huomattavasti suurempaa laitosta, jonka koko olisi ollut alustavasti 200 MW. Tarvittaessa myöhemmin olisi voitu asentaa 200 megawatin turbiineja lisää, kun laitoksen kokoa haluttaisiin suurentaa. Investointikustannukset hankkeelle arvioitiin olevan vähintään 200 miljoonaa euroa, mikä johti lopulta hankkeen jäädyttämiseen. (Lukkari 2014.) Kuitenkin vuonna 2016 Pöyry teki uusia kannattavuuslaskelmia Pyhäsalmen kaivoksen pumppuvoimalaitoshanketta varten. Uuden selvityksen mukaan alustavasti 75 MW laitos olisi kannattavin, jota voitaisiin taas tarvittaessa laajentaa jopa 400 MW. Tämän pienemmän laitoksen varastointikapasiteetti olisi näin ollen 530 MWh ja vesialtaan tilavuus 162 000 m<sup>3</sup>. Yläaltaana toimisi vanha avolouhos, josta vesi laskisi 1400 metriä turbiinien läpi maanalaisen kaivoksen pohjalle sopivaksi muokattuun paikkaan. Kuvassa 10 on esitettyinä kaivoksen sivuprofiili, jossa oikealla on yläaltaana toimiva vanha avolouhos.



**Kuva 10.** Pyhäsalmen kaivoksen sivuprofiili (Pyhäjärven Callio 2021).

Yläaltaan purkaminen kestäisi noin seitsemän tuntia, eli aika, jolloin laitoksella voidaan tuottaa sähköä. Investointikustannukset arvioitiin taas noin 100 miljoonan euron suuruisiksi, eli ainakin puolet halvemmaksi kuin aiemmin suunniteltu suurempi hanke. (Lukkari 2018; Pyhäjärven Callio 2021.) Lopulta vuonna 2019 ruotsalaisyritys Pumped Hydro Storage AB yhteistyössä paikallisen Pyhäjärven Callio kanssa julkistivat rakentavansa demolaitoksen Pyhäsalmen kaivokseen. Aluksi rakennettaisiin vain pieni pilottilaitos, jota voitaisiin laajentaa täysikokoiseksi 50-75 MW laitokseksi. Tämän demovaiheen rakentamisen arvioidaan olevan valmis vuonna 2022, jolloin laitos voitaisiin ottaa ensimmäisiin koekäyttöihin. Pilottilaitos tulisi alkuun olemaan kooltaan vain 2-8 MW luokkaa ja noin 800 metrin syvyydessä. Näin ollen rakentaminen onnistuisi siitä huolimatta, vaikka kaivos olisi vielä toiminnassa. Kaivos sulkeutuu lopullisesti vuonna 2021. (Lampila 2019; Laatikainen 2019a; Pyhäjärven Callio 2021.)

Täysikokoinen 75 MW laitos voisi tuottaa vuodessa säätösähköä 193 GWh edestä, jos laitosta ajettaisiin kerran päivässä. Tämä tarkoittaisi laitoksen 77 % hyötysuhteella, että laitoksen lataamiseen tarvittaisiin sähköenergiaa noin 250 GWh vuodessa. Tosin laitoksen ajoja tulee olemaan todennäköisesti vähemmän kuin kerran päivässä. (Laatikainen 2019a.) Valtion teknillinen tutkimuskeskus VTT on arvioinut laskelmissaan, että 75 MW pumppuvoimalaitos voisi tuottaa jopa 9,5 miljoonaa euroa tuloja vuosittain, sillä käyttö- ja huoltokustannukset ovat alhaiset. Eli laitoksen takaisinmaksuaika 100 miljoonalle eurolle olisi arviolta 20-30 vuotta, jos saaduista tuloista puolet kuluu investoinnin kuolettamiseen, eikä laitosta

päätetä laajentaa. Laitoksen käyttöiän on arvioitu olevan yli 50 vuotta, mikä tekisi laitoksen rakentamisesta näin ollen kannattavaa. (Pyhäjärven Callio 2021; Lampila 2018.)

### **6.2.2 Ahvenanmaa**

Ahvenanmaan etelärannikolla sijaitsevalla Lilla Båtskärin saarella on vanha merenalainen Nyhamnsgruvanin rautakaivos, jonka omisti aikoinaan Vuoksenniska Oy. Kaivoksen syvyys on noin 250 metriä ja se on täynnä vettä. Lilla Båtskärin, viereisen Stora Båtskärin ja parilla muulla pienemmällä viereisellä saarella sijaitsee ruotsalaisyritys Allwinds Ab:n tuulivoimapuisto. Pienen kahden megawatin pumppuvoimalaitoksen rakennuttaminen tuulivoimapuiston yhteyteen parantaisi tuulivoimaloiden toimintaa, kun ylijäämäsähköä voitaisiin tallettaa pumppuvoimalaitokselle. Sama ruotsalaisyritys Pumped Hydro Storage AB olisi toteuttamassa tätäkin pumppuvoimalaitoshanketta kuin Pyhäsalmen kaivoksella. Laitoksen yläaltaana toimisi Itämeri ja ala-altaana Pyhäsalmen tapaan vanhan kaivoksen pohjalle. Varastointikapasiteetti olisi 8 MWh. Ahvenanmaan pumppuvoimalaitoshanke on osana Smart Energy Åland -hanketta, jonka on perustanut Flexens Oy Ab. Hankkeen investointikustannuksien on arvioitu olevan noin viisi miljoonaa euroa. (Lampila 2019; Laatikainen 2019b.)

Tulevaisuudessa Ahvenanmaalle on kaavailtu suurta tuulivoimahanketta, jossa tuulivoimaloiden yhteenlaskettu teho olisi 6 GW. Merensyvyys sekä tuuliolosuhteet ovat laskelmoitu olevan optimaaliset merituulivoimaloiden rakentamiselle Ahvenanmaan etelä- ja pohjoisrannikon seuduilla. Näin ollen tarve energian varastoinnille tulee olemaan ennen pitkää suurta myös Ahvenanmaalla. (Laatikainen 2020.)

## **6.3 Mahdollisuudet**

Pumppuvoimalaitosten mahdollisuudet Suomen olosuhteissa tulevat suurimmaksi osaksi olemaan vanhoissa maanalaisissa kaivoksissa. Tavanomaisen pumppuvoimalaitoksen rakentamiseen vaadittavia korkeita pinnanmuotoja ei Suomessa juuri ole, eikä hyvin pitkään aikaan tule olemaan geologisten liikuntojen seurauksena. Pohjois-Suomessa voisi olla maantieteellisesti sopivaa maastoa perinteisen pumppuvoimalaitoksen rakentamiseen, mutta etäisyydet sähkönsiirtoverkkoihin voivat olla harvaan asutuilla alueilla vielä liian pitkät. Toisaalta kiristyvät ympäristöstandardit suosivat enemmän Pyhäsalmen kaivoksen kaltaisia ratkaisuja, sillä suurilla perinteisillä laitoksilla on huomattavammat vaikutukset ympäristöönsä. Panostaminen uusiutuvien energianlähteiden osuuden kasvattamiseen, kuten Suomen

nykyiset ja tulevaisuuden suuret tuulivoimahankkeet ovat nostaneet energiavarastojen tarpeellisuuden uudelle tasolle. Toistaiseksi pumppuvoimalaitokset ovat olleet kaikista energian varastointimenetelmistä kannattavimpia suuren kokonsa, pitkäikäisyyden ja nopean käynnistymisensä ansiosta. Samoin alhaiset käyttö- ja huoltokustannukset sekä minimaalinen itsestään purkautuvuus ovat selvästi pumppuvoimalaitoksen etuja.

Suomen tulevaisuus pumppuvoimalaitosten osalta tulee todennäköisesti olemaan maanalaisissa laitoksissa tai uusimmissa laitostyypeissä. Esimerkiksi paineilmapumppuvoimalaitos ei myöskään ole riippuvainen maantieteellisestä sijainnista, mutta idea on vielä hyvin uusi ja vaatii paljon tutkimusta. Vaikkei maanalaisia pumppuvoimalaitoksia ole vielä yhtäkään toiminnassa, niiden mahdollisuuksia tutkitaan laajasti ympäri maailmaa. Saksan Nordrhein-Westfalenin osavaltiossa vuonna 2018 käytöstä poistettuun Prosper-Hanielin hiilikaivokseen on suunnitteilla rakentaa 200 MW maanalainen pumppuvoimalaitos 600 metrin korkeuserolla. Samoin eripuolilla Australiaa vanhoihin kaivoksiin on liittynyt kiinnostusta pumppuvoimalaitoksien rakentamista koskien. Muun muassa Etelä-Australian osavaltiossa Adelaiden lähellä Highburyn suljettuun kaivokseen on suunnitteilla 300 MW laitos ja Queenslandin osavaltiossa vanhaan kultakaivokseen on suunnitteilla 250 MW laitos aurinkovoimaloiden yhteyteen. (Lukkari 2018; Colthorpe 2021.) Jos Suomi pääsee olemaan maanalaisten pumppuvoimalaitosten rakentamisen yksi edelläkävijöistä, siitä voi syntyä Suomelle uusi vientituote, kun muualle maailmaan tullaan rakentamaan vastaavanlaisia laitoksia.

## 7 YHTEENVETO

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena oli selvittää pumppuvoimalaitosten mahdollisuuksia Suomen energiantuotannossa. Työtä pohjustettiin aluksi selvittämällä pumppuvoimalaitoksen rakennetta ja toimintaperiaatetta. Sen pääkomponentit ovat pumppu, moottori, turbiini ja generaattori. Rakenteessa havainnoitiin, jos erillisen pumpun ja turbiinin sijaan käytettäisiin yhdistettyä pumpputurbiinia, voitaisiin komponenttien investointikustannuksissa säästää jopa 30 %. Laitoksen toiminta koostuu yksinkertaisesti kolmesta eri vaiheesta, jotka ovat lataus-, varastointi- ja purkamisvaihe. Latausvaiheessa sähkön ollessa halpaa vesi pumpataan ala-altaalta yläaltaalle. Vettä varastoidaan yläaltaalla siihen asti, kunnes se puretaan kalliimman sähkön aikaan.

Pumppuvoimalaitoksia tarvitaan tulevaisuudessa yhä lisääntyvissä määrin, kun energiaa tuotetaan enemmän uusiutuvilla lähteillä. Pumppuvoimalaitosten osuus maailman energian varastointimenetelmistä on 96 %, mikä tekee niistä ylivoimaisesti käytetyimmän varastointimenetelmän. Suuren kokonsa sekä nopean käynnistymisen ansiosta pumppuvoimalaitoksia voidaan käyttää myös apuna tehotasapainon säätämiseen, jännitehuippujen ja kuoppien taasaamiseen sekä suojaamaan sähköjärjestelmää kaatumiselta.

Tässä työssä tutustuttiin myös pumppuvoimalaitosten käytössä ja suunnitteilla oleviin toteutustapoihin. Tällä hetkellä maailman pumppuvoimalaitokset ovat rakennettu järvien, jokien ja merien yhteyteen, mutta uusia innovatiivisia keinoja ollaan kehittämässä. Esimerkiksi maanalaiset pumppuvoimalaitokset ovat lähitulevaisuudessa maailmalla nousemassa suosioon ympäristöystävällisyyden ja suurempien korkeuserojen tähden. Parhaita maanalaisia pumppuvoimalaitoksien rakennuskohteita todettiin olevan vanhat kaivokset, sillä tunneliverkoston ja luolien louhiminen täysin tyhjästä nostaisi huomattavasti investointikustannuksia.

Vuonna 2020 Kiinassa, Japanissa ja Yhdysvalloissa sijaitsevat noin puolet koko maailman pumppuvoimalaitoskapasiteetista, samoin viisi suurinta laitosta. Euroopan osuus maailman pumppuvoimalaitoskapasiteetista oli taas noin neljännes.

Pumppuvoimalaitoksen etuja ja haasteita pohdittiin teknisestä, taloudellisesta ja ympäristön näkökulmista. Tärkeimpiä etuja pumppuvoimalaitoksella olivat muun muassa suuri kokoluokka ja siihen nähden alhaiset käyttö- ja huoltokustannukset, nopea käynnistyminen,

vähäinen itsestään purkautuvuus ja pitkäikäisyys. Suurimpina haasteina olivat taas riippuvuus maantieteellisestä sijainnista sekä suuren alkupääoman tarve. Näistä syistä Suomessakin on kaatunut tai mennyt jäihin pumppuvoimalaitoshankkeita ympäristösyiden lisäksi. Suomen tämän hetken mittavat tuulivoimahankkeet ovat kuitenkin herättäneet uutta kiinnostusta suuren kokoluokan energian varastointia kohtaan. Pyhäjärvellä sijaitsevaan Pyhäsalmen vanhaan kaivokseen on rakentumassa mahdollisesti maailman ensimmäinen maanalainen pumppuvoimalaitos ja Ahvenanmaalla suunnitellaan vastaavaa laitosta. Vanhoissa kaivoksissa todennäköisesti piilee Suomen pumppuvoimalaitosten tulevaisuus.



## LÄHTEET

Alami, Abdul Hai. 2020. Mechanical Energy Storage for Renewable and Sustainable Energy Resources. Cham: Springer International Publishing. ISBN 978-3-030-33787-2.

Blakers, A., Stocks, M., Lu, B., Cheng, C. ja Nadolny, A. 2021. Global pumped hydro atlas [verkkoaineisto]. Canberra: The Australian National University. [Viitattu 16.6.2021]. Saatavissa: <http://re100.eng.anu.edu.au/global/>.

Colthorpe, Andy. 2021. First new pumped hydro plant in Australia for nearly 40 years approaches financial close. London: Energy Storage News. [Viitattu 23.7.2021]. Saatavissa: <https://www.energy-storage.news/news/first-new-pumped-hydro-plant-in-australia-for-nearly-40-years-approaches-fi>.

Dames & Moore. 1981. An Assessment of Hydroelectric Pumped Storage. Washington: Department of the Army Corps of Engineers Institute for Water Resources. [Viitattu 23.7.2021]. Saatavissa: <http://large.stanford.edu/courses/2014/ph240/galvan-lopez2/docs/IWR019-000001-000517.pdf>.

EERA. 2016. Pumped Hydro Energy Storage [verkkoaineisto]. Bryssel: European Energy Research Gate. [Viitattu 18.2.2021]. Saatavissa: [https://eera-es.eu/wp-content/uploads/2016/03/EERA\\_Factsheet\\_Pumped-Hydro-Energy-Storage.pdf](https://eera-es.eu/wp-content/uploads/2016/03/EERA_Factsheet_Pumped-Hydro-Energy-Storage.pdf).

Electric Mountain. 2021. Power Stations [verkkoaineisto]. [Viitattu 23.7.2021]. Saatavissa: <https://www.electricmountain.co.uk/Dinorwig-Power-Station>.

Energiateollisuus. 2020. Energiavuosi 2019 Sähkö [verkkoaineisto]. Helsinki: Energiateollisuus ry. [Viitattu 28.12.2020]. Saatavissa: [https://energia.fi/files/4360/Sahko-vuosi\\_2019\\_mediakuvat.pdf](https://energia.fi/files/4360/Sahko-vuosi_2019_mediakuvat.pdf).

Harrison, R. M. & Hester, R. E. 2019. Energy Storage Options and Their Environmental Impact. Royal Society of Chemistry. ISBN 978-1-78801-399-4.

Hendrick, P., Morabito, A., Spriet, J. & Vagnoni, E. 2020. Underground Pumped Storage Hydropower Case Studies in Belgium: Perspectives and Challenges. Basel: MDPI. [Viitattu 27.7.2021]. Saatavissa: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/15/4000/htm>.

- Holopainen, Hanna. 2015. Pumppuvoimala ei tuottaisi rahaa, mutta varmistaisi sähköt Kilpisjärvelle. Helsinki: Yleisradio Oy. [Viitattu 23.7.2021]. ISSN 1798-4734.
- IHA. 2020. Pumped storage hydropower [verkkoaineisto]. Lontoo: International Hydropower Association. [Viitattu 12.6.2021]. Saatavissa: <https://www.hydropower.org/factsheets/pumped-storage>.
- IRENA. 2015. Renewable Energy Prospects: United States of America. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency. [Viitattu 12.6.2021]. Saatavissa: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA\\_REmap\\_USA\\_report\\_2015.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA_REmap_USA_report_2015.pdf).
- Korpela, Aki. 2018. Suuren kokoluokan energiavarastointiteknologioiden teknis-taloudelliset näkymät. Tampere: Tampereen ammattikorkeakoulu. ISBN 978-952-7266-32-8.
- Laatikainen, Tuula. 2019a. Jopa 193 GWh sähköä vuodessa – Pyhäsalmen pumppuvoimalaa ajettaisiin vain kalliin sähkön aikana: ”Suomen suurin”. Tekniikka & Talous. [Viitattu 23.7.2021]. ISSN 0785-997X.
- Laatikainen, Tuula. 2019b. Myös Ahvenanmaalle suunnitteilla pumppuvoimala vanhaan kaivokseen – asialla Pyhäsalmeilta tutut ruotsalaiset, pörssi tähtäimessä. Tekniikka & Talous. [Viitattu 23.7.2021]. ISSN 0785-997X.
- Laatikainen, Tuula. 2020. Satoja merituulivoimaloita Ahvenanmaalle – sähköntuotanto vastaisi jopa 4 ydinvoimalaa. Tekniikka & Talous. [Viitattu 23.7.2021]. ISSN 0785-997X.
- Lampila, Jouko. 2018. Toteutuuko Pyhäsalmen kaivoksen energiavarasto? [verkkoaineisto]. Kestävä Energiatalous. [Viitattu 23.7.2021]. Saatavissa: <https://www.energiatalous.fi/?p=1931>.
- Lampila, Jouko. 2019. Suomeen kehitetään pumppuvoimaloita [verkkoaineisto]. Kestävä Energiatalous. [Viitattu 23.7.2021]. Saatavissa: <https://www.energiatalous.fi/?p=2547>.
- Letcher, Trevor. 2016. Storing Energy: with Special Reference to Renewable Energy Sources. Elsevier. ISBN 978-0-12-803449-1.

Lukkari, Jukka. 2014. Pyhäsalmen pumppuvoimala etenee. Tekniikka & Talous. [Viitattu 21.7.2021]. ISSN 0785-997X.

Lukkari, Jukka. 2018. Suomi, Saksa, Australia...Kaivoksille halutaan uusi elämä sähkövarastoina – näin toimii pumppuvoimala maan uumenissa. Tekniikka & Talous. [Viitattu 21.7.2021]. ISSN 0785-997X.

Metsähallitus. 2009. Vaarunvuorten Natura 2000 -alueen hoito- ja käyttösuunnitelma. Metsähallitus: Etelä-Suomen luontopalvelut. ISBN 978-952-446-708-7.

Myllyvirta, Lauri. 2020. Analysis: China's new 2030 targets promise more low-carbon power than meets the eye [verkkoaineisto]. London: Carbon Brief Ltd. [Viitattu 23.7.2021]. Saatavissa: <https://www.carbonbrief.org/analysis-chinas-new-2030-targets-promise-more-low-carbon-power-than-meets-the-eye>.

Newbery, David. 2016. A simple introduction to the economics of storage: shifting demand and supply over time and space. Cambridge: University of Cambridge. [Viitattu 29.6.2021]. Saatavissa: <https://www.jstor.org/stable/resrep30345>.

Pohjolan Voima. 2020. Jumiskon voimalaitos [verkkoaineisto]. Kemijärvi: PVO-Vesivoima Oy. [Viitattu 1.4.2021]. Saatavissa: [https://www.pohjolanvoima.fi/wp-content/uploads/2020/09/Jumiskon\\_vesivoimalaitos\\_2020.pdf](https://www.pohjolanvoima.fi/wp-content/uploads/2020/09/Jumiskon_vesivoimalaitos_2020.pdf).

Pyhäjärven Callio. 2021. Energiavarasto [verkkoaineisto]. Pyhäjärvi: Pyhäjärven Callio. [Viitattu 23.7.2021]. Saatavissa: <https://callio.info/fi/energy-storage/opportunities/>.

Ramboll Oy. 2014. Tuulivoimalaitoksen ja siihen liitetyn energiavaraston liiketoimintamalli [verkkoaineisto]. Espoo: Ramboll Finland Oy. [Viitattu 23.7.2021]. Saatavissa: [https://docplayer.fi/3683119-Enontekion-kunta-tuulivoimalaitoksen-ja-siihen-liitetyn-energiavaraston-liiketoimintamalli.html#show\\_full\\_text](https://docplayer.fi/3683119-Enontekion-kunta-tuulivoimalaitoksen-ja-siihen-liitetyn-energiavaraston-liiketoimintamalli.html#show_full_text).

Ruokangas, Perttu. 2014. ”Pumppuvoimala ei uhkaa Kilpisjärveä”. Helsinki: Yleisradio Oy. [Viitattu 23.7.2021]. ISSN 1798-4734.

Sevänen, Sanna. 2020. Tuuli ja aurinko valtaavat markkinat, kun sähköstä tulee ilmastoystävällistä [verkkoaineisto]. Tampere: Tampereen yliopisto. [Viitattu 23.7.2021].

Saatavissa: <https://www.tuni.fi/unit-magazine/artikkelit/tuuli-ja-aurinko-valtaavat-markkinat-kun-sahkosta-tulee-ilmastoystavallista>.

Snowy Hydro. 2020. The Snowy Scheme [verkkoaineisto]. Cooma: Snowy Hydro. [Viitattu 12.6.2021]. Saatavissa: <https://www.snowyhydro.com.au/generation/the-snowy-scheme/>.

Sterner, Michael & Stadler, Ingo. 2019. Handbook of Energy Storage. Regensburg: University Regensburg, 2. painos. ISBN 978-3-662-55503-3.

Stocks, Carrieann. 2020. Largest pumped storage plants in operation and development. NS Energy Business. [Viitattu 23.7.2021]. Saatavissa: <https://www.nsenerybusiness.com/features/largest-pumped-storage-plants/>.

TEM. 2019a. Sähköntuotannon skenaariolaskelmat vuoteen 2050 [verkkoaineisto]. Helsinki: Työ- ja elinkeinoministeriö. [Viitattu 28.12.2020]. Saatavissa: <https://tem.fi/documents/1410877/2132100/S%C3%A4hk%C3%B6ntuotannon+skenaariolaskelmat+vuoteen+2050+%E2%80%93+selvitys+22.2.2019/8d83651e-9f66-07e5-4755-a2cb70585262/S%C3%A4hk%C3%B6ntuotannon+skenaariolaskelmat+vuoteen+2050+%E2%80%93+selvitys+22.2.2019.pdf>.

TEM. 2019b. Alueelliset kehitysnäkymät [verkkoaineisto]. Helsinki: Työ- ja elinkeinoministeriö. [Viitattu 23.7.2021]. Saatavissa: [https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161538/TEM\\_28\\_19\\_Aluelliset\\_kehitysnakymat\\_Kevat\\_2019.pdf](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161538/TEM_28_19_Aluelliset_kehitysnakymat_Kevat_2019.pdf).

Ter-Gazarian, Andrei. 2020. Energy Storage for Power Systems. Stevenage: The Institution of Engineering and Technology, 3. painos. ISBN 978-1-78561-868-0.

Tuulivoimayhdistys. 2020. Tuulivoimalat Suomessa [verkkoaineisto]. Jyväskylä: Suomen Tuulivoimayhdistys ry. [Viitattu 28.12.2020]. Saatavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tuulivoima-suomessa>.

Wolf, E. 2018. Physics and Technology of Sustainable Energy. Oxford: Oxford University Press. ISBN 978-0-19-876980-4.

XFLEX HYDRO. 2020. Grand Mason France [verkkoaineisto]. EU: The Hydropower Extending Power System Flexibility. [Viitattu 12.6.2021]. Saatavissa: <https://xflex-hydro.net/grand-maison>.