

Opinnäytetyö
Tuotantotalous
2020

Miikkael Rantala

PAINOVOIMAN KÄYTTÖ ENERGIAN VARASTOINTIIN

– 2020

OPINNÄYTETYÖ | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Tuotantotalous

Lokakuu 2020 | 35 sivua, 3 liitesivua

Miikkael Rantala

PAINOVOIMAN KÄYTTÖ ENERGIAN VARASTOINTIIN

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tarkastella mahdollisia energianvarastointitapoja ja selvittää, onko painovoimaan perustuvien energianvarastointikoneiden rakentamiselle perusteita. Lisäksi opinnäytetyössä tutkitaan, minkälaisia kustannuksia ja kustannustekijöitä rakentamiseen liittyy sekä mitkä ovat mahdollisia rakenteita painovoimakoneille.

Tutkimuksen toteutusmenetelmänä on tiedon etsiminen erilaisista akateemisista lähteistä sekä haastattelut ja yhteydenotot sähköpostitse ja puhelimitse.

Työllä pyritään lisäämään kiinnostusta energiansäilönnän mahdollisuuksiin ja korostaa energiansäilönnän kasvavaa merkitystä. Työ pyrkii antamaan laajan yleiskuvan aiheeseen. Painovoimajärjestelmien vertaaminen varsinkin akkuteknologiaan on nähty aiheelliseksi.

ASIASANAT:

akut, energia, energianvarastointi, litium, painovoima, pumppuvoima

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Industrial Engineering

October 2020 | 35 pages, 3 appendices

Miikkael Rantala

BUILDING GRAVITY BASED ENERGY STORAGE SYSTEMS

Purpose of this thesis work is to research possible energy storage methods and clarify whether it is possible to use gravity to build energy storage machines. What kind of expenses and cost factors there are in constructing these machines and what are possible models for gravity machines.

Research method in this thesis is looking for information from various academic sources also conducting interviews by email and over the phone.

Goal is to raise interest towards importance of energy storage and possibilities for storing energy. This work aims to give general overview towards the topic. Comparing gravity systems to alternatives, especially rapidly developing battery storage has been seen as key importance

KEYWORDS:

batteries, energy, energy storage, gravity, lithium, pumped hydro

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET	6
1 JOHDANTO	7
2 UUSIUTUVA ENERGIA	8
2.1 Energiansäilönnän tarve	8
2.2 Suomen energiankulutus	8
2.3 Maailman energiankysynnän ennustaminen	9
3 ENERGIAN VARASTOINNIN FYSIKAALINEN PERUSTA	10
3.1 Kemiallinen energianvarastointi	10
3.1.1 Lyijy-happoakut	11
3.1.2 Flow batteries	11
3.1.3 Li-ioniakut	11
3.2 Mekaaninen energianvarastointi	12
3.2.1 Paineilma CAES	12
3.2.2 Pumpattu vesi PHES	13
3.3 Sähköinen energianvarastointi	14
3.4 Lämpöenergian varastointi	14
3.5 Muut järjestelmät	15
4 ONKALO JA KAIVOKSET	17
4.2 Vesi	17
4.3 Kaivokset ja kaivostoiminta	17
Muutamia Euroopassa tyypillisiä kaivostyypppejä ovat suolakaivokset kuten myös kivihiilikaivokset. Ligniittiä kaivetaan tyypillisesti avoimessa kaivoksessa. Kovaa hiiltä voidaan kaivaa avolouhoksessa ja maanalaisessa kaivoksessa. Suolakaivokset sopivat maakaasun säilytykseen ja CAES-järjestelyihin Suomessa Timon kuilun syvyys Pyhäsalmen kaivoksessa on 1 410 m. (Menendez 2018, 498-499; Isokorpi 2020)	17
4.4 Muita käyttötarkoituksia hylätyille kaivoksille	18
5 PAINOVOIMAKONEEN TOTEUTUS	19
5.2 Painovoimaan perustuva pumppuvoimalaitos	19
5.3 Vuoreen rakennettava energianvarastointihissi	20

5.4 Muut mahdolliset rakenteet koneille	20
5.5 Koneen rakentamiseen liittyvien kustannusten ja hyötyjen arviointi	22
5.6 Arvio kustannuksista	25
6 VERTAILU MUIHIN SÄILYTYSJÄRJESTELMIIN	27
6.2 Vertailu muihin järjestelmiin	27
6.3 Akkuteknologian kehitys ja potentiaali	29
6.4 SWOT-analyysi	31
6.5 PESTLE-analyysi	31
6.6 Vertailu vaihtoehtoisiiin teknologioihin	33
7 POHDINTA	34
LÄHTEET	36

LIITTEET

Liite 1. Yksittäinen sylinteri 500 m syvään kaivokseen

Liite 2. 50 sylinteriä 500 m syvään kaivokseen

Liite 3. 500 m:n maanalainen järvi

KUVAT

Kuva 1. Pumppuvoimalaitoksen rakenne.	14
Kuva 2. Vedenpaineella toimiva painovoimakone.	19
Kuva 3. Painovoimajärven rakenne.	21
Kuva 4. Energianvarastointi tapojen vertailua.	28
Kuva 5. BNEF-ennuste akkujen hinnasta.	29

KÄYTETYT LYHENTEET

BNEF	Bloomberg New Energy Finance
CAES	Compressed-air energy storage
E_p	Potentiaalienergia
g	Putoamiskiihtyvyys 9,81 m/s ²
GWh	Gigawattitunti
h	Korkeus (m)
m	Massa (kg)
kWh	Kilowattitunti
li-ion	Litiumioniakku
MWh	Megawattitunti
MW	Megawatti
NiCd	Nikkeli-kadmiumakku
PHES	Pumped hydroelectric energy storage
VRLA	Valve regulated lead acid battery

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä käsitellään painovoiman käyttämistä energian varastointiin. Käsitteilyssä on erilaisten mahdollisten koneiden rakenne ja niiden mahdolliset kustannuslaskelmat. Erityisen kiinnostavia ovat kilpailuedut sekä minkälaiset markkinaolosuhteet tekevät niistä kannattavia. Painovoimakoneita verrataan kilpaileviin teknologioihin. Työssä kuvataan myös akkuteknologian kehitystä, koska se on merkittävin kilpailija.

Tarkoituksena on esitellä vaihtoehtoja energian varastointiin ja selvittää, minkälaisessa markkinatilanteessa painovoimakoneen rakentaminen on kannattavinta. On olemassa muutamia yrityksiä, jotka kehittävät painovoimaan perustuvia energiansäilöntäratkaisuja. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on esitellä niiden mahdollisuuksia potentiaalisesti kiinnostuneille yrityksille ja muille yhteisöille.

Akkuteknologia kehittyy nopeasti, mutta sen kustannukset eivät lähesty nollaa, vaan hinta asettuu lopulta jollekin tasolle. Jotta olisi mahdollista laskea energian säilytyksen kustannuksia, akkujen jälkeen on kehitettävä vaihtoehtoisia teknologioita. (Curry 2017 7)

Vesivoima on jo todistettua teknologiaa, ja sillä voidaan varastoida energiaa tai siirtää sen tuotantoa myöhempään ajankohtaan rakentamalla tekojärvi. Vettä voidaan myös pumpata korkealla olevaan altaaseen. Tässä puutteena on veden alhainen tiheys. On hankalaa rakentaa suuri allas ja saavuttaa riittävä tasoero. Mitä enemmän massaa voidaan nostaa ja mitä suurempi tasoero voidaan löytää, sitä enemmän potentiaalienergiaa voidaan varastoida. (Hydroelectric Power: How it Works, 2020.)

Potentiaalienergia lasketaan kaavalla $E_p = m \cdot g \cdot h$, jossa m on massa (kg), g on putoamiskiihtyvyys, $9,81 \frac{m}{s^2}$ ja h on korkeus (m). Kaavasta voidaan havaita, että massan vaikutus on yhtä suuri kuin korkeuden. Massan kaksinkertaistaminen on yhtä vaikuttavaa kuin korkeuden kaksinkertaistaminen. (Peda, 2020)

Energiateollisuus on maailman suurimpia ja pääomaintensiivisimpiä aloja. Vuosittaisen energiakaupan arvo lasketaan biljoonissa euroissa. Pienikin markkinaosuus energiamaarkkinoista riittää kannattavan toiminnan ylläpitämiseen. (Fortune, 2020.)

2 UUSIUTUVA ENERGIA

2.1 Energiansäilönnän tarve

Maailma siirtyy uusiutuvan energian käyttöön kasvavissa määrin. Uusiutuvan energian ongelmana on ollut, että sitä ei välttämättä ole saatavilla silloin, kun siihen on tarvetta. Tämä johtaa hinnanmuutoksiin markkinoilla. Hinnanmuutoksesta on mahdollista hyötyä, jos kehitetään tekninen ratkaisu, jolla energiaa voidaan säilöä, ostaa halvalla ja myydä kalliilla.

Aurinko ei paista öisin, tuuli on epätasainen ja ydinvoima on hidas reagoimaan kysynnän muutoksiin. Tässä suhteessa fossiiliset polttoaineet ovat edellä uusiutuvaa energiaa. Mikäli halutaan siirtyä fossiilisista polttoaineista kestävämpään tuotantoon, tarvitaan varasointiratkaisu. (Azarpour A. Zahedi G. 2012, 318–319)

Aurinkoenergiaan liittyen tunnetaan ilmiö nimeltä ”duck curve”. Tällä viitataan tilanteeseen, jossa energian kysyntä on alhaista päivällä, kun aurinkoenergiaa on saatavilla, mutta se kasvaa merkittävästi lähestyttäessä iltaa. Tästä seuraa ankan kaulan muotoinen kysynnän jyrkkä kasvu, kun vertaillaan ajanhetkeä ja kysyntää. (Burnett M, 2019.)

Vain vesivoima pystyy reagoimaan markkinoiden muutoksiin. Vesivoima perustuu sateeseen, joka nostaa veden korkeampaan tasoon. Tästä vesi valuu alas ja muodostaa jokia. Joet virtaavat vesistöihin, järviin ja meriin. Jos joelle rakennetaan pato, voidaan hyötyä veden virtauksesta ja muuttaa sitä sähköenergiaksi. On aiheellista miettiä, voidaanko potentiaalienergian eroa hyödyntää jossain toisessa ratkaisussa vesivoiman lisäksi. (Hydroelectric Power, 2020.)

2.2 Suomen energiankulutus

Suomen energiankokonaiskulutus on noin nelinkertaistunut aikavälillä 1970–2007 21 817 GWh:sta 90 374 GWh:hon. Tämän jälkeen kulutus on pysynyt suhteellisen tasaisena. Vuonna 2017 käytettiin 85 449 GWh. Yhtä päivää kohden tämä tekee 234,1 GWh energiaa. Suomen sähköenergian ja uusiutuvien energiamuotojen kysynnän voidaan olettaa kasvavan merkittävästi siirryttäessä pois fossiilisista lämmitysmuodoista ja sähköntuotannosta. Merkittävää kysynnän lisäystä aiheuttaa kivihiihen polton lopettaminen

sekä sähköautoilun yleistyminen. Maailman sähkönkulutus vuonna 2017 oli 25 570 TWh. (Energia.fi sähkötase 2019; IEA 2018.)

2.3 Maailman energiankysynnän ennustaminen

IEA:n raportin mukaan seuraavan 20 vuoden sisällä varsinkin aurinko- ja tuulivoiman osuus maailman energian tuotannosta tulee nousemaan merkittävästi. Muita kasvavia aloja ovat kaasu ja vesivoima. Vuonna 2035 aurinkovoima nousee maailman tärkeimmäksi sähköenergian lähteeksi. IEA:n raportti uskoo, että sähköenergian kysyntä nousee 40 000 TWh:n vuoteen 2040 mennessä. Suurin osa kysynnän kasvusta tapahtuu kehitysmaissa, Kiinassa ja Intiassa. (IEA 2019.)

Raportti esittää, että tarve joustavalle energiantuotannolle nousee merkittävästi enemmän kuin sähköenergian kysyntä yleisesti, noin neljäkymmentäkertaiseksi nykyisestä. Varastointikapasiteetin kasvu on ollut yli 10 % vuodessa, vaikka vuonna 2019 kasvu hidastui ja kääntyi lievästi laskuun. (IEA 2019.)

3 ENERGIAN VARASTOINNIN FYSIKAALINEN PERUSTA

Tässä luvussa esitellään pääkategorioita energian varastoinnille. Ei ole virallista määrittelyä mitkä, säilöntämuodot sopivat minkäkin kategorian alle tai mihin muihin mahdollisiin osiin kategoriat voitaisiin lajitella. Tässä on kuitenkin yksi esimerkki mahdollisesta tavasta lajitella energianvarastointimuotoja.

3.1 Kemiallinen energianvarastointi

Esimerkkejä kemiallisesta energianvarastoinnista ovat muun muassa akut, vedyn tuottaminen ja erilaiset biopolttoaineet. Joskus sähkökemiallinen energiansäilöntä käsitellään omana kategorianaan, mutta tässä käsitellään sähkökemiallisia säilytysmuotoja, kuten akkuja, osana kemiallista energianvarastointia. Kun käytetään saatavilla olevaa energiaa, voidaan valmistaa yhdisteitä, jotka voidaan myöhemmin esim. polttaa ja vapauttaa energiaa käytettäväksi. (Larsen & Petersen 2013, 47–52)

Akussa kemiallista energiaa säilötään elektrolyyttien väliseen potentiaaliseen jänniteeroon. Kun akkua käytetään, saadaan akussa aikaan kemiallinen reaktio, joka tuottaa virtaa. Kun akku halutaan palauttaa ladattuun tilaan, siihen johdetaan verkosta virtaa ja kemiallinen tila palautuu alkuperäiseksi. Joissain raporteissa esitetään, että kemiallisen energian kategorian eri säilytykseksi kuin elektrokemiallisen, mutta tässä niitä käsitellään yhdessä. (Larsen & Petersen 2013, 47–52)

Vedestä voidaan erottaa vetyä elektrolyysin avulla. Tässä prosessissa on kuitenkin melko alhainen hyötysuhde, kun energiaa ollaan muuttamassa takaisin verkkoon syötettäväksi. Mahdollinen käyttökohde vedylle on esimerkiksi kulkuneuvoissa, mutta verkkotason ratkaisuksi se ei ole optimaalinen. (Larsen & Petersen 2013, 47–52)

Maakaasun synteettinen valmistaminen on mahdollista käyttäen power-to-gas (PtG) konseptia. Synteettinen maakaasu viittaa usein metaaniin. Vedestä valmistetaan vetyä, sekä vety yhdistetään hiilidioksidiin kemiallisen prosessin kautta. Metaanilla on muutamia etuja verrattuna vetyyn. Sitä voidaan käyttää kuten maakaasua, sen nesteytyminen on helpompaa, kuljetus ja säilytys ovat turvallisempia. (Hidalgo & Martin-Marroquin 2020, 1–2)

Yhteistä kemialliselle energiansäilönnälle on se, että energiatiheys on kohtuullisen korkea, joten projektit on helppo toteuttaa pienessä mittakaavassa. Osa projekteista vaatii harvinaisia metalleja ja kansainvälisiä tuotantoketjuja. (Larsen & Petersen 2013, 47–52)

3.1.1 Lyijy-happoakut

Lyijyakkuja on käytetty yli vuosisadan ajan ja niiden käytöstä on useita esimerkkejä. Kehitystä on tapahtunut hitaasti. Akkujen lisäksi voimalaitokselle tulee paljon muita kustannuksia, joiden voidaan arvioida olevan yhtä kalliita kuin akkujen hankinta. Näitä kustannuksia ovat muun muassa rakennukset, akkujen asennus, liittäminen verkkoon, lämmitys ja ilmastointi. Usein järjestelmät pitää uusia kerran viidessä tai kuudessa vuodessa. Tämä on akkujen suuri heikkous. Ne kestävät vain 500–1000 latausykliä tai 3–15 vuotta. Järjestelmän hyötysuhde on 0,7–0,8. Arvioidaan, että tarvitaan yksi henkilö 20 MW:n voimalan huoltamiseen. Vaihtoehtoisella VRLA-tekniikalla voidaan laskea huoltamisen kuluja kolmannekseen. Hinnaksi arvioidaan 100–400 €/kWh käytettynä verkon tasolla. (Schoenumg ym 2018, 153.)

3.1.2 Flow batteries

Flow batteries-tekniologian akkuja on kehitteillä. Tällaisesta akusta yksi esimerkki on uudelleen ladattava järjestelmä, jossa käytetään suolaa. Esimerkiksi yhdessä flow akussa on natriumbromidia positiivisessa elektrolyytissä ja natriumpolysulfidia negatiivisessa elektrolyytissä. Järjestelmä tuottaa 1,5 V virtaa ja sarjakytkenällä enemmän. Tekniologialle on vaihtoehtoisia toteutustapoja, kuten sinkki-bromidiakku tai vanadium-redox-akku. Vanadiumakut kestävät 12 000–20 000 sykliä, mutta vaativat paljon tilaa energiatheyden ollessa 16–33 kWh/m³. Järjestelmä pystyy vastaamaan nopeasti kysynnän vaihteluun ja soveltuu pitkäaikaiseen varastointiin. Järjestelmän hyötysuhde arvioidaan olevan 0,65–0,7 ja eliniän 5–20 vuotta. (Beaudin ym 2010, 302–314.)

3.1.3 Li-ioniakut

Sony valmisti litiumakkuja ensimmäisen kerran vuonna 1991 kaupallisiin tarkoituksiin. Kasvu on kiihtynyt sähköautojen yleistyttyä. Akut ovat hyvin tehokkaita; hyötysuhde voi olla 0,95, ja ne kestävät 3 000 sykliä. Ongelmana on ollut pitkään korkea hinta, mutta

viime vuosina hinnat ovat laskeneet merkittävästi. Litiumin saatavuudessa saattaa tulla vastaan merkittäviä puutteita, jos kaikki autot sähköistetään ja pyritään rakentamaan energianvarastointiin liittyvää infrastruktuuria. 81 % sähkökemiallisesta energianvarastoinnista on toteutettu li-ion-akuilla (2017). Alhaisimmat arviot kustannuksiksi verkkotalolla ovat noin 250 €/kWh (2017). (Beaudin ym. 2010, 302–314.)

3.2 Mekaaninen energianvarastointi

Mekaaninen energianvarastointi voi perustua paineeseen, liikkeeseen tai painovoimaan. Mekaaniset varastointimuodot ovat suosituimpia tapoja varastoida energiaa, mutta useat projektit ovat suuria sekä kooltaan sekä pääomavaatimuksiltaan. (Larsen & Petersen 2013, 37–41.)

Tämän lisäksi rakentamiseen sopivan paikan löytäminen aiheuttaa haasteita. Jotta voidaan rakentaa pumppuvoimalaitos, on löydettävä maastosta sopiva korkeusero. Jos halutaan rakentaa paineilmaan perustuva varastointijärjestelmä, olisi parasta käyttää tarkoitukseen sopivaa vanhaa kaivosta, kuten vanhaa suolakaivosta. (Larsen & Petersen 2013, 37–41.)

Mekaaniset energianvarastointitavat ovat ylivoimaisia kapasiteettinsa ja kustannustehokkuutensa kautta. Siksi ne ovat suosituimpia ratkaisuja verkkoon liitettäväksi energiasäiliöksi. Niillä on pitkä historia, ja useita esimerkkejä valmiista projekteista. (Larsen & Petersen 2013. 37–41.)

3.2.1 Paineilma CAES

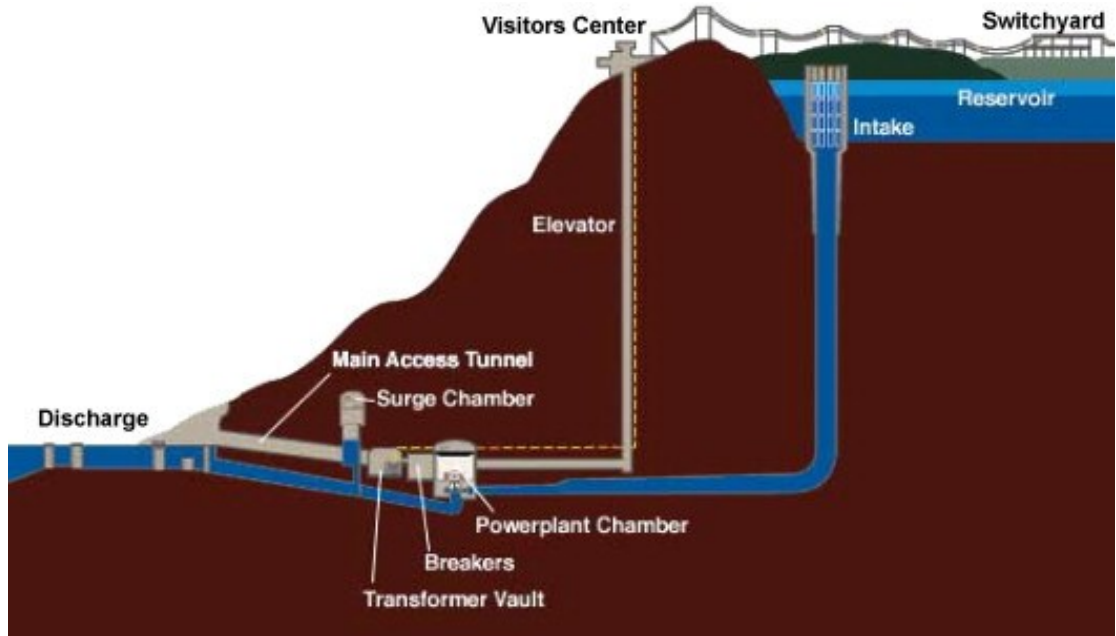
Paineilmajärjestelmä koostuu kompressorista, maanalaisesta varastointijärjestelmästä ja turbiinista, jota järjestelmä pyörittää. On mahdollista saada varastointijärjestelmä hyvin halpaan hintaan käyttämällä esimerkiksi sopivaa suolakaivosluolastoja, jos sellainen on saatavilla. Mikäli käytetään maan päällä olevaa säiliötankkia, arvioidaan tehokkuuden hyötysuhteen olevan 0,79. Järjestelmä voidaan kytkeä päälle, nopeasti ja se sopii tuuli-voiman yhteyteen. Järjestelmän eliniäksi on arvioitu 25–40 vuotta. (Blanco 2018, 1072–1074.)

3.2.2 Pumpattu vesi PHES

Pumppuvoimalaitoksessa käytetään vesivoimasta tuttua teknologiaa. Potentiaalienergia varastoidaan veden korkeuseroihin, ja se eroaa tavallisesta vesivoimasta siten, että vettä voidaan pumpata alhaisemmasta potentiaalienergian tasosta korkeampaan. Vanhimmat Yhdysvalloissa rakennetut järjestelmät ovat 1920-luvulta. Tyypillinen hyötysuhde järjestelmälle on 0,75. Alueet, joille järjestelmä voidaan rakentaa, ovat harvinaisia. 97 % maailmalla asennetusta varastointikapasiteetista ja 3 % maailmalle asennetusta tuotto-kapasiteetista perustuu tähän teknologiaan. Maailmassa on noin 4,67 TWh pumppuvoi-makapasiteettia (2017) ja sen uskotaan kasvavan 7,83 TWh:hon vuoteen 2030 mennessä. (Beaudin ym. 2010, 302–314.)

Järjestelmän eliniän on arvioitu olevan 30–60 vuotta. Aikaisemmin on käytetty järjeste-lyä, jossa generaattori ja pumppu ovat olleet erikseen, mutta nykyisin ne on kyetty yh-distämään kustannusten alentamiseksi. Tyypillistä projekteille ovat korkeat pääomain-vestoinnit projektin alussa, tarve suurelle määrälle maata (10–20 km²) ja pitkä läpivienti-aika (10 vuotta). (Beaudin M. ym. 2010, 302–314.)

Kuvassa 1 on esitetty pumppuvoimalan rakenne yksinkertaistettuna. Vuoren päällä si-jaitsee tekojärvi, jonka pohjalta lähtee putki, joka johtaa veden generaattorirakennuk-seen. Vesi pyörittää generaattoria, joka tuottaa sähköä. Sähkö ohjataan verkkoon pai-kallisen sähköinfrastruktuurin kautta. Kun energiaa halutaan varastoida, vettä pumpa-taan ylös. Pumppuyksikkö voi sijaita generaattorin yhteydessä tai se voi olla erillinen järjestelmä. (Beaudin M. ym. 2010, 302–314.)



Kuva 1. Pumppuvoimalaitoksen rakenne. (commons.wikimedia.org)

3.3 Sähköinen energianvarastointi

Sähköisessä varastointimuodossa energia säilytettäisiin perustuen sähkömagneettisiin ilmiöihin, mutta useimmat ratkaisut ovat lähinnä teoreettisia. Ne ovat hyvin pienikapasiiteettisia verkkoon liitettävään varastointiin, vaikka ovatkin tärkeitä verkon päivittäiselle toiminnalle. On kuitenkin mahdollista, että tulevaisuudessa kehitetään verkkoon sopivia suuren kapasiteetin ratkaisuja. Esimerkkejä ratkaisuista ovat kapasitorit tai energian säilöntä perustuen magneettikenttiin. (Larsen & Petersen 2013. 37–41.)

3.4 Lämpöenergian varastointi

Lämpöenergian varastoiminen on mahdollista kaukolämpöverkkoon liitetyssä järjestelyssä. Joidenkin polttovoimaloiden yhteydessä osa tuotetusta lämmöstä voidaan säilöä käytettäväksi myöhemmässä prosessissa. Useissa kotitalouksissa on järjestelmä, jossa käytetään halpaa yösähköä lämmittämään vesivarastoa, jota käytetään talon keskuslämmityksessä. Järjestelyä, jolla uusiutuvaa energiaa voitaisiin säilöä lämmöksi ja myöhemmin muuntaa takaisin sähköksi, ei ole kehitetty. (Larsen & Petersen 2013, 53–57.)

Lämpöenergian säilömisessä ongelmana on, että lämpö haihtuu ympäristöön ja sen muuntaminen takaisin sähköksi on tehotonta. Jotta voidaan kehittää käytännöllisiä sovelluksia, tarvitaan lisää tutkimusta energiatiheyden parantamiseksi. Toiseksi lämpöenergian siirtäminen ja muuntaminen ovat riippuvaisia molekyylien välisestä liikkeestä, ja siksi lämmönsiirto on hitaampaa kuin kemiallisessa tai sähköisessä energiassa ja aiheuttaa suurta hukkaa. Helen kehittää Helsingin Mustikkamaalle kaukolämpöverkkoon liitettävää lämpöenergian varastointijärjestelmää, joka perustuu veteen. Tämän projektin on määrä valmistua vuonna 2021. (Galkin-Aalto 2019; Yan ym. 2020, 4.)

On kehitteillä lämpöakku järjestelyjä, joissa aurinkoenergialla lämmitettäisiin suolaa 600 °C:ssa. Päivittäin lämpöenergiasta haihtuu noin 5 %. Akateemiset tutkimukset järjestelyn hyötysuhteeseen ja muuntamiseen takaisin sähköenergiaksi ovat vähäisiä, ja ratkaisuja myyvien yritysten lukuihin on syytä suhtautua kriittisesti. Energiasta kuitenkin menetetään merkittävä osuus, mikäli se muunnetaan takaisin sähköksi. Järjestely sopii paremmin lämmitykseen kuin sähkön myymiseen ja ostamiseen. Lämmityksessä tuotannon ja käytön aikaväli vaikuttaa olevan päiviä tai viikkoja, sillä muuten energiasta haihtuu liian suuri osuus ympäristöön. (Epp 2018.)

3.5 Muut järjestelmät

Vetyyn perustuvia järjestelmiä on rakennettu, mutta nämä ovat kalliita. Usein vety valmistetaan maakaasusta, jota itsessään voitaisiin käyttää energianlähteenä voimalaitoksessa. Vetyä voidaan valmistaa elektrolyysillä vedestä, mutta prosessi on tehoton ja hukkaa paljon energiaa. Erilaisia prosessin kannattavuutta parantavia katalyyttejä on kehitteillä. Jos vedyn valmistuksen kannattavuutta saataisiin parannettua, vedyn käyttämistä kannattaisi ensisijaisesti harkita kulkuneuvoissa, lentokoneissa, autoissa ja teollisuuden prosesseissa. (AFDC 2018.)

Nikkeli-kadmiumakut sopivat huonosti energian säilömiseen. Ne tulisi käyttää loppuun latauksesta yhdellä kerralla ja ladata uudestaan, muuten akut alkavat menettää kapasiteettiaan. Kadmium on myrkyllinen alkuaine. NiCd-akkuja on kohtuullisen halpaa valmistaa, mutta yleisesti kiinnostus niiden kehittämiseen on vähentynyt vaihtoehtojen kuten li-ion-akkujen suosion kasvaessa. (Koehler 2019, 21–46.)

Toissa vuosikymmenenä rikki suola akut kasvattivat suosiotaan. Niiden etuina on 2 500 lataussykliä, korkea tehokkuus 70–90 %, lisäksi ne kestävät virran vaihteluita hyvin.

NAS akut eivät vaikuta ympäristöönsä ja ne ovat täysin suojattuja. Lisäksi 99 % akun materiaaleista on kierrätettävissä. Huonona puolena akuissa voidaan pitää niiden korkeaa käsittelylämpöä 300–350 °C ja korkeaa hintaa 2000 \$/kW tai 350 \$/kWh.

Vauhtipyörät ovat lupaava teknologia, sillä ne kestävät 15–20 vuotta ja jopa 100 000 latausykliä sekä tehokkuus on korkea 0,95. Ongelmana ovat korkeat rakennuskustannukset sekä energian nopea häviäminen, 55–100 % päivässä. 5 kWh vauhtipyörä on käytössä pienessä Norjalaisessa sähköverkossa tuuli-vety järjestelyn kanssa. Vauhtipyörät ovat käytössä olevaa teknologiaa liitettyinä sähköverkkoon, ja niitä voidaan käyttää jännityksen vaihtelun tasaamiseen. Vauhtipyörillä voidaan kompensoida toisten järjestelyjen heikkouksia, mutta niitä ei käytetä pitkäaikaiseen varastointiin. (Beaudin ym. 2010, 302–314.)

4 ONKALO JA KAIVOKSET

Arvioidaan, että maailmanlaajuisesti on miljoonia hylättyjä kaivoksia. Hylätyt kaivokset myös saastuttavat ympäristöään, ja yksi tapa vähentää saasteita on laittaa kaivokset hyötykäyttöön ja investoida osa tuotosta niiden ympäristövaikutuksien pienentämiseksi. On mahdollista suunnitella kaivoksia lähtökohtaisesti painovoimakoneen käyttöä mielessä pitäen kaivoksen sulkeuduttua. (Hufty 2019.)

4.2 Vesi

Kaivoksiin tuleva vesi tulee pohja- ja pintavesistä sekä lisäksi kaivostöistä ja laitteistoista, kuten poraus-, kaivostäyttö- ja pölynpoistojärjestelmissä käytetyistä vesistä. Talvikautena veden tulo kaivoksiin on vähäisimmillään. Vedentuloa estämään voidaan käyttää ojituksia, patoja, kairausreikien tukkimista sekä kalliorakojen injektointia. Veden pumpaaminen kaivoksista ulos on välttämätöntä. Maanalainen kaivos täyttyy vedellä 10–15 vuoden sisällä. (Paalumäki, Lappalainen & Hakapää 2011.)

4.3 Kaivokset ja kaivostoiminta

Muutamia Euroopassa tyypillisiä kaivostyyppisiä ovat suolakaivokset kuten myös kivihilikaivokset. Ligniittiä kaivetaan tyypillisesti avoimessa kaivoksessa. Kovaa hiiltä voidaan kaivaa avolouhoksessa ja maanalaisessa kaivoksessa. Suolakaivokset sopivat maakaasun säilytykseen ja CAES-järjestelyihin Suomessa Timon kuilun syvyys Pyhäsalmen kaivoksessa on 1 410 m. (Menendez 2018, 498-499; Isokorpi 2020)

Kaivoksen ylläpitämiseen liittyy useita kustannuksia. Yksityiset yritykset eivät ilmoita julkisesti, mitä nämä kustannukset ovat. On myös yrityksiä, jotka arvioivat kaivostoiminnan kustannuksia, mutta heitä ei lähestytty tässä opinnäytetyössä, sillä tarjottujen palveluiden hinta on hyvin korkea. Kun valitaan sopivaa kaivosonkaloa, on tavoiteltava mahdollisimman suurta korkeuseroa, mutta on otettava huomioon myös se, miten nopeasti kaivokset täyttyvät vedellä ja minkälainen riski sortumiselle on.

Painovoimakoneen käyttö eroaa kaivostoiminnasta monilla tavoilla, esimerkiksi tarvetta ilman pumpaamiseen kaivokseen ei ole. Pumpattavan veden lietteen koostumus on

erilainen, koska kaivoksesta ei aktiivisesti poisteta materiaalia. On siis useita tekijöitä, jotka alentavat kustannuksia vertailtaessa perinteiseen kaivostoimintaan. (Samanta 2019.)

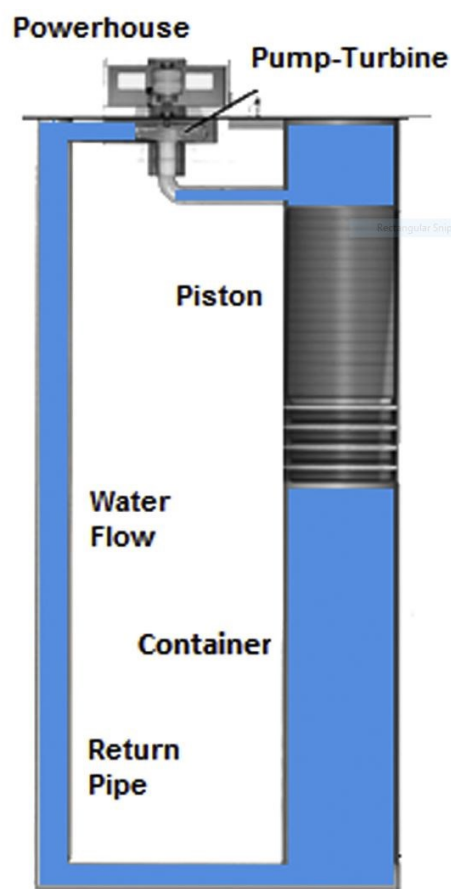
4.4 Muita käyttötarkoituksia hylätyille kaivoksille

Jotkin kaivokset saattavat soveltua CAES-ratkaisuihin riippuen siitä, mitä kaivoksessa on aikaisemmin louhittu. Mikäli on louhittu suolaa, malmeja, kalkkikiveä tai kivihiiltä, on mahdollista, että kaivokseen voitaisiin säilöä paineilmaa. Tämä riippuu kiven tiiveydestä ja mahdollisuudesta saada aikaan tiivis sulku. Ruotsissa on 1940-luvulla käytetty kaivosta nestemäisten hiilivetyjen varastointiin, mutta kaasujen varastoinnista on hyvin vähän esimerkkejä. (Donadei, 2016.)

5 PAINOVOIMAKONEEN TOTEUTUS

5.2 Painovoimaan perustuva pumppuvoimalaitos

Painovoimaan perustuva pumppuvoimalaitos on sovellus pumppuvoimalaitoksesta. Järjestelmä ratkaisee muutamia pumppuvoimalaitoksen ongelmia, kuten ongelman sopivan paikan löytämisestä. Kuvassa 2 esitetään mahdollinen rakenne painovoimaan perustuvalla koneella. (Berrada 2017. 325)



Kuva 2. Vedenpaineella toimiva painovoimakone (Berrada 2017. 325).

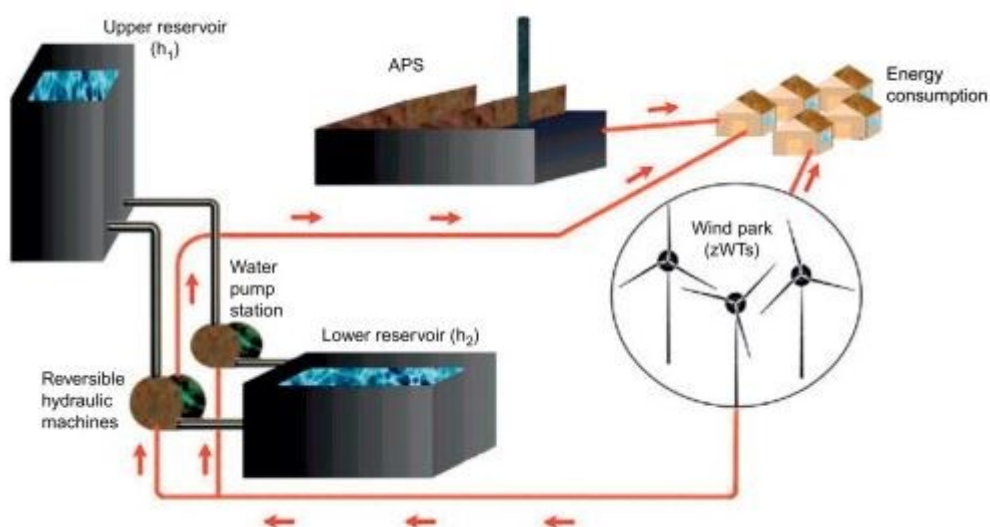
Kun pumppua käytetään, vesi liikkuu putkea pitkin sylinteriin. Tämä saa männän liikkumaan ylös ja alas ja varastoimaan energiaa potentiaalienergiana. Kun energiaa halutaan viedä järjestelmästä ulos, annetaan männän laskeutua, mikä saa turbiinin pyörimään. On arvioitu, että tehokkuus järjestelmälle voisi olla 80 %:n luokkaa. (Berrada 2017. 325.)

5.3 Vuoreen rakennettava energianvarastointihissi

Vuoren viereen rakennettava energianvarastointihissi perustuu sähkömoottorilla toimivaan hissiin, jolla nostetaan massa korkealle lataustilassa ja lasketaan se, jotta voitaisiin pyörittää generaattoria. Massa voi olla betonikuutio tai vaihtoehtoisesti hiekalla tai soralla täytetty astia. Lisäksi voidaan käyttää useita painoja järjestelmän kapasiteetin lisäämiseksi. Etuna on, että se voidaan rakentaa pienemmäksi kuin pumppuvoimala, projekti voi olla 20 MW ja soveltuu pitkäaikaiseen säilömiseen. Ratkaisu soveltuu eristyksissä oleville alueille, kuten saarelle. Kustannukseksi arvioidaan 50–100 \$/MWh. (Hunt. 2020 2–8.)

5.4 Muut mahdolliset rakenteet koneille

Vaihtoehtoinen kone voisi sisältää kaksi eri tasoissa olevaa allasta tai maanalaisen järven. Tällaisen koneen toimintaa on esitetty kuvassa 5. Kone vastaa toiminnaltaan pumppuvoimalaitosta. Maahan porataan reikä ja se täytetään vedellä. Reiän pitää olla tiivis, että vesi ei valuisi ympäristöön. Maan pinnalla on myös oltava järvi tai säiliö, josta vesi pumpataan onkaloon. Verkossa saatavaa halpaa energiaa, esimerkiksi tuulivoimaa, käytetään veden pumppaamiseen ylös, kun energiaa halutaan varastoida. Kun energiaa halutaan vapauttaa, se kulkee alemmassa tasossa olevaan järveen, pyörittäen generaattoria. Tämä ratkaisun on hyvin samanlainen verrattuna nykyisiin pumppuvoimalaitoksiin, mutta korkeudenvaihtelut ovat suurempia.



Kuva 3. Painovoimajärven rakenne.

Sørensen B. 2015

Käytännössä malli vastaa myös vanhan kaivoksen täyttämistä vedellä, mutta kaivos tulisi rakentaa siten, että se kestäisi rakenteellisesti. On myös mahdollista porata hyvin syvä reikä ja rakentaa tekojärvi maan alle.

Toinen malli voi olla vanha kaivos, johon lasketaan rautasyntereitä ja nostetaan niitä ylös. Maailman syvimät kaivokset ovat neljän kilometrin syvyydessä. Sylinterin ollessa 10m korkea ja säde 5m, kaivoksen syvyys 500m voidaan sylinterin laskemisella tuottaa korkeintaan 4,6 MWh energiaa, mikäli tiheys vastaa rautamalmia. Materiaalin hinta on 285 000€ ja jos koneiston hinnaksi arvioidaan 250 000€ on järjestelmä kilpailukykyinen 120 €/kWh säilytyksen kanssa. (Liite 1.)

Periaatteessa maanalle voitaisiin laskea useampia sylintereitä. Jos sylintereitä voitaisiin laskea maan alle, viisikymmentä kappaletta olisi järjestely kilpailukykyinen 80 €/kWh energiansäilytyksen kanssa. Tässä arviossa ei huomioida mitä teknisiä lisäjärjestelyjä vaadittaisiin. (Liite 2.)

Kaivoksen sijasta sylintereitä voidaan laskea mereen. Tällöin menetetään hieman potentiaalista energiaa veden nosteen vuoksi. Suurempia haasteita on rakentaa riittävä tukirakennelma, rakennelman liittäminen sähköverkkoon sekä muut tekniset haasteet. Toisaalta ei ole tarvetta porata syvää kaivoa. Maailman merien keskimääräinen syvyys on 3 500 metriä, pohjanlahden enimmäissyvyys on 295 metriä. (Worldatlas 2017.)

Toinen malli on nostokurki, jolla kasataan terässylintereitä. Tämä malli on saavuttanut suosioita, sillä se on yksinkertainen rakentaa. Sylintereihin on mahdollista käyttää myös muita materiaaleja, kuten hiekkaa tai betonia. Jos kasattujen terässylintereiden kesimääräiseksi korkeudeksi arvioidaan 20 m, painoksi 700 kg ja määräksi 200 kpl, järjestelmään voidaan varastoida 7.6 kWh energiaa. (Energyvault, 2020.)

On olemassa myös kuluttajakäyttöön tarkoitettu pieni painovoimakone, GravityLight. Tässä koneessa painovoima pyörittää generaattoria, joka tuottaa riittävästi energiaa lamppuun. Tuote on suunniteltu kehitysmaiden markkinoille. Koneessa punnus on nostettava takaisin ylös tasaisin väliajoin. Se ei vaadi verkkoon kytkentää, akkua eikä luotettavaa virtalähdettä. Tuote on saatavilla Amazon.com verkkokaupasta. (Deciwatt, 2020)

5.5 Koneen rakentamiseen liittyvien kustannusten ja hyötyjen arviointi

Painovoimaan perustuva energiansäilytyskone sisältää seuraavat rakenteet: sähkömoottori, vaihdelaatikko ja muut tekniset rakenteet, vastapaino ja onkalo. Perustuipa kone pumppuvoimaan, hissiin tai pumpattuun veteen, se sisältää silti nämä tai vastaavat rakenteet. Otan tässä käsittelyyn erityisesti mallin, jossa käytetään vertikaalista kuilua, joka saattaa olla vaikka vanha kaivoskuilu ja siinä ylös ja alas liikkuvaa painoa.

Painon ollessa ylhäällä se sisältää potentiaalienergian, joka voidaan laskea kaavalla $E_p = m \cdot g \cdot h$, jossa m on massa (kg), g on putoamiskiikkyvyys, $9.81 \frac{m}{s^2}$ ja h on korkeus (m). Kun paino lasketaan alas, tämä pyörittää sähkömoottoria, jolla voidaan syöttää virtaa sähköverkkoon. Kun taas markkinoilla on saatavana halpaa sähköä, järjestelmää käytetään toiseen suuntaan ja paino nostetaan ylös. Ajatuksena on siis hyötyä sähkön hinnan vaihteluista ostaa sähköä, kun se on halpaa ja myydä kun se on kallista.

Sähkögeneraattorin hintaa arvioidaan tarkistelemalla myynnissä olevia sähkömoottoreita. Alibabassa 4 MW moottorin hinta 50 000€. ABB 1 MW moottorista löytyi ilmoitus 56 000€ hintaan. Siemens myy 3 MW moottorin hintaan 136 000€. Kallein Siemensin moottori maksoi 440 000€ ja sen teho oli 41 MW. Ilmoituksia löytyy hyvin erilaisista hinnoista, tuotteista ja käyttökohteista, joten on vaikea arvioida mikä olisi sopiva ja mikä todellinen hinta tuotteelle. Numerot ovat peräisin jälleenmyyjiltä. Lisäksi tarvitaan muita sähkökomponentteja, vaihdelaatikko, muuntajia. (Siemens-Energy 2020)

Vaihdelaatikko vaikuttaa myös paljon siihen, minkälainen moottori voidaan valita projektiin. Tuulivoimaprojektissa vaihdelaatikon on arvioitu maksavan 3,75 kertaa moottorin kustannusten. Toisaalta on ehkä mahdollista valita kalliimpi ja monimutkaisempi moottori ja yksinkertaisempi vaihdelaatikko. Tuulivoimaprojektiin verrattuna painovoimakone on erilainen ainakin sikäli, että rajoituksia laitteiston koolle ei ole. Lisäksi olosuhteet ovat hyvin vakaat eikä paino aiheuta rajoituksia. Järjestelmässä täytyy olla myös jonkinlainen jarru. Joihinkin moottoreihin on rakennettu jarru. (Blanco 2009, 37.)

Moottorien tehokkuus on 93%-96% pienemmissä alle 100 kW moottoreissa, mutta suuremmissa 100 kW–100 MW moottoreissa tehokkuus on 97%–98,9%. ABB-katalogissa mainitaan moottorin valintaan vaikuttavia tekijöitä. Näitä tekijöitä ovat muun muassa mahdolliset lämpötilanvaihtelut, äänieristys, käyttökohteen korroosio, suolaisuus, rikkidioksidin määrä ja käytetty jäähdytys. Lisäksi asiaan vaikuttaa, onko käyttökohde pölyinen tai maan alla, mistä materiaalista moottorin tulee olla valmistettu ja onko moottori toiminnassa pitkään tasaisella teholla vai ajoittain tai vaihtelevalla teholla. ABB -moottorit ovat korkeintaan 1 MW tehoisia, suurempia on saatavilla esimerkiksi Siemensiltä tai GE:ltä. (ABB, 2014 25-38.)

Tuulivoimaprojekteissa sivukustannusten on arvioitu olevan noin 25–33% kustannuksista. On aiheellista verrata kustannuksia tuulivoimaprojektiin, sillä molemmat järjestelmät pitää liittää sähköverkkoon (9% kustannuksista). Molemmat sijaitsevat verrannollisella etäisyydellä asutuksesta. Lisäksi täytyy rakentaa teitä, vuokrata maata ja syntyy rahoitukseen liittyviä kustannuksia. (Blanco 2009, 8-12.)

Painovoimaan perustuva kone jakaa myös osia ja rakenteita hissien kanssa. Tällaisia rakenteita ovat kaapelit ja turvallisuuteen liittyvät laitteet kuten tarraaja, nopeudenrajoitaja ja hälytyslaitteet. Eroa hisseihin verrattuna on ainakin se, että hissi liikkuu pitkin päivää ylös ja alas (asutokäytössä mahdollisesti 150 kertaa päivässä) ja painovoimakone huomattavasti harvemmin. (Matikka 2013, 2-13.)

Käytettävä paino voi olla terästä, hiekkaa, betonia, lyijyä tai mitä tahansa muuta materiaalia. Tärkeää on pystyä rakentamaan yhtenäinen paino. Painon tulisi olla mahdollisimman halpaa materiaalia ja painaa mahdollisimman paljon. Suuren tilavuuden vaativat painot aiheuttavat vaatimuksia onkalolle, ja mikäli käytetään irtomateriaalia, kuten soraa tai hiekkaa on rakennettava kestävä astia. Seuraavassa taulukossa tarkastellaan eri materiaalien maailmanmarkkinahintoja ja tiheyksiä.

Taulukko 1. Materiaalien hintoja ja tiheyksiä

Materiaali	Hinta EUR/1000kg	Tiheys kg/dm ³
Lyijy	1550-1830	11,34
Rautamalmi 62%	74-85	4,28
Teräs	411-548	8,05
Sora	10-50	1,50-1,8
Sementti	43-60	1,44

Materiaalien hinnat vaihtelevat markkinatilanteesta ja saatavuudesta riippuen. Taulukon numerot on saatu erilaisten sivujen ilmoittamista hinta-arvioista ja arvioista tiheydelle. Jotkut tiheydet kuten lyijyn tiheys on tieteellisesti määritetty ja se on laajasti tunnettu, mutta toiset numerot kuten soran tiheys vaihtelevat riippuen keneltä asiaa kysyy, miten paljon ostetaan, missä ostetaan. Soralle ei voida määritellä maailmanmarkkinahintaa. Teräksen ja lyijyn hinnat hyödykemarkkinoilla vaihtelevat ja niitä on mahdollista saada halvalla, mutta hinnat ovat merkittävästi korkeampia kuin vaihtoehdoilla. Soran ja sementin tiheydet vaihtelevat valmistustavasta, kosteudesta, materiaaleista ja hienojakaisuudesta riippuen, mutta tiheys ei ainakaan nouse yli 2,5 kg/dm³ yli. (Trading Economics, 2020.)

Ensisijaisesti ei kannata harkita lyijyn käyttämistä, sillä se on selkeästi kalliimpi kuin vaihtoehdot. Mitä tiheämpi aine on, sitä pienempi sylinteri voidaan rakentaa ja sitä pienempi kaivoskuilu tarvitaan. Tässä tarkastelussa ei oteta huomioon kustannusta valmistaa tietystä aineesta sopiva paino, vain raaka-aineen hinta on huomioitu. Lisäksi loppusijoituksen ja kierrättämisen kustannukset on huomioitava.

Oma tulkintani on, että rautamalmin käyttäminen painona olisi fiksuin vaihtoehto. Tiheys on kohtuullisen korkea, hinta halvimpiin vaihtoehtoihin verrattuna on vain hieman korkeampi ja materiaali on helposti kierrätettävää, eikä se kulu.

Jos ei ole käytettävissä valmista kaivoskuilua, sellainen pitäisi rakentaa erityisesti projektia varten. Tämä on suurin kustannus. Olisi tärkeää rakentaa mahdollisimman syvä, mutta samalla halkaisijaltaan laaja kuoppa. Syvyyden kaksinkertaistaminen kaksinkertaistaa potentiaalienergian ja halkaisijan kaksinkertaistaminen nelinkertaistaa potentiaalienergian. Vastapainon korkeuden kaksinkertaistaminen kaksinkertaistaa potentiaalienergian, mutta nostaa painopistettä ja vähentää käytettävissä olevaa kuilun syvyyttä.

Jos vastapainoja voitaisiin laskea kuilun pohjalle useita, voidaan potentiaalienergia moninkertaistaa.

On esitetty ajatuksia, joiden mukaan painovoimaan perustuvat energiansäilytysjärjestelyt eivät ole kannattavia, mutta käytännössä vastaus kannattavuudesta riippuu siitä, mihin hintaan kaivaminen on mahdollista. Tunneleiden ja kaivoskuilujen rakentamisessa on tapahtunut merkittävää kehitystä viime vuosina. Kun teknologia on maanalaisesta rakentamisesta kehitty riittävän pitkälle, painovoimaan perustuvat laitteet tulevat olemaan hyvin kilpailukykyisiä kemialliseen varastointiin (kuten akut) perustuviin laitteisiin verrattuna. (Liite 2)

5.6 Arvio kustannuksista

Timon kuilun syvyys Pyhäsalmen kaivoksessa on 1410 m. Jos tähän kaivokseen laskeaan rautamalmista ja teräksestä valmistettu paino (tiheys 4500 kg/m^3), jonka säde on 3 m ja korkeus 10 m voidaan tuottaa energiaa

$$(3\text{m})^2 * \pi * 10\text{m} = 282,75 \text{ m}^3$$

$$4500 \text{ kg/m}^3 * 282,75 \text{ m}^3 = 1\,272\,345 \text{ kg}$$

$$9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 1\,272\,345 \text{ kg} * 1405 \text{ m} = 17536794752 \text{ J} = 4871,3 \text{ kWh}$$

Materiaalikustannus painosta on 102 000€. Moottorin hinta on 56 000€. Muut kustannukset ovat 150 000€. Kokonaiskustannukseksi saadaan 308 000€ ja hinta kWh kohden olisi 67,38 €/kWh. Kun arvioidaan tehokkuudeksi vielä 90%, saadaan lopulliseksi kustannukseksi 70,26 €/kWh.

Käyttökustannusten arviointi on vaikeaa ilman kokemusta laitteista. Ainakin ensimmäisissä laitteissa käyttö- ja huoltokuluja varmaan tulee kohtuullisen paljon, sillä käytännössä ei tiedetä, miten laitteita tullaan käyttämään ja mitkä ovat niiden heikkoja kohtia. Kuluja tulee ainakin kaivoksen kuivana pitämisestä, mutta vaikka kaivoksen täyttämisajaksi arvioidaan 15 vuotta, pumppauskustannusten ei pitäisi olla merkittäviä. Lisäksi pumppaamiseen voidaan käyttää mahdollisimman edullista energiaa.

Kun arvioidaan, että järjestelmän käyttöikä on 30 vuotta ja käyttökustannukset ovat 20%, aloitusinvestoinnista vuodessa saadaan järjestelmälle hinnaksi koko sen elinkaaren ajalta 2,16 miljoonaa euroa. Arvioidaan saman kapasiteetin toteuttamista li-ioniakuilla.

Käyttöiän ollessa 8 vuotta ja kustannuksen ollessa 120 €/kWh, vuosittaiset kustannukset 5% aloitusinvestoinneista saadaan tämän ratkaisun hinnaksi 30 vuoden ajalta 2,76 miljoonaa euroa.

Mikäli järjestelmän energiansäilöntäkapasiteetti halutaan kaksinkertaistaa on kaksinkertaistettava, joko massa tai korkeus. Vastapainon massan kaksinkertaistaminen kaksinkertaistaa sen kustannukset. Tästä syystä on tärkeää löytää mahdollisimman hyvin varastointiin sopiva kohde.

6 VERTAILU MUIHIN SÄILYTYSJÄRJESTELMIIN

6.2 Vertailu muihin järjestelmiin

Kuvassa 2 on esitelty energianvarastointitapojen kustannuksia. Taulukossa on myös arvioitu minkälaisia kustannuksia vuonna 2030 eri menetelmillä saattaisi olla. Vertailussa on erilaisia akkuja, sekä pumppuvoimalaitos, vauhtipyörä ja paineilma.

Flow akkujen uskotaan kehittyvän 120–310 dollarin hintatasolle kWh kohden, mutta tämä on silti kallis hinta verrattuna kilpailijoihin. Akkujen tehokkuus on myös melko alhainen 70% hyötysuhteella, kun varastoitua energiaa myydään verkkoon. Akut eivät kuitenkaan purkautu itsestään merkittävästi, ja purkautumisen taso on verrattavissa parhaisiin ratkaisuihin.

Taulukon ennustuksen laatija on arvioinut asennuskustannukset lyijyakuille alhaisiksi, 70–140 dollarin hintaluokkaan vuoteen 2030 mennessä. Lyijyakkujen tehokkuus on noin kymmenen prosenttiyksikköä alhaisempi kuin li-ioniakuilla. Purkautuminen on samaa tasoa kuin li-ioniakuilla. Energiatiheys on paljon alhaisempi, joten lyijyakuilla toteutettu varastointijärjestelmä vaatii paljon tilaa. Kustannuksissa pitää huomioida myös lyijyakkujen merkittävästi kilpailijoita lyhyempi elinikä.

Erilaisten li-ioniakkujen asennuskustannusten arvioidaan olevan noin 150–500 dollaria kWh kohden, mutta merkittävää kehitystä verrattuna nykyiseen hintatasoon. Tehokkuus on erinomaisella 95% tasolla.

Vauhtipyörän kustannukset arvioidaan tulevaisuudessa korkealle tasolle, 1000 dollaria kWh ja ne laskevat vain hieman nykytasolta. Lisäksi energia haihtuu nopeasti.

Paineilmaa käyttävä järjestelmä arvioidaan parhaassa mahdollisessa tapauksessa jopa pumppuvoimalaa kustannustehokkaammaksi, vaikkakin yleisellä tasolla ratkaisujen hinta-arvio on korkeampi. Molemmat ratkaisut vaativat paljon tilaa ja sopivat pitkäaikaiseen energian säilöntään. Paineilmasäilytyksessä hyötysuhteeksi arvioidaan vain 60–70%.

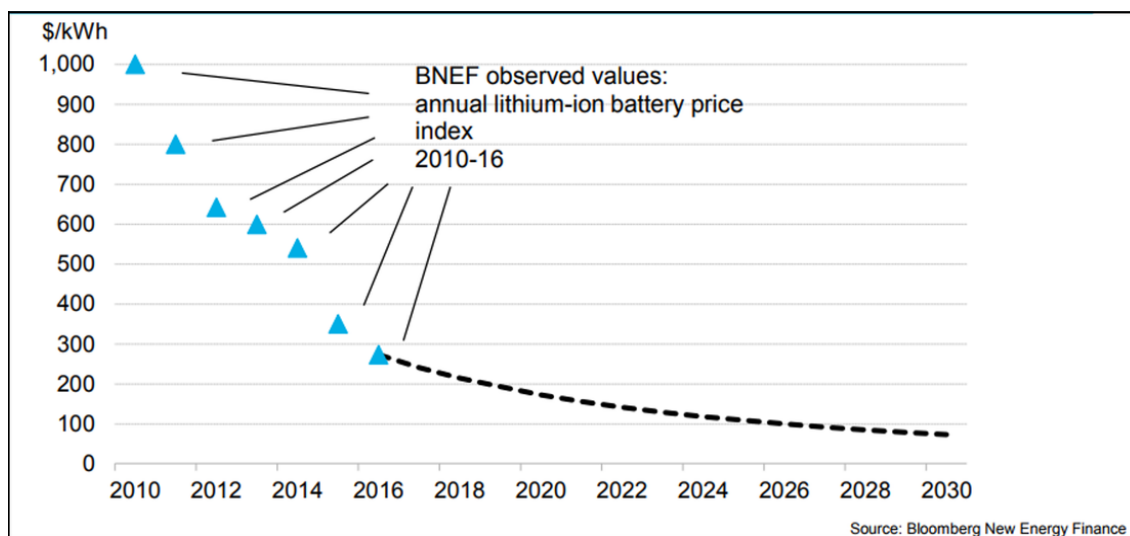
Pumppuvoimalaitosten hintatason ei oleteta muuttuvan. Se arvioidaan edullisimmaksi vaihtoehdoksi nyt ja vuonna 2030.

Type	Technology	Year	Energy installation cost (USD/kWh)			Power density (W/L)			Round-trip efficiency (%)			Self-discharge (% per day)		
			worst	reference	best	worst	best	reference	worst	reference	best	worst	reference	best
Flow	VRFB	2016	1 050	347	315	1	2	70.00	1.00	0.15	0.00			
		2030	360	119	108	1	2	78.00	1.00	0.15	0.00			
	ZBFB	2016	1 680	900	525	1	25	70.00	33.60	15.00	8.00			
		2030	576	309	180	1	25	78.00	33.60	15.00	8.00			
High-temperature	NaNiCl	2016	488	399	315	150	270	84.00	15.00	5.00	0.05			
		2030	197	161	127	150	270	87.00	15.00	5.00	0.05			
	NaS	2016	735	368	263	120	160	80.00	1.00	0.05	0.05			
		2030	324	162	116	120	160	85.00	1.00	0.05	0.05			
Lead-acid	Flooded LA	2016	473	147	105	10	700	82.00	0.40	0.25	0.09			
		2030	237	74	53	10	700	85.00	0.40	0.25	0.09			
	VRLA	2016	473	263	105	10	700	80.00	0.40	0.25	0.09			
		2030	237	132	53	10	700	83.00	0.40	0.25	0.09			
Li-ion	LFP	2016	840	578	200	100	10 000	92.00	0.36	0.10	0.09			
		2030	326	224	77	100	10 000	94.00	0.36	0.10	0.09			
	LTO	2016	1 260	1 050	473	100	10 000	96.00	0.36	0.05	0.09			
		2030	574	478	215	100	10 000	98.00	0.36	0.05	0.09			
NCA	2016	840	352	200	100	10 000	95.00	0.36	0.20	0.09				
	2030	347	145	82	100	10 000	97.00	0.36	0.20	0.09				
NMC/LMO	2016	840	420	200	100	10 000	95.00	0.36	0.10	0.09				
	2030	335	167	79	100	10 000	97.00	0.36	0.10	0.09				
Mechanical	CAES	2016	84	53	2	0	1	60.00	1.00	0.50	0.00			
		2030	71	44	2	0	1	68.00	1.00	0.50	0.00			
	Flywheel	2016	6 000	3 000	1 500	5 000	10 000	84.00	100.00	60.00	20.00			
		2030	3 917	1 959	979	5 000	10 000	87.00	42.61	39.17	8.52			
PHS	2016	100	21	5	0	0	80.00	0.02	0.01	0.00				
	2030	100	21	5	0	0	80.00	0.02	0.01	0.00				

Kuva 4. Erilaisten energianvarastointimuotojen ominaisuuksia, taulukko listaa arvioita hintaluokalle, energiatihedelle, kokonaistehokkuudelle ja latauksen katoamisnopeudelle. (IRENA 2017, 125).

6.3 Akkuteknologian kehitys ja potentiaali

Litiumioniakkujen hintojen on arvioitu puoliutuvan aikavälillä 2017–2030. Vuonna 2017 tuotannon hinta on ollut 162 \$/kWh (149 € huhtikuu 2020). Vuonna 2010 hinta kilowattitunnin säilytystä kohden oli tuhat dollaria. Hinnat ovat pudonneet merkittävästi viimeisien vuosien aikana, sekä absoluuttisesti että suhteellisesti. Tuotantokapasiteetin uskotaan nousevan 1 293 GWh:een, vuoden 2017 kapasiteetista 103 GWh. Bloomberg New Energy Finance -raportissa kustannusten on arvioitu lopulta asettuvan 80 \$/kWh tasolle, eli puoleen nykyisestä hintatasosta. EU -raportissa mainitaan hinta-arvio 110 €/kWh vuonna 2040. Litiumakuissa on myös huomioitava, että niiden tyhjäksi käyttäminen ei ole suositeltavaa, vaan akkuun tulee jäädä 5–10% varauksesta. Myös muut ympäristöön, lämpötilaan, käyttötarkoitukseen ja käyttötiheyteen liittyvät tekijät vaikuttavat niiden elinikään. (Lithium-ion Battery Costs and Market, 2017 2-8; Lilac Solutions Aims to Get Battery Costs Below \$80 per Kilowatt-Hour, 2018.)



Kuva 2. BNEF raportin ennuste on yksi esimerkki litiumakkujen hinnasta ja niiden tulevasta kehityksestä. (Curry.C. 2017 7).

IDTechEx arvioi, että materiaalit maksavat 75% akun hinnasta. Muita kustannuksia ovat työ, pääoma ja operatiiviset kustannukset. BNEF arvioi materiaalien olevan noin 60% hinnasta. BNEF ja IDTechEx arvioivat myös, että tulevana vuosikymmenenä sähköautot ja elektroniikkasovellukset käyttävät melkein kaiken tuotetun akkutuotannon, eikä

verkkoon asennettavia järjestelmiä rakennettaisi juuri lainkaan. (Dalius T. Ioannis T. Natalia L. 2018, 16-17.)

On olemassa kymmeniä litiumioniakkuteknologioita, joissa saatetaan käyttää eri materiaaleista valmistettuja elektrolyyttejä. Eri elektrolyyteillä voidaan saavuttaa erilaisia etuja ja haittoja, tutkimus jatkuu niiden hyödyntämiseen. Se miten kehitykset on otettu huomioon raporteissa ja miten niitä on painotettu, on epäselvää. EU -raportti ilmoittaa mahdolliset kehityssuunnat, sekä korkean, alhaisen ja todennäköisen hintatasoarvion. (Dalius T. ym. 2018, 31-44.)

Vaihtoehtoisia litiumakkuja on kehitteillä, näistä esimerkkinä litiumilma-akku, jossa olisi korkeampi energiatiheys ja halvemmat valmistuskustannukset, mutta alhaisempi toimintavarmuus. Litiumilma-akkujen energiatiheys on mahdollisesti 5–15 kertaa korkeampi kuin nykyisten litiumioniakkujen. (IRENA 2017, 75-77.)

Solid-state li-ion-akut saattavat olla yksi teknologia, joka johtaa korkeampiin energiatihyksiin ja alentuviin kustannuksiin. Kun samalla määrällä materiaalia voidaan säilöä enemmän energiaa, kustannukset laskevat. Litiumrikkiakussa voitaisiin saavuttaa suurempi energiatiheys, suojaa tulipalolta ja ylikuumenemiselta, sekä käyttää halpaa raaka-ainetta valmistukseen. Ongelmina näissä akuissa on mm. nopea varauksen katoaminen ja pieni määrä lataussyklejä. (IRENA 2017, 75-77.)

BNEF -raportin kohdalla on kyseenalaistettu tietojen luotettavuutta ja on herännyt kysymys, mistä numerot raporttiin on saatu. Raportin lähteitä ei olla paljastettu, mutta varsinkin tulevaisuuden tuotantokustannusten arviointi on hyvin vaikeaa. EU -raportti käyttää arvioissaan korkeaa, matalaa ja todennäköistä arviota. On olemassa myös muita raportteja, jotka sisältävät kokoelmia muiden tekemistä arvioista. Todellisuudessa on epävarmaa, miten akkujen hinnat tulevat kehittymään seuraavan 20 vuoden aikana. (Hill 2018.)

6.4 SWOT-analyysi

Tässä osassa käydään läpi painovoimakoneiden vahvuuksia ja heikkouksia SWOT-analyysimenetelmällä. SWOT -analyysissä tutkitaan tarkastelunalaisuudessa olevan aiheen vahvuuksia, heikkouksia, mahdollisuuksia ja uhkia.

Vahvuudet

- Yksinkertainen rakenne ja helposti saatavat materiaalit
- Mahdollisuus varastoida suuri määrä energiaa
- Pumpattu vesivoima todisteena tekniikan toimimisesta

Heikkoudet

- Toimivaa konetta ei ole vielä rakennettu
- Kustannukset korkeat, mikäli ei käytetä valmista onkaloa
- Matalaan kaivostunneliin ei voida varastoida paljon energiaa
- Vuoren kylkeen rakennettu kone huonontaa näköalaa

Mahdollisuudet

- Voivat varastoida kilpailijoita suuremman määrän energiaa
- Merkittävä mahdollisuus yrityksille, jotka valmistavat maanalaista infrastruktuuria
- Kotimaiset raaka-aineet ja mahdollisuus talouden elvytykseen

Uhat

- Sortumisriski
- Investointi asiaan, jota ei olla tehty aiemmin on riski
- Kaivostunnelit voivat täytyä vedellä

6.5 PESTLE-analyysi

PESTLE-analyysi on työkalu, jolla tutkimuksen kohdetta tarkistellaan eri näkökulmista. Nämä näkökulmat ovat poliittinen, taloudellinen, sosiaalinen, teknologinen, laillinen ja ympäristö.

Poliittinen

Kansainvälisesti huoli ilmastonmuutoksesta on kasvanut merkittävästi. Tämä lisää paineita rakentaa uusiutuvaa energiaa ja kapasiteettia uusiutuvan energian varastointiin.

Taloudellinen

Raha on tällä hetkellä halvempaa kuin koskaan ja lainojen korot ovat alhaiset. Markkinat etsivät innovaatioita ja ovat valmiita kokeilemaan ajatuksia, joihin liittyy korkeita riskejä.

Sosiaalinen

Ihmisten huoli ilmastosta ja ilmanlaadusta kasvaa. Ihmiset eivät välttämättä ole halukkaita muuttamaan kulutustottumuksiaan hyötyäkseen halvasta sähkön hinnasta. Maan alle rakennettuna painovoima energiansäilytys on huomaamaton, mutta jos käytetään vuotta ihmiset saattavat pitää tätä maiseman pilaamisena.

Teknologinen

Teknologia painovoimakoneiden rakentamiseen on olemassa, mutta sitä voidaan kehittää eteenpäin. Varsinkin kaivamiseen liittyvissä teknologioissa on paljon kehittämisen mahdollisuuksia. Painovoimakoneet eivät vaadi täysin uuden teknologian kehittämistä, vaan olemassa olevan soveltamista.

Laillinen

Projekteissa täytyy huomioida maankäyttöön liittyviä seikkoja ja sortumariskin aiheuttamia vaikutuksia läheiseen rakennuskantaan. On arvioitava maisemallisia seikkoja ja ihmisten mielipiteitä. Joissain maissa voi olla käytössä energiansäilytykseen liittyviä lakeja.

Ympäristö

Käytön aikana painovoimakone ei välttämättä aiheuta minkäänlaisia päästöjä ympäristöön. Rakentamisen aikana on huomioitava maanmuokkauksen ja jätemaan sijoitukseen liittyviä seikkoja. Painovoimakone ei vaadi harvinaisia maametalleja tai litiumia kuten akut.

6.6 Vertailu vaihtoehtoisin teknologioihin

Tämän vertailun luvut ovat peräisin eri raporteista ja gravitaatiokoneen numerot ovat arvioitani. Nämä numerot on valittu tärkeiksi makrotason kannattavuuden näkökulmasta. Osa näistä numeroista on ollut merkittävän muutoksen kohteena, kuten li-ioniakkujen kustannukset. Toiset numerot ovat pysyneet muuttumattomina vuosikymmeniä. Näitä lukuja ovat pumppuvoimaloiden elinikä sekä li-ioniakkujen elinikä.

Taulukko 2 Eri teknologioiden vertailu

Tarkastelu	Akku li-ion	Gravitaatio	Pumpattu vesi
Elinikä	8v	30–100v	30–60v
Kustannukset	140 €/kWh	160 €/kWh	20 €/kWh
Hyötysuhde	85–95%	85–95%	75–85%
Teho	0,001–0,1 MW	0,01–10 MW	100–5000 MW

Uskon gravitaatiokoneen hyötysuhteen olevan verrattavissa akkujen hyötysuhteeseen, sillä suurten moottorien hyötysuhteet ovat hyvin korkeita. Rakennuskustannukset olen arvioinut vaihtoehtoja korkeammaksi ainakin ensimmäisten projektien osalta. En näe mitään syytä, miksi gravitaatiokone ei voisi olla hyvinkin kestävä, koska monet projektin osat eivät kulu ja ne voidaan uudelleenkäyttää. Erilaisella vaihdelaatikolla voidaan säätää huipputehoa, mutta en usko, että järjestelmää kannattaa rakentaa ainakaan yli 10MW teholummaa tavoiteltaessa.

Yksi painovoimakoneita suunnitteleva yritys uskoo, että koneet sopivat lyhytaikaiseen kysynnänvaihteluun vastaamiseen. He suunnittelevat 1–20 MW painovoimakoneita. (Gravitricity, 2020)

Gravitaatiokoneissa on myös muita etuja verrattuna pumpattuun veteen. Kiinteä massa ei haihdu. Tämän lisäksi pumpattu vesivoimala voidaan rakentaa vain 1200m korkeuteen, koska muuten vedenpaine nousee liian korkeaksi. (Davies R. 2020)

7 POHDINTA

Painovoimaan perustuvilla energiansäilytysmuodoilla on tulevaisuudessa suuret mahdollisuudet. Suomessa olevia etuja laitteiden rakentamiseen ovat suuri energian tarve, lähellä oleva meri (jossa olosuhteet ovat kohtuullisen rauhallisia), terästeollisuus, kehittynyt talous, vakaa maaperä ja kaivosteollisuutta.

On myös näkökulmia, joiden mukaan koneita kannattaa ensisijaisesti rakentaa jonnekin muualle kuin Suomeen. Saksassa on enemmän kehittyntä energiainfrastruktuuria ja kysyntää energialle. Juuri tällä hetkellä vaikuttaa siltä, että markkinat ovat kiinnostuneita rakentamaan akkujen tuotantokapasiteettiä ja erilaisia akuilla toimivia koneita ja ajoneuvoja eikä välttämättä tulevaisuudesta akkujen jälkeen olla vielä innostuneita.

On kuitenkin aika kehittää ratkaisuja, jotta niistä voisi tulla kannattavia teollisuudenaloja. Ensimmäinen askel on rakentaa yksi kone ja oppia siitä saaduista kokemuksista. Uskon, että tehty tutkimus paljastaa painovoimaan perustuvan energianvarastoinnin olevan taloudellisesti kannattavaa käyttäen hylättyä kaivoskuilua. Projekti on lyhyellä aikavälillä kannattava ja sen mahdollisuuksia kannattaa tutkia käyttäen kokemuksia, jotka saadaan ensimmäisistä koneista.

Työn jälkeen on monia aiheita, joista tarvitaan lisää tutkimusta. Yksi tällainen aihe on selvittää, kykeneekö painovoimakone vastaamaan markkinoiden kysyntävaihteluun. Lisäksi tulisi tutkia, miten markkinoilta saatavat osat sopivat koneeseen, ja mitä osia on kehitettävä ja suunniteltava paremmin tarkoitukseen sopivaksi. Täytyisi myös selvittää, minkälaisia investointeja tarvitaan kaivoskuilun pitämiseksi käyttökelpoisena ja ehjänä painovoimakoneen käyttöä varten.

Opinnäytetyössä selvitettiin energiansäilytyksen vaihtoehtoja ja sitä, miten painovoimakoneet vertautuvat niihin. Tärkeimpänä seikkana nähtiin soveltuvatko painovoimakoneet hinta/kWh perusteisesti kilpailemaan vaihtoehtojen kanssa. On paljon muitakin näkökulmia, joiden kannalta aihetta voitaisiin tarkastella, näitä ovat mm. soveltuvuus tietyille maantieteellisille alueille ja painovoimakoneen reagointinopeus kysynnänmuutoksiin. Tutkimuksen perusteella voidaan sanoa painovoimakoneiden olevan kilpailukykyisiä verrattaessa muihin ”bulk storage” -ratkaisuihin.

Akkuteknologian ja li-ioniakkujen lisäksi en näkisi, että markkinat olisivat erityisen aktiivisesti kehittämässä muita vaihtoehtoja. Kenties flow akkujen kehittämisestä ollaan

jokseenkin kiinnostuneita. Flow akkuja on rakennettu muutamia, ne soveltuvat suuren energiamäärän varastointiin ja kustannuksia on mahdollista saada nykytasoa alemmaksi. Optimistisimmat arviot eivät kuitenkaan arvioi flow akkujen tulevan kilpailukykyiseksi pumppuvoimalaitosten tai li-ioniakkujen kanssa. Pumppuvoimalaitoksia varmasti tullaan rakentamaan vielä suuria määriä lisää. CAES-varastointi on kilpailukykyinen ja tähän liittyviä ratkaisuja varmasti tullaan kehittämään lisää.

Näkemykseni li-ioniakkujen kehityksestä on, että niiden kustannustehokkuus tulee paranemaan ennen kaikkea johtuen suuruuden ekonomiasta ja globaalien tuotantoketjujen optimoinnista. Akkuihin liittyvä teknologia voi parantua, mutta vaihtoehtoiset teknologiat kuten litiumilma-akut tuovat mukanaan omia ongelmiaan.

Työssä pyrittiin suhteellisen pinnalliseen, mutta monipuoliseen ja pitkänäköiseen tarkasteluun käyttäen valmiiksi tuotettua tutkimusaineistoa ja omaa pohdintaa. Uskon että työssä on innovatiivista näkökulmaa liittyen mahdollisten koneiden rakenteeseen. Tutustuttaessa koneisiin, joita ei olla ennen rakennettu, on tärkeää pitää mahdollisuudet avoinna ja etsiä useita ratkaisumalleja. Tutkimuksessa pyrittiin löytämään tiekartta, jolla painovoimakoneet voidaan tuoda osaksi energiainfrastruktuuria ja yhteiskunnan kokonaisvaltaista kehitystä.

On todennäköistä, että akkuteknologia kehittyy selvästi nykyistä kilpailukykyisemmäksi, mutta rajat tulevat vastaan vuosikymmenen päästä. Painovoimakoneilla on paljon potentiaalia.

LÄHTEET

Azarpour A. Zahedi G. A 2012 Review on the Drawbacks of Renewable Energy as a Promising Energy Source of the Future ARABIAN JOURNAL FOR SCIENCE AND ENGINEERING

ABB 2014 Low voltage motors Motor guide Viitattu 17.4.2020 <https://new.abb.com/docs/librariesprovider53/about-downloads/low-voltage-motor-guide.pdf>.

AFDC 2018 Viitattu 17.9.2020 https://afdc.energy.gov/fuels/hydrogen_production.html

Beaudin M. Zareipour H. Schellenberglabe A. Rosehart W. 2010 Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated review

Berrada A. Loudiyi K. Garde R. 2017 Dynamic modeling of gravity energy storage coupled with a PV energy plant

Blanco M. I 2009 The Economics of Wind Energy

Blanco H. Faaij A. 2018. A review at the role of storage in energy systems with a focus on Power to Gas and long-termstorage

Burnett M. 2015 Viitattu 10.6.2020 <http://large.stanford.edu/courses/2015/ph240/burnett2/>

Commons.wikimedia.org 2012 Viitattu 1.12.2020 https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Raccoon_Mountain_Pumped-Storage_Plant.svg

Curry. C 2017 Lithium-ion Battery Costs and Market

Dalius T. Ioannis T. Natalia L. 2018 Li-ion batteries for mobility and stationary storage applications

Davies R. 2020 Using mountains for long-term energy storage

Deciwatt Viitattu 21.9.2020 <https://deciwatt.global/gravitylight>

DG ENER Working Pape 2012 Viitattu 20.5.2020 https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/energy_storage.pdf

Donadei S. Schneider G-S 2016 Compressed Air Energy Storage in Underground Formations

Electric Automation Viitattu 18.4.2020 <https://www.electricalautomationnetwork.com/en/>

Energyvault 2020 Viitattu 21.9.2020 <https://energyvault.com/>

Epp B. 2018 Viitattu 27.5.2020 <https://www.solarthermalworld.org/news/molten-salt-storage-33-times-cheaper-lithium-ion-batteries>

Fortune 2020 Viitattu 7.11.2020 <https://fortune.com/global500/search/>

Galkin-Aalto M. 2019 Viitattu 10.6.2020 <https://www.helen.fi/helen-oy/vastuullisuus/ajankoh-taista/blogi/2019/mustikkamaa>

Geoffrey J.M, Davidsonb A, Monahov B. Lead batteries for utility energy storage: A review 2018

Gravitricity Viitattu 10.10.2020 <https://www.gravitricity.com/>

Hidalgo D. Martin-Marroquin J.M 2020 Power-to-methane, coupling CO2 capture with fuel production: An overview

Hill J.S 31.7.18 Cleantechnica Viitattu 7.11.2020 <https://cleantechnica.com/2018/07/31/trends-vs-activity-understanding-the-differences-between-bnef-iea-investment-figures/>

Hufty M. 2019 Viitattu 11.11.2020 <https://globalchallenges.ch/issue/6/abandoned-mines-the-scars-of-the-past/>

Hunt. J.D Zakeri B. Falchetta G. 2020 Mountain Gravity Energy Storage: A new solution for closing the gap between existing short- and long-term storage technologies

Hydroelectric Power: How it Works Viitattu 19.9.2020 https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/hydroelectric-power-how-it-works?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects

IEA 2018 The IEA's first Global Energy and CO₂ Status Report Viitattu 27.3.2019 (<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/GECO2017.pdf>)

IEA 2019 World Energy Outlook 2019 Viitattu 20.5.2020 <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>

IRENA 2017 ELECTRICITY STORAGE AND RENEWABLES: COSTS AND MARKETS TO 2030

Isokorpi J. Viitattu 8.10.2020 <https://tekijalehti.fi/2019/06/26/reportaasi-pyhasalmen-kaivoksen-pitkat-jaahyvaiset-varmaan-moni-miittii-mita-rupeaisi-tekemaan-kun-on-ikansa-ollut-taalla/>

Koehler U. Li-Battery Safety 2019

Larsen H.H, Petersen L.S 2013 DTU International Energy Report 2013

Lilac Solutions Aims to Get Battery Costs Below \$80 per Kilowatt-Hour 9.7.2018. Viitattu 27.3.2019 <https://www.greentechmedia.com/articles/read/lilac-solutions-aims-to-get-battery-costs-below-80-per-kilowatt-hour>

Lithium-ion Battery Costs and Market 5.5.2017 Viitattu 27.3.2019 <https://data.bloomberglp.com/bnef/sites/14/2017/07/BNEF-Lithium-ion-battery-costs-and-market.pdf>

Matikka J. 2013 Hissit – Energiankulutus ja kehitys

Menendez J. Ordonez A Renewable and Sustainable Energy Reviews 2018

Omondi S. 2017 How Deep Is the Ocean? 7.11.2017. Viitattu 27.3.2019 <https://www.worldatlas.com/articles/how-deep-is-the-ocean.html>

Paalumäki T. Lappalainen P. Hakapää A. 2011 Kaivos- ja louhintatekniikka Opetushallitus 2011

Peda Viitattu 7.11.2020 <https://peda.net/kotka/perusopetus/langinkosken-koulu/oppiaineet2/fysiikka/9-luokka/5lejmt/1ljp>

Samanta B. Samaddar A B. 2019 Underground mining slurry transportation viability <https://link.springer.com/article/10.1007/s40789-019-0257-2> Viitattu 8.10.2020

Schoenumg S.M. Hassenzahl W.V Sandia National Laboratories 2003 Long-vs. Short-Term Energy Storage Technologies Analysis A Life-Cycle Cost Study A Study for the DOE Energy Storage Systems Program

Siemens-Energy 2020 Viitattu 7.11.2020 <https://www.siemens-energy.com/global/en/offers/power-generation/generators/sgen-100a.html>

Sørensen B. 2015 Solar Energy Storage

Sähkötase 1970-2017 07.11.2018. Viitattu 27.3.2019 https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/sahkotase_1970-2017.html#material-view

Trading Economics 2020 Viitattu 7.11.2020 <https://tradingeconomics.com/>

Worldatlas 2017 Viitattu 7.11.2020 <https://www.worldatlas.com/articles/how-deep-is-the-ocean.html>

Yan Z. Zhang Y. Liang R. Jin W. 2020 An allocative method of hybrid electrical and thermal energy storage capacity for load shifting based on seasonal difference in district energy planning Viitattu 11.10.2020

Liitteet

Liitteisiin sisältyy muutamalle mahdolliselle painovoimakoneelle tehty laskelma. Niissä on laskettu, miten paljon energiaa on mahdollista säilöä koneeseen, mitä kustannuksia koneelle tulisi ja miten paljon vaihtoehtoisella tekniikalla rakennettu saman kapasiteetin säilytysjärjestely tulisi maksamaan.

Liite 1. Yksittäinen sylinteri 500 m syvään kaivokseen

Sylinterin Tilavuus	785,40 m ³	Potentiaali energia	4580,0 kWh
Sylinterin säde	5 m		16488177,8 KJ
Sylinterin korkeus	10 m		4,58 MWh
Tiheys	4,28 1000kg/m ³	Materiaalin hinta jos rautamalmi	285 727,85 €
Massa	3361504,139 Kg	Muut kustannukset	270 000 €
Kaivoksen korkeus	500 m	Yht	555 728 €
		Energiansäilytys vaihtoehtoisella kustannuksella	Vaihtoehtoisen säilytyksen hinta
		1 145 012	250 €/kWh
		549 606	120 €/kWh
		366 404	80 €/kWh

Liite 2. 50 sylinteriä 500m syvään kaivokseen

Monta sylinteriä tilavuus	39 269,91 m ³	Potentiaali energia	11 450 123 kWh
Sylinterin säde	5 m		41 220 444 509 KJ
Sylinterin korkeus	10 m		11 450,12 MWh
Tiheys	4,28 1000kg/m ³	Materiaalin hinta, jos rautamalmi	630 282 026 €
Massa	168 075 207 Kg	Kaikki kustannukset	945 423 039 €
Kaivoksen korkeus	500 m		
Sylintereitä	50	Energiansäilytys vaihtoehtoisella kustannuksella €	Vaihtoehtoisen säilytyksen hin
		2 862 530 869	250 €/kWh
		1 374 014 817	120 €/kWh
		916 009 878	80 €/kWh

Liite 3. 500m maanalainen järvi

Maanalainen järvi	3926990,82 m ³	Potentiaali energia	5350525,0 kWh
Sylinterin säde	5 m		19261889957 KJ
Sylinterin korkeus	1000 m		5350,52 MWh
Tiheys	1 1000kg/m ³	Energiansäilytys vaihtoehtoisella kustannuksella	Vaihtoehtoisen säilytyksen hinta
Massa	3926990817 Kg	1 337 631 247	250 €/kWh
Kaivoksen korkeus	500 m	642 062 999	120 €/kWh
		428 041 999	80 €/kWh