

Miia Raerinne

**POTENTIAALIENERGIAA
HYÖDYNTÄVIEN
ENERGIAVARASTOJEN
MAHDOLLISUUDET SUOMESSA**

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Seppo Syrjälä
Helmikuu 2023

TIIVISTELMÄ

Miia Raerinne: Potentiaalienergiaa hyödyntävien energiavarojen mahdollisuudet Suomessa
Possibilities of gravitational energy storages in Finland
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tekniikan ja luonnontieteiden TkK-tutkinto-ohjelma, ympäristö- ja energiatekniikka
Helmikuu 2023

Hiilineutraalimpaan energiantuotantoon siirryttäessä tuuli- ja aurinkovoiman sähköntuotannon osuus Suomen energiantuotannosta tulee kasvamaan. Koska tuuli- ja aurinkovoiman sähköntuotanto vaihtelee säätilojen ja vuodenaikojen mukaan, tarvitaan sähköenergiavaroja tasapainottamaan sähköntuotanto ja -kulutus sähköverkossa. Yksi sähköenergiavarojen muoto ovat potentiaalienergiaa hyödyntävät energiavarastot, joiden mahdollisuuksia Suomessa tutkitaan tässä työssä. Työn tavoitteena on tutkia uusiutuvan sähköenergian varastoinnista potentiaalienergiaan ja perehtyä erilaisiin potentiaalienergiaa hyödyntäviin energian varastointitekniikoihin. Lisäksi työssä tutkitaan potentiaalienergiaa hyödyntävien energiavarojen toteutettavuutta Suomessa energiavarojen rajoitteiden ja Suomen olosuhteiden kautta.

Työssä käydään ensin läpi tuuli- ja aurinkovoimaa sekä niiden sähköntuotantoa Suomessa. Havaittiin, että tuuli- ja aurinkovoiman sähköntuotannon osuus Suomen sähköntuotannosta kirjoittamishetkellä on noin 10 %. Mutta koska kyseinen osuus on vielä suhteellisen pieni ja Suomen sähköverkko on hyvin kytkeytynyt laajempiin valtioiden välisiin sähköjärjestelmiin, ei Suomessa ole vielä kirjoitushetkellä kriittistä tarvetta sähköenergian varastoinnille. Lähtötilanteessa tarve energiavaroille tulee kuitenkin kasvamaan muun muassa tuulivoiman kapasiteetin nopean kasvun takia.

Sähköenergiaa varastoidaan varastosysteemin potentiaalienergiaan nostamalla ja laskemalla vettä tai kiinteää massaa kahden eri korkeudella olevan tason välillä. Potentiaalienergiaa hyödyntävät energiavarastot ovat suuren luokan varastoja, jotka pystyvät yleensä varastoimaan energiaa minuuteista tunteihin. Erilaiset potentiaalienergiaa hyödyntävät energiavarastot jaetaan työssä karkeasti kolmeen kategoriaan niiden veden tarpeen mukaan. Veden käyttöä vaativat energiavarastot eli pumppuvoimalaitokset ovat yleisimpiä ja teknologialtaan edistyneimpiä potentiaalienergiaa hyödyntäviä energiavaroja. Männälliset veden käyttöä vaativat energiavarastot sekä energiavarastot ilman veden käyttöä ovat vielä varhaisemmassa teknologian kehitysvaiheessa.

Työssä on otettu huomioon merkittävimmät potentiaalienergiaa hyödyntävien energiavarojen rajoitteet, jotka ovat sijaintiin liittyvät sekä teknologiset, taloudelliset ja ympäristölliset tekijät. Todettiin, että useat varastointimenetelmät ovat vielä kalliita suhteessa niistä saatavaan hyötyyn. Ympäristöhaasteet taas riippuvat energiavaron tarkemmasta sijainnista. Sijaintiin liittyvistä rajoitteista haastavin Suomen olosuhteissa on tarvittavan korkeuseron löytäminen. Tämän vuoksi Suomeen sopivimmat potentiaalienergiaa hyödyntävät energiavarastot ovat sellaiset, jotka voidaan sijoittaa vanhoihin kaivoksiin.

Avainsanat: energiavaro, uusiutuva energia, potentiaalienergia, pumppuvoimalaitos, Suomi, vanhat kaivokset

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. UUSIUTUVA SÄHKÖENERGIA SUOMESSA	3
2.1 Tuulivoima.....	3
2.2 Aurinkovoima	4
3. POTENTIAALIENERGIAA HYÖDYNTÄVÄT ENERGIAVARASTOT	6
3.1 Sähköenergian varastoiminen potentiaalienergiaan	6
3.2 Erilaisia potentiaalienergiaa hyödyntäviä energiavarastoja.....	9
3.2.1 Veden käyttöä vaativat energiavarastot	9
3.2.2 Männälliset veden käyttöä vaativat energiavarastot	11
3.2.3 Energiavarastot ilman veden käyttöä	14
3.3 Energiavarastojen rajoitteet.....	16
4. POTENTIAALIENERGIAA HYÖDYNTÄVÄT ENERGIAVARASTOT SUOMESSA..	19
4.1 Suomi energiavarastojen sijoittamisen kannalta	19
4.2 Energiavarastojen toteutettavuus Suomessa	21
5. JOHTOPÄÄTÖKSET	23
LÄHTEET	25

1. JOHDANTO

Suomen hallitus on asettanut tavoitteeksi Suomen olevan hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä [1, luku 3.1]. Tämä tarkoittaa myös energiantuotannon perusteellista muuttamista. Siirryttäessä hiilineutraalimpaan energiantuotantoon tulee uusiutuvien energialähteiden merkitys kasvamaan.

Uusiutuvista energialähteistä tuuli- ja aurinkovoima ovat hyvin sää-, sijainti- ja vuodenaikariippuvaisia. Tuuli- ja aurinkovoiman osuuden kasvaessa energiantuotannossa sähköverkkoon tulevan sähköntuotannon ja sieltä lähtevän sähkönkulutuksen tasapainottaminen muuttuu vaikeammaksi. Sähköntuotannon vaihtelevuuden vuoksi uusiutuvien energialähteiden tuottama sähkö tulisi voida varastoida. Sähköenergiaa varastoidaan, kun sähköntuotanto on korkeammalla kuin sähkönkulutus. Kun taas sähkönkulutus on korkeammalla kuin sähköntuotanto voidaan varastoitua sähköenergiaa hyödyntää tasapainottamaan sähkönkulutus ja -tuotanto. [2, s. 5–6] Tässä työssä keskitytäänkin uusiutuvista energialähteistä tuuli- ja aurinkovoimaan niiden sähköntuotannon vaihtelevuudesta johtuvan energiavarastoinnin tarpeen vuoksi.

Sähköenergian varastoimiseen on monia eri tekniikoita ja menetelmiä. Tässä työssä keskitytään potentiaalienergiaa hyödyntäviin varastointitekniikoihin. Potentiaalienergia määritellään Tepa-termipankin [3] mukaan energiana, joka ”riippuu järjestelmän eri osien suhteellisesta asemasta toisiinsa nähden”. Potentiaalienergialla tarkoitetaan tässä työssä kahden eri tason välisen vertikaalisen etäisyyden varastoimaa energiaa. Potentiaalienergiaa hyödyntäviksi energiavarastoiksi luokitellaan tässä työssä sähköenergiavarastot, joissa varastoidaan sähköenergiaa varastosysteemin potentiaalienergiaksi.

Yksi esimerkki potentiaalienergiaa hyödyntävästä energiavarastosta on pumppuvoimalaitos, jossa sähköä käytetään veden pumppaamiseen alemmalla vesisäiliöltä ylemmälle vesisäiliölle, jolloin systeemin potentiaalienergia kasvaa. Potentiaalienergiaa muunnetaan takaisin sähköenergiaksi laskemalla vettä takaisin alemmalle vesisäiliölle turbiinien läpi. [4, luku 2]. Potentiaalienergiaa hyödyntäviä energiavarastoja ovat erilaiset veden sekä kiinteän massan siirtämiseen perustuvat menetelmät [2, s. 9].

Tämän työn tavoitteena on selvittää minkälaiset mahdollisuudet potentiaalienergiaa hyödyntävillä varastointimenetelmillä olisi Suomen olosuhteissa. Suomen mahdollisuutta varastointimenetelmille tarkastellaan varastointimenetelmien vaatimusten ja rajoitteiden kautta. Tarkastelussa otetaan huomioon Suomelle tyypilliset ominaisuudet, kuten maaston suhteellisen pienet korkeuserot sekä pohjoisesta sijainnista johtuvat olosuhteet. Vaihtoehtojen potentiaalisuutta tutkittaessa otetaan huomioon muun muassa varastointimenetelmien taloudelliset esteet sekä tekniikan nykyiset ja lähitulevaisuuden rajoitteet.

Työn tutkimuskysymykset ovat:

1. Miten uusiutuvaa sähköenergiaa saadaan varastoitua hyödyntäen potentiaalienergiaa?
2. Mitä eri potentiaalienergiaa hyödyntäviä sähköenergian varastointimenetelmiä on?
3. Miten kyseiset varastointimenetelmät soveltuvat Suomeen?
 - 3.1 Minkälaisia rajoittavia tekijöitä tulee ottaa huomioon?
 - 3.2 Ovatko varastointimenetelmät toteutettavissa Suomessa lähitulevaisuudessa?

Tämän työn luvussa 2 käsitellään uusiutuvaa sähköenergiaa Suomessa. Luvussa tarkastellaan työn rajauksen mukaisesti uusiutuvista energialähteistä tuuli- ja aurinkovoimaa sekä niiden sähköntuotantoa Suomessa. Luvussa 3 käsitellään sähkön varastointia systeemin potentiaalienergiaan, perehdytään erilaisiin potentiaalienergiaa hyödyntäviin energiavarastoihin yleisellä tasolla sekä käydään läpi niihin liittyviä rajoitteita. Luvussa 4 käsitellään Suomen mahdollisuuksia soveltaa kyseisiä varastointimenetelmiä. Luvussa tarkastellaan Suomen olosuhteita energiavarastojen kannalta, Suomeen suunniteltua energiavarastohanketta sekä sitä, onko potentiaalienergiaa hyödyntävillä energiavarastoilla tulevaisuutta Suomessa. Viimeisessä luvussa esitetään työn johtopäätökset.

2. UUSIUTUVA SÄHKÖENERGIA SUOMESSA

Tässä luvussa käsitellään uusiutuvista energialähteistä tuuli- ja aurinkovoimaa. Sähköenergian varastoinnin kannalta tuuli- ja aurinkovoima ovat keskeisimmät energialähteet niiden sähköntuotannon vaihtelevuuden takia. Alaluvussa 2.1 perehdytään tuulivoimaan ja sen sähköntuotantoon Suomessa. Alaluvussa 2.2 perehdytään puolestaan aurinkovoimaan ja sen sähköntuotantoon Suomessa.

2.1 Tuulivoima

Tuulivoima on ilmapvirtauksen liike-energian muuttamista tuulivoimalan lapojen pyörimisliikkeeksi, minkä jälkeen pyörimisenergia muuttuu sähköksi generaattorissa [5]. Lapojen pyöriminen perustuu aerodynamiikan periaatteeseen, jota käytetään myös lentokonetekniikassa. Tuuli aiheuttaa lavan alapuolelle matalapaineen, jota kohti lapa liikkuu. Tämä nostovoima on suurempi kuin tuulen aiheuttama voima lavan etuosaan, minkä takia tuulivoimalan roottori alkaa pyöriä. [6, s. 6] Roottorin pyöriminen muutetaan generaattorissa sähköksi [7].

Tuulivoimalan sähköntuotanto riippuu tuulen nopeudesta. Tuulivoimala tuottaa sähköä silloin, kun tuulen nopeus on välillä 3–25 m/s [8]. Tuulivoimala tarvitsee 3 m/s tuulennopeuden käynnistyäkseen, ja nimellisteho saavutetaan tuulennopeuden ollessa noin 10–15 m/s. Tuulivoimalan tehoa voidaan joutua rajoittamaan nopeuden ollessa 15–25 m/s. Tuulen nopeuden ollessa yli 25 m/s tuulivoimala pysäytetään, jotta välttyttäisiin mahdollisilta laiterikoilta. [7]

Tuulivoima on kasvava energiamuoto Suomessa. Tuulivoiman arvioidaan kattaneen Suomen sähköntuotannosta 9,3 % vuonna 2021 [9]. Tuulivoiman kapasiteetti ylitti 5600 MW vuoden 2022 lopussa [5], ja sen arvioidaan kasvavan lähitulevaisuudessa noin 1000 MW vuodessa, mikä vastaa yhtä ydinreaktoria [10]. Tuulivoimalat kannattaa sijoittaa rannikolle tai merelle sijainnin tuulisuuden takia. Suomessa tuulivoimalat sijoitetaan yleensä Pohjois- ja Länsi-Suomeen [10].

Tuulivoimaloiden sijoittamisessa on otettava huomioon monia eri tekijöitä, joista sijainnin tuulisuus on oleellisin. Tuulivoimalan sijaintiin vaikuttavat muun muassa paikan tuulisuus, tuulivoimalan vaatima tila ja etäisyys asutuksesta sekä ympäristölliset tekijät. Sijainnin tuulisuus on vuositasolla hyvin ennustettavissa, koska tuulen vuodenaikavaihtelut ovat sijaintityypillisiä [11, s. 65]. Sijainnin vuosittaiseen tuulisuuteen vaikuttaa maantieteellinen sijainti, sijainnin korkeus merenpintaan nähden ja etäisyys

merestä, ympärillä olevat mäet, kasvusto ja rakennukset sekä ympäröivän maan korkeusvaihtelu [11, s. 66]. Päivä- ja tuntitasolla sijainnin tuulen voimakkuus sekä suunta voivat vuosittaisesta tuulisuudesta poiketen vaihdella merkittävästi [11, s. 65]. Sijainnin tuulisuudesta voidaan kuitenkin muodostaa malleja, joiden avulla voidaan selvittää keskivertotuulisuutta eri ajankohtina [12, luku 3.2].

Tuulivoiman tuotannon vuorokauden ajan ja vuodenajan mukaiselle vaihtelulle on syynä muun muassa ilman lämpötilan vaikutus tuulen nopeuteen [12, luku 3.2]. Esimerkiksi Suomessa vuodenaajoista talvella (joulukuusta helmikuuhun) tuulivoiman tuotanto on suurempaa kuin muina vuodenaikoina [12, luku 3.1]. Lämpötilan vaikutus tuulen nopeuteen kuitenkin myös lisää vuorokauden sisäistä tuulisuuden ennustettavuutta [12, luku 3.2]. Ennustettavuus kasvaa, koska vuorokauden sisäisiä lämpötiloja pystytään ennustamaan suhteellisen hyvin.

Vaikka tuulivoima on uusiutuvuutensa takia tärkeä energialähde hiilineutraalimpaan energiantuotantoon siirryttäessä, on sen sähköntuotannon vaihtelevuus merkittävä haittatekijä. Tuuli energialähteenä on epävakaa, koska tuulta on vaikea ennustaa täsmällisesti ja se riippuu sääolosuhteista. Tämä johtaa siihen, että tuulivoimaa ei ole aina saatavilla silloin, kun sille olisi tarvetta. Tuulivoimalla voi olla myös ylituotantoa samaan aikaan, kun energiankulutus on vähäistä. [6, s. 11] Tuulivoiman epätasaisen energiantuotannon takia tarvitaan sähköenergiavarastoja, joita käsitellään tarkemmin luvussa 3.

2.2 Aurinkovoima

Aurinkovoima on auringon tuottaman säteilyn muuttamista sähköksi tai lämmöksi. Aurinkosähkön tuotannossa aurinkokennon materiaali absorboi auringon tuottamaa valoenergiaa ja siten tuottaa virittyneitä elektroneja. Virittynyt elektroni siirtyy elektrodilta toiselle, jolloin elektrodien välille syntyy jännite ja sähkövirta. [13, s. 54–55] Aurinkokennojen materiaalina käytetään usein yhtä tai kahta eri puolijohdetta [13, s. 103]. Useammasta aurinkokennosta muodostuu aurinkopaneeli.

Aurinko tuottaa joka vuosi maanpinnalle noin 885 TWh energiaa, joka vastaa vuoden 2008 globaalia energiankulutusta 6200-kertaisesti. On arvioitu, että globaalin energiankulutuksen kattamiseksi tarvitsisi hyödyntää prosentin kymmenesosa maanpinnalle tulevasta aurinkoenergiasta. [14, s. 31–32] Aurinkopaneeleihin ulottuvaan auringon säteilyn määrään vaikuttavat säteilyn tekemän matkan pituus auringosta maanpinnalle, ilmassa olevat hiukkaset ja vesihöyry sekä pilvet. [14, s. 40]

Kaikkea maanpinnalle tulevaa aurinkoenergiaa ei saada hyödynnettyä, koska aurinkopaneelit eivät pysty muuntamaan kaikkea paneelien kennoihin tulevaa auringon säteilyä sähköksi. Osa auringon säteilystä heijastuu kennosta pois, osa kulkee kennon läpi absorboitumatta siihen ja osa muuttuu lämmöksi. Esimerkiksi kennon materiaaleilla voidaan vaikuttaa osittain näiden kolmen tekijän suuruuteen, mutta niitä ei saada kokonaan hävitettyä. [15, luku 3.1]

Suomen aurinkovoiman sähköntuotantokapasiteetin arvioitiin olevan vuoden 2021 lopussa noin 395 MW, josta suurin osa tulee alle 1 MW pientuotannosta. Yli 1 MW laitosten kapasiteetti on yhteensä noin 4,6 MW. Lisäksi on sähköverkkoon kytkemätöntä kapasiteettia, joka koostuu esimerkiksi pientalojen omista aurinkopaneeleista. Aurinkosähkön kapasiteetin on arvioitu kasvaneen vuoden 2021 aikana yli 100 MW. [16]

Vaikka aurinkovoima on kasvava energiamuoto Suomessa, on sen tuotanto silti vähäistä verrattuna esimerkiksi tuulivoimaan. Esimerkiksi vuonna 2021 aurinkovoiman arvioidaan kattaneen 0,4 % Suomen sähköntuotannosta [9], kun tuulivoiman osuus oli vastaavasti 9,3 %. Eroa selittää osin se, että tuulivoima on monin puolin optimaalisempi energialähde Suomen olosuhteissa kuin aurinkovoima.

Aurinkosähkön tuotannon määrä muuttuu vuorokauden ja vuoden aikana sekä sijainnin mukaan. Epäsäännöllisyyttä aiheuttavat muun muassa maapallon sijainti aurinkoon nähden sekä säävaihtelut. Kun aurinko on alempana taivaalla, sen energia jakautuu suuremmalle pinta-alalle ja heikkenee. [14, s. 34–35] Suomen pohjoisen sijainnin takia aurinko on alempana taivaalla talvikuukausina, mikä vähentää aurinkosähkön tuotantoa. Pohjois-Euroopassa eli myös Suomessa auringon säteily on suurimmillaan huhtikuusta elokuuhun [14, s. 40], jolloin aurinkosähkön tuotanto on parhaimmillaan.

Aurinkosähkön tuotannon epätasaisuuden ja kausivaihtelun takia aurinkosähköä olisi tarpeellista varastoida. Sähköenergiavarastojen käytöllä voisi yhtenäistää sähköntuotantoa ja -kulutusta. Aurinkovoiman tuotanto on kuitenkin Suomessa vähäistä, joten tuulivoima on oleellisempi tässä työssä tarkasteltava energialähde sähköenergian varastointia tutkittaessa.

3. POTENTIAALIENERGIAA HYÖDYNTÄVÄT ENERGIAVARASTOT

Kuten luvussa 2 todettiin, tuuli- ja aurinkosähköä tulisi pystyä varastoimaan niiden sähköntuotannon epätasaisuuden vuoksi. Sähköenergian varastointiin on monia eri tekniikoita, mutta tässä luvussa käsitellään potentiaalienergiaa hyödyntäviä energiavarastoja sekä teoriaa niiden taustalla. Alaluvussa 3.1 käsitellään potentiaalienergiaa ja sähköenergian varastointia. Alaluvussa 3.2 perehdytään erilaisiin potentiaalienergiaa hyödyntäviin energiavarastoihin. Viimeisenä alaluvussa 3.3 käydään läpi energiavarastojen rajoitteita, esimerkiksi energiavaraston vaatiman teknologian sekä sijoituksen kannalta.

3.1 Sähköenergian varastointi potentiaalienergiassa

Tuuli- ja aurinkosähkön yleistyessä sähkön varastoinnin tarve kasvaa. Kun tuuli- ja aurinkosähkön osuus sähköverkon tuotannosta on suhteellisen pieni, energialähteiden tuotannon vaihtelevuus saadaan vielä korjattua sähköverkon normaalilla joustavuudella [2, s. 5]. Sähköenergiavarastoja tarvitaan, kun vaihtelevan tuotannon energialähteiden osuus kasvaa sähköverkossa [17, luku 2].

Kun sähköenergian kulutus on korkealla ja tuotanto matalalla, on sähköverkko epätasapainossa [2, s. 5]. Tällöin sähköä on saatava muualta kulutuspiikin verran. Nykyään käytetään kulutuspiikkien tasaamiseen joustavia sähköenergian tuotantotapoja [2, s. 6]. Tällaisia ovat esimerkiksi varavoimalat, joita Suomessakin on käytössä. Yleensä varavoimaloissa poltetaan hiilipohjaisia polttoaineita. Esimerkiksi Kellosaaren varavoimalaitoksessa poltetaan polttoöljyä [18]. Fossiilisiin polttoaineisiin nojautuvat varavoimalaitokset ovat kuitenkin ristiriidassa hiilineutraalimman energiantuotannon kanssa, johon Suomikin pyrkii. Varavoimalat tulevat kuitenkin pysymään osana energiantuotantoa esimerkiksi energiahuoltovarmuuden kannalta. Suomessa energiaa onkin varastoituna huoltovarmuuskeskuksen toimesta muun muassa kivihiilenä, öljynä ja maakaasuna [19].

Joustavien sähköenergian tuotantotapojen käytössä ei kuitenkaan hyödynnetä sähköenergian tuotantopiikkejä eli ylituotantoa [2, s. 6], jota usein tulee esimerkiksi tuulivoiman sähköntuotannossa. Varavoimalojen hiilipohjaiset polttoaineet ovat luonnollisia energiavarastoja, mutta niihin ei vielä pysty varastoimaan uusiutuvista energialähteistä tulevaa sekundääristä sähköenergiaa [20, luku 2.2]. Kehitteillä on

kuitenkin menetelmä, jolla voitaisiin lähitulevaisuudessa sähkön yli tuotannolla valmistaa vetyä. Vety voidaan myös jatkojalostaa esimerkiksi metaaniksi käyttämällä hiilidioksidia. [21, s. 1]

Usein kansalliset sähköverkot on yhdistetty ulkomaisiin sähköverkkoihin, jolloin sähköä voidaan ostaa muualta kulutuksen ylittäessä tuotannon. Suurempi sähköverkko on siis myös tapa vähentää tuotannon ja kulutuksen epätasapainoa [2, s. 6]. Sähköverkon tasapainon säilyttämiseksi sähkönkulutusta voidaan myös yrittää ohjata enemmän normaalien kulutuspiikkien ulkopuolelle tai aikoihin, joina tuotetaan paljon ylimääräistä sähköä [2, s. 6].

Sähköenergiavarastot ovat yksi tapa sähköntuotannon ja -kulutuksen tasapainottamiseen, jossa otetaan huomioon niin kulutuspiikit kuin yli tuotantokin. Jos sähköä on varastoitu korkean tuotannon ja matalan kulutuksen aikana, on sähköä saatavilla korjaamaan sähköverkon epätasapaino tarvittaessa. Korkean tuotannon ja matalan kulutuksen aikana ylimääräinen energia yleensä "ajetaan maahan" eli se menee hukkaan ilman sähköenergiavarastoja [2, s. 5]. Sähköenergiavarastot tuovat siis lisää joustavuutta sähköverkkoon ja vähentävät hukkasähköä.

Sähköenergiavarastot ovat uusiutuvien energialähteiden lisäksi tärkeitä myös energiantuotannon peruskuormasta vastaaville energiantuotantotavoille, kuten ydinvoimalle. Ydinvoima on suuren luokan energialaitos, jolloin se vastaa hyvin sähköntuotannon peruskuormasta, mutta se ei reagoi hyvin vaihtelevaan sähkönkysyntään. Sähkönkysynnän piikkeihin tulee siis reagoida muulla tavalla, esimerkiksi sähkövarastojen avulla. [2, s. 72]

Sähköenergiavarastot voidaan jakaa varastointiajan mukaan. Lyhytaikaisessa varastoinnissa sähköä varastoidaan sekunneista minuutteihin. Pitkäaikaisessa varastoinnissa taas sähköä varastoidaan tunneista jopa kausittaiseen vaihteluun. [22, s. 21]. Termeihin liittyvät ajanmääreet riippuvat käytetystä lähteestä. Esimerkiksi osassa lähteistä on myös lisäksi keskipitkä varastointiaika [23].

Varastointimenetelmät soveltuvat vaihtelevasti eri pituisiin varastointiaikoihin. Lyhytaikaiseen varastointiin soveltuvat parhaiten tekniikat, joissa sähköä varastoidaan suoraan hyödyntämällä staattista sähköä tai magneettikenttiä. Tällaisia ovat esimerkiksi SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) sekä superkondensaattorit. Pitkäaikaiseen varastointiin soveltuvat parhaiten menetelmät PSH (Pumped-Storage Hydropower) eli pumppuvoimalaitos, CAES (Compressed Air Energy Storage) sekä vetyyn varastointi. PHS eli pumppuvoimala on globaalisti laajemmin käytetty varastointimenetelmä kuin CAES tai vetyyn varastointi. [22, s. 21] CAES:ssa sähköä

käyttämällä ilmaa kompressoidaan ja varastoidaan, josta sitä sähkön kulutuspiikkien aikana käytetään turbiinien avulla sähkön tuottamiseen [20, luku 4.1.1.4]. Vetyyn varastoitaessa sähkön ylituotannolla valmistetaan vetyä, joka voidaan jatkojalostaa tai käyttää suoraan sähkön kulutuspiikkien aikana esimerkiksi reaktioaineena polttokennoissa sähkön tuottamiseksi [20, luku 4.1.2.1]. Osa varastointimenetelmistä soveltuu sekä lyhyt- että pitkäaikaiseen varastointiin. Tällaisia ovat esimerkiksi akkuvarastot. [22, s. 21]

Tässä työssä tarkastellaan potentiaalienergiaa hyödyntäviä energiavarastoja, joiden yleisesti käytössä oleva lyhenne on GES (Gravity Energy Storage) [20, luku 4.1.1.3]. Potentiaalienergiaa hyödyntävät varastot sopivat paremmin pitkäaikaiseen varastointiin, kuten yllä PSH:n kohdalla mainittiin. PSH:lle on myös toinen yleisempi termi PHES (Pumped Hydroelectricity Storage), jota käytetään tästä eteenpäin kyseiselle tekniikalle tässä työssä. GES-systeemien kohdalla pitkäaikainen varastointi tarkoittaa lähinnä tunneissa mitattavaa aikaa [24, 17].

Potentiaalienergia on kahden eri tason välillä varastoituvaa energiaa. Esimerkiksi liike-energiaa varastoituu potentiaalienergiaksi, kun pallo heitetään suoraan ylöspäin. Kun pallo laskeutuu takaisin alas, se vapauttaa potentiaalienergian takaisin liike-energiaksi. Jos pallo heitettäisiin lähtötasoa korkeammalle tasolle ja pudotettaisiin vasta myöhemmin, pallo olisi varastoinut energiaa potentiaalienergian muodossa pidemmän aikaa. [25, luku 8.1] Sama periaate pätee sähköenergian varastoimisessa potentiaalienergiaan. Sähköenergian varastoiminen on kuitenkin monimutkaisempi prosessi kuin pallon heittäminen.

Kappaletta nostettaessa tehtävä työ on yhtä suuri kuin potentiaalienergian kasvu systeemissä tai toisin sanoen varastoituva energia potentiaalienergiaan. Kaava potentiaalienergialle U on

$$U = mgh, \quad (1)$$

jossa m on nostettavan kappaleen massa, g on maan putoamiskiikkyvyys ja h on korkeus, jolle massa nostetaan. Korkeus riippuu valitusta nollapotentiaalista eli vertailutasosta, joka on mielivaltainen. [25, luku 14.2] Usein nollapotentiaali asetetaan kohtaan, josta kappale nostetaan. Koska maan putoamiskiikkyvyys pysyy suhteellisen muuttumattomana lähellä maanpintaa tietyssä sijainnissa, ovat massa ja korkeus ainoat muuttuvat tekijät, joihin voi merkittävästi vaikuttaa. Esimerkiksi PHES-systeemissä nostettavan veden määrä ja putouskorkeus vaikuttavat suoraan varastoitavan potentiaalienergian määrään.

Koska maan painovoima on suhteellisen heikko voima, on potentiaalienergiaan varastoivien systeemien energiatiheys matala [4, luku 2]. Systeemin energiatheydellä tarkoitetaan varastoitua energiaa per systeemin tilavuus [4, luku 1]. Matalan energiatheyden takia potentiaalienergiaa hyödyntävät varastot vaativat suuren korkeuseron ja suhteellisen suuren määrän vettä tai kiinteää massaa, jotta ne voivat varastoida tarvittavan määrän energiaa [4, luku 2]. Potentiaalienergiaa hyödyntävät energiavarastot ovat siis suuren mittakaavan varastoja ja siten sopivampia pitkäaikaiseen varastointiin.

Potentiaalienergiaa hyödyntävistä energiavarastoista on tehty laajasti tutkimuksia maailmalla. Esimerkiksi Hunt et al. tekemässä artikkelissa on tutkittu kiinteän massan, kuten hiekan, siirtämiseen perustuvaa energiavarastointimenetelmää [26]. Pumpattua vesivoimaa energiavarastona on tutkittu muun muassa Blakers et al. kirjoittamassa artikkelissa [17]. Suomessa tutkimusten määrä on pienempi, mutta esimerkiksi Vuorenmaa et al. kirjoittamassa raportissa [23] tutkitaan potentiaalienergiaa hyödyntävien energiavarastojen mahdollisuutta Suomessa muiden energiavarastojen ohella.

Potentiaalienergiaan perustuvat varastointimenetelmät voidaan jakaa karkeasti kahteen eri kategoriaan sen mukaan, vaatiiko varastointimenetelmä veden käyttöä vai ei [4, luku 2]. Vedenkäyttöä vaativat energiavarastot ovat erilaisia versioita PHES:stä. Energiavarastoja, jotka eivät vaadi veden käyttöä kutsutaan lyhenteellä SGES (Solid Gravity Energy Storage). Kyseisissä energiavarastoissa siirretään kiinteää massaa veden sijasta. Osa energiavarastoista voidaan kuitenkin määritellä kuuluvan molempiin kategorioihin, koska ne siirtävät kiinteää massaa vesivirtauksen avulla. Seuraavassa alaluvussa 3.2 käydään läpi potentiaalienergiaa hyödyntäviä varastointimenetelmiä jaettuna kolmeen eri kategoriaan: PHES-systeemit, SGES-systeemit sekä niiden välimuotona mäännälliset PHES-systeemit.

3.2 Erilaisia potentiaalienergiaa hyödyntäviä energiavarastoja

3.2.1 Veden käyttöä vaativat energiavarastot

Luvussa 2 käsiteltiin uusiutuvia energialähteitä Suomessa. Siinä keskityttiin tuuli- ja aurinkovoimaan niiden sähköntuotannon vaihtelevuuden ja tästä johtuvan energian varastoinnin tarpeen vuoksi. Vesivoima on yksi uusiutuvista energialähteistä, mutta sen tuotanto on hyvin säädeltyä, ja se voi jo itsessään toimia energiavarastona.

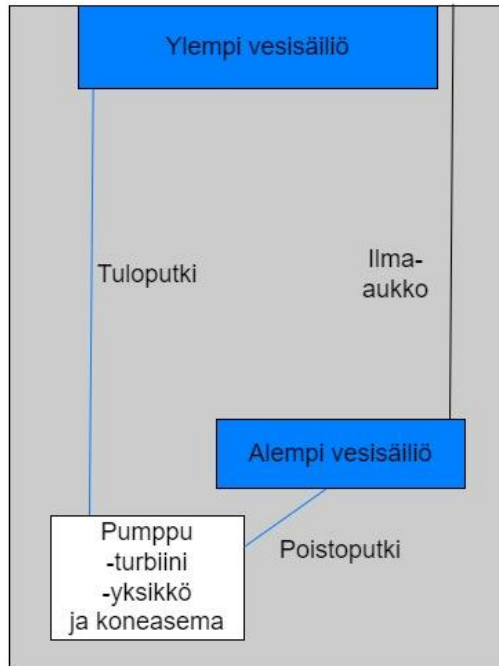
Vesivoimalaitos voi toimia energiavarastona, jos sen yhteydessä on pato, jolla voidaan varastoida vettä korkeammalle tasolle. Vesivoimalaitoksessa joessa virtaavaa vettä ohjataan turbiinien läpi sähköntuottamiseksi. Turbiineiden läpi kulkevan veden virtausta voidaan säädellä sähköntuotannon ja -kulutuksen tasaamiseksi. Ilman patoa vesi virtaa joessa luonnolliseen tahtiin ja tuottaa sähköä vedenvirtauksen mukaisesti. [17, luku 4] Vesivoimalla voidaan myös reagoida suhteellisen nopeasti sähkönkulutuksen piikkeihin. Vesivoima on kuitenkin rajallista, koska suurin osa sopivista vesivoimaloiden sijainneista, esimerkiksi soveltuvista jokipaikoista, on jo hyödynnetty. [17, luku 2]

Varsinaiset veden käyttöä vaativat energiavarastot ovat erilaisia variaatioita PHES:stä. PHES-systeemeissä on yleensä kaksi eritasolla olevaa vesisäiliötä, joiden välillä siirretään vettä. Kun vesi pumpataan ylemmälle säiliölle, energiaa varastoituu systeemin potentiaalienergiaksi. Vesi lasketaan sähkönkulutuksen kasvaessa takaisin alemmalle säiliölle turbiinien kautta, jotta varastoitu energia saadaan takaisin sähköenergiaksi. [4, luku 2] PHES on yleisin maailmalla käytetty suuren luokan sähköenergian varastoimisen tekniikka [17 intro ja 20 luku 4.1.1.2]. PHES-systeemien tehokkuuden on arvioitu olevan välillä 65–85 % [20, luku 4.1.1.2].

PHES-systeemi voidaan sijoittaa myös joella toimivan vesivoimalaitoksen yhteyteen. Joen pää- tai sivuhaarassa on kahdella eri tasolla vesialtaat, joiden välillä vesi kulkee pumpun tai turbiinin kautta. Suurin osa joen vedestä kulkee turbiinin läpi ja jatkaa matkaa jokea myöten. Jotta kyseessä olisi energiavarasto, osa joen vedestä pumpataan takaisin ylemmälle vesialtaalle. [17, luku 5] Suurin osa PHES-systeemeistä maailmalla on jokien yhteydessä [17, luku 6].

Vettä hyödyntävä energiavarasto voidaan sijoittaa myös joen ulkopuolelle. Tällaisissa PHES-systeemeissä on kaksi eri korkeudella olevaa keinotekoista vesialtasta. Vesialtaat voivat olla jopa usean kilometrin päässä toisistaan. Altaita yhdistävät maan alla kulkevat vesiputket sekä pumput ja turbiinit. [17, luku 6] Koska molemmat vesialtaat ovat maanpinnalla, on PHES:n alueella oltava merkittävä korkeusero vesialtaiden välillä.

PHES:n vesisäiliöistä toinen voi olla maanpinnan alapuolella, jolloin puhutaan maanalaisesta PHES-systeemistä. Kyseinen ratkaisu sopii alueille, joiden maastossa ei ole luonnostaan suuria korkeuseroja. [4, luku 2.1] Kuvassa 1 on yksinkertaistettu kaksiulotteinen piirros maanalaisesta PHES-systeemistä. Kuvan mittasuhteet eivät vastaa oikean varaston mittasuhteita. Maanalaisia PHES systeemejä on suunniteltu myös vanhojen kaivosten hyötykäyttöön. Tästä lisää luvussa 4.



Kuva 1. Maanalainen PHEES-systeemi, perustuu lähteeseen [27]

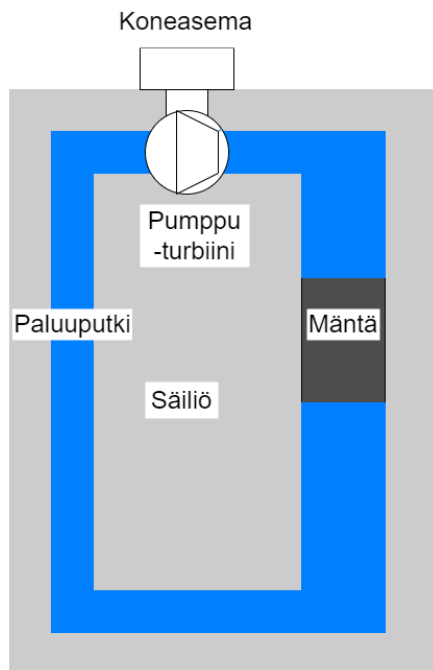
PHEES-systeemi voi myös sijaita merenpinnan alapuolella (Underwater Ocean Storage Systems eli UOSS), jolloin osa systeemiä, esimerkiksi vesisäiliö, on merenpohjassa. Tarvittava korkeusero on merenpinnan ja -pohjan välillä. UOSS:n kaltaiset energiavarastot voidaan yhdistää merellä kelluviin uusiutuvan energian laitoksiin. [4, luku 2.1]

3.2.2 Männälliset veden käyttöä vaativat energiavarastot

Osa veden käyttöä vaativista energiavarastoista voidaan luokitella myös SGES-systeemeiksi. Näissä energian varastointimenetelmissä on mukana mäntä, joka toimii liikuteltavana massana PHEES-systeemeissä liikuteltavan pelkän veden sijaan. Vettä kuitenkin tarvitaan väliaineeksi männän liikuttamiseen. Tässä työssä kyseisiä varastointimenetelmiä kutsutaan männällisiksi PHEES-systeemeiksi (Piston PHEES tai Piston SGES).

Männällinen PHEES-systeemi on maanalainen energiavarasto, jossa mäntä liikkuu veden avulla kuilussa. Varastoitaessa energiaa vettä pumpataan männän alapuolelle, jolloin mäntä nousee kuilun yläosaan. Kun varastoitu potentiaalienergia halutaan vapauttaa takaisin sähköksi, männän annetaan laskeutua kuilun alaosaan. Männän alla oleva vesi

kulkee turbiinin kautta tuottaen generaattorin avulla sähköä. Vesi kulkee kuilun päädystä toiseen putkea pitkin. [4 luku 2 ja 24 luku 3.3] Kuvassa 2 on yksinkertaistettu kaksiuolotteinen piirros männällisestä PHES-systeemistä. Kuvan mittasuhteet eivät vastaa oikean varaston mittasuhteita.



Kuva 2. Männällinen PHES-systeemi, perustuu lähteeseen [24]

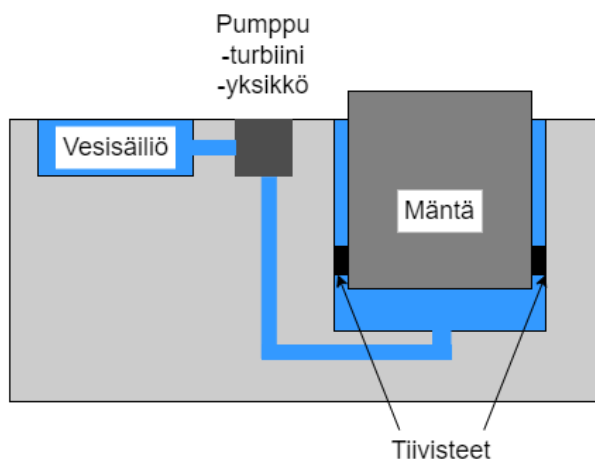
Männällisessä PHES-systeemissä voi olla mukana ilman kompressori, jolloin systeemiin lisätään paineilma osana energiavaraston toimintaa. Muuten energiavarasto toimii kuten edellä esitelty männällinen PHES. Kun energiaa halutaan varastoida, vettä pumpataan männän alapuolelle, joka nostaa mäntää ylöspäin. Männän yläpuolella on paineilmasäiliö, jossa oleva ilma pusertuu kasaan säiliön tilavuuden pienentyessä. Energiaa varastoituu gravitaationaalisen potentiaalienergian (gravitational potential energy) lisäksi elastiseen potentiaalienergiaan (elastic potential energy). Kun varastoitu energia halutaan takaisin käyttöön sähköä muodossa, männän annetaan laskeutua. Paineilmasäiliön ilma laajenee ja työntää mäntää ennestään. Männän alapuolella oleva vesi kulkee turbiinin läpi sähköä tuottamiseksi. Kuilun yläosa ei ole yhteydessä vettä kuljettavaan putkeen ja eikä siten kuilun alaosaan, toisin kuin tavallisessa männällisessä PHES-systeemissä. [24, luku 3.4] Vesi ei siis kierrä systeemissä samalla tavalla kuin tavallisessa männällisessä PHES-systeemissä.

Männällisestä PHES-systeemistä on suunniteltu versiota, jossa veden lisäksi mäntää liikutettaisiin vajerin avulla. Kun energiaa halutaan varastoida, vettä pumpataan männän

alapuolelle, jonka seurauksena mäntä nousee. Tämän lisäksi mäntää vedetään ylöspäin moottorin voimalla mäntään kytketyllä vaijerilla. Kuten edellisissäkin variaatioissa, männän annetaan laskeutua ja vesi kulkeutuu männän alta turbiinin läpi. Turbiiniyksikön lisäksi sähköä tuottaa vaijerin vapautuessa siihen kytketty generaattori. [24, luku 3.5]

Männällinen PHES-systeemi voi olla suljettu tai avoin. Suljettu systeemi on erillään muusta ympäristöstä suljettuna esimerkiksi maan alle. Edellä käytyt männälliset PHES-systeemit ovat suljettuja. Esimerkiksi Gravity Power-yrityksen kehittämä Gravity Power Plant on suljettu männällinen PHES-systeemi [28]. Suljetun männällisen PHES-systeemin tehokkuuden on arvioitu olevan välillä 75–80 % [24, luku 3.3].

Avoimessa männällisessä PHES-systeemissä vesisäiliöistä ainakin toinen on maanpinnalla, joka on siten avoinna ympäristöön. Esimerkiksi systeemissä voi olla kaksi vesisäiliötä, joiden välissä on turbiini-pumppu-yksikkö. Toinen vesisäiliöstä on suurempi ja siten sijaitsee alempana pienempää vesisäiliötä. Suuremmassa vesisäiliössä mäntänä toimii erikseen alueelta muodostettu maa-alue tai lohkar, joka nousee maanpinnan yläpuolelle pumpattaessa vettä sen alapuolelle. [4 luku 2.1 ja 29] Kuvassa 3 on yksinkertaistettu kaksiuotteinen piirros avoimesta männällisestä PHES-systeemistä. Kuvan mittasuhteet eivät vastaa oikean varaston mittasuhteita.



Kuva 3. Avoin männällinen PHES-systeemi, perustuu lähteeseen [4]

Avoimen systeemin toiminta on samankaltainen kuin suljetuissa männällisissä PHES-systeemeissä. Kuvassa 3 näkyvät tiivisteet varmistavat ettei vesi vuoda ulos systeemistä, kun vettä pumpataan männän alapuolelle. [4, luku 2.1] Tekniikkaa kehittävä yritys Heindl Energy arvioi sen tehokkuudeksi noin 80 % [29].

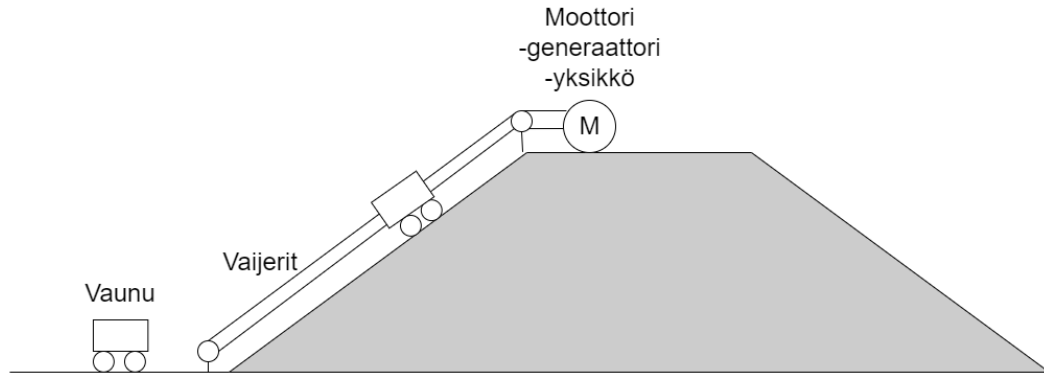
3.2.3 Energiavarastot ilman veden käyttöä

Potentiaalienergiaa hyödyntävät energiavarastot eivät aina vaadi veden käyttöä. SGES-systeemeillä on sama toimintaperiaate kuin veden käyttöä vaativilla energiavarastoilla [4, luku 2.2]. Ne varastoivat sähköenergiaa varastosysteemin potentiaalienergiaksi. Kyseisistä energiavarastoista on monenlaisia variaatioita, jotka ovat eri kehityksen vaiheissa.

Yhdessä SGES-systeemeistä pinotaan kiinteää massaa torneiksi. Varastoitaessa energiaa rakennuspalikan muotoisia massoja nostetaan paikallaan pysyvien massojen päälle. Mitä korkeammalle massoja joudutaan nostamaan, sitä enemmän nosturin moottorin käyttämää sähköenergiaa pinoamiseen saadaan varastoitua systeemin potentiaalienergiaksi. Kun sähkölle on tarvetta, siirretään massoja takaisin matalammalle, jolloin saadaan muunnettua potentiaalienergiaa takaisin sähköksi. Energiavaraston tehokkuuden on arvioitu olevan välillä 80–90 % riippuen projektista. [24, luku 3.1]

Sähköenergiaa voidaan varastoida potentiaalienergiaan myös lineaarimoottoria hyödyntäen. Kyseisessä systeemissä massoja siirretään ohjauskuilussa, joka sijaitsee kahden eri korkeudella olevan tason välillä. Lineaarimoottori muuntaa sähköä liikkeeksi, jolla massa liikkuu ohjauskuilussa ilman vaijereita. Sähköenergiaa varastoitaessa massoja siirretään ylemmälle tasolle lineaarimoottorilla, jolloin sähkö muuntuu systeemin potentiaalienergiaksi. Potentiaalienergia saadaan takaisin sähköksi laskemalla massoja takaisin alemmalle tasolle. Kyseinen tekniikka on vasta suunnitteluvaiheessa, mutta sen tehokkuudeksi on arvioitu alustavasti lineaarimoottorin tehokkuuden mukaan noin 95 %. [24, luku 3.8]

Kiinteää massaa voidaan siirtää myös kiskoilla kulkevien kaivosvaunujen avulla alemmalta tasolta ylemmälle. Kun varastoitu potentiaalienergia halutaan muuttaa takaisin sähköksi, vaunut päästetään laskeutumaan hitaasti takaisin alas rinnettä. Vaunua kuljettavat vaijerit pyörittävät generaattoria sähköä luomiseksi. Systeemi voi sijaita esimerkiksi vuorenrinteellä tai siinä voidaan hyödyntää vanhoja kaivoksia. [24, luku 3.6] Kuvassa 4 on yksinkertaistettu kaksikulotteinen piirros kyseisestä SGES-systeemistä. Kuvan mittasuhteet eivät vastaa oikean varaston mittasuhteita.



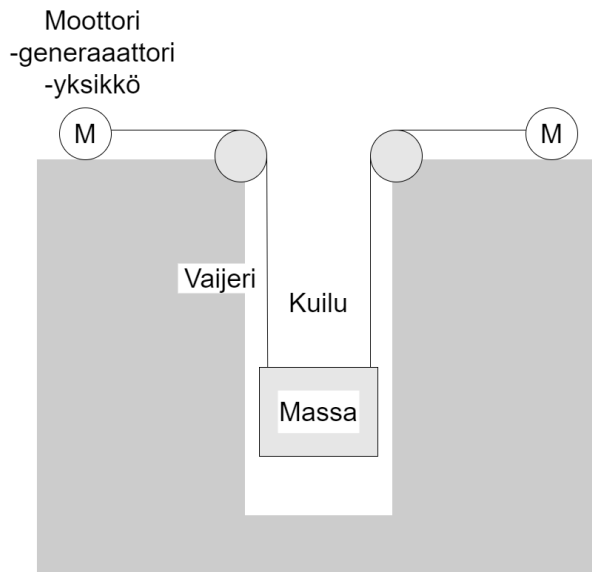
Kuva 4. Kiinteää massaa kaivosvaunulla kuljettava SGES-systeemi, perustuu lähteeseen [24]

Kyseistä tekniikkaa kehittää yritys Advanced Rail Energy Storage (ARES). Tekniikkaa on pilotoitu onnistuneesti ja varsinaista kaupallista energiavarastoa ollaan kehittämässä [2, s. 69]. Rautatien pituus ja kulma sekä kaivosvaunujen kuljettaman massan paino riippuvat halutusta energiavaraston suuruudesta ja projektista ylipäättäänsä. Esimerkiksi rautatietä voisi olla 16 km 8,5 % nousukulmalla ja vaunut voisivat painaa noin 45–64 t. Tekniikan tehokkuuden on arvioitu olevan välillä 78–80 %. [4, luku 2.2].

Kaivosvaunujen sijaan voidaan käyttää myös riippukoreja, jotka kulkevat rinnettä pitkin vaijerien varassa. Kyseinen systeemi sopii paremmin jyrkemmille rinteille kuin edellinen systeemi. [24, luku 3.7] MGES-systeemissä (Mountain Gravity Energy Storage) kuljetetaan hiekkaa tai soraa kahden esimerkiksi vuoren rinteellä olevan tason välillä. Maa-aines siirretään nosturin ja vaijereiden avulla. Maa-aineksen pakkaaminen ja purkaminen kuljetukseen toimii automaattisesti. [26, luku 2] MGES on tarkoitettu pitkäaikaisenergiavarastoksi pienen sähkönkysynnän alueelle. MGES-systeemi toimii siis parhaiten pienemmissä sähköverkoissa ja eristetyillä alueilla, kuten saarilla. [26, luku 1] Tekniikan tehokkuudeksi on arvioitu 85 %. Tekniikan on kehittänyt yritys Energy Cache, joka rakensi ensimmäisen prototyypin vuonna 2012. [24, luku 3.7]

Kuilullisessa SGES-systeemissä (Suspended Weight Energy Storage tai Shaft SGES) on kuilu, jossa vaijereilla riippuvaa massaa nostetaan ja lasketaan. Energiaa varastoitaessa painoa nostetaan ylimääräistä ja/tai halpaa sähköä käyttämällä. Kun energia halutaan takaisin sähköverkkoon, painon annetaan laskeutua. [30 luku 5 ja 24 luku 3.2] Painon laskeutuessa käytetään hyötyjarrutusta, jolla moottori tuottaa sähköä [30, luku 5]. Energiavarastosysteemi voidaan rakentaa maan päälle tai alle. Kuvassa 5 on yksinkertaistettu kaksiulotteinen piirros maanalaisesta, kuilullisesta SGES-systeemistä. Kuvan mittasuhteet eivät vastaa oikean energiavaraston mittasuhteita.

Vanhoja kaivoksia voidaan käyttää hyödyksi maanalaisissa kuilullisissa SGES-systeemeissä [30, luku 5]. Tekniikkaa kehittää yritys Gravitricity, joka on arvioinut tekniikan tehokkuuden olevan välillä 80–90 % [24 luku 3.2 ja 4 luku 2.2].



Kuva 5. Kuilullinen SGES-systeemi, perustuu lähteeseen [24]

Myös SGES voidaan sijoittaa meren alle, kuten PHES. Merenalaisessa SGES-systeemeissä ylempi taso on merenpinnalla ja alempi merenpinnan alla. Tasojen välillä nostetaan ja lasketaan kiinteää massaa. Kyseisessä systeemissä vältetään maanalaisen kuilun rakentamiselta. Kuten vastaavassa merenalaisessa PHES-systeemeissä, myös merenalaiseen SGES-systeemiin voidaan yhdistää merellä toimiva uusiutuvan energian laitos. [4, luku 2.2]

3.3 Energiavarastojen rajoitteet

Potentiaalienergiaa hyödyntävien energiavarastojen rajoittavia tekijöitä ovat esimerkiksi sijaintiin liittyvät tekijät sekä teknologiset, taloudelliset ja ympäristölliset tekijät [31 luku 3.5.1 ja 2 s. 70]. Sijaintiin liittyvinä tekijöinä ovat esimerkiksi tarvittava korkeusero ja tila sekä PHES-systeemeissä tarvittavan veden saatavuus. Haasteena onkin sopivan paikan löytäminen, jossa esimerkiksi tarvittava korkeusero toteutuu. Energiavarastojen sijainnin valitsemisessa on hyvä ottaa myös huomioon varaston sijainti suhteessa sähkön jakeluun. Sähkön jakelualuetta lähempänä oleva energiavarasto esimerkiksi vähentää sähkön siirtämisen tarvetta ja siitä aiheutuvia kuluja [26, luku 3]. Teknologiaan liittyvillä tekijöillä tarkoitetaan sitä, missä vaiheessa ja miten toimintavarmaa

varastosysteemissä käytettävä tekniikka on. Ovatko kyseiset energiavarastot toteutettavissa teknologian suhteen? Taloudellisilla tekijöillä tarkoitetaan lähinnä sitä, onko kyseistä energiavarastoa järkevä toteuttaa taloudelliselta kannalta ajateltuna verrattuna muihin ratkaisuihin. Ympäristöllisillä tekijöillä tarkoitetaan energiavaraston mahdollisesti aiheuttamia ympäristöön kohdistuvia riskejä sekä vahinkoja.

Potentiaalienergiaa hyödyntävät energiavarastot ovat suuren mittakaavan varastoja, ja tarvitsevat siten suuren tilan sekä korkeuseron. Kuten luvussa 3.1 mainittiin, maan painovoima on suhteellisen heikko voima. Tästä johtuen korkeusero alemman ja ylemmän tason välillä tulee olla riittävän suuri, jotta varastosta olisi hyötyä. [4, luku 2] Esimerkiksi tyypillinen PHES-systeemi vaatii noin 200 – 300 metrin putouskorkeuden [2, s. 27]. Tarvittava korkeusero voi löytyä luonnosta tai se voidaan toteuttaa keinotekoisesti. Energiavarasto voidaan rakentaa esimerkiksi vuorenrinteelle, kuten rautatiekiskoilla kaivosvaunuilla massaa siirtävä energiavarasto ARES tai riippukoreilla massaa siirtävä MGES. MGES vaatii jyrkemmän rinteeseen kuin ARES ja siten sille sopivan paikan löytäminen on haastavampaa [24, luku 4.3.7]. Ongelmaksi energiavaraston rakentamiseen vuoren yhteyteen voi tulla myös se, että varaston ylemmälle tasolle ei löydy sopivaa paikkaa tai että ylemmälle tasolle on vaikeaa päästä [26, luku 4].

Jos tarvittavaa korkeuseroa ei ole käytettävissä energiavarasto voidaan myös sijoittaa maan alle tai voidaan hyödyntää vanhoja kaivoksia. Esimerkiksi mäännälliset PHES-systeemit ja kuilullinen SGES voidaan sijoittaa maan alle, mutta se vaatii satoja metrejä syvän ja kymmeniä metrejä leveän kuilun kaivamisen, joka on kallista [24, luku 4.3.3]. Olemassa olevien vanhojen kaivosten kuilut ovat yksi ratkaisu ongelmaan, mutta kaivoskuilujen hyödyntämisessäkin on omat haasteensa. Esimerkiksi vastaan voi tulla ongelmia kaivokseen kerääntyvän pohja- tai sadeveden kanssa [26, luku 4] tai kaivoksen sisäänkäynnin yhteyteen rakennettavat tukirakenteet voivat aiheuttaa liikaa painetta kuilun seinämiin aiheuttaen turvallisuusriskin [24, luku 4.3.2].

PHES-systeemit vaativat suuren määrän vettä toimiakseen. Tarvittava veden määrä on pienempi maanalaisella PHES-systeemillä kuin joen yhteydessä olevalla [17, luku 6.3]. Veteen liittyvinä haasteina voi olla esimerkiksi veden saatavuus ja laatu suunnitellun PHES-systeemin sijainnissa tai veden karkaaminen ja haihtuminen energiavaraston vesisäiliöstä. Veden kuljettaminen kaukaa kohteisiin, joissa vettä ei ole saatavilla lähellä energiavarastoa, on kallista. [31, luku 3.5.1.4]

Teknologian tuomat rajoitteet ovat yksi merkittävistä esteistä energiavarastojen rakentamiselle. Suunnitellut energiavarastotekniikat voivat olla liian tehottomia tai epäkäytännöllisiä. [2, s. 70] Energiavarastojen vaatima tekniikka ei välttämättä ole vielä

tarpeeksi kehittyntä. Pidemmälle kehitettyjen energiavarastojen kustannukset ovat pienemmät sekä niiden toiminnasta on enemmän tietoa saatavilla. Esimerkiksi PHES on yksi pisimmälle kehitetyistä energiavarastotekniikoista. [20, luku 5.7] ARES-systeemi on vähemmän kehittyntä teknologiaa, mutta sitä on pilotoitu onnistuneesti ja siitä on rakenteilla kaupalliseen käyttöön tarkoitettu energiavarasto [2, s. 69]. Lineaarimoottoria hyödyntävä energiavarasto on vasta varhaisessa suunnitteluvaiheessa [24, luku 3.8].

GES-systeemien esteeksi voivat myös tulla ympäristölliset tekijät [2, s. 70], jotka vaikuttavat erityisesti sijainnin valinnassa. Esimerksi PHES-systeemin ympäristöllinen haaste on vesisäiliöiden mahdollinen tulviminen. Tulvimisen aiheuttamat ympäristöhaitat ovat kuitenkin pienemmät maanalaisella tai männällisellä PHES-systeemillä kuin joen yhteydessä olevalla PHES-systeemillä [17, luku 7]. Myös vaikutukset alueelliseen lajistoon, maaperään sekä ilmastoon ovat mahdollisia PHES-systeemien ympäristöllisiä haasteita [31, luku 3.5.1.6].

Taloudelliset tekijät ovat merkittävä rajoite potentiaalienergiaa hyödyntäville energiavarastoille. Usein energiavarastot ovat liian kalliita toteuttaa hyötyn nähden [2, s. 70] Taloudellisessa arvioinnissa tulee ottaa huomioon energiavaraston tuoma hyöty verrattuna sen tuomiin kustannuksiin. On myös hyvä tarkastella onko kyseinen energiavarasto paras vaihtoehto kohteeseen, vai olisiko jokin toisenlainen energiavarasto tai muu ratkaisu kustannustehokkaampi. Tarkasteltaessa energiavaraston kustannuksia, on tärkeää ottaa huomioon investointikustannusten lisäksi myös energiavaraston käytön aikaiset kustannukset [20, luku 5.3]. Osalla energiavarastoista investointikustannukset saadaan takaisin vasta vuosikymmenten aikana [2, s. 27]. Sopivaa energiavarastoa valittaessa tulee kuitenkin pohtia kohteeseen soveltuvaa energiavarastoa myös kohteen olosuhteiden sekä ominaisuuksien kannalta. Suomen olosuhteita GES-systeemien rajoitteiden kautta käydään läpi alaluvussa 4.1.

4. POTENTIAALIENERGIAA HYÖDYNTÄVÄT ENERGIAVARASTOT SUOMESSA

Kun pohditaan sopivaa energianvarastointiratkaisua Suomeen tulee huomioida Suomen olosuhteet sekä GES-tekniikoiden rajoitteet. Tässä luvussa keskitytään potentiaalienergiaa hyödyntävien energiavarastojen rajoitteisiin Suomessa sekä siihen, onko kyseisillä energiavarastoilla mahdollisuutta Suomessa. Lisäksi pohditaan sitä, millainen tarve Suomessa ylipäättään on energiavarastoille. Alaluvussa 4.1 perehdytään Suomen olosuhteisiin potentiaalienergiaa hyödyntävien energiavarastojen kannalta sekä käydään läpi mitkä alaluvussa 3.3 käydyistä rajoittavista tekijöistä ovat merkittäviä juuri Suomen olosuhteissa. Alaluvussa sivuutetaan ne taloudelliset, teknologiset sekä ympäristölliset tekijät, jotka eivät suoranaisesti ole yhteydessä Suomen olosuhteisiin tai liittyvät vahvasti energiavaraston tarkempaan sijaintiin. Alaluvussa 4.2 pohditaan potentiaalienergiaa hyödyntävien energiavarastojen toteutettavuutta Suomessa sekä esitellään Suomeen suunnitteilla olevaa GES-projektia.

4.1 Suomi energiavarastojen sijoittamisen kannalta

Energiavaraston sijainnin olosuhteet ovat tärkeitä tekijöitä pohdittaessa sopivaa energian varastointimenetelmää. Huomioon otettavia olosuhteita ovat esimerkiksi sijainnin energiankulutus ja sen vuodenaika- ja vuorokausivaihtelut, uusiutuvan energian osuus energiantuotannosta, sähköverkon laajuus sekä maantieteelliset korkeuserot ja mahdollisesti tarvittavan veden saatavuus. Ympäristöllisetkin tekijät ovat merkittäviä sijainnin kannalta, mutta ne riippuvat lähinnä tarkemmasta energiavaraston sijainnista kuin kohdemaasta [2, s. 28].

Pohjoisen sijaintinsa takia Suomen vuodenaikaiset lämpötilavaihtelut ovat suuria. Tämän takia Suomessa sähkönkulutus on kausittaista. Sähkönkulutus vaihtelee vuodenaikojen mukaan eniten maissa, joissa on kylmät talvet ja sähkölämmitystä käytetään rakennusten lämmittämiseen [2, s. 4]. Suomessa esimerkiksi asuinrakennuksia lämmitettiin vuonna 2021 eniten kaukolämmöllä (30 %), puulla (27 %) ja sähköllä (25 %) [32]. Kausittainen sähkönkulutuksen ero luo tarpeen energiavarastoille, jotka voivat varastoida energiaa jopa kuukausiksi kerrallaan. On kuitenkin arvioitu, että GES-systeemit pystyvät varastoimaan sähköenergiaa yleensä minuuteista tunteihin [24, 17], joka vastaa lähinnä vuorokauden aikaisiin sähköntuotannon- ja kulutuksen vaihteluihin. Näitäkin esiintyy Suomessa.

Suomessa uusiutuvien energialähteiden osuus energiantuotannosta on kasvussa. Varsinkin tuulivoiman kapasiteetti kasvaa nopeasti nyt ja lähitulevaisuudessa, kuten luvussa 2 todettiin. Kasvava uusiutuvien energialähteiden osuus sähköntuotannosta lisää tarvetta energiavarastoille. Tämän työn kirjoitushetkellä Suomessa tuuli- ja aurinkovoiman sähköntuotanto on vielä suhteellisen vähäistä, noin 10 % koko sähköntuotannosta [9]. On arvioitu, että jos tuuli- ja aurinkovoiman osuus sähköntuotannosta sähköverkossa on noin alle neljäsosa koko sähköntuotannosta, ei energiavarastoille ole vielä suurta tarvetta. Tällöin sähkönkulutus ja -tuotanto tasoitetaan varavoimailoiden avulla, joita ovat esimerkiksi poltto- tai vesivoimalat. [17, luku 2] Mutta varsinkin koska tuulivoima on kasvava energiamuoto Suomessa, energiavarastojen tarve tulee kasvamaan lähitulevaisuudessa.

Maissa, joissa käytetään sekä tuuli- että aurinkovoimaa potentiaalisina energianlähteinä, on energiavarastojen tarve pienempi. Tämä johtuu siitä, että ne usein tuottavat toimintaperiaatteidensa takia sähköä eri aikoina ja siten tasoittavat toistensa tuotantoa. [17, luku 2] Kuten luvussa 2 todettiin Suomessa aurinkovoima ei ole yhtä tuottava energianlähde kuin tuulivoima, joten tuuli- ja aurinkovoiman sähköntuotannon eriaikaisuus ei vähennä merkittävästi epätasapainoa sähkönkulutuksen ja -tuotannon välillä.

Myös suuremman alueen yhteinen sähköverkko vähentää energiavarastojen tarvetta, koska jos tietyllä alueella tuuli- ja aurinkovoiman sähköntuotanto on vähäistä, toisella alueella tuotanto voi olla runsaampaa [17, luku 2]. Suomen sähköjärjestelmä on yhdessä Ruotsin, Norjan ja Itä-Tanskan kanssa osa pohjoismaiden yhteistä sähköjärjestelmää. Suomesta on myös yhteydet Venäjän, Baltian sekä Keski-Euroopan sähköjärjestelmiin. [33] Suomen sähköjärjestelmä on siis hyvin kytkeytynyt ympäröivien alueiden sähköjärjestelmiin. Maiden sähköjärjestelmien välisiin yhteyksiin voi kuitenkin vaikuttaa esimerkiksi poliittiset tekijät. Suomessa tarve energiavarastoille ei siis ole yhtä suuri kuin esimerkiksi eristäytyneellä saarivaltioilla voisi olla, mutta sähkön omavaraisuus on kannattavaa muun muassa kansainvälisen politiikan näkökulmasta.

Potentiaalienergiaa hyödyntävät energiavarastot tarvitsevat joko luonnosta löytyvän tai rakennetun korkeuseron, kuten luvussa 3 todettiin. Suomesta ei löydy paljon suuria pinnanmuodollisia korkeuseroja, kuten vuoria, joten todennäköisempänä paikkana GES-systeemeille olisivat vanhat kaivokset. Esimerkiksi maanalainen PHES ja MGES sovellettuina kaivosympäristöön voisivat olla mahdollisia GES-systeemejä vanhoihin kaivoksiin [23, luku 3.1.2]. Myös muut kaivoksiin soveltuvat SGES-systeemit voisivat tämän perusteella olla sopivia Suomeen. Useissa SGES-systeemeissä tulevat kuitenkin vielä vastaan systeemin teknologisen kehittyneisyyden rajoitteet.

PHES-systeemit tarvitsevat korkeuseron lisäksi riittävän suuren määrän vettä. Varsinkin PHES-systeemeille, joiden molemmat vesisiliöt ovat maanpinnalla, on haastavaa löytää sopivaa paikkaa Suomen pinnanmuodollisten rajoitteiden takia. Kyseinen PHES-systeemi sopiikin parhaiten saarille tai alueille, joissa on vuoristoa. [23, luku 3.1.1] Veden saatavuuteen liittyvät haasteet taas on havaittu olevan merkittävämpiä kehittyvissä maissa kuin esimerkiksi Suomessa. [31, luku 3.5.1.4].

4.2 Energiavarastojen toteutettavuus Suomessa

Suomessa energian varastoinnin tarve ei ole vielä kirjoitushetkellä suurta, kuten alaluvussa 4.1 todettiin. Mutta varsinkin tuulivoiman kapasiteetin kasvaessa Suomessa sekä omavaraisen sähköntuotannon tarpeen kasvaessa muuttuvien kansainvälisten poliittisten suhteiden vuoksi, tulee energiavarastojen tarve kasvamaan lähitulevaisuudessa. Koska GES-systeemien suunnitteluun ja rakentamiseen menee useita vuosia (joskus jopa yli kymmenen vuotta) [2, s. 27], on hyvä tutkia jo ennen kriittistä energiavarastojen tarvetta millaiset energiavarastoratkaisut olisivat mahdollisia ja potentiaalisimpia Suomen olosuhteissa.

Suomessa potentiaalisin sijainti GES-systeemeille on vanhat kaivokset, kuten alaluvussa 4.1 todettiin. Suomessa on yli 1000 toiminnassa ollutta kaivosta, joista osa on vanhempia sekä pienempiä ja osa suurempia modernimpia kaivoksia. Niille on tehty vaihtelevasti eriasteisia sulkemiseen liittyviä toimenpiteitä. [34, luku 2] Kun arvioidaan kaivoksen kelpoisuutta uudelleenkäyttöön GES-systeemeille, on otettava huomioon esimerkiksi ympäristöön ja kaivoksen geologiaan liittyvät tekijät [23, luku 3.1.2.1] Kaivosten toiminnan loputtua sekä uudelleen käytössä voi tulla vastaan ympäristöriskejä, jotka pitää arvioida [34, 23 luku 3.1.2.1]. Kaivoksen geologisilla tekijöillä tarkoitetaan esimerkiksi kaivoksen syvyyttä ja muita mittoja [23, luku 3.1.2.1].

Suomessa ei ole vielä toteutettu varsinaisia potentiaalienergiaa hyödyntäviä energiavarastoja, mutta ainakin yksi on suunnitteilla. Pyhäsalmen kaivoksessa louhinta loppui malmivarantojen ehdyttyä vuoden 2022 elokuussa [35]. Kaivoksen jatkohyödyntämiseen on suunnitteilla EPV Energia Oy:n toimesta pumppuvoimalaitos eli PHES-systeemi, joka varastoi tuuli- ja aurinkovoimalla tuotettua sähköä. Kaivoksen ollessa 1445 metriä syvä, PHES-systeemin ylemmän ja alemman vesäiliöiden korkeusero olisi yli 1400 metriä, joka on enemmän kuin yleensä PHES-systeemeillä. [36, 37 ja 2 s. 27] Laitoksen tehoksi on suunniteltu 75 MW, sen lataus ja purkautumisaika olisi tunneissa mitattava sekä hyötysuhde olisi noin 77 %. Hankkeesta on tehty

esiselvityksiä ja kirjoittamishetkellä sitä esisuunnitellaan. Jos hanke toteutuu, PHES-laitoksen on suunniteltu tulevan käyttöön aikaisintaan vuonna 2025. [36, 37]

Alaluvussa 3.2 esitellyistä GES-tekniikoista potentiaalisimpia Suomeen ovat varastot, jotka voidaan sijoittaa maan alle tai vanhoihin kaivoksiin. PHES-systeemeistä tälläisiä tekniikoita ovat maanalainen PHES (jota jo Suomeen suunnitellaan kaivokseen) sekä mäännälliset PHES-systeemit. SGES-systeemeistä kaivoksiin tai maan alle soveltuvia ovat ainakin kiinteää massaa kaivosvaunulla kuljettava SGES, MGES ja kuilullinen SGES. Myös esimerkiksi lineaarimooottorilla toimivasta SGES-systeemistä on suunnitteilla myös maanalainen versio [24, luku 3.8]. Suunniteltaessa GES-systeemiä esimerkiksi vanhaan kaivokseen on tärkeää ottaa huomioon GES-tekniikoiden rajoitteet sekä soveltuvuus juuri kyseiseen kohteeseen.

Kun pohditaan sopivaa energiavarastoa Suomeen, tulee huomioida muutkin kuin potentiaalienergiaa hyödyntävät energiavarastot. Esimerkiksi vedyn tuottaminen ylimääräistä ja/tai halpaa sähköä käyttämällä (power-to-hydrogen) on arvioitu olevan yksi potentiaalisista vaihtoehtoista Suomessa SGES-tekniikoiden ohella [23, luku 6]. Suomeen onkin suunnitteilla Kristiinankaupunkiin vedyn tuotantolaitos, jossa tarkoituksena on tuottaa vetyä elektrolyysin avulla käyttäen tuuli- ja aurinkoenergiaa. Laitoksessa vedystä jatkojalostetaan metaania. [38] Kun jo olemassa olevia GES-tekniikoita tutkitaan ja ne kehittyvät sekä uusia keksitään, voi tulevaisuudessa olla vielä parempia ratkaisuja energian varastoinnin tarpeeseen Suomen olosuhteissa.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Energiantuotannon siirtyessä hiilineutraalimpaan tuuli- ja aurinkovoiman sähköntuotannon osuus tulee kasvamaan Suomen energiantuotannossa. Tuuli- ja aurinkovoiman sähköntuotanto vaihtelee säätilojen ja vuodenaikojen mukaan, mikä hankaloittaa sähköntuotannon ja -kulutuksen tasapainottamista sähköverkossa. Tämä luo tarpeen sähköenergiavarastoille, joista yksi muoto ovat potentiaalienergiaa hyödyntävät sähköenergiavarastot.

Suomessa tarve energiavarastoille ei ole vielä kriittinen kirjoittamishetkellä, koska tuuli- ja aurinkovoiman osuus Suomen energiantuotannosta ei ole vielä suuri ja Suomi on osa suurempaa sähköjärjestelmää. Lähitulevaisuudessa energiavarastojen tarve tulee kuitenkin kasvamaan ja ottaen huomioon energiavarastojen toteuttamiseen kuluvan ajan, on kannattavaa jo nyt selvittää energiavarastojen mahdollisuuksia Suomessa.

Tässä kandidaatintyössä tavoitteena oli tutkia potentiaalienergiaa hyödyntävien energiavarastojen mahdollisuuksia Suomessa. Rajauksena oli uusiutuvista energialähteistä tuuli- ja aurinkovoiman sähköntuotannon varastoiminen Suomessa. Työssä tutkittiin uusiutuvan sähköenergian varastoimista potentiaalienergiaan sekä käytiin läpi erilaisia potentiaalienergiaa hyödyntäviä sähköenergian varastointimenetelmiä. Varastointimenetelmien soveltuvuutta Suomeen tutkittiin niiden rajoittavien tekijöiden kautta Suomen olosuhteet huomioon ottaen.

Potentiaalienergiaa hyödyntäviä energiavarastoja ovat esimerkiksi PHEs-systeemit eli pumppuvoimalaitokset, jotka ovat teknikaltaan kehittyneimpiä. Lisäksi on olemassa SGES-systeemejä, jotka nostavat ja laskevat kiinteää massaa veden sijasta. Näiden välimuotona on mäännälliset PHEs-systeemit, joissa veden lisäksi nostetaan ja lasketaan mäntää.

Potentiaalienergiaa hyödyntävien energiavarastojen merkittävimiksi rajoitteiksi todettiin teknologiset, taloudelliset ja ympäristölliset tekijät. Lisäksi sijaintiin liittyvät tekijät, kuten vaadittu korkeusero ja veden saatavuus, ovat oleellisia. Havaittiin, että monessa varastointitekniikassa teknologinen kehitys on vielä varhaisessa vaiheessa, joten niiden toteuttaminen on vielä kallista ja epävarmaa. Ympäristölliset tekijät riippuvat energiavaraston suunnittelusta sijainnista. Vaadittu korkeusero hankaloittaa sopivan sijainnin löytämistä Suomesta, mutta Suomessa voidaan hyödyntää vanhoja kaivoksia tai rakentaa energiavarasto osaksi maan alle. Veden saatavuus ei ole suuri ongelma Suomessa.

Potentiaalisimmiksi energiavarastotekniikoiksi havaittiin varastointitekniikat, jotka voidaan tehdä ainakin osittain maanalaisiksi. Tällöin Suomen maaston korkeudelliset rajoitteet eivät estä GES-systeemin rakentamista. Koska maanalaisen varastosysteemin kaivaminen on kallista, on edullisempi vaihtoehto sijoittaa energiavarasto vanhaan kaivokseen. Suomessa käytöstä poistuneita kaivoksia on paljon, mutta niiden soveltuvuus uudelleenkäytölle vaihtelee. Suomeen ollaan suunnittelemassa maanalaista PHES-systeemiä Pyhäsalmen kaivokseen, jossa louhinta on vuonna 2022 loppunut. Tarvitaan lisää tutkimusta ja varastointitekniikoiden kehittymistä ennen kuin voidaan sanoa tarkemmin mitkä varastointitekniikoista olisivat parhaiten toteutettavia Suomessa.

Kun pohditaan mitkä ratkaisut sopisivat parhaiten Suomeen, on hyvä ottaa huomioon myös muutkin kuin potentiaalienergiaa hyödyntävät energiavarastot. Potentiaalienergiaa hyödyntävillä energiavarastoilla on kuitenkin mahdollisuuksia Suomessa varsinkin, kun teknologia kehittyy ja tutkimusta aiheesta tehdään lisää.

LÄHTEET

- [1] Pääministeri Sanna Marinin hallituksen ohjelma 10.12.2019: Osallistava ja osaava Suomi - sosiaalisesti, taloudellisesti ja ekologisesti kestävä yhteiskunta. Valtioneuvosto, 2019, Helsinki. <https://valtioneuvosto.fi/marinin-hallitus/hallitusohjelma>
- [2] T.M. Letcher. Storing energy: with special reference to renewable energy sources. Elsevier, 2016. 565 p.
- [3] Terminologiset sanastot: ”potentiaalienergia”. TEPA-termipankki: sanastokeskus. Saatavissa: (viitattu 29.9.2022) <https://termipankki.fi/tepa/fi/haku/potentiaalienergia>
- [4] C.D. Botha, M.J. Kamper. Capability study of dry gravity energy storage. Journal of Energy Storage, Vol. 23, 2019. pp. 159 – 174. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.03.015>
- [5] Tuulivoima kasvaa vauhdilla. Energiateollisuus: tuulivoima. Saatavissa: (viitattu 18.2.2023) <https://energia.fi/energiasta/energiantuotanto/sahkontuotanto/tuulivoima>
- [6] T.M. Letcher. Wind energy engineering: a handbook for onshore and offshore wind turbines. Elsevier Science & Technology, 2017. 624 p.
- [7] Tuulivoimateknologia. Motiva. Saatavissa: (viitattu 6.10.2022) https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima/tuulivoima_suomessa/tuulivoimateknologia
- [8] Tuulivoimatuotannon vaihtelevuus: Koska sähköä syntyy?. Suomen Tuulivoimayhdistys. Saatavissa: (viitattu 6.10.2022) <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatuotanto/tuulivoimatuotannon-vaihtelevuus>
- [9] Energiavuosi 2021 – Sähkö. Energiateollisuus ry. 2022. Saatavissa: (viitattu 4.11.2022) https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/energiavuosi_2021_-_sahko.html#material-view
- [10] Pian helpottaa: tuulivoima kasvaa ydinvoimalan verran joka vuosi. Fingrid. 2022. Saatavissa: (viitattu 6.10.2022) <https://www.fingridlehti.fi/pian-helpottaa-tuulivoima-kasvaa-ydinvoimalan-verran-joka-vuosi/>
- [11] W. Shepherd, L. Zhang. Electricity generation using wind power. World Scientific Publishing Company, 2010. 257 p.
- [12] A. Buttler, F. Dinkel, S. Franz, H. Spliethoff. Variability of wind and solar power – An assessment of the current situation in the European Union based on the year 2014. Energy, Vol. 106, 2016. pp. 147–161. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.041>
- [13] M.E. Mackay. Solar energy: An Introduction. Vol. First edition, Oxford University Press, 2015. 258 p.
- [14] International Energy Agency. Solar energy perspectives. OECD/IEA, 2011. 234 p. <https://doi-org.libproxy.tuni.fi/10.1787/9789264124585-en>
- [15] K.Takashi, H. Yukihiro, S. Asahi. Energy Conversion Efficiency of Solar Cells. Springer Singapore, 2019. 202 p.
- [16] Aurinkosähkön kapasiteetti kasvoi Suomessa yli 100 megawattia vuonna 2021. Energiavirasto. 2022. Saatavissa: (viitattu 11.10.2022) <https://energiavirasto.fi/-/aurinkosahkon-kapasiteetti-kasvoi-suomessa-yli-100-megawattia-vuonna-2021>

- [17] A. Blakers, M. Stocks, B. Lu, C. Cheng. A review of pumped hydro energy storage. Progress in Energy, Vol. 3, No. 2, 2021. <https://doi.org/10.1088/2516-1083/abeb5b>
- [18] Kellosaaren varavoimalaitos. Helen. Saatavissa: (viitattu 9.1.2023) <https://www.helen.fi/helen-oy/energia/energiantuotanto/voimalaitokset/kellosaaren-varavoimalaitos>
- [19] Energiahuolto. Huoltovarmuuskeskus. Saatavissa: (viitattu 24.11.2022) <https://www.huoltovarmuuskeskus.fi/toimialat/energiahuolto/>
- [20] M. Aneke, M. Wang. Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review. Applied Energy, Vol. 179, 2016. pp. 350 – 377. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.097>
- [21] R. I. Attila. Seasonal Energy Storage with Power-to-Methane Technology. Energies, MDPI, 2022. 146 p.
- [22] International Energy Agency. Energy Storage. OECD/IEA, 2014. 60 p. <https://doi-org.libproxy.tuni.fi/10.1787/9789264211872-en>
- [23] M. Vuorenmaa, K. Mahmoodi, O. Lindblom, A.Värä, M.Sierakowski. Technologies for storing electricity in medium- and long term – potential in Finland. 2020.
- [24] W. Tong, Z. Lu, W. Chen, M. Han, G. Zhao, X. Wang, Z. Deng. Solid gravity energy storage: A review. Journal of Energy Storage, Vol. 53, 2022. pp. 105 – 226. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105226>
- [25] M.E Browne. Schaum's Outline of Physics for Engineering and Science. Vol. Fourth edition, McGraw-Hill Education, 2020. 448 p.
- [26] J.D. Hunt, B. Zakeri, G. Falchetta, A. Nascimento, Y. Wada, K. Riahi. Mountain Gravity Energy Storage: A new solution for closing the gap between existing short- and long-term storage technologies. Energy, Vol. 190, 2020. pp. 116 – 419. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116419>
- [27] W.F. Pickard. The History, Present State, and Future Prospects of Underground Pumped Hydro for Massive Energy Storage. Proceedings of the IEEE, Vol. 100, No.2, 2012. pp. 473 – 483. [10.1109/JPROC.2011.2126030](https://doi.org/10.1109/JPROC.2011.2126030)
- [28] Low-cost energy storage with minimal environmental impact. Gravity Power. Saatavissa: (Viitattu 17.11.2022) <https://www.gravitypower.net/>
- [29] Gravity Storage: Basic Concept. Heindl Energy. Saatavissa: (viitattu 4.1.2023) <https://heindl-energy.com/technical-concept/basic-concept/>
- [30] C. Saigustia, S. Robak. Review of Potential Energy Storage in Abandoned Mines in Poland. Energies, Vol. 14, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14196272>
- [31] S. Ali, R.A. Stewart, O. Sahin. Drivers and barriers to the deployment of pumped hydro energy storage applications: Systematic literature review. Cleaner Engineering and Technology, Vol. 5, 2021. pp. 100 – 281. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100281>
- [32] Asuinrakennusten lämmitys rakennustyypeittäin, 2008 – 2021: vuoden 2021 tilasto. Tilastokeskus. Saatavissa: (viitattu 25.1.2023) https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_asen/statfin_asen_pxt_11zr.px/chart/chartViewColumn/
- [33] Suomen sähköjärjestelmä. Fingrid. Saatavissa: (viitattu 23.1.2023) <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/suomen-sahkojarjestelma/>

[34] A. Tornivaara, K. Turunen, T. Lahtinen, N. Heino, A. Pasanen, J. Reinikainen, T. Jouttijärvi, J. Häkkinen, N. Karjalainen, M. Viitasalo. Suljettujen ja hylättyjen kaivannaisjätealueiden kunnostustarpeen arviointi. Ympäristöministeriö, 2020, Helsinki. 193 s.
<http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-361-228-0>

[35] Euroopan syvin kaivos Pyhäjärvellä halutaan muuttaa tahkoamaan sähköä – ennen pumppuvoimalaa ei nähty kannattavana, nyt tilanne on toisin. Yle Uutiset. 2022. Saatavissa: (viitattu 27.1.2023) <https://yle.fi/a/3-12593341>

[36] Pyhäsalmen kaivokseen pumppuvoimalaitos. EPV. Saatavissa: (viitattu 25.1.2023)
<https://www.epv.fi/project/pyhasalmen-kaivokseen-pumppuvoimalaitos/>

[37] AFRY käynnistää esisuunnittelun EPV Energia Oy:n suunnittelemaalle pumppuvoimalaitokselle Pyhäsalmen kaivokseen. AFRY. Saatavissa: (viitattu 25.1.2023)
<https://afry.com/fi-fi/uutiset/uutinen/afry-kaynnistaa-esisuunnittelun-epv-energia-oy-suunnittelemaalle>

[38] Kristiinankaupunkiin aiotaan rakentaa jättimäinen vetyvoimalaitos, sopimus maaperän vuokrasta valmis – laitoksen investoinnin arvo 450 miljoonaa. Yle Uutiset. 2022. Saatavissa: (viitattu 14.2.2023) <https://yle.fi/a/74-20003281>