



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Teemu Kielinen

ENERGIANVARASTOINNIN TULEVAISUUSNÄKYMÄT

Energiatasevastaavien näkökulma

Tekniikka
2020

TIIVISTELMÄ

| | |
|--------------------|---|
| Tekijä | Teemu Kielinen |
| Opinnäytetyön nimi | Energianvarastoinnin tulevaisuusnäkymät |
| Vuosi | 2020 |
| Kieli | suomi |
| Sivumäärä | 65 + 1 liite |
| Ohjaaja | Ossi Koskinen |

Eu:n ilmastotavoitteiden toteuttaminen edellyttää uusiutuvan energian osuuden kasvattamista energiantuotannossa. Tämän ennakoidaan lisäävän myös tarvetta energianvarastoinnille erityisesti tuulivoimatuotannon kasvun johdosta. Tutkimuksen tutkimusongelmana on selvittää Suomen sähkökaupassa toimivien tasevastaavien näkemyksiä energianvarastoinnin tulevaisuudesta erityisesti taloudellisesta näkökulmasta. Tutkimuksessa pyritään selvittämään, millaisia tarpeita tasevastaavat näkevät energianvarastoinnille sähkö- ja kapasiteettimarkkinoilla, sekä mitkä olisivat tasevastaavien näkökulmasta houkuttelevimmat energianvarastointiteknologiat.

Tutkimuksen teoriaosuudessa luodaan katsaus Suomen ja Euroopan ilmastotavoitteisiin, uusiutuvan energiaan ja tuulivoimaan. Tämän jälkeen teoriaosuudessa tarkastellaan energianvarastoinnin roolia energiantuotannossa ja tulevaisuuden ennusteita. Lopuksi käsitellään energianvarastointiteknologioita, sekä sähkö- ja kapasiteettimarkkinoita. Tutkimus toteutettiin tekemällä kysely, joka lähetettiin kaikille Suomen tasevastaaville.

Tutkimuksessa selvisi, että eniten potentiaalia energianvarastoinnille nähdään olevan kapasiteettimarkkinoilla yleisesti. Energianvarastointiteknologioista houkuttelevimpia ovat vedyn varastointi, lämpövarastot, pumppuvoimalaitokset ja akkuteknologiat.

ABSTRACT

| | |
|--------------------|--------------------------|
| Author | Teemu Kielinen |
| Title | Future of Energy Storage |
| Year | 2020 |
| Language | Finnish |
| Pages | 65 + 1 Appendice |
| Name of Supervisor | Ossi Koskinen |

Increasing the share of renewable energy production is essential in order to meet the climate goals set by the European Union. This is also estimated to increase the need for energy storage systems, especially due to increase in wind power production. The research question of this study is to find out what the views of Finnish balance responsibility parties (BRPs) are on the future of energy storage systems, especially from a financial perspective. The aim of this study is to learn how much potential the BRPs see for energy storage systems in the electricity and capacity markets and which energy storage technologies they see to be the most suitable.

In the theoretic section of the study we will discuss climate goals, renewable energies, and wind power in order to get an overview of the background of the study. After that we will move on to discuss the role of energy storage in energy production. At the end of theoretic section, we will discuss the energy storage technologies and electricity and capacity markets in more detail. The study was made by conducting a questionnaire, which was sent out to all Finnish BRPs.

The study concluded that BRPs see more potential for energy storage systems in capacity markets as opposed to electricity markets in general. The most suitable energy storage technologies were deemed to be hydrogen storages, heat storages, pumped hydro plants and battery technologies.

| | |
|----------|---|
| Keywords | Energy storage, electricity markets, capacity markets, renewable energy |
|----------|---|

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | JOHDANTO | 10 |
| 1.1 | Tutkimuksen tausta ja tavoitteet | 10 |
| 1.2 | Tutkimusongelma ja tutkimuskysymykset | 11 |
| 1.3 | Tutkimuksen rakenne | 12 |
| 2 | UUSIUTUVA ENERGIA | 13 |
| 2.1 | Uusiutuvan energian tavoitteet ja nykytilanne..... | 13 |
| 2.2 | Uusiutuva energia Suomessa | 14 |
| 2.3 | Tuulivoima uusiutuvana energiana | 15 |
| 3 | UUSIUTUVA ENERGIA JA ENERGIANVARASTOINTI | 20 |
| 3.1 | Energianvarastoinnin rooli energiantuotannossa | 20 |
| 3.2 | Energianvarastointikapasiteetin nykytilanne ja ennusteet | 22 |
| 4 | ENERGIANVARASTOINTITEKNOLOGIAT | 24 |
| 4.1 | Mekaaniset varastointiteknologiat | 24 |
| 4.1.1 | Pumppuvoimalaitos..... | 25 |
| 4.1.2 | Vauhtipyörä..... | 26 |
| 4.1.3 | Paineilmavarastointi | 27 |
| 4.2 | Sähkökemialliset varastointiteknologiat | 27 |
| 4.2.1 | Litiumioniakku | 28 |
| 4.2.2 | Virtausakut | 29 |
| 4.3 | Kemiallinen energiavarastointi | 31 |
| 4.3.1 | Vedyn varastointi | 31 |
| 4.3.2 | Synteettinen maakaasu | 32 |
| 4.4 | Sähköinen energiavarastointi | 32 |
| 4.4.1 | Superkondensaattori | 32 |
| 4.4.2 | Suprajohtava magneettinen energiavarastointi (SMES) | 33 |
| 4.5 | Lämpöenergian varastointi..... | 33 |
| 4.6 | Energianvarastointiteknologioiden vertailua | 34 |
| 5 | SÄHKÖ- JA KAPASITEETTIMARKKINAT | 36 |

| | | |
|-------|--|----|
| 5.1 | Sähkömarkkinoiden rakenne..... | 36 |
| 5.1.1 | Sähkömarkkinat..... | 36 |
| 5.1.2 | Reservimarkkinat | 37 |
| 5.2 | Taseselvitys..... | 38 |
| 5.2.1 | Tasevastuun järjestäminen | 38 |
| 5.2.2 | Tasevastaavat | 38 |
| 5.2.3 | Valtakunnallinen taseselvitys..... | 39 |
| 5.3 | Energiavarastointi ja markkinat | 40 |
| 6 | TUTKIMUKSEN TOTEUTUS..... | 41 |
| 6.1 | Tutkimusmenetelmän valinta..... | 41 |
| 6.2 | Haastateltavat toimijat | 41 |
| 6.3 | Kyselyn rakenne..... | 42 |
| 6.3.1 | Pohjustavat tiedot | 42 |
| 6.3.2 | Näkemyksenne energianvarastoinnista | 43 |
| 6.3.3 | Sähkö- ja kapasiteettimarkkinat | 43 |
| 7 | TULOKSET JA ANALYSOINTI..... | 45 |
| 7.1 | Tulosten ja analysoinnin pohjustus | 45 |
| 7.2 | Vastaajien perustiedot..... | 45 |
| 7.2.1 | Tasepalveluiden tarjonta | 45 |
| 7.2.2 | Vastaajien energiaravastosuunnitelmat..... | 47 |
| 7.3 | Näkemykset energianvarastoinnista..... | 50 |
| 7.3.1 | Näkemykset energianvarastoinnista nyt ja tulevaisuudessa..... | 50 |
| 7.3.2 | Energianvarastoinnin potentiaali uusiutuvalle energialle | 51 |
| 7.3.3 | Arvio omasta energiaravastointitarpeesta vuonna 2025 | 52 |
| 7.3.4 | Potentiaalisimmat energiaravastointiteknologiat | 54 |
| 7.4 | Näkemykset sähkö- ja kapasiteettimarkkinoista | 55 |
| 7.4.1 | Sähkövaraston käyttötarkoitukset nyt ja tulevaisuudessa | 55 |
| 7.4.2 | Sähkövarastojen potentiaali sähkömarkkinoilla..... | 57 |
| 7.4.3 | Sähkönvarastojen potentiaali kapasiteettimarkkinoilla..... | 58 |
| 8 | JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA | 59 |
| 8.1 | Johtopäätökset..... | 59 |
| 8.1.1 | Vastaukset tutkimuskysymyksiin..... | 59 |

| | | |
|--------------|---|----|
| 8.1.2 | Energianvarastoinnin tulevaisuus Suomessa..... | 60 |
| 8.2 | Suosituksset tutkimuksen pohjalta | 60 |
| 8.3 | Tutkimuksen onnistumisen arviointi..... | 61 |
| 8.3.1 | Teoriaosuuden onnistuminen | 61 |
| 8.3.2 | Tutkimuksen validiteetti ja reliabiliteetti | 62 |
| LÄHTEET..... | | 63 |

LIITTEET

KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

| | |
|--|----|
| Kuva 1. Suomen ja EU:n uusiutuvan energian nykytilanne ja tavoitteet. | 13 |
| Kuva 2. Uusiutuvien energialähteiden käyttö 1970–2018 /9/. | 15 |
| Kuva 3. Uusiutuvan energian sähköntuotanto EU:ssa 1990–2016 (TWh) /15/... .. | 16 |
| Kuva 4. Suomen vuosittainen tuulivoimatuotanto 1997 – 2017 /17/. | 18 |
| Kuva 5. Tasattu tuulisähkön hintakehitys 2010-luvulla Yhdysvalloissa /20/. | 19 |
| Kuva 6. Energianvarastointitekniologioiden käyttökohteet /3, s. 13/. | 20 |
| Kuva 7. Tuulivoimatuotanto Suomessa viikolla 52, vuonna 2019 /22/. | 21 |
| Kuva 8. Energianvarastointikapasiteettiennuste 2017 – 2030 /3, s. 15/. | 22 |
| Kuva 9. Energianvarastointitekniologioiden jaottelu. | 24 |
| Kuva 10. Havainnekuva pumppuvoimalaitoksen toimintaperiaatteesta. | 25 |
| Kuva 11. Vauhtipyörän rakenne /24/. | 26 |
| Kuva 12. Redox-akun toimintaperiaate. | 30 |
| Kuva 13. Energianvarastointitekniologioiden vertailua. | 34 |
| Kuva 14. Sähkömarkkinoiden rakenne ilman taseselvitystä. | 36 |
| Kuva 15. Energianvarastoinnin potentiaaliset reservimarkkinat /37/. | 37 |
| Kuva 16. Tuotantotaseiden laskenta. | 39 |
| Kuva 17. Tasepalveluiden tarjontakapasiteetti. | 45 |
| Kuva 18. Tasepalveluiden tarjonnan kohteet. | 46 |
| Kuva 19. Vastaajien energianvarastointisuunnitelmat. | 48 |
| Kuva 20. Todennäköisimmät sähkövaraston käyttötarkoitukset. | 56 |
| Kuva 21. Sähkönvarastoinnin potentiaali sähkömarkkinoilla. | 57 |
| Kuva 22. Sähkönvarastoinnin potentiaali kapasiteettimarkkinoilla. | 58 |
| | |
| Taulukko 1. Energian kokonaiskulutus 2017–2019 (TJ). | 17 |
| Taulukko 2. Akkujen keskinäinen osuus energianvarastoinnissa, 2016 /23/. | 28 |
| Taulukko 3. Tasepalveluiden tarjonta energiamuodoittain. | 47 |
| Taulukko 4. Sähkövaraston arvioitu teho ja energia. | 48 |
| Taulukko 5. Lämpövaraston arvioitu teho ja energia. | 49 |
| Taulukko 6. Tarve energianvarastoinnille nyt tai tulevaisuudessa. | 50 |
| Taulukko 7. Tarve energianvarastointi tulevaisuudessa. | 51 |

| | |
|--|----|
| Taulukko 8. Tarve energianvarastoinnille tällä hetkellä..... | 51 |
| Taulukko 9. Sähkövarastojen arvioitu tarve muutos vuoteen 2025 mennessä. | 53 |
| Taulukko 10. Lämpövarastojen arvioitu tarve muutos vuoteen 2025 mennessä.. | 54 |
| Taulukko 11. Houkuttelevimmat energianvarastointiteknologiat. | 55 |
| Taulukko 12. Kapasiteetti- ja reservimarkkinoiden keskiarvot ja mediaanit. | 58 |

LIITELUETTELO**LIITE 1. Kyselylomake**

1 JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta ja tavoitteet

Uusiutuvan energian, kuten tuuli- ja aurinkovoiman, tuotanto on Suomessa ja maailmalla kasvussa pyrkimyksenä hillitä ilmastonmuutosta ja lisätä energiaomavaraisuutta. Vuonna 2015 pidetyssä Yhdistyneiden kansakuntien (YK) kokouksessa allekirjoitettiin Pariisin sopimus, joka on ensimmäinen yleismaailmallinen sopimus ilmastonmuutoksen torjumisesta. Sopimuksen keskeisimpänä linjauksena oli maapallon keskilämpötilan nousun hillitseminen alle kahteen celsiusasteeseen esiteolliseen kauteen verrattuna ja ensisijaisesti pyrkiä rajoittamaan lämpötilan nousu alle 1,5 celsiusasteen. Yhtenä oleellisena keinona ilmastonmuutoksen hillitsemiselle on uusiutuvan energian tuotannon lisääminen. /1/

Uusiutuvan energian tuotantokapasiteetin kasvu luo tarvetta myös energianvarastoinnille. Syynä tälle on tuuli-, sekä aurinkovoiman luonteesta johtuva vaihteleva tuotanto, joka ei noudata sähkön kulutustarpeita, vaan määräytyy energian sen hetkisen saatavuuden mukaan. Energianvarastoinnilla näitä vaihteluita voidaan tasoittaa. Energianvarastointi auttaa myös haasteissa, joita vaihteleva energiantuotanto luo sähköverkolle. Tuulivoimaa esimerkkinä käyttäen, tuulipuistojen minuuttikohtainen tuotanto voi olla hyvinkin epätasaista johtuen ilman turbulentsisuudesta, joka syntyy ilman kulkiessa tuuliturbiinien läpi. /2/ Tuulivoimatuotannon ennustettavuus päiväkohtaisesti on hyvä, mutta keskinkertaisilla tuulennopeuksilla lyhytaikainen ennustaminen on haasteellista.

Investoiminen energianvarastointiin ei kuitenkaan tällä hetkellä ole aivan ongelmallista. Esimerkiksi alhaiset hinnat ja vähäinen hintahajonta luovat haasteita energianvarastoinnille sähkömarkkinoilla. Paremmat liiketaloudelliset mahdollisuudet energianvarastoinnille löytynevätkin kapasiteettimarkkinoilta. On myös otettava huomioon, että monet energianvarastointitekniikat ovat yhä kehitysvaiheessa, joten näiden teknologioiden investointikustannukset voivat laskea tulevaisuudessa merkittävästi. Tällä hetkellä edullisin vaihtoehto on pumppuvoimalaitos.

Mikäli kuitenkin uusiutuvan energian tuotantoa kasvatetaan Pariisin sopimuksen tavoitteiden mukaisesti, energianvarastointikapasiteetin tarve tulee suunnilleen kolminkertaistumaan nykyisestä vuoteen 2030 mennessä /3, s. 14/. Jo tämä huomio yksinään luo tarpeen ottaa energianvarastointi huomioon suunniteltaessa investointeja tutkimus- ja opetuslaboratorioon ja selvittämään, mitkä teknologiset vaihtoehdot ovat tasevastaavien kannalta suotuisimpia.

1.2 Tutkimusongelma ja tutkimuskysymykset

Tämä tutkimus on osa Technobothnian tutkimus- ja opetuslaboratorion investointihanketta ja sen pyrkimyksenä on auttaa kohdentamaan investointeja teknologioihin, joilla on tulevaisuudessa merkittävä rooli energiayhtiöiden energianvarastoinnissa. Näin voidaan mahdollistaa Technobothnialla käytävien energianvarastointiin liittyvien laboratorio-opetustuntien vastaavan työelämän tarpeita.

Tutkimuksen tutkimusongelma on selvittää Suomessa toimivien energiatasevastaavien kantoja energiavarastoinnin tulevaisuudesta erityisesti taloudellisesta näkökulmasta. Taloudellinen näkökulma pohjautuu yhtiöiden toimintaedellytyksiin. Mikäli tietyn teknologian ei koeta olevan liiketoiminnallisesti kannattava, myös kyseiseen teknologiaan investoiminen tulee olemaan vähäistä.

Tutkimusongelmasta on johdettu kolme tutkimuskysymystä, joihin tämä tutkimus pyrkii vastaamaan:

1. Millaisia tarpeita ja mahdollisuuksia energiatasevastaavat näkevät energianvarastoinnissa sähkömarkkinoilla (Nord Pool: Elspot/Elbas)?
2. Millaisia tarpeita ja mahdollisuuksia energiatasevastaavat näkevät energianvarastoinnissa kapasiteettimarkkinoilla (Fingrid)?
3. Mitkä energianvarastointiteknologiat vaikuttavat houkuttelevimmilta energiatasevastaavien näkökulmasta?

Tarkemmat tasevastaaville esitettävät alakysymykset rakennetaan näiden kysymysten kautta pohjaten alan ennusteisiin ja tutkimustietoon.

1.3 Tutkimuksen rakenne

Tämä tutkimus koostuu kahdesta laajemmasta kokonaisuudesta. Ensin perehdytetään lukija tutkimuksen aihepiiriin käsittelemällä energianvarastointiin liittyviä taustalla vaikuttavia ilmiöitä ja teoriaa. Tämän jälkeen käsittelemme itse tutkimuksen empirian.

Koska energianvarastointi on vahvasti kytköksissä uusiutuvaan energiaan ja uusiutuva energia ilmastonmuutoksen hillitsemiseen, aloitamme teoriaosuuden käsittelemällä uusiutuvan energian nykytilannetta ja tavoitteita ilmastotavoitteiden kautta. Koska Suomen ilmastotavoitteet ovat osin sidoksissa EU:n ilmastotavoitteisiin, luomme yleiskuvan sekä Suomen, että EU:n tavoitteista. Tämän jälkeen tarkastelemme tarkemmin uusiutuvan energian tilannetta Suomessa. Koska tuulivoiman tuotantokapasiteetin ennakoitaan kasvavan Suomessa vahvasti, käymme tarkemmin läpi myös siihen liittyviä seikkoja.

Uusiutuvan energian ja ilmastopolitiikan jälkeen siirrymme tarkastelemaan energianvarastoinnin roolia energiantuotannossa käymällä läpi potentiaalisia sen käyttökohteita. Tämän jälkeen luomme katsauksen energianvarastointikapasiteetin nykytilanteeseen ja sen ennakoituihin kehityssuuntiin.

Tutkimuksen taustojen ja ennusteiden käsittelyn jälkeen siirrymme käsittelemään empirian kannalta olennaista teoria-aineistoa. Käymme yksitellen läpi merkittävimmät energianvarastointiteknologiat ja vertailemme niiden ominaisuuksia. Tämän jälkeen käsittelemme sähkö- ja kapasiteettimarkkinoita, taseselvitystä ja energianvarastoinnin ennakoitua potentiaalia eri markkinoilla.

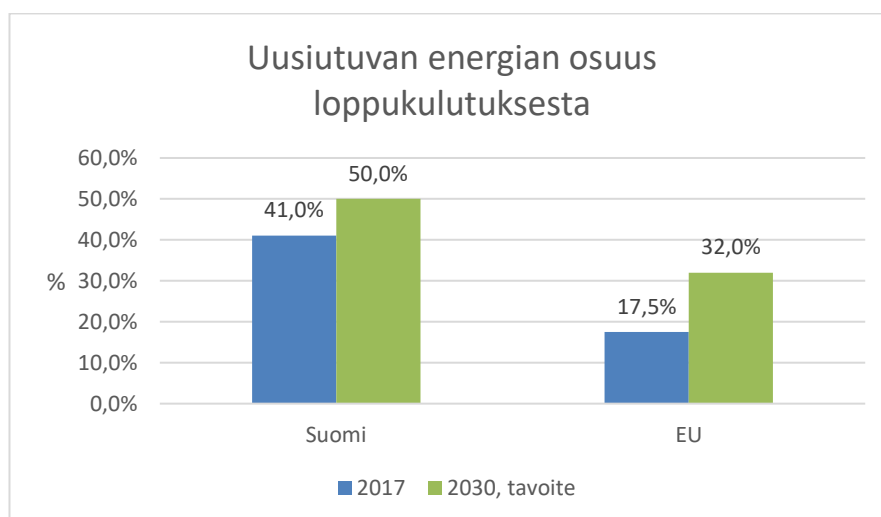
Empiriaosuudessa käydään läpi tutkimusmenetelmän valinta ja esitellään tutkimuksen toteutuksen yleispiirteet. Tämän jälkeen esitellään tutkimuksen tulokset ja niiden analyysi. Viimeisenä kappalekokonaisuutena tehdään tulosten ja analyysin perusteella johtopäätökset, joissa esitetään vastaukset tutkimuskysymyksiin ja energianvarastoinnin tulevaisuusnäkyymiin. Lisäksi annetaan suositukset tutkimuksen pohjalta ja arvioidaan tutkimuksen onnistumista.

2 UUSIUTUVA ENERGIA

2.1 Uusiutuvan energian tavoitteet ja nykytilanne

Euroopan unioni (EU) on sitoutunut Pariisin sopimuksessa esitettyihin tavoitteisiin ilmasto- ja energiapolitiikassaan /4/. Jo ennen vuonna 2015 kirjoitettua Pariisin sopimusta Euroopan komissio ehdotti vuonna 2014 energiantuotannon osalta uusiutuvien energioiden osuuden nostamista 27 prosenttiin loppukulutuksesta vuoteen 2030 mennessä. Energian loppukulutuksella tarkoitetaan sähkön, lämmön ja eri tarkoituksiin käytettävien polttoaineiden kulutusta, josta on vähennetty energian siirto- ja muuntohäviöt /5/.

Myöhemmin vuonna 2016 antamassaan päätöslauselmassaan ”Uusiutuvan energian tilannekatsaus” Euroopan parlamentti linjasi, että tavoitetasoa tulisi nostaa huomattavasti. Perusteluna tälle mainittiin teknologian kehitys ja investointien kustannusten aleneminen. Uudeksi uusiutuvan energian tavoitetasoksi määriteltiin Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivissä 2018/2001 32 prosenttia loppukulutuksesta. /4, 6/ EU:n asettamat uusiutuvan energian tavoitteet koskevat jokaista jäsenvaltiota sellaisenaan, eli maakohtaisia tavoitteita ei ole määritelty EU:n tasolla. /7, s. 24/



Kuva 1. Suomen ja EU:n uusiutuvan energian nykytilanne ja tavoitteet.

Juha Sipilän hallitusohjelmassa Suomen tavoitteeksi asetettiin uusiutuvan energian olevan vähintään 50 prosenttia loppukulutuksesta ennen vuotta 2030 /7, s. 25/. Sanna Marinin hallitusohjelmassa tätä tuotantotavoitetta ei ole muutettu.

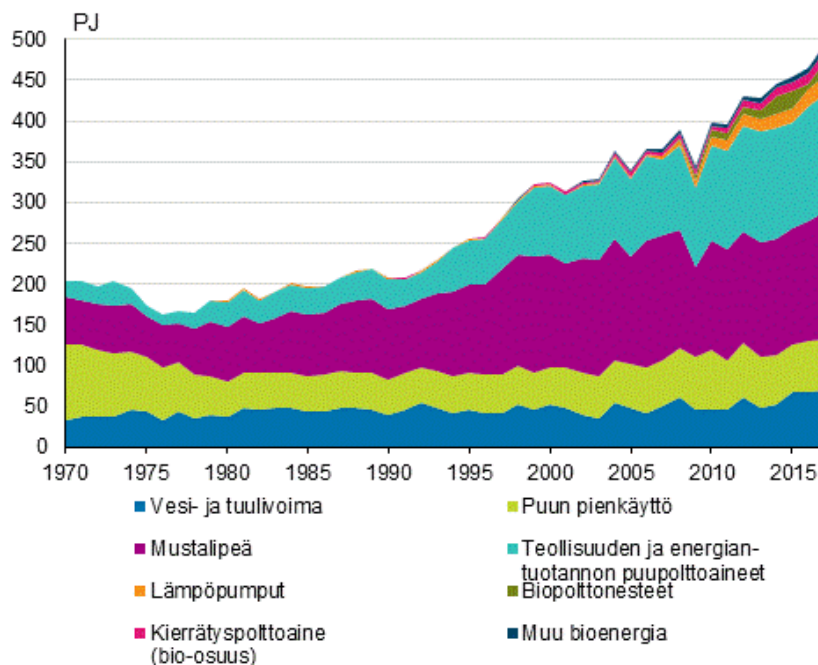
Vuonna 2017 Suomi tuotti 41,0 prosenttia käyttämästään energiasta käyttäen uusiutuvia energiamuotoja. Suhteellisesti tarkasteltuna Suomen tilanne on hyvä, mikäli vertaamme tuotantoa tavoitetuotantoon ja EU:n tavoitteisiin (**Kuva 1**). Päästökseen tavoitteeseensa, Suomen on kasvatettava uusiutuvan energian tuotantoaan noin 22 prosentilla vuoden 2017 tasosta. EU:n tasolla uusiutuvan energian tuotantoa on kasvatettava noin 83 prosentilla, mikäli asetettu 32 prosentin tavoite pyritään täyttämään, vuoden 2017 uusiutuvan energian tuotannon ollessa 17,5 prosenttia. /8/

2.2 Uusiutuva energia Suomessa

Uusiutuvan energian kokonaiskäyttö on kasvanut Suomessa tasaisesti 1990-luvulta asti. Erityisesti kasvua tällä ajanjaksolla ovat olleet ajamassa teollisuuden ja energiatuotannon puupolttoaineet, sekä sellutuotannon sivutuote, mustalipeä. Muuhun bioenergiaan kuuluu muun muassa turvetuotanto, mutta sen lukeutuminen uusiutuvaksi energialähteeksi on kiistanalaista sen hitaan uusiutumisenopeuden takia. 2000-luvun alusta saakka myös muut, aiemmin käytännössä olemattomat, uusiutuvat energialähteet ovat olleet kasvussa. Näihin lukeutuvat bio- ja niistä kierrätetyt polttoaineet, sekä lämpöpumput. Puun pienkäyttö on kasvanut vähäisesti 1990-luvulta, mutta on kuitenkin selkeästi vähäisempää, kuin 1970-luvun alussa. Vesi- ja tuulivoiman yhteiskäyttö on ollut melko tasaista 1980 – 2000 lukujen välillä, mutta on lähtenyt asteittaiseen kasvuun 2000-luvun alun notkahduksen jälkeen. (**Kuva 2**)

Tiivistetysti voidaan todeta Suomen uusiutuvan energian käytön kasvun olleen hyvin biotalouspaineista, mikä johtuu Suomen vahvasta metsäteollisuudesta. Jopa 86 prosenttia Suomen maapinta-alasta on metsätalouden käytössä /10/. Metsät toimivat myös hiilinieluna, eli ne sitovat itseensä ilmakehässä olevaa hiilidioksidia. Suomen vuoden 2018 laskelma 83 miljoonan kuutiometrin vuotuisista hakkuista ilman vaikutusta ilmastotavoitteisiin herättikin paljon keskustelua. Suomen arviot hakkuista ylittivät LULUCF-asetuksen mukaisesti tehtävät arviot noin 10–18 mil-

joonalla kuutiometrillä. /11/ EU:n LULUCF-asetus (2018/841) koskee tiettyin kriteerein laskettua metsänkäytön vertailutasoa, jonka avulla voidaan arvioida metsänkäytön ilmastovaikutuksia /12/.



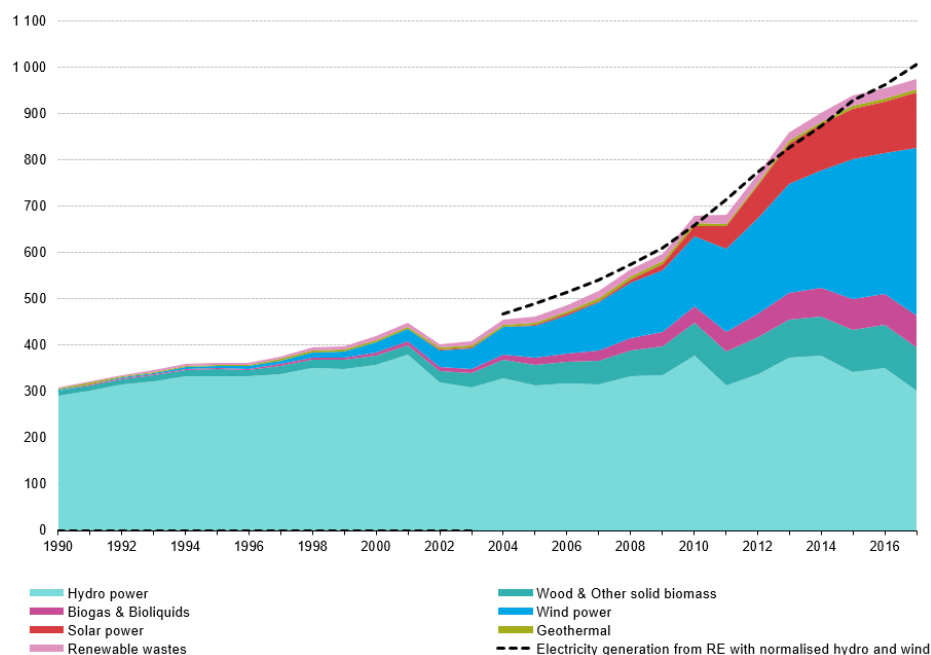
Kuva 2. Uusiutuvien energialähteiden käyttö 1970–2018 /9/.

Luonnonvarakeskuksen (Luke) laskelmat tarkentuivat myöhemmin vuonna 2019 83 miljoonasta 81–82 miljoonaan kuutiometriin. Myös nämä laskelmat ovat saaneet osakseen kritiikkiä tiedeyhteisöltä. /13/ Tilanteen ollessa hakkuiden määrän osalta kirjoittamishetkellä yhä epäselvä, voidaan kuitenkin todeta, että mikäli Suomen hakkuut ylittävät LULUCF-asetuksen vertailutason, tarkoittaa se Suomelle tiukennuksia ilmastovelvoitteiden osalta muualla. Suomen uusiutuvan energian tavoitteisiin pääseminen vaatiikin joka tapauksessa myös muiden energialähteiden käyttämistä.

2.3 Tuulivoima uusiutuvana energiana

Uusiutuvan energian ja energianvarastoinnin kannalta erityisen mielenkiintoiseksi tutkimuskohteeksi nousee tuulivoima. Tuulivoima on ollut maailman nopeimmin kasvava sähköntuotantotapa 1990-luvulta asti ja vuonna 2016 se ohitti

tuotantokapasiteetiltaan hiilen, noustessaan samalla Euroopan toiseksi suurimmaksi yksittäiseksi energiantuotantomuodoksi. Vuonna 2017 tuulivoimaa myös rakennettiin Euroopassa enemmän kuin mitään muuta energiantuotantomuotoa. /14/ Tätä vahvaa kehitystä EU-alueella voimme havainnollistaa kuvan 3 avulla.



Kuva 3. Uusiutuvan energian sähköntuotanto EU:ssa 1990–2016 (TWh) /15/.

Myös Suomessa tuulivoiman kehitys on ollut suhteellisesti tarkasteltuna viime vuosina voimakasta. Tätä voimme tarkastella energian kokonaiskulutuksen ja sähköntuotannon osuuksien kautta. Energian kokonaiskulutuksella viitataan kaikkiin energiamuotoihin, mukaan lukien erilaiset polttoaineet, kun taas sähköntuotannossa keskitytään sanan mukaisesti sähköntuotantoon käytettyihin energiamuotoihin.

Vuodesta 2017 vuoteen 2019, tuulivoiman osuus energian kokonaiskulutuksesta kasvoi enemmän kuin muut energiamuodot. Tuulivoiman osuus kasvoi vuoteen 2017 verrattuna 24 prosenttia. Toiseksi eniten osuuttaan kasvattivat maakaasu,

ydinvoima ja luokittelemattomat energianlähteet. On kuitenkin muistettava, että vaikka tuulivoiman prosentuaalinen kehitys itseensä nähden on ollut vuositasolla voimakasta, tuulivoima kattoi vuonna 2019 Suomen kokonaisenergiankulutuksesta vain noin 2 prosenttia. (**Taulukko 1**)

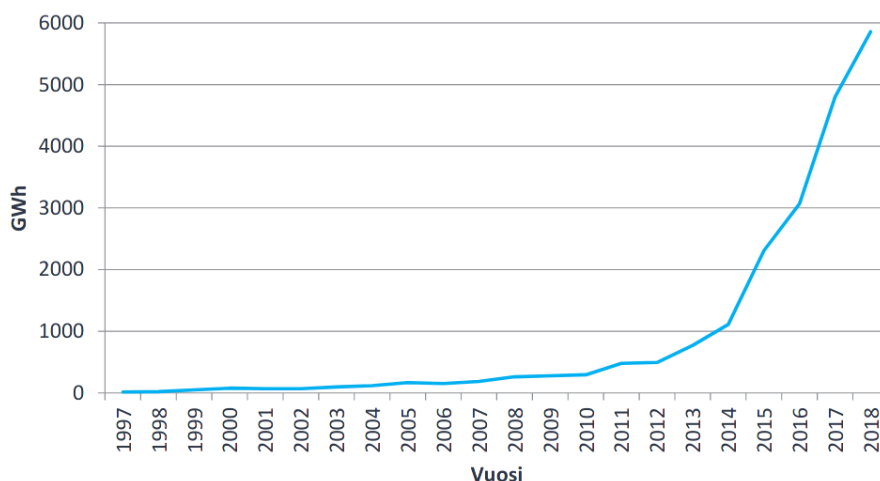
Taulukko 1. Energian kokonaiskulutus 2017–2019 (TJ).

| | 2017 | 2018 | 2019 | Muutos | Osuus, 2018 |
|--------------------|------------------|------------------|------------------|------------|--------------|
| Puupolttoaineet | 362 314 | 374 705 | 377 726 | 4 % | 28 % |
| Öljy | 313 545 | 309 712 | 308 493 | -2 % | 23 % |
| Ydinenergia | 235 352 | 238 700 | 250 102 | 6 % | 18 % |
| Hiili | 113 651 | 113 359 | 90 025 | -21 % | 7 % |
| Maakaasu | 65 986 | 75 614 | 72 752 | 10 % | 5 % |
| Turve | 53 860 | 61 877 | 56 308 | 5 % | 4 % |
| Sähkön nettotuonti | 73 532 | 71 769 | 72 151 | -2 % | 5 % |
| Vesivoima | 52 597 | 47 295 | 44 231 | -16 % | 3 % |
| Tuulivoima | 17 263 | 21 019 | 21 420 | 24 % | 2 % |
| Muut | 64 174 | 66 782 | 68 580 | 7 % | 5 % |
| Yhteensä | 1 352 274 | 1 380 832 | 1 361 788 | 1 % | 100 % |

Suomessa kuitenkin tuulivoiman tuotanto on ollut kuitenkin ainakin toistaiseksi jäljessä muuta Eurooppaa. Esimerkiksi EU:ssa keskimäärin vuonna 2019 tuotettiin tuulivoimalla 15 prosenttia sähköntarpeesta, mutta Suomessa vastaava luku oli vain 7 prosenttia. /14, s. 17/

Tuulivoiman tuotanto Suomessa on ollut kuitenkin nopeassa kasvussa 2010-luvulta alkaen (**Kuva 4**). Eräänä merkittävänä syynä 2010-luvun kiihtyneelle tuulivoiman tuotantokehitykselle on ollut vuonna 2011 voimaan tullut laki uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta, jossa säädettiin syöttötariffi tuulivoimalle, biokaasulle, metsähakkeelle ja puupolttoaineille. /18/ Syöttötariffin määrä on 83,5 euroa tuotettua megawattituntia kohden ja sitä maksetaan 12 vuoden ajan. Tämän on laskettu kattavan noin 40 prosenttia tuulivoimahankkeiden investointikustannuksista. Määräaika uusille tuulivoimahankkeille tähän tariffijärjestelmään mukaan pääsemiseksi meni umpeen 1.11.2017. /19/ Kuten tuulivoimatuotannon kehityksestä 2010-luvulla voidaan huomata, tariffijärjestelmä

selvästi herätti sijoittajien mielenkiinnon ja toimi uusiutuvan energian lisäämiskeinona parantaen tuulivoiman taloudellista kilpailukykyä.

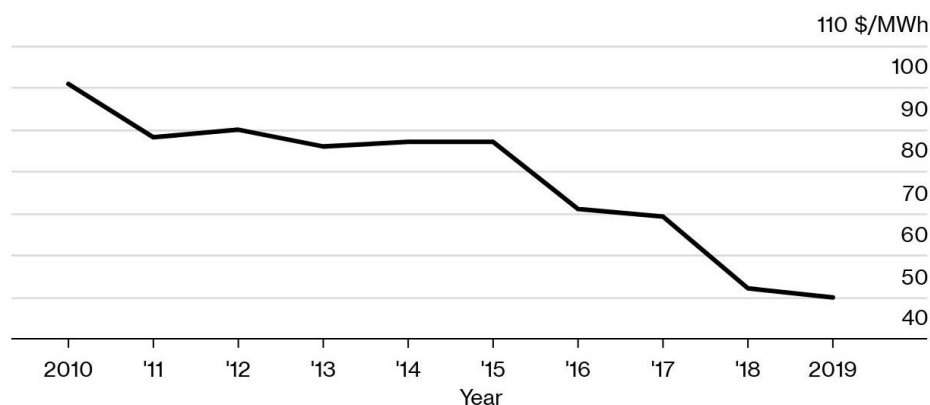


Kuva 4. Suomen vuosittainen tuulivoimatuotanto 1997 – 2017 /17/.

Tariffijärjestelmän sulkeuduttua tuulivoiman osalta marraskuussa 2017, tuulivoima siirrettiin osaksi teknologianeutraalia uusiutuvan energian tukijärjestelmää vuonna 2018. Tässä tukijärjestelmässä uusiutuvien energioiden hankkeet kilpailutetaan ja tukipäätökset tehdään niiden kustannustehokkuuden perusteella. Kilpailutukseen voivat hakea tuulivoiman lisäksi hankkeet, joissa tuotetaan energiaa hyödyntämällä aurinko-, ja aaltovoimaa, sekä biokaasua ja bioenergiaa. Tuulivoimayhdistyksen mukaan vuonna 2018 kaikki tähän uuteen tuotantotuen kilpailutukseen osallistuneet hankkeet olivat tuulivoimahankkeita. Tarjouksia oli yhteensä 26 ja niistä hyväksyttiin seitsemän ja hylättiin 19. /19/

Kustannustehokkaaseen uusiutuvaan energiaan perustuvan tukijärjestelmän kannalta tuulivoiman tulevaisuus näyttää vahvalta myös jatkossa tuulisähkön hintakehityksen näkökulmasta. Maailmalla tuulisähkön hinta tuotettua megawattituntia (MWh) kohden on likimain puolittunut viimeisen kymmenen vuoden aikana ja sen odotetaan olevan tulevaisuudessa myös kilpailukykyinen ilman tukia eri puolilla

maailmaa (**Kuva 5**). Esimerkiksi Yhdysvalloissa tuuli- ja aurinkovoimaloiden taloudellisen voiton varmistamiseksi sähkönhankintasopimuksia tehtiin ennen 20–25 vuodeksi, mutta uusille voimaloille on kyetty tekemään sopimuksia jopa alle 15 vuodeksi /20/. Myös niin sanottujen PPA-sopimusten (Power Purchase Agreement) solmiminen on kasvattanut kiinnostusta tuulivoimaprojekteihin. PPA-sopimuksissa tehdään yksittäisten, suurten sähkönkäyttäjien kanssa pitkäaikaisia sähkönostosopimuksia tietylle määrälle sähköä tiettyyn hintaan. Tämä luo varmuutta sekä sähkön ostajalle, että tuottajalle. /21/



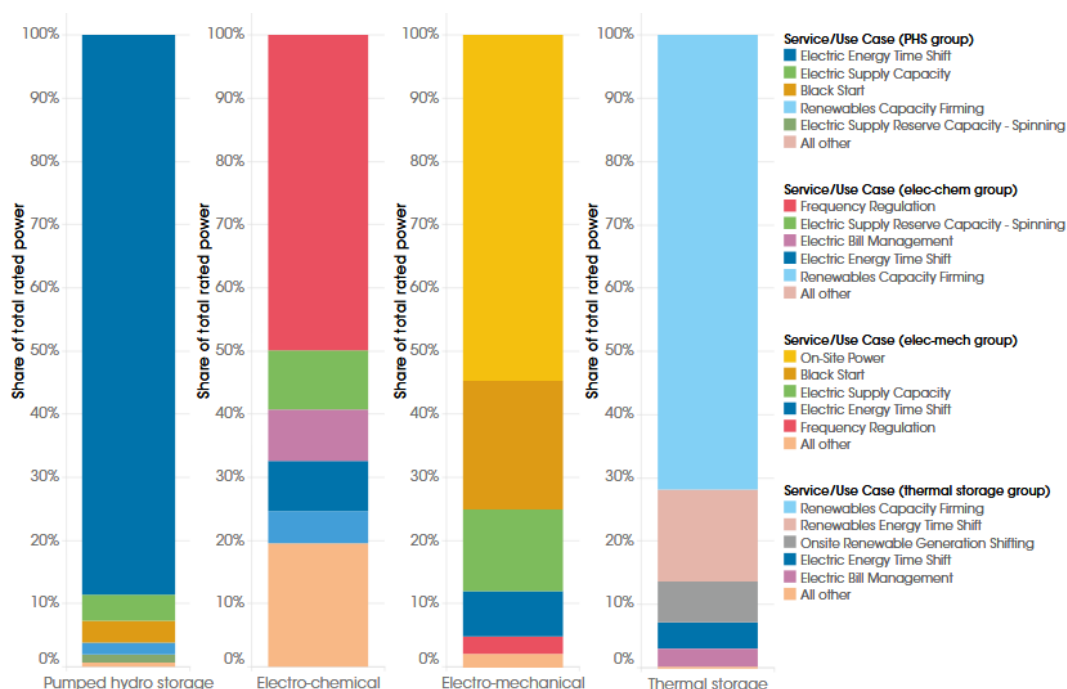
Kuva 5. Tasattu tuulisähkön hintakehitys 2010-luvulla Yhdysvalloissa /20/.

Laiva- ja energiateollisuuden keskittynyt yhtiö Wärtsilä ennustaa myös tuulivoimalle vahvaa kasvua vuoteen 2030 mennessä. Mallintamalla Suomen sähköverkon ja laskemalla tuotantokapasiteetin, sähköntuotannon ja erilaiset kustannukset, Wärtsilä arvioi laskelmiensa mukaisesti uusien tuulivoimahankkeiden olevan jo kilpailukykyisiä ilman tukia. Tämä perustuu laskelmiin, joiden mukaan uusien tuulivoimaloiden sähköntuotantohinta on noin 30 euroa megawattituntia kohden. Tämä hinta on melko hyvin linjassa Yhdysvaltojen hintakehityksen kanssa (**Kuva 5**), ja on jopa alhaisempi. Wärtsilä myös arvioi, että tuulivoimakapasiteetti Suomessa tulee olemaan seitsemänkertainen vuonna 2030 verrattuna vuoteen 2018. Myös tuulivoiman käyttäminen yhdessä lämpöpumppujen kanssa mainitaan. Tämä mahdollistaisi kaukolämpöjärjestelmän uusimisen ja auttaisi Suomea hiilivoimasta luopumisessa, vähentäen hiilidioksidipäästöjä huomattavasti. /22/

3 UUSIUTUVA ENERGIA JA ENERGIANVARASTOINTI

3.1 Energianvarastoinnin rooli energiantuotannossa

Kasvava uusiutuvan energian tuotanto ja energianvarastointi kulkevat käsi kädessä. Koska energianvarastointitekniologioita on useita ja niiden ominaisuudet poikkeavat toisistaan, niitä myös sovelletaan erilaisiin käyttötarkoituksiin niiden vahvuuksien mukaisesti. Tarkastelemme tässä energianvarastoinnin roolia energiantuotannossa yleisesti ja käsittelemme varastointitekniologioita tarkemmin luvussa neljä.

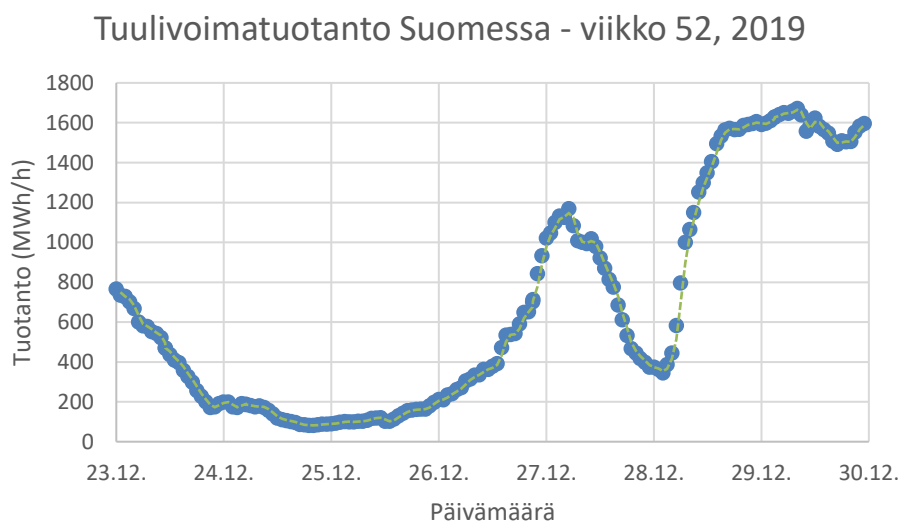


Kuva 6. Energianvarastointitekniologioiden käyttökohteet /3, s. 13/.

Kuva 6 havainnollistaa hyvin eri energianvarastointitekniologioiden käyttökohteita. Pumppuvoimalaitosten roolina on noin 90 prosenttisesti sähkön tuotanto- ja kulutushuippujen tasaaminen, kun taas akkuteknologiaa on hyödynnetty sähköntuotantotasaamisen tasauksessa. Mekaanista energianvarastointia puolestaan hyödynnetään esimerkiksi sähkötyökohteissa ja auttamassa esimerkiksi voimalaitosten uudelleenkäynnistämisen jälkeen. Lämpöenergian varastoinnin

merkittävin rooli on ollut uusiutuvan energian vaihtelevan tuotannon tasaaminen. /3, s. 13/ Merkittävimpien käyttökohteiden lisäksi kutakin teknologiaa käytetään vähemmissä määrin myös muihin tarkoituksiin.

Esimerkkinä energianvarastoinnin mahdollisuuksista, voimme tarkastelemalla vuoden 2019 viimeisen viikon tuulivoimatuotantoa Suomessa (**Kuva 7**). Viikon alussa tuulivoiman tuotto koko Suomen alueella oli suhteellisesti erittäin alhaista, yhteensä noin 200 MWh/h, mutta loppuviikkoa kohti edetessä tuotanto kasvoi jopa 1 600 MWh/h asti. Tällöinkin tuotanto oli alimmillaan vain noin 400 MWh/h. Viikolla 52 vuorokauden sisäinen vaihtelu oli suurimmillaan siis jopa noin 1 200 MWh/h. Energianvarastointia hyödyntämällä voimme muun muassa tasoittaa tällaista tuotannonvaihtelua pitääksemme tuotannon tasaisena, sekä vähentää kuormitusta sähköverkolle varmistamalla tuotetun sähkön taajuuden vakauden.

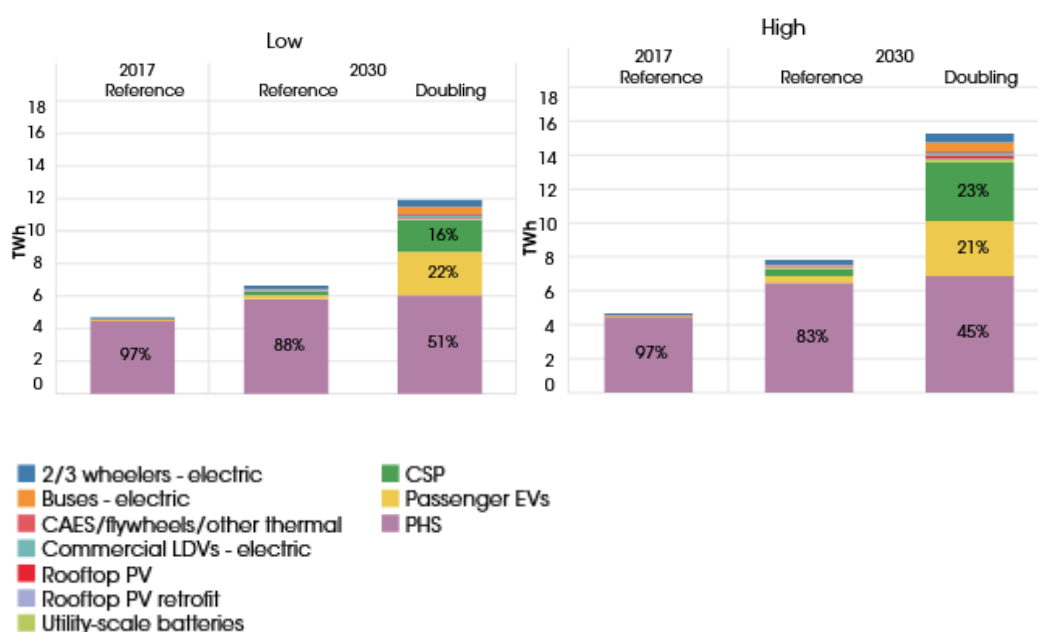


Kuva 7. Tuulivoimatuotanto Suomessa viikolla 52, vuonna 2019 /22/.

Energianvarastoinnin odotetaan myös epäsuorasti vahvistavan energiaomavaraisuutta. 53 prosenttia EU:n alueella käytetystä kokonaisenergiasta tuodaan alueen ulkopuolelta. Tämän on arvioitu maksavan EU:lle yli miljardi euroa päivää kohden. /23, s. 14/

3.2 Energianvarastointikapasiteetin nykytilanne ja ennusteet

International Renewable Energy Agency (IRENA) mukaan energianvarastointikapasiteetin voidaan odottaa kolminkertaistuvan nykyisestä, jos uusiutuvan energian osuus energiantuotannosta kaksinkertaistetaan vuoteen 2030 mennessä /3, s. 14/. Mikäli uusiutuvan energian lisäystavoitteet EU:n alueella toteutuvat, energianvarastointitarpeen voidaan odottaa likimain kolminkertaistuvan EU-alueella uusiutuvan energian lisäystarpeen ollessa 88 prosenttia nykyisestä.



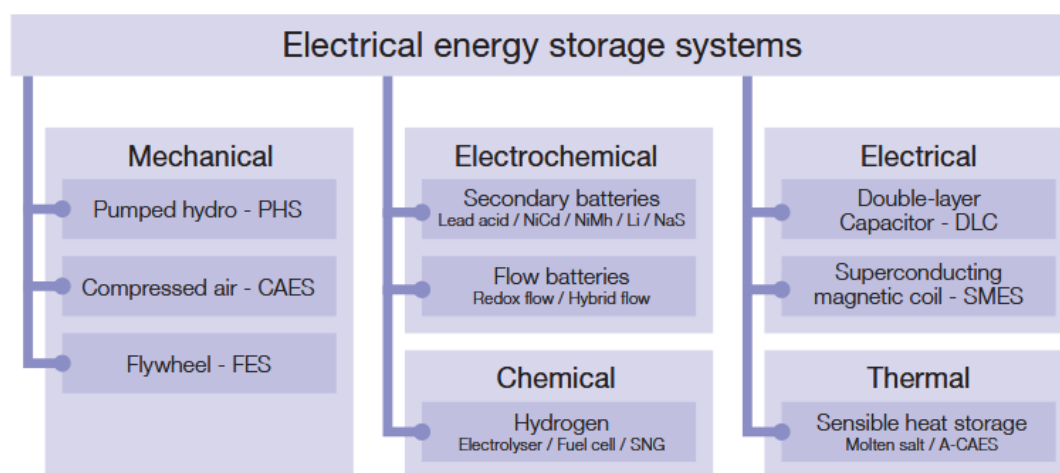
Kuva 8. Energianvarastointikapasiteettiennuste 2017 – 2030 /3, s. 15/.

Tällä hetkellä pumppuvoimalaitos on maailmanlaajuisesti hallitsevin energianvarastointiteknologia 97 prosentin osuudellaan käytössä olevasta energianvarastointikapasiteetista. Muiden teknologioiden käyttöönoton lisääntyessä sen osuuden ennustetaan kuitenkin laskevan 41 – 51 prosenttia vuoteen 2030 mennessä. (**Kuva 8**) Tämä osuuden lasku ei kuitenkaan tarkoita pumppuvoimalaitosten varastointikapasiteetin laskua, vaan heijastelee muiden teknologioiden nopeaa, suhteellista kasvua.

Muiden teknologioiden yhteisvarastointikapasiteetin odotetaan kasvavan maailmanlaajuisesti 2030 vuoteen mennessä noin 162 gigawattitunnista (GWh) jopa 5 821 – 8 426 GWh asti. Esimerkiksi jo pelkästään akkuteknologioiden osuuden odotetaan kasvavan kuluvan vuosikymmenen aikana seitsemäntoistakertaiseksi vuoteen 2017 verrattuna, johtuen akustojen laskevasta hintakehityksestä, paranevasta tehokkuudesta, liikenteen sähköistämisestä ja kuluttajille suunnatuista aurinkopaneeleista. /3, s. 14 – 15/

4 ENERGIANVARASTOINTITEKNOLOGIAT

Energianvarastointi voidaan toteuttaa käyttämällä monenlaisia teknologioita ja niiden valintaan vaikuttavat muun muassa käyttökohteen tarve energian varastoinnin kapasiteetille ja aikakestolle. Nämä teknologiat luokitellaan yleisesti niiden käyttämien varastointimenetelmien fysikaalisten ominaisuuksien mukaan ja kuhunkin luokkaan kuuluu useampia varastointimenetelmiä. Tavallisimmin varastointiteknologiat luokitellaan viiteen eri luokkaan: mekaanisiin, sähkökemiallisiin, kemiallisiin, sähköisiin ja lämpövarastoihin (**Kuva 9**). /24/



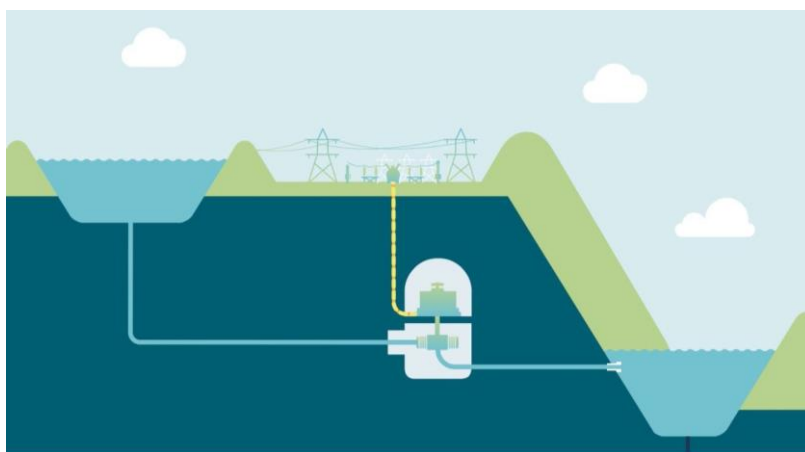
Kuva 9. Energianvarastointiteknologioiden jaottelu.

4.1 Mekaaniset varastointiteknologiat

Mekaanisessa energianvarastoinnissa tuotettu sähkö muutetaan kineettiseksi energiaksi, joka myöhemmin voidaan muuttaa takaisin sähköksi. Näihin varastointiteknologioihin kuuluvat pumppuvoimalaitos, vauhtipyörä ja paineilmaparastointi. Näistä teknologioista selkeästi yleisin käytössä oleva vaihtoehto on pumppuvoimalaitos. /24/

4.1.1 Pumppuvoimalaitos

Pumppuvoimalaitokset toimivat hyödyntämällä kahta vesiallasta, kuten esimerkiksi tekojärviä, jotka ovat pinnankorkeudeltaan eri tasossa (**Kuva 10**). Kun energiaa halutaan varastoida, vettä pumpataan alemmasta altaasta ylempään, esimerkiksi padottuun altaaseen. /24/ Näin tuotettu sähköenergia saadaan muunnettua kineettiseksi energiaksi kasvattamalla veden potentiaalienergiaa, kun sähkön kysyntä on alhaista. Varastoitavaksi haluttu sähkö toimii siis pumppujen voimanlähteenä ja ylös pumpatun veden kyky tehdä työtä kasvaa. Kun sähkön kysyntä on korkea, voidaan varastoitua energiaa purkaa tuottamalla sähköä turbiinin läpi juoksutetulla vedellä.

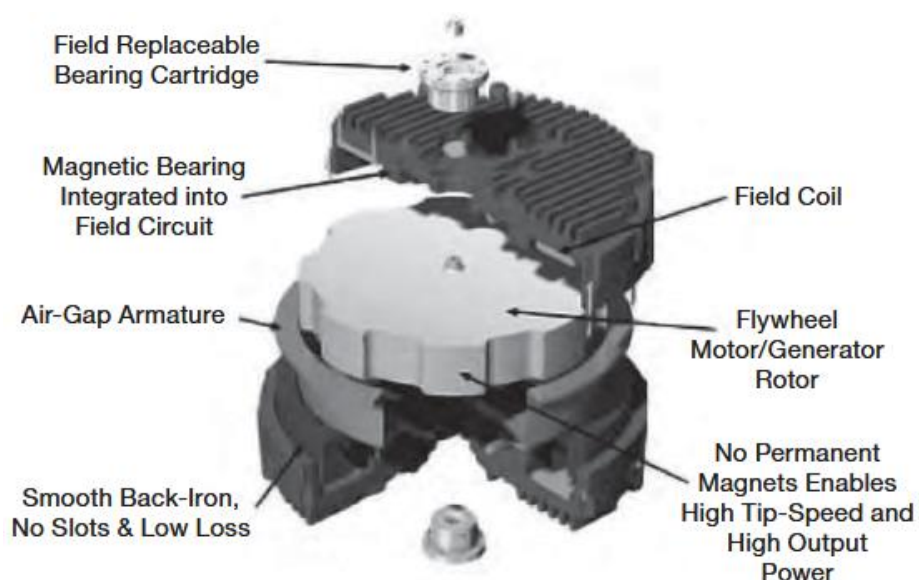


Kuva 10. Havainnekuva pumppuvoimalaitoksen toimintaperiaatteesta.

Ylös pumpattua vettä voidaan varastoida altaassaan ajallisesti käytännössä rajattoman kauan. Tyypillinen energian purku-aika vaihtelee muutamasta tunnista jopa muutamaan päivään riippuen pumppulaitoksen altaan ja generaattorin koosta, sekä energianpurkutarpeesta. Pumppuvoimalaitoksia käytetäänkin pääasiassa tasaamaan energian tuotanto- ja kulutushuippuja (**Kuva 6**). /24/ Luonteensa takia pumppuvoimalaitosten kapasiteetti on verrattain suuri. Niiden kapasiteetti voi vaihdella 10 MW ja 3,0 GW välillä. Hyötysuhde tällä energianvarastointimuodolla vaihtelee 70–85 prosentin välillä. /25/

4.1.2 Vauhtipyörä

Vauhtipyörä toimii varastoimalla energiaa pyörivään, raskaaseen kappaleeseen, jota pyöritetään sähkömoottorilla akselinsa ympäri (**Kuva 11**). Kun kappaleen pyörimisnopeutta kasvatetaan, myös siihen varastoituneen energian määrä kasvaa. Käänteisesti, kun vauhtipyörän energiaa halutaan purkaa, kappaleen pyörimisenergiaa voidaan käyttää generaattorin voimanlähteenä, jolloin pyörimisnopeus hidastuu. Varastoitua energiaa säilytetään pitämällä vauhtipyörän pyörimisnopeus tasaisena. /24/



Kuva 11. Vauhtipyörän rakenne /24/.

Vauhtipyörän etuja ovat korkea energiatiheys, nopea varastointi, nopea reaktioaika ja käyttöikä /3, s. 61/. Vauhtipyörän hyötysuhde on 70 – 95 prosenttia ja kapasiteetiltaan se luonteensa takia yksi energianvarastointimuodoista pienimmistä, yltaen suurimmillaan noin 20 MW saakka. Vauhtipyöriä käytetään tavallisimmin jännitteen ja taajuuden tasaamiseen. /26/

4.1.3 Paineilmavarastointi

Paineilmavarastoinnissa sähkö toimii voimanlähteenä kompressorille, joka puristaa ilman korkeapaineiseksi ja tämä ilma säilötään. Kun tämä säilötty energia halutaan käyttää, korkeapaineinen ilma lämmitetään sekoittamalla siihen maakaasua ja sytyttämällä seos, jonka jälkeen paine vapautetaan kaasuturbiinissa. Tämä menetelmä vapauttaa energiaa kolminkertaisesti verrattuna pelkän maakaasun käyttöön. /26/

Paineilmavarastoinnilla voidaan saavuttaa noin 70 prosentin hyötysuhde, mikäli järjestelmä on adiabaattinen, eli tuotettu lämpö otetaan talteen. Diabaattisessa järjestelmässä, jossa lämpöä ei oteta talteen, hyötysuhde on selvästi alhaisempi, noin 42 – 55 prosenttia. Paineilmavarastoinnin kapasiteetti voi ylittää noin yhteen gigawattiin ja energian purkautumisaika vaihtelee muutaman tunnin ja 30 tunnin välillä. /26/ Paineilmavarastointi skaalautuu hyvin ja sitä voidaan tästä syystä käyttää hyvin erilaisiin tehtäviin käyttökohteen mukaan. Maininnan arvoisena ominaisuutena paineilmavarastointi toimii hyvin palautusjärjestelmänä esimerkiksi sähkökatkon jälkeen. /23/

4.2 Sähkökemialliset varastointiteknologiat

Sähkökemiallisella energianvarastoinnilla tarkoitetaan erilaisia akkuja. Akuissa käytettävässä sähkökemiallisessa reaktiossa kahden johtimen välille luodaan jännite-ero. Positiivisesti varautunutta johdinta kutsutaan katodiksi ja negatiivisesti varautunutta anodiksi. Yksinkertaisesti esitettynä, akkua voidaan kuvailla varaukseltaan epätasapainossa olevana järjestelmänä, joka sähköisen piirin sulkeutuessa pyrkii tasapainottamaan varausten eroja johdinten välillä siirtämällä elektroneja, negatiivisia alkeishiukkasia, anodista positiivisesti varautuneeseen katodiin. Akkua ladataessa, reaktio tapahtuu käänteiseen suuntaan. /27/

Perustoimintaperiaatteen ollessa samanlainen, sähkökemialliset varastointiteknologiat voidaan jakaa kahteen luokkaan: perinteisiin ja virtausakkuihin /23/. Nämä molemmat luokat sisältävät useita eri akkutyyppisiä ja ne jaotellaan niissä käytettävien johdinmateriaalien mukaan /28/. Akkuteknologian yleisimpiä käyttökohteita tule-

vat tulevaisuudessa olemaan erilaiset kulkuneuvot, mutta myös kiinteiden akustojen käyttö tulee lisääntymään energianvarastoinnissa uusiutuvan energian tuotantoyksiköissä, johon tämä tutkimus keskittyy. /23/

4.2.1 Litiumioniakku

Perinteisissä akuissa käytettäviä materiaalivaihtoehtoja on lukuisia erilaisia. Näiden akkujen osalta tämä tutkimus keskittyy kuitenkin käsittelemään litiumioniakkuja johtuen niiden energiatihydestä, käyttöönnoton vahvasta kasvusta, hintakehityksestä, sekä asemasta nimenomaan energianvarastoinnissa. /26/ Litiumioniakkuja ei tule sekoittaa muihin litiumpohjaisiin akkuteknologioihin, joita ovat esimerkiksi litiumpolymeeriakku ja tulevaisuudessa mahdollisesti akkuteknologiaa mullistava litiumilma-akku.

Vuonna 2016 energianvarastoinnissa litiumioniakut olivat selkeästi käytetyin akkuteknologia ja ne ovat myös nopeimmin kasvava sähkökemiallinen varastointimuoto (**Taulukko 2**). Sähköautoissa käytettävien litiumioniakkujen hinta vuoden 2017 lopussa oli 209 \$/kWh ja ennusteiden mukaan hinta voi tippua vuoteen 2025 mennessä jopa alle 100 \$/kWh. Tämän kehityksen voidaan odottaa heijastuvan myös energianvarastointiin. /23, 25/

Taulukko 2. Akkujen keskinäinen osuus energianvarastoinnissa, 2016 /23/.

| Akkutyyppi | Kapasiteetti (MW) | Osuus |
|-----------------|-------------------|--------------|
| Litiumioniakku | 1 134 | 73 % |
| Suola-akku | 206 | 13 % |
| Lyijyakku | 110 | 7 % |
| Virtausakut | 74 | 5 % |
| Nikkeliakku | 30 | 2 % |
| Yhteensä | 1 554 | 100 % |

Litiumioniakkujen hyötysuhde on korkea, noin 95 – 98 prosenttia ja niiden energian purkuaika on mahdollista mitoittaa muutamista sekunneista jopa viikkoihin. Nämä ominaisuudet tekevät litiumioniakuista joustavan ja monikäyttöisen vaihtoehdon

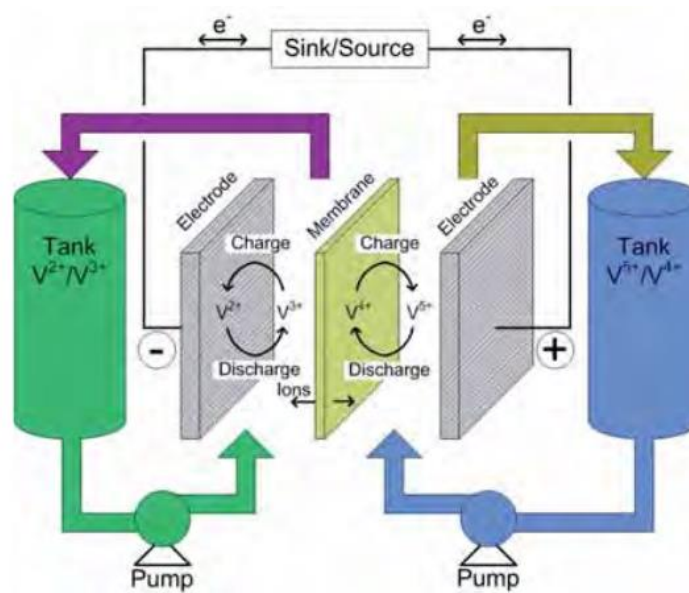
energianvarastoinnille. /24/ Litiumioniakkujen etuna on myös niiden hyvä skaalautuvuus. Pienimmillään ne sopivat taskuun puhelinten akkujen muodossa ja suurin tällä hetkellä käytössä oleva akusto pystyy tuottamaan sähköä 30 000 taloudelle 100 MW kapasiteetillaan. /26/ Skaalautuvuutensa lisäksi akustoja on mahdollista tehdä modulaarisesti. Modulaariset akkuyksiköt voidaan tehdä konteiksi, joita on helppo kuljettaa käyttökohteisiin sellaisinaan. Näiden modulaaristen konttiakustojen kapasiteetti on noin 1 MW. Tällainen akusto on käytössä esimerkiksi Nurmon Atrian aurinkovoimalan yhteydessä. /29, 30/

Litiumioniakkujen heikkoutena on niiden tarve koboltille, jonka saatavuus on rajallista, sen ollessa verrattain harvinainen metalli. Myös materiaalien louhinnasta ja jalostuksesta syntyy päästöjä ja ympäristöhaittoja, joten tulevaisuudessa on syytä pitää silmällä myös muita akkuteknologioita, kuten suola-akkuja. /31/ Litiumioniakut ovat myös kehittymässä edelleen ja eräänä lupaavana kehityssuuntana on syytä pitää tulevaisuudessa litiumhappiakkuja, joiden energiatiheys teoriassa lähestyy bensiiniä. Tämä teknologia on kuitenkin yhä kehitysasteella, eikä sen voida odottaa olevan markkinoilla tämän vuosikymmenen aikana. /32/

4.2.2 Virtausakut

Virtausakut poikkeavat tavanomaisista akuista. Niissä nesteeseen liuotetut elektrolyytit varastoidaan akun ulkopuolella sijaitseviin tankkeihin, joista ne voidaan pumpata akkukennon, joka muuntaa kemiallisen energian suoraan sähköksi. Kennossa on myös läpäisevä kalvo, joka mahdollistaa protonien pääsyn puolelta toiselle elektronien siirtymisprosessin aikana. **(Kuva 12)** Akun teho määräytyy kennon koon mukaan ja käytettävissä oleva energia tankkien koon mukaan. /24/

Virtausakut voidaan jakaa redox- ja hybridivirtausakkuihin. Nämä eroavat toisistaan siinä, että redox-akut käyttävät nesteeseen liuotettuja elektrolyyttejä sekä positiivisella, että negatiivisella navalla, kun taas hybridivirtausakuissa vain toinen puoli on nestemäinen ja toinen on kiinteä. Hybridivirtausakku on siis yhdistelmä perinteisen ja virtausakun välillä. /26/



Kuva 12. Redox-akun toimintaperiaate.

Virtausakkujen etuna on niiden pitkä käyttöikä, mutta niiden energiatiheys on alhainen verrattuna litiumioniakkuun. Esimerkiksi litiumioniakun energiatiheys on 200–400 Wh/l, kun taas virtausakulla vastaava lukema on 20–70 Wh/l. /26/ Käyttöikänsä osalta ne toimivat parhaiten tuottaen energiaa jatkuvasti. Tätä ajatusta tukee myös se, että teoriassa virtausakkuja on mahdollista ladata jatkuvasti pienellä viiveellä, koska käytetyt elektrolyytit poistuvat kennosta takaisin tankkiin. Näin ollen kierto on mahdollista uudistaa. /24/

Virtausakut ovat myös alati kehittyvä teknologia. Esimerkiksi Kiinassa virtausakkujen rakennusprojekteja on käynnissä useita ja viimeisin Dalianin alueelle rakennettavan virtausakun kapasiteetti on jopa 200 megawattia. Aiemmat virtausakut ovat ylittäneet vain noin 100 MW kapasiteettiin. /33/ Myös uudenlaisia materiaaliyhdistelmiä tutkitaan. Esimerkiksi Stanfordin yliopistossa on kokeiltu natriumkalium (NaK) metalliseosta, joka on nestemäinen huoneenlämmössä. Teoriassa tätä yhdistettä käyttäessä virtausakkujen energiatiheys voisi olla jopa kymmenkertainen nykyisiin, vanadiumia käyttäviin virtausakkuihin verrattuna. /34/

4.3 Kemiallinen energiavarastointi

Kemiallisessa energianvarastoinnissa sähköä käytetään tuottamaan vetyä, joka voidaan käyttää sellaisenaan, tai syntetisoida edelleen esimerkiksi metaaniksi (CH_4), metanoliksi (CH_3OH) tai ammoniakiksi (NH_3). Vedyn tuottaminen tapahtuu elektrolyysillä, jossa veden (H_2O) vetyatomit erotetaan happiatomista. Syntetisointiprosessissa vedyn lisäksi tarvitaan hiilidioksidia (CO_2) ja typpeä (N_2). /23/

4.3.1 Vedyn varastointi

Vedyn erottaminen puhtaimmillaan tapahtuu erottamalla se vedestä elektrolyysilaitteella. Reaktion ollessa endoterminen, eli lämpöä sitova, se tarvitsee myös lämpöä. Kun vety on erotettu, se säilötään paineistetussa säiliössä ja säilömisaika on käytännössä rajaton. Elektrolyysissä syntynyttä happea ei ole tarpeen säilöä, vaan se vapautetaan ilmakehään. Kun vety halutaan ottaa käyttöön muuttamalla se sähköksi, elektrolyysi toteutetaan käänteisesti, eli vety ja happi yhdistetään, jolloin saadaan aikaan vettä. Tämä prosessi tapahtuu polttokennossa. Prosessin tarvitsema happi saadaan ilmakehästä. Koska veden hajottaminen on endoterminen reaktio, veden muodostaminen hapesta ja vedystä on eksoterminen reaktio, eli se vapauttaa lämpöä. Samalla reaktiossa saadaan aikaan sähköä. /24/

Vetyä voidaan käyttää hyvin monipuolisesti eri tarkoituksiin. Sähkön ja lämmön tuotannon lisäksi sitä voidaan käyttää muun muassa kaasumootoreissa ja -turbiineissa. Sitä voidaan myös kuljettaa putkien avulla käyttöpaikoille. /23/

Vedyn energiatiheys on mahdollista saada korkeaksi, mikäli se paineistetaan. Tämä on tarpeen siksi, että vety on hyvin kevyt kaasu. Säilöittäessä vety voidaankin kompressoida jopa 700 baarin paineeseen. Tässä paineessa vedyn energiatiheys on jopa 1 400 Wh/l, mikä on energianvarastointimuodoista selvästi suurin. Vedyn varastoinnin hyötysuhde on kuitenkin energianvarastointimuodoista alhaisin sen ollessa 25 – 45 prosenttia. /26, 35/

4.3.2 Synteettinen maakaasu

Synteettisen maakaasun tuottaminen vedystä vaatii ylimääräisen prosessin vedyn varastointiin verrattuna. Vety yhdistetään hiilidioksidin kanssa metanoinnissa, jolloin saadaan aikaan metaania. Tämä metaani voidaan varastoida säiliöissä vedyn tapaan, mutta metaanin etuna on sen korkeampi energiatiheys ilmakehän paineessa, jolloin tarve kompressoinnille on alhaisempi. Tämä sama etu pätee myös metaanin kuljettamiseen putkistoja pitkin, sillä sen siirtämiseen tarvitaan suhteellisesti vähemmän energiaa. Lisäksi verkosto kaasun siirtämiselle on jo olemassa. Synteettisen maakaasun heikkoutena on sen alhainen hyötysuhde. Tämä johtuu siitä, että verrattuna vedyn tuottamiseen ja varastointiin, kyseessä on ylimääräinen vaihe. Hyötysuhde on siis alhaisempi kuin vedyllä, ollen alle 35 prosenttia. /24/

4.4 Sähköinen energiavarastointi

Sähköisessä energiavarastoinnissa tuotettu sähköenergia varastoidaan sellaisenaan käyttäen sähkötekniisiä ratkaisuja. Merkittävimpänä ratkaisuna tälle ovat niin sanotut superkondensaattorit. Käsittelemme niiden lisäksi magneettista energianvarastointia.

4.4.1 Superkondensaattori

Superkondensaattoreita voidaan pitää välimuotona tavallisten kondensaattoreiden ja akkujen välillä. Tavalliset kondensaattorit toimivat varastoimalla sähköenergiaa kahden toisiaan lähellä olevan johtimen väliseen sähkökenttään. Tämä sähkökenttä synnytetään varaamalla toista johdinta, joka synnyttää sen ympärille sähkökentän. Tämä sähkökenttä synnyttää voiman, joka kohdistuu toiseen johtimeen ja saa aikaan myös toisen johtimen varautumisen. Tämä ilmiö mahdollistaa tasaisen virran tuottamisen kondensaattorin lähtöpuolella, vaikka virta olisi epätasaista sille saapuessa. Sähkötekniikassa tämä ominaisuus on erittäin hyödyllinen esimerkiksi laitteiden tasaisen toimivuuden turvaamiseksi. Superkondensaattorit hyödyntävät tavallisten kondensaattoreiden toimintaperiaatetta, mutta ovat kapasitanssiltaan ja energiatiheydeltään huomattavasti parempia kuin tavalliset kondensaattorit. /24/

Superkondensaattoreiden hyötynä ovat myös niiden käyttövarmuus, pitkäkestoisuus ja niiden kyky toimia erilaisissa lämpöolosuhteissa. Ne voidaan myös kierrättää helposti. Superkondensaattoreiden hyötysuhde on korkea, noin 90 prosenttia, mikä on odotettavissa, koska sähköä ei tarvitse muuttaa muihin energiamuotoihin.

Superkondensaattoreiden heikkoutena on niiden energianvarastointiaika. Niiden käyttö pitkäaikaisessa energianvarastoinnissa onkin käytännössä mahdotonta, koska ne purkavat varastoimansa energian ajan kanssa itsestään, joten niiden edut tulevat esiin lähinnä silloin, kun energianpurkutarve on lyhytaikainen. Superkondensaattorit pystyvätkin purkamaan energiansa muutamista sekunneista muutamiin tunteihin. /24/

4.4.2 Suprajohtava magneettinen energiavarastointi (SMES)

Suprajohtavassa magneettisessa energianvarastoinnissa energia varastoidaan magneettikenttään, joka syntyy jäädytetyn käämin ympärille. Käämin jäädyttämistä tarvitaan käytettävän materiaalin suprajohtavalle lämpötila-alueelle pääsemiseksi. Ennen vaadittava lämpötila käytetyille materiaaleille oli noin 4 kelviniä, mutta nykyaikaisia materiaaleja käyttäen suprajohtavuus voidaan saavuttaa jo 100 kelvinin lämmössä. Mikäli materiaalin lämpötila pidetään suprajohtavalla alueella, energia voidaan varastoida käytännössä määräämättömäksi ajaksi. /24/

Magneettisen energianvarastoinnin etuna on sen nopea vasteaika; varastoitu energia on käytettävissä lähes välittömästi ja sen hyötysuhde on myös hyvä, noin 85 – 95 prosenttia. Potentiaaliset käyttökohteet magneettiselle energianvarastoinnille voisivat olla esimerkiksi sähkön laadun ja tuotannon tasaamisen varmistaminen. Nykyisellään teknologian suuremmat sovellutukset, noin 10 megawattia, ovat käytössä lähinnä korkeaenergisissä fysiikan koejärjestelyissä, kuten hiukkasilmaisimissa ja ydinfuusiassa. /23, 24/

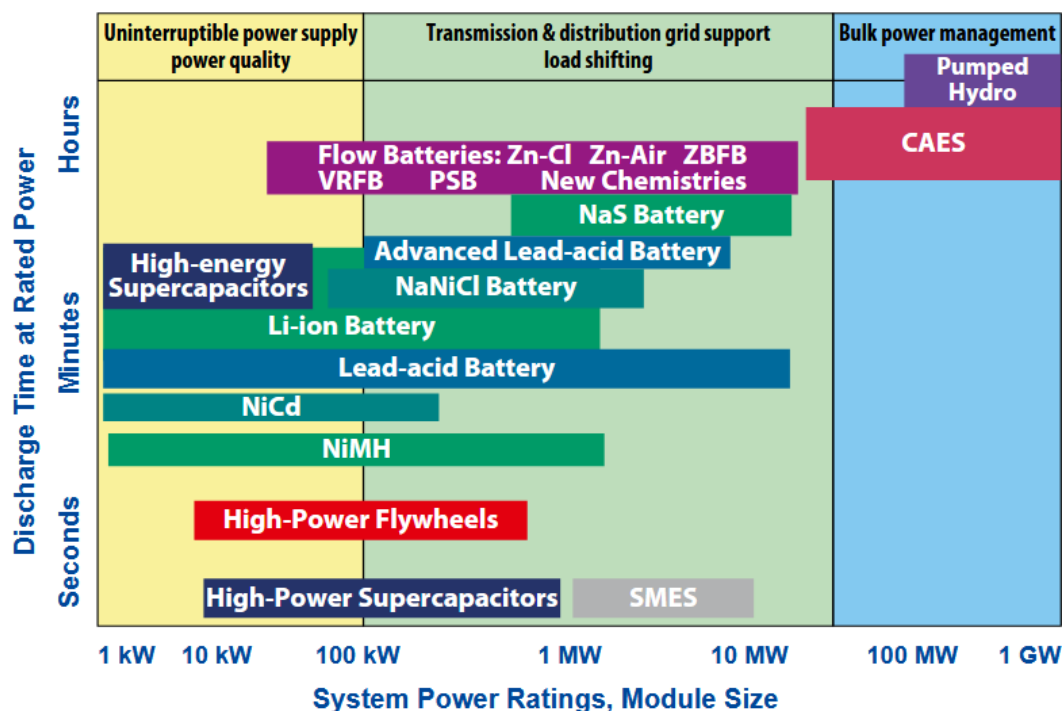
4.5 Lämpöenergian varastointi

Lämpöenergian varastoinnissa lämpöä varastoidaan käytettäväksi myöhemmin. Tätä lämpöä voidaan käyttää esimerkiksi sisäilman lämmitykseen, jäädyttämi-

seen, veden lämmittämiseen tai sähköntuotantoon. /24/ Tätä kautta lämmön varastoinnilla onkin merkittäviä etuja. Se esimerkiksi mahdollistaa paremman energiatehokkuuden teollisuusprosesseissa ja rakennusten lämmityksessä /23/. Suomen energiankulutuksesta suuri osa käytetään vuosittain juuri rakennusten lämmittämiseen, joten pienetkin parannukset tällä sektorilla voivat tuoda verrattain suuret hyödyt.

Lämmönvarastointimenetelmiä on erilaisia ja ne voidaan jakaa kolmeen pääluokkaan niiden lämmönvarastointiperiaatteen perusteella. Nämä luokat ovat: vaihtuvan lämmön varasto (Sensible Heat Storage, SHS), latenttinen lämpövarasto (Latent Heat Storage, LHS) ja termokemiallinen lämpövarasto (Thermochemical Storage, TCS). Näistä laajimmin käytössä oleva varastointimenetelmä on SHS. /23/ Arkiesimerkkinä SHS-lämpövarastosta on esimerkiksi kotien lämminvesivaraaja.

4.6 Energianvarastointitekniikoiden vertailua



Kuva 13. Energianvarastointitekniikoiden vertailua.

Kuva 13 vertailee energianvarastointitekniikoita niiden kapasiteetin ja energian purkuajan kautta, jaotellen ne soveltuvuutensa perusteella kolmeen eri sektoriin /3, s. 41/. Eri varastointitekniikat sijoittuvat sektoreille niiden tehokapasiteetin mukaan. Suurin osa tekniikoista soveltuu vapaamuotoisesti ilmaistuna tukemaan siirto- ja jakeluverkon toimintaa, sekä parantamaan energiantuotannon laatua ja vakautta. Ainoastaan pumppuvoimalaitos ja paineilma-energiavarastointi mielletään soveltuvan suuressa mittakaavassa toimivaksi varaenergian lähteeksi niiden valtavan, > 100 MW, kapasiteetin mukaan.

On huomautettava, että Kuvan 13 kuvaajasta ei löydy lainkaan vetyä tai synteettistä maakaasua. Nämä tekniikat ulottuvat noin 100 MW:n luokkaan. Kuvaaja ei myöskään esitä lämmön varastointia. Syynä tälle on mahdollisesti varastoidun lämmön käyttäminen esimerkiksi kaukolämmön tuottamiseen, mikä luonteeltaan poikkeaa sähköverkon ylläpitämisen ja vakauttamisen tarpeista, joihin kyseenomainen kuvaaja keskittyy.

Pohdittaessa energianvarastointitekniikoiden käyttöä energiantuotannossa, kuva 13 ja kolmannen luvun kuva 6 antavat suuntaa tekniikoiden käyttökohteista, joita pohjana käyttäen on mahdollista aloittaa selvitys niiden soveltumisesta sähkö- ja kapasiteettimarkkinoille.

5 SÄHKÖ- JA KAPASITEETTIMARKKINAT

5.1 Sähkömarkkinoiden rakenne

Suomen sähkömarkkinat voidaan jakaa eri osiin niiden kaupankäynnin aikaperusteisuuden mukaan (**Kuva 14**). Näihin kuuluvat finanssi-, vuorokausi-, päivänsisäiset, ja reaaliaikamarkkinat. Reaaliaikamarkkinoihin kuuluvat säätösähkö- ja reservimarkkinat. Tämän tutkimuksen kannalta finanssimarkkinoiden käsittely ei ole tarkoituksenmukaista. Markkinat ovat avoimia kilpailulle, eli kuka vain voi tehdä sähköä verkkoon. /36/

| Finanssimarkkinat | Vuorokausimarkkinat | Päivänsisäiset markkinat | Säätösähkömarkkinat |
|---|-----------------------|--|---------------------|
| Kaupankäynti | | | Reservimarkkinat |
| 10 vuotta-päivä eteenpäin | Huutokauppa: Huominen | Jatkuva kaupankäynti: Huominen ja kuluva päivä | Reaaliaika |
| Tuotteet | | | |
| Futuurit, DS futuurit, optiot Vuosi, 3kk, kk ja viikko | Tunti | Tunti | 1-60 min |

Kuva 14. Sähkömarkkinoiden rakenne ilman taseselvitystä.

5.1.1 Sähkömarkkinat

Vuorokausimarkkinoilla (day-ahead) käydään kauppaa seuraavan päivän arvioidun sähkön käytön ja kulutuksen mukaan. Sähkön hinta lasketaan pörssissä vuorokauden jokaiselle tunnille ja se määräytyy osto- ja myyntitarjousten sekä siirtokapasiteetin mukaan. Siirtokapasiteetti vaikuttaa hintaan mahdollisten pullonkaulojen kautta, eli mikäli siirtokapasiteetti tarjousalueiden välillä on liian alhainen suhteessa tarpeeseen, hinnat nousevat pullonkaulan alijäämäisellä puolella. Suomi toimii näillä markkinoilla omana tarjousalueenaan ja ylläpitäjänä toimii Nord Pool. Markkina tunnetaan myös nimellä Elspot. /36/

Päivänsisäiset markkinat (intra-day) toimivat lyhyemmällä aikajänteellä. Päivämarkkinoilla arvioituun sähkön kulutus päätökseen tai tuotannon määrään voi tulla odottamattomia muutoksia ja niitä voidaan korjata päivänsisäisillä markkinoilla. Tällaisia muutoksia voivat aiheuttaa esimerkiksi säätilanne, vaurioituneet laitteet tai muut ennakoimattomat tekijät. Päivänsisäiset markkinat voidaankin mieltää vuorokausimarkkinoita hienosäätävinä markkinoina. Näitä markkinoita ylläpitää Nord Pool ja markkina tunnetaan myös nimellä Elbas. /36/

5.1.2 Reservimarkkinat



Kuva 15. Energianvarastoinnin potentiaaliset reservimarkkinat /37/.

Reaaliaikaisiin sähkömarkkinoihin kuuluu kaksi kokonaisuutta: säätösähkö- ja reservimarkkinat. Nämä markkinat voidaan mieltää myös pelkästään reservimarkkinoiksi (**Kuva 15**). Näitä markkinoita ylläpitää Fingrid. Säätösähkömarkkinoilla varmistetaan, että kulutuksen ja tuotannon tasapainottamiseksi on käytettävissä tarpeeksi säädettävää kapasiteettia. Näillä markkinoilla säätötarjouksia voidaan jättää

alle tunti (45 min) ennen käyttötuntia ja niiden tarkoituksena on korjata tasevastaavien tasevirheitä. Nämä markkinat tunnetaan myös nimellä manual Frequency Restoration Reserves (mFRR).

Sujuvan sähkötoimituksen varmistamiseksi tarvitaan myös reservejä mahdollisia häiriötilanteita varten. Nämä reservimarkkinat jaetaan toiminnaltaan erilaisten reservien kesken. Näitä ovat taajuudenvakautus- (FCR-N ja FCR-D) ja automaattinen taajuudenpalautusreservi (aFRR). Näiden lisäksi Fingrid itse listaa myös aiemmin mainitun säätökapasiteetin (mFRR) osaksi reservimarkkinoita. /36/

5.2 Taseselvitys

5.2.1 Tasevastuun järjestäminen

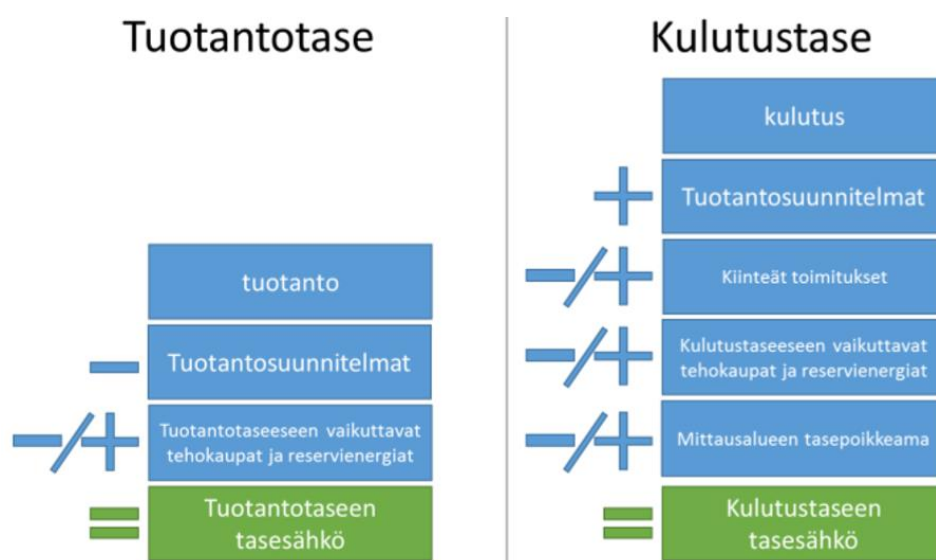
Jokaisella sähkökäyttäjällä ja sähköverkkoon sähköä syöttävällä tuottajalla tulee olla kullekin käyttö- ja tuotantopaikalleen yksi sähkömyyjä. Sähkömyyjää nimitetään myös avoimeksi toimittajaksi. Tämän sähkömyyjän on osoitettava avoimelle toimitukselleen tasevastaava, joka puolestaan tasapainottaa avoimen toimitusketjun välityksellä sekä sähköntuotannon ja -hankinnan, että sähkökäytön ja -toimituksen kullekin osapuolelle. /41/

5.2.2 Tasevastaavat

Tasevastaavaksi määritellään yritys, jolla on voimassa oleva tasepalvelusopimus Fingrid Oyj:n kanssa ja taseselvityssopimus pohjoismaisten kantaverkkoyhtiöiden omistaman taseselvitysyhtiö eSettin kanssa. Tasevastaava on itse, tai muiden osapuolten puolesta sähkön tuottaja, kuluttaja tai myyjä. Tasevastaavista käytetään myös lyhennettä BRP (Balance Responsible Party). Näiden toimijoiden vastuulla on pitää yllä sähköjärjestelmän tasapainoa huolehtimalla niiden vastuulla olevien osapuolten tuottaman ja kuluttaman sähkön taseesta, sekä laatia tasepoikkeamista selvitykset. /39, s. 2/ Suomessa tasevastaavia on yhteensä 51 kappaletta /40/.

5.2.3 Valtakunnallinen taseselvitys

Taseselvityksessä tarkastellaan tasevastaavien markkinoille tarjoaman sähkön tuotantosuunnitelman erotusta toteutuneisiin lukuihin toimituksen jälkeen. Tämä taseselvitys toteutetaan pohjoismaissa niin sanotulla kahden taseen mallilla, joka on jaettu tuotanto- ja kulutustaseeseen (**Kuva 16**). Tuotantotase lasketaan vähentämällä toteutuneen sähköntuotannon määrä tuotantoennusteesta ja ottamalla huomioon tuotantotaseeseen vaikuttavat tehokaupat ja reservienergiat. Kulutustase puolestaan lasketaan vähentämällä toteutuneesta kulutuksesta tuotantosuunnitelmat, ottaen huomioon kiinteät toimitukset, kulutustaseeseen vaikuttavat tehokaupat ja reservienergiat, sekä mittausalueen tasepoikkeama. /41/



Kuva 16. Tuotantotaseiden laskenta.

Nämä poikkeamat lasketaan jaksoittain ja koska sähköjärjestelmä pyritään pitämään jatkuvassa tasapainossa, poikkeamista aiheutuneet tasapainottamiskustannukset kohdistetaan niille toimijoille, joiden toiminnasta tasapainottamisen tarvetta syntyy. Tällä toimintamenetelmällä pyritään rohkaisemaan tasevastaavia olemaan tarkkoja sähköjärjestelmän tasapainon ylläpitämisen suhteen. /36/

Tällä hetkellä tasepoikkeamat lasketaan tuntikohtaisesti, mutta vuoteen 2022 loppuun mennessä EU-tasolla on tarkoitus siirtyä niin kutsuttuun varttitaseeseen. Alun perin tavoite varttitaseeseen siirtymiselle oli vuoden 2020 loppuun mennessä, mutta pohjoismaiset kantaverkkoyhtiöt eivät kuitenkaan ole pitäneet aikataulua realistisena. Varttitase nimensä mukaisesti lyhentää taseselvityksen tarkastelujakson tunnista 15 minuuttiin. Tämä mahdollistaa tarkemman tase seurannan, mikä on hyödyksi muun muassa säästä riippuvan sähköntuotannon tarkemmassa tasapainottamisessa. Varttitase esimerkiksi paljastaisi taseen poikkeamia, jotka tuntikohtaisessa seurannassa jäisivät piiloon niiden kumoutuessa pidemmän seurantavälin aikana. Näiden poikkeamien huomaaminen on kuitenkin oleellista sähköjärjestelmän tasapainottamisen kannalta. /38/

5.3 Energiavarastointi ja markkinat

Energianvarastoinnin tulevaisuusnäkyviä tarkastellessa on pohdittava myös sen roolia tasevastaavien liiketoiminnassa ja sen asemointia sähkö- ja kapasiteettimarkkinoilla. Tutkimusta edeltäneessä haastattelussa esitettiin arvio siitä, että energianvarastoinnilla on mahdollisesti enemmän potentiaalia kapasiteettimarkkinoilla, joilla viitataan aiemmin käsiteltyihin reservimarkkinoihin. Lisäksi haastattelussa todetaan, että liiketaloudelliset mahdollisuudet sähkömarkkinoilla, eli vuorokausi- ja päivänsisäisillä markkinoilla, ovat heikommat sähkön hinnan ja hintahajoaman ollessa pienempiä. Fingridin webinaarissa ”Sähkövarastojen järjestelmätekniset vaatimukset” energianvarastoinnista puhuttaessa keskitytään myös yksinomaan reservimarkkinoihin. Lisäksi esitelmässä eritellään sähkövarastoille luontaisiksi markkinoiksi erityisemmin FFR-, FCR-D- ja FCR-N-markkinat. /37/

6 TUTKIMUKSEN TOTEUTUS

6.1 Tutkimusmenetelmän valinta

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on selvittää tasevastaavien suhtautumista energianvarastointiin, sen liiketoiminnallisiin mahdollisuuksiin sähkö- ja kapasiteetti-markkinoilla, sekä arvioida potentiaalisimpia teknologioita varastoinnin toteuttamiseksi. Näiden asioiden selvittämiseksi vaaditaan suoraa yhteydenottoa tasevastaaviin. Punnittaessa valintaa kvalitatiivisen ja kvantitatiivisen tutkimusmenetelmän välillä, on pohdittava tutkimuksen syvyyttä ja toisaalta laajuutta; kumpi menetelmästä on paremmin sovellettavissa tutkimuksen tarkoitukseen?

Koska tutkimuksen tavoitteena on selvittää yleisesti asenteita energianvarastointiin liittyen, eikä tarkoituksena ole selvittää taustalla piileviä syitä tasevastaavien näkemyksille yksityiskohtaisesti, tämän tutkimuksen tarkoitusta palvelee parhaiten kvantitatiivinen tutkimusmenetelmä. Näiden huomioiden nojalla tutkimus päätettiin toteuttaa käyttäen sähköistä kyselylomaketta.

6.2 Haastateltavat toimijat

Suomessa toimii yhteensä 51 tasevastaavaa ja tutkimuksen ollessa kyselymuotoinen, kyselylomake pyrittiin lähettämään näistä jokaiselle. Lista tasevastaavista yhtiöistä on saatavilla taseselvitysyrhtiö eSettin verkkosivujen kautta ja lomake kyettiin lähettämään onnistuneesti 46 tasevastaavalle. /40/ Syynä kyselyn lähettämisen onnistumattomuudelle viiden tasevastaavan osalta johtuu osin vastuuhenkilöiden yhteystietojen vanhentuneisuudesta. Yhteystiedot kerättiin eSettin tasevastaavien yhteystietolistaa käyttäen ja puuttuvia yhteystietoja pyrittiin täydentämään käsin. Kysely lähetettiin vastaajille sähköpostitse ja vastausaikaa annettiin 14 vuorokautta aikavälillä 18.3. – 31.3.2020. Kyselyn alhaisen vastaajamäärän takia vastausaikaa pidennettiin seitsemällä vuorokaudella. Näiden 21 vuorokauden aikana vastaajille lähetettiin kaksi muistutusviestiä.

6.3 Kyselyn rakenne

Kysely on jaettu kysymysten kartoitustarkoituksen mukaisesti eri osioihin. Näin kyselylle saadaan aikaan johdonmukainen rakenne, jota myös vastaajan itsensä on helppo seurata. Osakokonaisuuksia kyselyssä on yhteensä kolme: Pohjustavat tiedot, Näkemyksenne energianvarastoinnista ja Sähkö- ja kapasiteettimarkkinat. Näiden lisäksi neljänneksi osioksi on lisätty vapaaehtoinen osio nimeltään Tutkimuksen tulokset, jossa vastaaja voi antaa sähköpostiosoitteensa saadakseen tiivistelmän tutkimustuloksista.

6.3.1 Pohjustavat tiedot

Tässä osiossa pyritään muodostamaan kuvaa siitä, minkä kaltaisia kyselyyn vastanneet tasevastaavat ovat. Tämä on perusteltua, koska tasevastaavat ovat keskenään hyvin erilaisia, eikä niiden luokittelu yhdeksi homogeeniseksi ryhmäksi ole suositeltavaa. Vastanneiden yhtiöiden hahmottaminen ja ymmärtäminen auttaa siis myös vastausten analysointia.

Ensimmäiseksi vastaajalta pyydetään tasevastaavan nimi. Tämä kysymys on ainoastaan tutkimuksen tekijää varten, eikä kenenkään kyselyyn vastanneen yhtiön nimi esiinny työssä millään tavalla. Nimen antamisen tarkoituksena on helpottaa kyselyyn vastanneiden ja vastaamattomien seuranta, jotta mahdolliset vastausmuistutukset voidaan kohdentaa yhtiöille, jotka eivät ole vastanneet kyselyyn.

Toiseksi vastaajilta kysytään perustietoja heidän tarjoamistaan tasepalveluista. Tätä tarkoitusta varten pyydetään tiedot tuotantokapasiteetista, jolle tasepalveluita tarjotaan, keille palveluita tarjotaan ja mitkä ovat yhtiön palveluissa hyödynnetyt energiantuotantomuodot. Esimerkiksi osa yhtiöistä voi tarjota tasepalveluita vain yhtiön sisäisesti, kun taas toiset tarjoavat palveluita kaikille sähköntuottajille.

Viimeisinä pohjustavina tietoina pyydetään antamaan tiedot yhtiön energianvarastoinnin nykytilasta. Tähän liittyen kysytään, onko yhtiössä keskusteltu energianvarastoinnista, onko sellainen suunnitteilla, vai onko sellainen jo käytössä. Tämän ky-

symyksen vastausten perusteella esitetään tarkentavia jatkokysymyksiä suunnitella olevan tai jo käytössä olevan energiavaraston tehosta ja energiamäärästä. Tässä energiavarastot on jaettu erikseen sähkö- ja lämpövarastoihin.

6.3.2 Näkemyksenne energianvarastoinnista

Tässä osiossa kartoitetaan vastaajien näkemyksiä ja asenteita energianvarastointia kohtaan ensin yleisellä tasolla ja sen jälkeen oman yhtiön näkökulmasta. Osion ensimmäinen kysymyskokonaisuus koostuu kolmesta osakysymyksestä, joissa vastaajalta kysytään väittämien kautta, kokevatko he energianvarastoinnilla olevan tarvetta nyt, vasta tulevaisuudessa, tai ei koskaan. Näin saadaan avattua vastaajien yleistä asennetta energianvarastointia kohtaan. Tämän jälkeen vastaajaa pyydetään arvioimaan, mitkä uusiutuvat energiantuotantomuodot olisivat energianvarastoinnin kannalta potentiaalisimpia. Vaihtoehtoiksi vastaajille on annettu tuulivoima, aurinkosähkö, vesivoima ja bioenergia.

Energianvarastointiin liittyvien yleisten kysymysten jälkeen siirrytään tarkastelemaan aihetta tasevastaavien omien tasepalveluiden kautta. Tässä vaiheessa vastaajaa pyydetään arvioimaan, kuinka suuri tarve hänen edustamallaan yhtiöllä on energianvarastoinnille vuonna 2025. Kuten aiemmin energianvarastoinnin nykytilasta kysyttäessä, kysymys on jaettu lämpö- ja sähkövaraston osalta omiin luokkiinsa niiden luonteen ollessa erilainen.

Tämän osion lopuksi vastaajaa pyydetään valitsemaan neljä houkuttelevinta energianvarastointiteknologiaa heidän edustamansa yhtiön kannalta. Tämä on suoraan yksi tämän tutkimuksen tutkimuskysymyksistä ja se auttaa selvittämään, mitkä ovat tähän työhön liittyvän investointihankkeen näkökulmasta kannattavimmat investointikohteet.

6.3.3 Sähkö- ja kapasiteettimarkkinat

Viimeisessä osakokonaisuudessa selvitetään vastaajan näkemyksiä sähkönvarastoinnin potentiaalista sähkö- ja kapasiteettimarkkinoilla. Ensimmäisenä kysymyksessä vastaajalta kysytään sähkövaraston käyttötarkoitusta yhtiön tasepalveluiden

osalta tällä hetkellä ja toisessa kysymyksessä vastaajaa pyydetään arvioimaan sähkövaraston käyttötarkoitusta tulevaisuudessa olettaen, että teknologiat kehittyvät ja kannattavuus paranee.

Seuraavassa vaiheessa kysytään sähkö- ja kapasiteettimarkkinoista tarkemmin. Ensimmäisenä kysymyksenä esitetään, millainen näkemys tasevastaavilla on sähkövarastoinnin soveltuvuudesta intra-day- ja day-ahead-markkinoille, sekä kapasiteettimarkkinoille yleisesti. Tämän jälkeen kysymystä soveltuvuudesta tarkennetaan koskemaan kapasiteettimarkkinoita. Varsinaisia sähkömarkkinoita on olemassa vain kaksi, day-ahead ja intra-day, ja kapasiteettimarkkinoita on useampia, joten sähkö- ja kapasiteettimarkkinoista päätettiin kysyä kahdessa erillisessä kysymyksessä jaottelun yksinkertaistamiseksi. Etenkin ensimmäinen sähkö- ja kapasiteettimarkkinoihin liittyvä kysymys auttaa suoraan tutkimuksen kahden tutkimuskysymyksen selvittämisessä, nimenomaisesti tekemään eron sähkövarastoinnin soveltuvuudesta näiden eri markkinatyypin välille.

7 TULOKSET JA ANALYSOINTI

7.1 Tulosten ja analysoinnin pohjustus

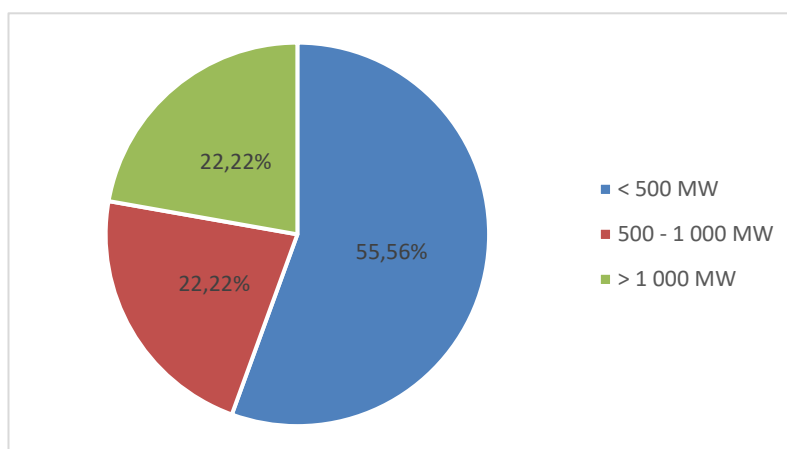
Suomessa toimivia tasevastaavia on yhteensä 51 ja tutkimuskysely lähetettiin onnistuneesti 46 vastaajalle, joista yhdeksän (9) tasevastaavaa vastasi kyselyyn. Näin ollen itse valikoitunut näyte edustaa siis 17,6 prosenttia koko perusjoukosta.

Ennen siirtymistä itse kyselyn tuloksiin huomautettakoon, että tilastollisen analysoinnin kannalta asetelma on haastava perusjoukon ja näytteen ollessa lukumääräisesti pieniä. Analysointimenetelmät tämän tutkimuksen osalta rajoittuvat pääosin keskiarvon ja mediaanin tarkasteluun. Tasevastaavien näkemyksiä tarkasteltaessa on lisäksi otettava huomioon yhtiöiden keskinäinen poikkeavuus, mikä tarkoittaa, että annetut vastaukset eivät välttämättä kuvasta koko perusjoukkoa kysymyksissä, joissa tarkastellaan yhtiöiden omia tarpeita energianvarastoinnin osalta.

Tutkimus sisältää myös kysymyksiä, jotka luonteeltaan kartoittavat näkemyksiä energianvarastoinnista sekä sähkö- ja kapasiteettimarkkinoista yleisesti. Näiden osalta voidaan olettaa vastausten luovan kuvaa koko perusjoukon osalta, mutta kuitenkin vain suuntaa antavasti.

7.2 Vastaajien perustiedot

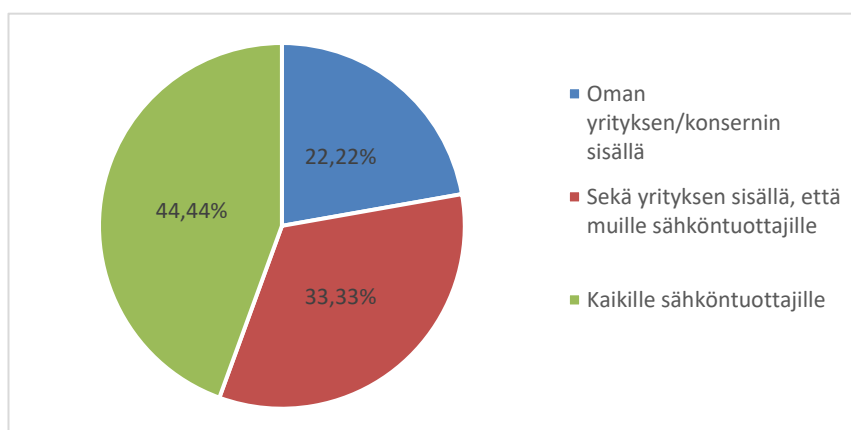
7.2.1 Tasepalveluiden tarjonta



Kuva 17. Tasepalveluiden tarjontakapasiteetti.

Tutkimukseen vastanneista tasevastaavista suurin osa, 55,56 prosenttia, tarjoaa tasepalveluita alle 500 MW:n kapasiteetilla ja 22,22 prosenttia yli 1 000 MW:n kapasiteetilla. Jäljelle jäänyt 22,22 prosenttia tarjoaa tasepalveluita näiden väliltä, eli 500 – 1 000 MW (**Kuva 17**).

Vastaajista 44,44 prosenttia tarjoaa tasepalveluita ulkoisille sähköntuottajille, 22,22 prosenttia vain oman yrityksen tai konsernin sisällä ja 33,33 prosenttia sekä oman yrityksen sisäisesti, että muille sähköntuottajille (**Kuva 18**).



Kuva 18. Tasepalveluiden tarjonnan kohteet.

Vastaajat siis jakautuvat melko tasaisesti ryhmiin sen mukaan, keille he tarjoavat tasepalveluitaan, painottuen kuitenkin yrityksiin, jotka tarjoavat tasepalveluita kaikille sähköntuottajille. Pienemmällä kapasiteetilla palveluita tarjoavia yrityksiä on lukumääräisesti enemmän verrattuna kyselyssä keskisuuriksi ja suuriksi luokiteltuihin tasepalveluiden tarjoajiin.

Taulukosta 3 näemme, kuinka kyselyyn vastanneet yritykset tarjoavat tasepalveluita eri energiantuotantomuodoille. Tätä taulukkoa tulkittaessa on huomattava, että kukin yritys tarjoaa tasepalveluita useammalle kuin yhdelle energiamuodolle. Vastanneista yrityksistä kaikki tarjoavat tasepalveluita vesivoimalle. Toiseksi eniten tasepalveluita vastanneiden tarjotaan tuulivoimalle ja kolmanneksi eniten bioenergiolle. Ydinvoimalle tasepalveluita tarjoaa 44,44 prosenttia vastaajista ja auringolle ja hiilelle kumpaakin 33,33 prosenttia vastanneista. 22,22 prosenttia vastanneista

ilmoitti hyödyntävänsä myös muita energiamuotoja. Näitä olivat CHP, Combined Heat and Power, eli sähkön ja lämmön yhteistuotanto, sekä pörssiostot. Nämä vastaukset joudutaan ohittamaan, sillä pörssiostot eivät itsessään ole energiantuotantomuoto ja on oletettava, että vastaus sähkön ja lämmön yhteistuotannosta viittaa kaukolämmön tuottamiseen, jonka varsinaisen energiantuotantomuodon vastaaja on jo valinnut, ottaen huomioon kysymyksen olevan monivalintakysymys, jossa useampi vastausvaihtoehto on mahdollinen.

Taulukko 3. Tasepalveluiden tarjonta energiamuodoittain.

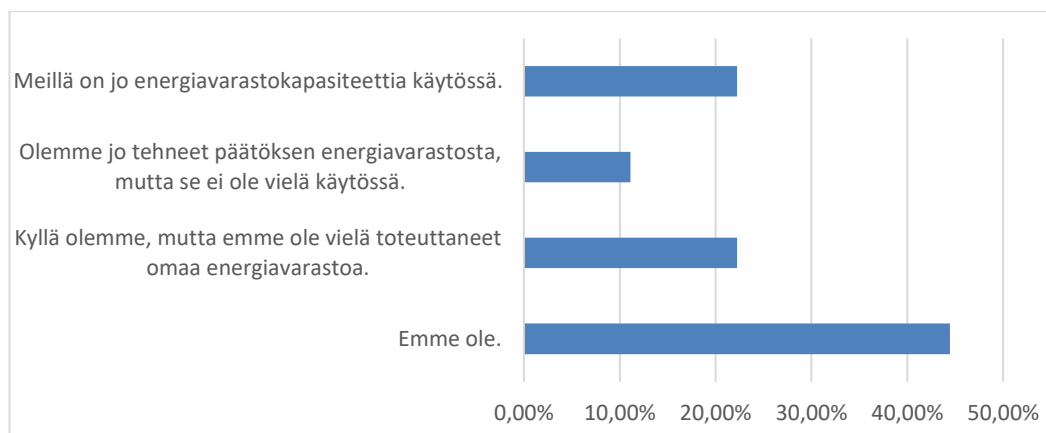
| Tarjotut tasepalvelut | |
|-----------------------|----------|
| Vesi | 100,00 % |
| Tuuli | 88,89 % |
| Bio | 77,78 % |
| Ydinvoima | 44,44 % |
| Aurinko | 33,33 % |
| Hiili | 33,33 % |
| Muu | 22,22 % |

Näistä vastauksista huomionarvoista tämän tutkimuksen kannalta on vesi- ja tuulivoiman osuus tasepalveluiden tarjonnassa. Tuulivoima on energianvarastoinnin tarkastelun kannalta merkittävä energiantuotantomuoto, kun taas vesivoima jo itsessään toimii säätövoimana. Vesivoiman hyödyntäminen energiantuotannossa voi toisaalta enteillä myös kiinnostusta energianvarastoinnin osalta pumppuvoimalaitoksiin.

7.2.2 Vastaajien energiavarastosuunnitelmat

Tasevastaavilta kysyttiin heidän energianvarastointikapasiteettinsa toteuttamissuunnitelmista, sekä niiden mahdollisesta tehosta ja energiamäärästä jakaen ne erikseen sähkö- ja lämpövarastoihin. Kysyttäessä suunnitelmista investoida energianvarastointiin, vastaukset jakautuivat kahtia sen mukaan, onko keskustelua aiheesta jo avattu. 44,44 prosenttia vastaajista ilmoitti, että keskustelua energiavaraston toteuttamisesta ei ole käyty ja 55,56 prosenttia vastaajista ilmoitti, että keskustelua

aiheesta on jo käyty, tai energianvarastointikapasiteettia on jo käytössä. Jo olemassa olevaa varastointikapasiteettia on käytössä 22,22 prosentilla vastaajista. (**Kuva 19**)



Kuva 19. Vastaajien energianvarastointisuunnitelmat.

Kysyttäessä energiavarastojen mitoituksesta, tasevastaajien arviot mahdollisten sähkövarastojen tehosta (MW) ja energiamäärästä (MWh) olivat hyvin varovaisia ja epävarmoja. 88,89 prosenttia vastaajista ei osannut arvioida sähkövaraston tehoa tai energiamäärää ja jäljelle jääneet 11,11 prosenttia arvioivat tehon tulevan olevan mahdollisesti alle 500 MW ja energian alle 1 GWh. (**Taulukko 4**)

Taulukko 4. Sähkövaraston arvioitu teho ja energia.

| Sähkövaraston teho (MW) | |
|-----------------------------|---------|
| En osaa sanoa. | 88,89 % |
| < 500 | 11,11 % |
| 500 - 1 000 | 0,00 % |
| > 1 000 | 0,00 % |
| Sähkövaraston energia (GWh) | |
| En osaa sanoa. | 88,89 % |
| < 1 | 11,11 % |
| 1 - 10 | 0,00 % |
| > 10 | 0,00 % |

Lämpövarastojen osalta vastaukset olivat hyvin samansuuntaiset sähkövarastojen mitoituksen arvioinnin osalta. Eroavuutena lämpövarastojen mitoituksen osalta olivat ne aiemmin mainitut 22,22 prosenttia vastaajista, jotka vastasivat energianvarastointikapasiteettia olevan jo käytössä. He vastasivat lämpövaraston tehon olevan 100 – 500 MW ja energian olevan 1 – 10 GWh. Näitä 22,22 prosenttia lukuun ottamatta vastaukset olivat sähkövarastoihin liittyvän kysymyksen kanssa identtiset. 11,11 prosenttia vastaajista arvioi lämpövaraston mitoituksen tehon ja energian osalta olevan mahdollisesti alle 100 MW ja alle 1 GWh ja jäljelle jäänyt enemmistö, 66,67 prosenttia, ei osannut arvioida tehoa tai energiamäärää. (**Taulukko 5**)

Taulukko 5. Lämpövaraston arvioitu teho ja energia.

| Lämpövaraston teho (MW) | |
|-----------------------------|---------|
| En osaa sanoa. | 66,67 % |
| < 100 MW | 11,11 % |
| 100 - 500 MW | 22,22 % |
| > 500 MW | 0,00 % |
| Lämpövaraston energia (GWh) | |
| En osaa sanoa. | 66,67 % |
| < 1 | 11,11 % |
| 1 - 10 | 22,22 % |
| > 10 | 0,00 % |

Annetut vastaukset kyselyyn vastanneiden yritysten osalta antavat kuvan siitä, että keskustelut energianvarastointikapasiteetin toteuttamisesta ovat vielä hyvin alkuvaiheessa. Voidaan arvioida, että energianvarastoinnin tämänhetkinen liiketaloudellinen kannattavuus on mahdollisesti yksi selittävä osatekijä ja tilannetta pidetään yrityksissä silmällä, mutta varsinaisia päätöksiä ei olla vielä valmiita tekemään. Voidaan pitää myös todennäköisenä, että aitoa kiinnostusta sähkön varastoinnille kuitenkin on, sillä huomattavan suuri osa yrityksistä tarjoaa tasepalveluita tuulivoimalle, missä tarve tuotantoarvioiden korjaamiselle on verrattain suurta verrattuna muihin energiantuotantomuotoihin. Näitä asioita käsittelemme tarkemmin seuraavassa alaluvussa.

7.3 Näkemykset energianvarastoinnista

7.3.1 Näkemykset energianvarastoinnista nyt ja tulevaisuudessa

Selvittäessä tasevastaavien näkemyksiä energianvarastoinnin tarpeesta nyt ja tulevaisuudessa vastaajille esitettiin kolme väittämää, joihin he voivat vastata asteikolla 1 – 5 ilmaisten oman mielipiteensä. Numeroarvot kuvastavat samanmielisyyttä väitteen kanssa, jossa yksi (1) tarkoittaa vastausta ”Täysin eri mieltä” ja viisi (5) vastausta ”Täysin samaa mieltä”. Vastaajat olivat lähes yksimielisiä siitä, että energianvarastoinnille on tarvetta joko nyt tai tulevaisuudessa. 88,89 prosenttia vastaajista ilmoitti olevansa täysin eri mieltä väittämän ”Emme näe tarvetta energianvarastoinnille nyt tai tulevaisuudessa” kanssa. 11,11 prosenttia vastasi olevansa kyseisen väittämän kanssa täysin samaa mieltä. (Taulukko 6) Asteikolla 1 – 5, keskiarvo oli 1,44 ja mediaani 1.

Taulukko 6. Tarve energianvarastoinnille nyt tai tulevaisuudessa.

| Emme näe tarvetta energiavarastoinnille nyt tai tulevaisuudessa. | | | | | |
|--|-------------------|------------------|------------------|--------------------|---------------------|
| En osaa sanoa | Täysin eri mieltä | Melko eri mieltä | Ei vahvaa kantaa | Melko samaa mieltä | Täysin samaa mieltä |
| 0,00 % | 88,89 % | 0,00 % | 0,00 % | 0,00 % | 11,11 % |

Toinen esitetty väittämä oli: ”Emme näe tarvetta energianvarastoinnille juuri nyt. Uskomme kuitenkin, että tämä tulee olemaan merkittävä kysymys esimerkiksi tuuli- ja aurinkosähkötuotannon lisääntyessä tulevaisuudessa.”. Vastaukset väittämään jakoutuivat läpi asteikon ilman selkeää, yhteistä näkemystä. (Taulukko 7) Yksi osasy sille on mahdollisesti väittämän hieman epätarkka esitys, sillä väite sisältää kaksi virkettä ja niistä jälkimmäinen tarkennusvirke voidaan tulkita koskevan ainoastaan tuuli- ja aurinkosähköä, jättäen pois esimerkiksi lämpövarastot. Vastauksen keskiarvo väittämään oli 2,67 ja mediaani 2, eli kuitenkin voidaan tulkita, että vastaajilla ei tämän väittämän suhteen ole vahvaa mielipidettä suuntaan tai toiseen.

Taulukko 7. Tarve energianvarastointi tulevaisuudessa.

| Emme näe tarvetta energianvarastoinnille juuri nyt. Uskomme kuitenkin, että tämä tulee olemaan merkittävä kysymys esimerkiksi tuuli- ja aurinkosähkötuotannon lisääntyessä tulevaisuudessa. | | | | | |
|---|-------------------|---------------------|------------------|-----------------------|---------------------|
| En osaa sanoa | Täysin eri mieltä | Osittain eri mieltä | Ei vahvaa kantaa | Osittain samaa mieltä | Täysin samaa mieltä |
| 0,00 % | 33,33 % | 22,22 % | 11,11 % | 11,11 % | 22,22 % |

Kolmannessa väittämässä selvitettiin vastaajien näkemystä energianvarastoinnista tällä hetkellä. Esitetty väittämä oli: “Koemme energiavarastoinnille olevan tarvetta jo tällä hetkellä.”. Vastausten keskiarvo oli 3,33 ja mediaani 4. 11,11 prosenttia vastaajista ei osannut ottaa kantaa väittämään. (**Taulukko 8**) Vastaajat suhtautuvat siis energianvarastoinnin tarpeeseen tällä hetkellä varovaisen myönteisesti, mikä vaikuttaa olevan jokseenkin linjassa aiemman yritysten energianvarastointisuunnitelmia koskevan kysymyksen kanssa.

Taulukko 8. Tarve energianvarastoinnille tällä hetkellä.

| Koemme energiavarastoinnille olevan tarvetta jo tällä hetkellä. | | | | | |
|---|-------------------|---------------------|------------------|-----------------------|---------------------|
| En osaa sanoa | Täysin eri mieltä | Osittain eri mieltä | Ei vahvaa kantaa | Osittain samaa mieltä | Täysin samaa mieltä |
| 11,11 % | 0,00 % | 11,11 % | 11,11 % | 55,56 % | 11,11 % |

7.3.2 Energianvarastoinnin potentiaali uusiutuvalla energialle

Tasevastaajien yleisten energianvarastointiin liittyvien näkemysten kartoittamiseksi heiltä kysyttiin myös mielipidettä siitä, millaiseksi he kokevat energianvarastoinnin tarpeen eri uusiutuvien energioiden osalta. Vastaajia pyydettiin arvioimaan varastointipotentiaalia asteikolla 1 – 5 ja annetut vaihtoehdot olivat aurinko-, tuuli- ja vesivoima, sekä bioenergia. Tuulivoima osoittautui annetuista vaihtoehdoista keskeisimmäksi energiantuotantomuodoksi energianvarastoinnin kannalta. Lähes kaikki vastaajat arvioivat, että tuulivoimalla olevan erittäin paljon potentiaalia energianvarastoinnissa. Vastausten keskiarvo oli 4,89 ja mediaani 5. Mielipide

oli siis lähestulkoon yksimielinen ja jo tutkimuksen valmisteluvaiheessa ennakoitu, johtuen tuulivoimatuotannon vaihtelevasta luonteesta.

Vähiten energianvarastointipotentialia vastajat arvioivat olevan vesivoimalla, joskin vastaukset vaihtelivat laajalti vaihtoehtojen “erittäin vähän potentiaalia” ja “melko paljon potentiaalia” välillä. Kysymyksen vastausten numeroarvoinen keskiarvo oli 1,89 ja mediaani 1. 11,11 prosenttia vastaajista ei osannut antaa omaa näkemystään. Vesivoimaan liittyvien vastausten vaihtelevuutta voidaan pitää mielenkiintoisena ja on mahdollista, että syynä erimielisyyden taustalla on mahdollisesti osin vesivoiman luonne ja tätä kautta tulkintaerot. Vesivoima itsessään on hyvin joustava energiantuotantotapa ja sitä käytetäänkin myös säätövoimana, eli ajatus erillisestä vesivoiman varastoinnista voi näyttäytyä tarpeettomana. Toisaalta, jos vastaaja on tulkinnassaan ottanut mukaan myös pumppuvoimalaitokset ja ajatus siirtyy vesivoimasta yleisemmälle tasolle veden energian varastointiin ja käyttämiseen, potentiaalinen arvioiminen korkeammaksi on mahdollisesti tuntunut mielekkäämmältä. Muihin uusiutuviin energiantuotantomuotoihin verrattuna vesivoima sai kuitenkin vähiten kannatusta.

Vesi- ja tuulivoiman väliin jäivät aurinkovoima ja bioenergia. Aurinkovoimalla nähtiin myös olevan tarvetta, eikä se jää kovin kauas tuulivoiman positiivisista arvioista. Vastausten keskiarvo ja mediaani olivat molemmat tasan neljä (4). Tuulivoiman tavoin aurinkovoimatuotanto on vaihtelevaa ja sääolot ovat ihmisen vaikutusten ulottumattomissa, mikä lisää riskiä tuotantoennusteiden alittumiselle ja ylittymiselle. Bioenergialle nähtiin myös jonkin verran tarvetta energianvarastoinnissa, joskin hieman varovaisemmin kuin tuuli- ja aurinkovoimalle. Yksikään vastaajista ei arvioinut tarvetta olevan erittäin vähän tai erittäin paljon. Vastausten keskiarvo oli 3,11 ja mediaani 3.

7.3.3 Arvio omasta energiavarastointitarpeesta vuonna 2025

Pohjustavan energianvarastointikartoituksen lisäksi tasevastaavilta pyydettiin antamaan arvio omasta energianvarastointitarpeestaan vuonna 2025, tulevaisuuden kehityksen arvioimisen mahdollistamiseksi. Kysymykset jaettiin jälleen koskemaan

erikseen sähkö- ja lämpövarastoja, sekä tehoa ja energiamääriä kummallekin energianvarastointimuodolle.

Taulukko 9. Sähkövarastojen arvioitu tarvemuutos vuoteen 2025 mennessä.

| Sähkövaraston teho (MW) | | |
|-----------------------------|---------|---------|
| | 2020 | 2025 |
| En osaa sanoa. | 88,89 % | 22,22 % |
| < 500 | 11,11 % | 66,67 % |
| 500 – 1 000 | 0,00 % | 11,11 % |
| > 1 000 | 0,00 % | 0,00 % |
| Sähkövaraston energia (GWh) | | |
| | 2020 | 2025 |
| En osaa sanoa. | 88,89 % | 22,22 % |
| < 1 | 11,11 % | 44,44 % |
| 1 – 10 | 0,00 % | 33,33 % |
| > 10 | 0,00 % | 0,00 % |

Arvioitu suunta vastaajien kesken sähkövarastojen osalta on positiivinen. Kun vastaajilta kysyttiin tällä hetkellä suunnitteilla olevien ja jo käytössä olevien sähkövarastojen mitoitusta, vastaajista 88,89 prosenttia ei osannut antaa vastausta. Vuoden 2025 tilannetta kysyttäessä tämä luku tippui 22,22 prosenttiin. 66,67 prosenttia vastaajista arvioi sähkövaraston tehon tarpeen olevan vuonna 2025 alle 500 MW ja 11,11 prosenttia 500 – 1 000 MW. Sähkövaraston energian tarvetta arvioitaessa 44,44 prosenttia arvioi tarpeen olevan alle 1 GWh ja 33,33 prosenttia 1 – 10 GWh. **(Taulukko 9)**

Kun tarkastellaan tarvetta investoida lämpövarastoihin yritysten lukumäärän kautta, muutos oli vähäisempää. Pohjustustiedoissa mahdollisen lämpövaraston mitoitustarvetta kysyttäessä vastausta ei osannut antaa 66,67 prosenttia vastaajista, kun vuoden 2025 tilanteeseen ei osannut vastata 55,56 prosenttia vastaajista. Lämpövaraston tehoa kysyttäessä vuodelle 2025, erona oli 11,11 prosentin kasvu 100 – 500 MW:n lämpövaraston tarpeelle. Energiamääriä tarkastellessa 1 – 10 GWh:n lämpövarastojen osuus laskee 11,11 prosentilla vastaajista, mutta vastaavasti 22,22 prosenttia vastanneista arvioi lämpövaraston energiantarpeen olevan vuonna 2025 yli 10 GWh. **(Taulukko 10)** Lämpövarastojen mitoituslukuja tarkastellessa voidaan

esittää, että vastanneista yrityksistä moni ei aio investoida ensimmäisiin lämpövarastoihinsa lähiaikoina, mutta niitä jo hyödyntävät yritykset aikovat kasvattaa niiden kapasiteettia.

Taulukko 10. Lämpövarastojen arvioitu tarve muutos vuoteen 2025 mennessä.

| Lämpövaraston teho (MW) | | |
|-----------------------------|---------|---------|
| | 2020 | 2025 |
| En osaa sanoa. | 66,67 % | 55,56 % |
| < 100 MW | 11,11 % | 11,11 % |
| 100 – 500 MW | 22,22 % | 33,33 % |
| > 500 MW | 0,00 % | 0,00 % |
| Lämpövaraston energia (GWh) | | |
| | 2020 | 2025 |
| En osaa sanoa. | 66,67 % | 55,56 % |
| < 1 | 11,11 % | 11,11 % |
| 1 – 10 | 22,22 % | 11,11 % |
| > 10 | 0,00 % | 22,22 % |

7.3.4 Potentiaalisimmat energianvarastointitekniologiat

Potentiaalisimpia energianvarastointitekniologioita arvioitaessa tasevastaavia pyydettiin valitsemaan neljä (4) oman yrityksen toiminnan kannalta soveltuvinta tekniologiaa. Taulukossa 11 tekniologiat ovat esitettynä niiden houkuttelevuuden mukaan laskevassa järjestyksessä ja ne on numeroitu houkuttelevuussijoituksen mukaan. Koska osa tekniologioista sai samansuuruisen kannatuksen, osa järjestykselluista on jaettu useamman tekniologian kesken.

Suosituimmat kolme sijaa muodostuvat viidestä eri tekniologiasta. Ainoana yli 50 prosenttia äänistä saaneena tekniologiana on vedyn varastointi. Jaetulla toisella sijalla ovat pumppuvoimalaitos, lämpövarasto ja litiumioniakut 44,44 prosentin kannatuksella ja kolmanneksi sijoittuivat virtausakut 33,33 prosentin kannatuksella.

Taulukko 11. Houkuttelevimmat energianvarastointiteknologiat.

| Houkuttelevimmat energianvarastointiteknologiat | | |
|---|----------------------|---------|
| 1 | Vedyn varastointi | 55,56 % |
| 2 | Pumppuvoimalaitos | 44,44 % |
| | Lämpövarasto | 44,44 % |
| | Litiumioniakut | 44,44 % |
| 3 | Virtausakut | 33,33 % |
| 4 | Paineilmavarastointi | 22,22 % |
| 5 | Maakaasu | 11,11 % |
| | SMES | 11,11 % |
| 6 | Vauhtipyörä | 0,00 % |
| | Superkondensaattori | 0,00 % |

Muut energianvarastointiteknologiat saivat alhaisemman kannatuksen. Paineilma-
varastointia kannatti 22,22 prosenttia vastaajista, maakaasua ja suprajohtavaa mag-
neettista energiavarastointia 11,11 prosenttia vastaajista. Yksikään yritys ei pitänyt
vauhtipyörää tai superkondensaattoria yhtenä houkuttelevimmista vaihtoehtoista
omalle toiminnalleen neljästä mahdollisesta valinnasta. Superkondensaattoreiden
sijoittumista viimeiseksi voidaan pitää hieman yllättävänä ilman yhtään kannatta-
jaa, koska niiden voidaan ajatella olevan välimuoto tavallisten kondensaattoreiden
ja akkujen välillä. Näin ollen ne voisivat toimia esimerkiksi sähköntuotannon taa-
juudenhallinnassa.

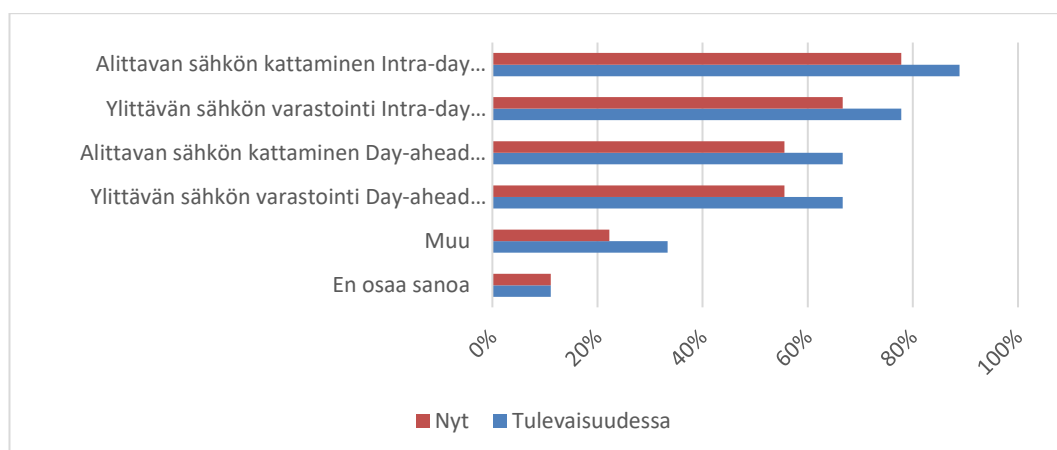
7.4 Näkemykset sähkö- ja kapasiteettimarkkinoista

Kyselyn viimeisessä osiossa kartoitettiin yritysten näkemyksiä energianvarastoin-
nin potentiaalista sähkö- ja kapasiteettimarkkinoilla yleisesti, sekä niihin kuuluvilla
yksittäisillä markkinoilla. Tämän lisäksi pyrittiin kartoittamaan yritysten todennä-
köisimpiä sähkövaraston käyttötarkoituksia. Koska tämä osio keskittyy sähkö- ja
kapasiteettimarkkinoihin, sivuutamme lämpövarastojen tarkastelun.

7.4.1 Sähkövaraston käyttötarkoitukset nyt ja tulevaisuudessa

Yrityksiltä kysyttiin sähkömarkkinoihin painottuen, mitkä olisivat todennäköisim-
mät sähkövarastojen käyttötarkoitukset tasepalveluiden tuottamisessa. Kysymys
esitettiin avoimena monivalintakysymyksenä, jossa oli mahdollista valita yksi, tai

halutessaan kaikki vastausvaihtoehdot. Lisäksi kysymys esitettiin erikseen koskien nykyhetkeä ja tulevaisuutta vertailun mahdollistamiseksi. Tulevaisuuden osalta kysymyksessä luotiin oletus siitä, että teknologiat tulevat kehittymään ja niiden kannattavuus paranee.



Kuva 20. Todennäköisimmät sähkövaraston käyttötarkoitukset.

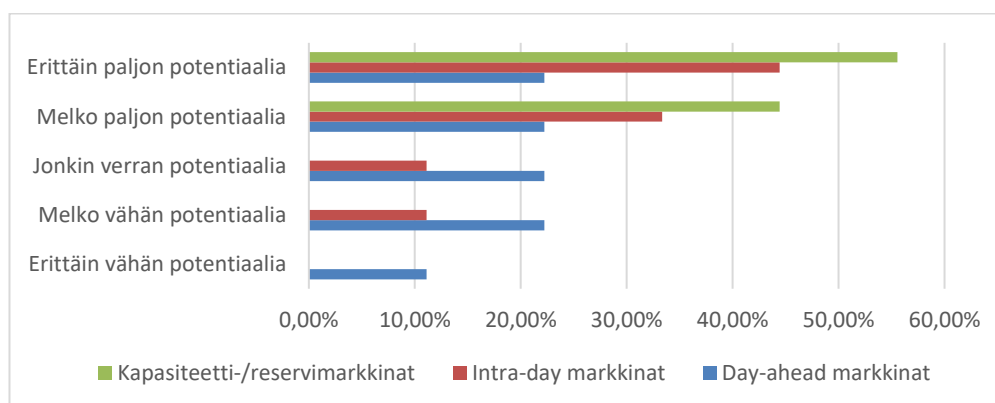
Kuva 20 auttaa luomaan yleiskuvan annetuista vastauksista. Huomattavaa on, että yli 50 prosenttia vastaajista valitsi jokaisen vaihtoehdon lukuun ottamatta vastausvaihtoehtoa ”Muu”. Yleisesti ottaen sähkövarastojen hyödyntäminen intra-day-markkinoilla sai osakseen enemmän kiinnostusta verrattuna day-ahead-markkinoihin. Tämän lisäksi todennäköisemmäksi käyttökohteeksi vastaajat mieltävät tuotantoennusteen alittavan sähkön kattamisen, mutta kuitenkin melko pienellä marginaalilla. Kun verrataan vastauksia sähkövarastojen käyttökohteista nykyhetken ja tulevaisuuden välillä, voidaan jokaisessa vastausvaihtoehdossa nähdä 11,11 prosentin kasvu. Tämä antaa hieman lisää varmuutta aiemmille, kappaleessa 7.2.2, esitetyille arvioille siitä, että tilannetta energianvarastojen investointien kannattavuudesta pidetään yrityksissä silmällä.

Nykyhetkelle 22,22 prosenttia ja tulevaisuudelle 33,33 prosenttia vastaajista antoivat vastauksen ”Muu” ja tarkensivat vastaustaan. Kaikki näistä olivat lisämainintoja

kapasiteetti- ja reservimarkkinoista. 11,11 prosenttia vastaajista ei osannut antaa näkemystään nykyhetkestä tai tulevaisuudesta.

7.4.2 Sähkövarastojen potentiaali sähkömarkkinoilla

Seuraavassa kysymyksessä tarkennettiin tasevastaajien näkemyksiä siitä, kuinka paljon he yleisesti ottaen näkevät sähkönvarastoinnilla potentiaalia sähkömarkkinoilla. Vastausvaihtoehdot annettiin asteikolla 1 – 5. Kysymykseen otettiin mukaan myös kapasiteetti- ja reservimarkkinat yhtenä kokonaisuutena, jotta voisimme tehdä vertailua sähkö- ja kapasiteettimarkkinoiden välillä.

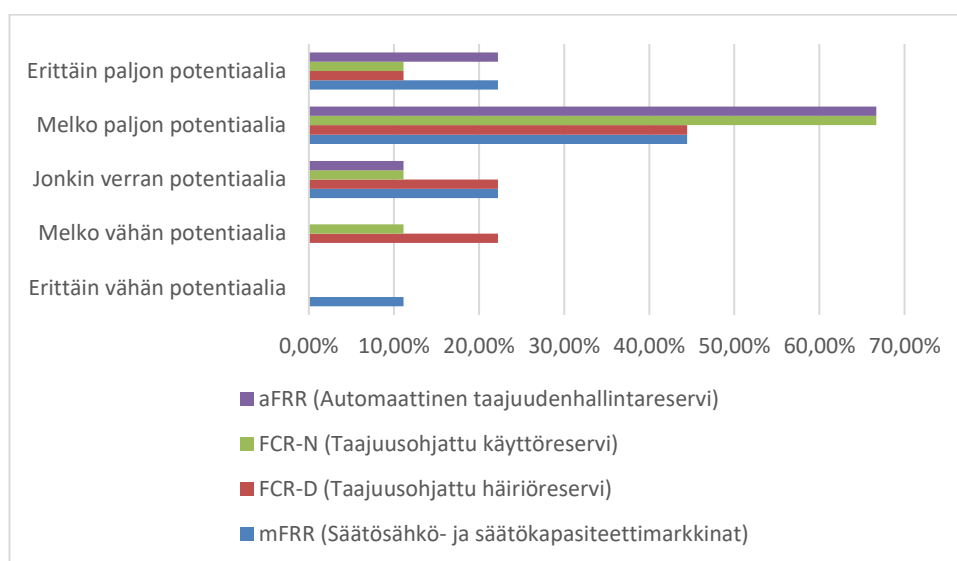


Kuva 21. Sähkönvarastoinnin potentiaali sähkömarkkinoilla.

Day-ahead-markkinoiden osalta vastaukset jakautuivat hyvin tasaisesti läpi asteikon (**Kuva 21**). Sille nähtiin sekä erittäin vähän potentiaalia, että erittäin paljon potentiaalia vastaajan mukaan. Vastausten keskiarvo day-ahead-markkinoille oli 3,22 ja mediaani 3. Yleisesti ottaen day-ahead-markkinat saivat vähemmän kannatusta kuin intra-day- ja kapasiteettimarkkinat. Intra-day-markkinoilla potentiaalia nähdään sähkönvarastoinnin kannalta enemmän. Vastausten keskiarvo oli 4,11 ja mediaani 4. Kysymyksessä selkeästi parhaiten menestyivät kapasiteetti- ja reservimarkkinat. Kaikki vastaajat arvioivat sähkönvarastoinnilla olevan näillä markkinoilla potentiaalia olevan joko melko tai erittäin paljon. Vastausten keskiarvo oli 4,56 ja mediaani 5.

7.4.3 Sähkönvarastojen potentiaali kapasiteettimarkkinoilla.

Viimeisenä kysymyskokonaisuutena vastaajia pyydettiin arvioimaan tarkemmin neljän eri kapasiteetti- ja reservimarkkinan soveltuvuutta sähkönvarastoinnin kannalta. Tuloksia tarkasteltaessa näkemykset sähkönvarastoinnin soveltuvuudesta näille markkinoille ovat yleisesti ottaen positiiviset. (Kuva 22) Vastausten mediaani kaikille markkinoille on neljä (4).



Kuva 22. Sähkönvarastoinnin potentiaali kapasiteettimarkkinoilla.

11,11 prosenttia vastaajista näki sähkönvarastoinnilla mFRR-markkinoilla olevan erittäin vähän potentiaalia. Melko vähän potentiaalia FCR-D-markkinoille koki 22,22 prosenttia ja FCR-N-markkinoille 11,11 prosenttia vastaajista. Taulukossa 12 on esitetty kaikkien kapasiteetti- ja reservimarkkinoiden keskiarvot. Annettujen vastausten perusteella edukseen lievästi erottuivat aFRR-markkinat muiden sijoituksessa hyvin lähelle toisiaan vastausten keskiarvoja tarkasteltaessa.

Taulukko 12. Kapasiteetti- ja reservimarkkinoiden keskiarvot ja mediaanit.

| | FCR-D | mFRR | FCR-N | aFRR |
|-----------|-------|------|-------|------|
| keskiarvo | 3,44 | 3,67 | 3,78 | 4,11 |
| mediaani | 4 | 4 | 4 | 4 |

8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Tämän tutkimuksen tutkimusongelmana oli selvittää Suomessa toimivien energiatasevastaavien kantoja energianvarastoinnin tulevaisuudesta erityisesti taloudellisesta näkökulmasta. Tästä tutkimusongelmasta muodostettiin kolme tutkimuskysymystä, jotka olivat seuraavat:

1. Millaisia tarpeita ja mahdollisuuksia energiatasevastaavat näkevät energianvarastoinnissa sähkömarkkinoilla (Nord Pool: Elspot/Elbas)?
2. Millaisia tarpeita ja mahdollisuuksia energiatasevastaavat näkevät energianvarastoinnissa kapasiteettimarkkinoilla (Fingrid)?
3. Mitkä energianvarastointiteknologiat vaikuttavat houkuttelevimmilta energiatasevastaavien näkökulmasta?

Nämä tutkimuskysymykset toimivat tutkimuksen rajaamisessa ja niiden avulla tutkimukselle pystyttiin asettamaan selkeät tavoitteet.

8.1 Johtopäätökset

8.1.1 Vastaukset tutkimuskysymyksiin

Toteutetun kyselyn alhaisesta vastaajamäärästä huolimatta voidaan arvioida sen antavan karkeaa suuntaa tutkimuksen perustana oleviin tutkimuskysymyksiin. Perusteluna tälle pidän tutkimuksen teoriapohjan ja annettujen vastausten keskinäistä heijastelevuutta, eli tasevastaajien vastaukset olivat hyvin linjassa kerätyn teoria-aineiston kanssa.

Tutkimuksesta selvisi, että verrattaessa energianvarastoinnin potentiaalia sähkö- ja kapasiteettimarkkinoiden välillä, kapasiteettimarkkinoilla potentiaalin nähdään olevan yleisesti ottaen korkeampi. Tilannetta tarkasteltaessa sähkömarkkinoiden sisällä, päivän sisäiset markkinat, eli intra-day-markkinat saivat osakseen enemmän kannatusta kuin päivämarkkinat (day-ahead-markkinat). Energianvarastoinnin roolin sähkömarkkinoilla nähdään olevan siis lyhytaikaisessa tuotantoennusteiden korjaamisessa.

Todellinen potentiaali energianvarastoinnilla nähdään kuitenkin kapasiteettimarkkinoilla, mikä näkyy myös selkeästi kappaleen 7.4.2 kuvasta 20. Kapasiteetti- ja reservimarkkinoiden sisällä potentiaalia arvioitaessa kaikki joukkoon kuuluvat markkinat saivat keskiarvon ja mediaanin kautta tarkasteltuna hyvin samankaltaiset arvot ja ottaen huomioon kyselyn alhaisen vastausmäärän, tarkempien johtopäätösten tekeminen on mahdollisesti huolimaton. Yleisesti ottaen vastaajien näkemykset sähkö- ja kapasiteettimarkkinoista olivat odotettavissa teoria-aineiston kanssa.

Listattaessa kolme suosituinta teknologiaa, voitiin jaettuina sijoja käyttämällä muodostaa lista, johon kuului yhteensä viisi teknologiaa. Nämä viisi suosituinta teknologiaa olivat vedyn varastointi, pumppuvoimalaitos, lämpövarasto, litiumakut ja virtausakut. Houkuttelevimmat energianvarastointiteknologiat eivät sisältäneet suuria yllätyksiä, verrattaessa tutkimusta varten kerättyyn aineistoon, lukuun ottamatta vedyn varastoinnin sijoittumista suosituimmaksi vaihtoehdoksi.

8.1.2 Energianvarastoinnin tulevaisuus Suomessa

Tutkimuksessa selvisi, että energianvarastoinnille löytyy kiinnostusta tasevastaavien keskuudessa ja että tilannetta pidetään yrityksissä silmällä taloudellisen kannattavuuden näkökulmasta. Tutkimuksessa saadut vastaukset koskien energianvarastoinnin nykyhetken ja tulevaisuuden tilannetta yrityksissä, vastaukset olivat positiivisempia koskien tulevaisuutta, kun kysymyksenasetteluun otettiin mukaan ajatus teknologioiden kehittämisestä. Tämän perusteella uskon, että energianvarastoinnin kapasiteetin kasvu Suomessa tulee olemaan hyvin pitkälti kiinni teknologioiden kehittämisestä ja niiden kannattavuuden parantumisesta.

8.2 Suositukset tutkimuksen pohjalta

Nojautuen tasevastaavien näkemyksiin sähkönvarastoinnista sähkö- ja kapasiteettimarkkinoilla, on syytä painottaa huomiota sähkönvarastoinnin rooliin kapasiteettimarkkinoilla ja lyhytaikaisten tuotantoarvioiden korjaamisessa. Teknologioiden osalta vastaajia pyydettiin antamaan neljä heidän oman toimintansa kannalta sovel-

tuvinta vaihtoehtoa ja näiden vastausten pohjalta on syytä kiinnittää huomiota vedyn varastointiin, pumppuvoimalaitoksiin, lämpövarastoihin ja akkuteknologioihin.

Yleisesti katsoen tutkimuksen teoria-aineiston ja kerättyjen kyselyvastausten perusteella energianvarastoinnin tarve tulevaisuudessa tulee kasvamaan ja tämä on syytä ottaa huomioon myös opetusta suunniteltaessa. Etenkin energiatekniikan opiskelijoilla tulisi olla käsitys energianvarastoinnista. Sivuhuomautuksena mainitsen, että itse energiatekniikan opiskelijana koen, että myös sähkö- ja kapasiteettimarkkinoiden laajemmalla käsittelyllä opinnoissa olisi myös mahdollisesti hyötyä työelämässä valmistumisen jälkeen.

Tutkimus oli luonteeltaan kvantitatiivinen, eli eri vastausten taustalla olevia syitä ei selvitetty tarkasti. Tämän pohjalta suosittelen, että mikäli yritysten energianvarastointiin investoimista halutaan kehittää, mahdollisten investointeja rajoittavien syiden selvittäminen esimerkiksi haastatteluiden kautta voisi olla aihe insinööriyölle.

8.3 Tutkimuksen onnistumisen arviointi

8.3.1 Teoriaosuuden onnistuminen

Tutkimuksessa koen onnistuneeksi erityisesti teoriaosuuden. Siinä luotiin pohja työn aihepiirien ymmärtämiselle edeten laajemmista kokonaisuuksista, kuten ilmastomuutoksesta ja uusiutuvasta energiasta, kohti työn kannalta merkityksellisempiä aiheita. Näin ollen tutkimuksen merkitys tulee selväksi myös henkilöille, jotka eivät välttämättä ole perehtyneet aiheeseen. Koen myös, että teoriaosan rajaaminen oli melko onnistunut. Suurimmat haasteet rajaamisessa ilmenivät ilmastopolitiikan käsittelyn laajuudessa ja energianvarastointiteknologioita käsiteltäessä. Ilmastoiheeseen liittyvää tietoa saatavilla valtavasti, joten rajaaminen tuntui haasteelliselta. Teknologioiden kohdalla ongelmana oli päättää, kuinka tasapainottaa tekstin sen ymmärrettävyyden ja teknisten yksityiskohtien välillä. Kustakin teknologiasta on saatavilla paljon tarkkaa tietoa, mikä tulevan insinöörin näkökulmasta vaikuttaa tärkeältä, mutta toisaalta syvällisempi tekninen käsittely ei olisi ollut tämän työn toteuttamisen kannalta tarkoituksenmukaista.

8.3.2 Tutkimuksen validiteetti ja reliabiliteetti

Tutkimuksen onnistumista arvioitaessa on pohdittava sen validiteettia ja reliabiliteettia. Validiteetilla tässä yhteydessä tarkoitetaan tutkimuksen toteuttamisen ja tulosten pätevyyden arviointia ja reliabiliteetilla tulosten luotettavuuden arviointia. Tutkimusmenetelmän validiteettia arvioitaessa keskitytään pohtimaan tutkimuksen toteuttamisen validiteettia itsessään ilman, että mukaan otetaan tulosten validiteetin arviointia. Tämä toteutetaan omana arviointinaan. Validi tutkimusmenetelmä ei siis automaattisesti johda valideihin tuloksiin. /42/

Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää tasevastaavien yleisiä näkemyksiä energianvarastoinnin potentiaalista sähkö- ja kapasiteettimarkkinoilla sekä selvittää, mitkä ovat kiinnostavimmat teknologiat energianvarastoinnin toteuttamiselle. Tutkimusta suunniteltaessa empiria päädyttiin toteuttamaan käyttäen suoraan tasevastaaviin kohdistuvaa kyselytutkimusta. Koska tarkoituksena ei ollut perehtyä syvemmin syihin, jotka mahdollisten vastausten takana vaikuttavat, kvantitatiivinen lähestymistapa on perusteltu. Ottaen tutkimuksen tutkimusongelman ja siitä johdetut tutkimuskysymykset, tutkimusmenetelmän validiteetti esitettyjen kysymysten ja kohderyhmän osalta on sinänsä hyvä, muttei täydellinen.

Ulkoista validiteettia tarkasteltaessa on mietittävä, kuinka hyvin tutkimuksen tulokset ovat yleistettävissä perusjoukkoon /42/. Tämän tutkimuksen osalta ulkoisen validiteetin kannalta ongelmalliseksi nousevat alhainen vastaajamäärä ja niin sanottu itsevalikoitunut näyte. Voidaan siis kysyä, ovatko kyselyyn vastanneet yritykset erityisesti kiinnostuneita energianvarastoinnista ja onko osa yrityksistä jättänyt vastaamatta kyselyyn johtuen vähäisestä kiinnostuksesta energianvarastointiin? Tätä ei voida tietää varmasti, mutta se on yksi asioista, jotka tulee huomioida tutkimuksen tuloksia arvioitaessa. Myös tasevastaavien keskinäinen eriävyys vaikeuttaa tulosten yleistämistä koskemaan suurempaa joukkoa.

Vastauksista ei voida siis tehdä tarkkoja johtopäätöksiä siltä osin, kun arvioidaan tasevastaavien suunnitelmia investoida energiavarastoihin. Toisaalta näkemykset energianvarastoinnin potentiaalista sähkö- ja kapasiteettimarkkinoilla, sekä houkuttelevimmat teknologiat korreloivat teoria-aineiston kanssa.

LÄHTEET

- /1/ The Paris Agreement. Yhdistyneet kansakunnat. 2015. Viitattu 4.1.2020. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>.
- /2/ Steering wind power in a new direction: Stanford study shows how to improve production at wind farms. Stanford University News. 2019. Viitattu: 4.1.2020. <https://news.stanford.edu/2019/07/01/steering-wind-power-new-direction/>
- /3/ Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030. IRENA. 2017. Viitattu: 5.1.2020. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017.pdf.
- /4/ Ilmastonmuutoksen torjuminen. Euroopan parlamentti. 2020. Viitattu: 5.1.2020. <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/fi/sheet/72/ilmastonmuutoksen-torjuminen>.
- /5/ Energian loppukäyttö. Tilastokeskus. 2018. Viitattu 10.1.2020. https://www.stat.fi/meta/kas/energian_loppuk.html.
- /6/ L 328/82. Direktiivi uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä. Euroopan Unioni. 2018. Viitattu: 6.1.2020. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/HTML/?uri=CELEX:32018L2001&from=EN>.
- /7/ Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja. 2017. Viitattu: 8.1.2020. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/79189/TEMjul_4_2017_verkkojulkaisu.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- /8/ Share of renewable energy in the EU up to 17.5% in 2017. Eurostat. 2019. Viitattu: 8.1.2020. <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/2995521/9571695/8-12022019-AP-EN.pdf/b7d237c1-ccea-4adc-a0ba-45e13602b428>.
- /9/ Uusiutuvien energioiden käyttö 1970 – 2018. Tilastokeskus. 2019. Viitattu: 10.1.2020. https://www.stat.fi/til/ehk/2018/ehk_2018_2019-12-12_kuv_004_fi.html.
- /10/ Metsävarat. Luonnonvarakeskus. 2019. Viitattu: 10.1.2020. <https://stat.luke.fi/metsavarat>.
- /11/ Uusi laskelma: Suomessa suunnitellaan jopa 18 miljoonaa kuutiota enemmän metsien hakkuita kuin EU sallii. YLE. 2019. Viitattu: 10.1.2020. <https://yle.fi/uutiset/3-10772407>.
- /12/ Maankäyttösektorin sisällyttäminen EU:n ilmastotavoitteisiin. Maa- ja metsätalousministeriö. 2019. Viitattu:10.1.2020. <https://mmm.fi/lulucf>.

- /13/ Luonnonvarakeskuksen korjattu laskelma: Hiilinielua kasvatettava 10 prosenttia aiempaan arvioon verrattuna. YLE. 2019. Viitattu: 10.1.2020. <https://yle.fi/uutiset/3-10818133>.
- /14/ Wind Energy in Europe in 2019. Wind Europe. 2020. Viitattu: 27.4.2020. <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Statistics-2019.pdf>.
- /15/ Uusiutuvien energioiden tilastoja. Eurostat. 2019. Viitattu: 13.1.2020. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Renewable_energy_statistics#Wind_power_becomes_the_most_important_renewable_source_of_electricity.
- /16/ Energian kokonaiskulutus 2017 – 2018. Tilastokeskus. 2019. Viitattu: 13.1.2020. http://www.stat.fi/til/ehk/2018/ehk_2018_2019-12-12_tie_001_fi.html.
- /17/ Tuulivoima Suomessa 2018. Suomen tuulivoimayhdistys ry. 2019. Viitattu: 11.1.2020. https://www.tuulivoimayhdistys.fi/filebank/1316-STY_-_Vuosiraportti_2018_Public.pdf.
- /18/ L 30.12.2010/1396. Laki uusiutuville energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta. 2010. Viitattu 11.1.2020. <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2010/20101396>.
- /19/ Tuet Suomessa. Suomen tuulivoimayhdistys ry. 2019. Viitattu: 11.1.2020. <https://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta/taloudellisuus/uusiutuvan-energian-tukeminen/tuet-suomessa>.
- /20/ Solar and Wind Power So Cheap They're Outgrowing Subsidies. Bloomberg. 2019. Viitattu: 13.1.2020. <https://www.bloomberg.com/news/features/2019-09-19/solar-and-wind-power-so-cheap-they-re-outgrowing-subsidies>.
- /21/ PPA: pitkäaikaiset sähkönostosopimukset. Suomen tuulivoimayhdistys ry. 2019. Viitattu: 27.4.2020. <https://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/ppa-pitkaaikaiset-sahkonostosopimukset>.
- /22/ Tuulivoiman tuotanto. Fingridin tilasto. 2019. Viitattu: 5.1.2020. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/sahkomarkkinainformaatio/tuulivoiman-tuotanto/>.
- /23/ Energy Storage Technology Development Roadmap. EERA. 2017. Viitattu: 20.1.2020. https://www.eera-set.eu/wp-content/uploads/2017.01.16_Update-of-the-EASE-EERA-ES-Technology-Development-Roadmap_for-public-consultation.pdf.
- /24/ Electrical Energy Storage. IEC. 2019. Viitattu: 21.1.2020. <https://www.iec.ch/whitepaper/pdf/iecWP-energystorage-LR-en.pdf>.

/25/ Pumped Hydro Storage. EASE. 2016. Viitattu: 22.1.2020. http://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2016/07/EASE_TD_Mechanical_PHS.pdf.

/26/ Fact Sheet: Energy Storage. EESI. 2019. Viitattu: 22.1.2020. <https://www.eesi.org/papers/view/energy-storage-2019>.

/27/ Power System. Northwestern University. 2019. Viitattu 26.1.2020. <http://www.qrg.northwestern.edu/projects/vss/docs/power/2-how-do-batteries-work.html>.

/28/ Akut. Motiva. 2019. Viitattu: 26.1.2020. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava-liikenne-ja-liikkuminen/nain-liikut-viisaasti/valitse-auto-viisaasti/ajoneuvotekniikka/akut>.

/29/ Leading the Charge: As Battery Storage Sweeps the World, GE Finds Its Place in the Sun. GE Reports. 2018. Viitattu: 27.1.2020. <https://www.ge.com/reports/leading-charge-battery-storage-sweeps-world-ge-finding-place-sun/>.

/30/ Atria ottaa käyttöön yhden megawattitunnin akuston aurinkosähkön varastointiin. YLE. 2019. Viitattu: 27.1.2020. <https://yle.fi/uutiset/3-11050523>.

/31/ Sähköauton akku on epäekologinen ja siksi nyt on kehitteillä ilmastoystävällisempi vaihtoehto. YLE. 2019. Viitattu: 27.1.2020. <https://yle.fi/uutiset/3-10853858>.

/32/ An improved high-performance lithium–air battery. Nature Chemistry. 2012. Viitattu: 27.1.2020. <http://hanyangelec.cafe24.com/pdf/07.pdf>.

/33/ China’s biggest flow battery project so far is underway with hundreds more megawatts to come. Energy Storage News. 2018. Viitattu: 28.1.2020. <https://www.energy-storage.news/news/chinas-biggest-flow-battery-project-so-far-is-underway-with-hundreds-more-m>.

/34/ Virtausakku voi ratkaista uusiutuvan energian varastoinnin. ETN. 2018. Viitattu: 28.1.2020. <https://etn.fi/index.php/13-news/8304-virtausakku-voi-ratkaista-uusiutuvan-energian-varastoinnin>.

/35/ Liquid Hydrogen Outline. IdealHy. 2019. Viitattu: 29.1.2020. https://www.idealhy.eu/index.php?page=lh2_outline.

/36/ Sähkön johdannaismarkkinat. Fingridin verkkosivut. 2019. Viitattu: 7.2.2020. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyss/sahkomarkkinoiden-tulevaisuus/johdanto-sahkomarkkinoihin/#sahkon-johdannaismarkkinat>.

/37/ Sähkövarastojen järjestelmätekniset vaatimukset –webinaari. Fingrid. 2020. Viitattu: 7.2.2020. <https://www.youtube.com/watch?v=HVa--HL4AdE>.

/38/ Varttitase. Fingridin verkkosivut. 2019. Viitattu: 11.2.2020.
<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyss/askelmerkit-sahkomarkkinamurrokseen/varttitase/>.

/39/ Pohjoismaisen taseselvityksen käsikirja. eSett. 2018. Viitattu: 11.2.2020.
https://www.esett.com/wp-content/uploads/2019/01/NBS_K%C3%A4sikirja_SUOMI_2.3.pdf.

/40/ Imbalance settlement structures – BRP. eSett. 2020. Viitattu: 11.2.2020.
<https://www.esett.com/structures/structure-lists/brp-list>.

/41/ Fingrid Oyj:n yleiset taseselvityksen ehdot. Fingrid. 2019. Viitattu: 27.4.2020.
<https://www.epressi.com/media/userfiles/107305/1524820909/fingrid-oyjn-yleiset-taseselvityksen-ehdot.pdf>.

/42/ Validiteetti ja reliabiliteetti. Jyväskylän yliopisto. 2009. Viitattu: 27.4.2020.
http://www.mit.jyu.fi/ope/kurssit/Graduryhma/PDFt/validius_ ja_reliabiliteetti.pdf.

LIITE 1

1. Pohustavat tiedot

1.1. Tasevastaavan nimi: _____

1.2. Tuotantokapasiteetti, jolle tarjoatte tasepalveluita:

- < 500 MW
- 500 – 1 000 MW
- > 1 000 MW

Kuinka toteutate ja tarjoatte tasepalveluita?

1.3. Tarjoamme tasepalveluita...

- ...kaikille sähköntuottajille.
- ...pääasiassa yrityksellemme/konsernillemme, mutta tarvittaessa myös muille tahoille.
- ...vain yrityksemme/konsernimme sisällä.

1.4. Tasepalveluissanne hyödynnetyt energiantuotantomuodot:

- Vesi
- Ydinvoima
- Tuuli
- Aurinko
- Hiili
- Bio (kaasu, turve, puupohjaiset)
- Muu, mikä?

Energianvarastoinnin nykytila yrityksessänne

1.5. Oletteko keskustelleet yrityksessänne oman energianvarastointikapasiteetin toteuttamisesta?

- Emme ole.
- Kyllä olemme, mutta emme ole vielä toteuttaneet omaa energiavarastoa.
- Olemme jo tehneet päätöksen energiavarastosta, mutta se ei ole vielä käytössä.
- Meillä on jo energiavarastokapasiteettia käytössä.

1.6. Jos teillä on suunnitteilla tai jo käytössä energiavarasto, ilmoittakaa:

1.6.1. Sähkövaraston teho:

- < 500 MW
- 500 – 1 000 MW
- > 1 000 MW
- En osaa sanoa.

1.6.2. Sähkövaraston energia:

- < 1 GWh
- 1 – 10 GWh
- > 10 GWh
- En osaa sanoa.

1.6.3.Lämpövaraston teho:

- < 100 MW
- 100 – 500 MW
- > 500 MW
- En osaa sanoa.

1.6.4.Lämpövaraston energia:

- < 1 GWh
- 1 – 10 GWh
- > 10 GWh
- En osaa sanoa.

2. Näkemyksenne energianvarastoinnista

2.1. Kuinka tasevastaavan roolissa näette energian varastointitarpeen?

2.1.1.Emme näe tarvetta energianvarastoinnille nyt tai tulevaisuudessa.

0 En osaa sanoa; 1 Täysin eri mieltä – 5 Täysin samaa mieltä
0 1 2 3 4 5

2.1.2.Emme näe tarvetta energianvarastoinnille juuri nyt. Uskomme kuitenkin, että tämä tulee olemaan merkittävä kysymys esimerkiksi tuuli- ja aurinkosähkötuotannon lisääntyessä tulevaisuudessa.

0 1 2 3 4 5

2.1.3.Koemme energianvarastoinnille olevan tarvetta jo tällä hetkellä.

0 1 2 3 4 5

2.2. Miten näette energianvarastoinnin tarpeen ja liiketoimintapotentiaalin

tasepalveluiden kannalta seuraaville uusiutuville energiantuotantomuodoille?

| | | | | | | |
|--------------|---|---|---|---|---|---|
| Aurinkosähkö | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Tuulivoima | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Vesivoima | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Bio | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

2.3. Kuinka suureksi arvioitte energiavaraston tarpeen omalta osaltanne vuonna 2025?

2.3.1.Sähkövaraston teho:

- < 500 MW
- 500 – 1 000 MW
- > 1 000 MW
- En osaa sanoa.

2.3.2.Sähkövaraston energia:

- < 1 GWh
- 1 – 10 GWh
- > 10 GWh
- En osaa sanoa.

2.3.3.Lämpövaraston teho:

- < 100 MW
- 100 – 500 MW
- > 500 MW
- En osaa sanoa.

2.3.4.Lämpövaraston energia:

- < 1 GWh
- 1 – 10 GWh
- > 10 GWh
- En osaa sanoa.

2.4. Mitkä energianvarastointitekniologiat vaikuttavat toimintanne kannalta houkuttelevimmilta? (Valitse 4)

- Pumppuvoimalaitos
- Vauhtipyörä
- Paineilmavarastointi
- Litiumakut
- Virtausakut
- Vedyn varastointi
- Maakaasu
- Superkondensaattori
- Suprajohtava magneettinen energiavarasto
- Lämpövarasto
- Muu, mikä?

3. Sähkö- ja kapasiteettimarkkinat

3.1. Mitkä olisivat todennäköisimmät sähkönvarastoinnin käyttötarkoitukset yrityksessänne tällä hetkellä?

- Tuotantoennusteen ylittävän sähkön varastointi day-ahead markkinoilla
- Tuotantoennusteen alittavan sähkön kattaminen day-ahead markkinoilla
- Tuotantoennusteen ylittävän sähkön varastointi intra-day markkinoilla
- Tuotantoennusteen alittavan sähkön kattaminen intra-day markkinoilla
- En osaa sanoa.
- Muu, mikä?

3.2. Mitkä olisivat todennäköisimmät sähkönvarastoinnin käyttötarkoitukset yrityksessänne tulevaisuudessa?

- Tuotantoennusteen ylittävän sähkön varastointi day-ahead markkinoilla
- Tuotantoennusteen alittavan sähkön kattaminen day-ahead markkinoilla
- Tuotantoennusteen ylittävän sähkön varastointi intra-day markkinoilla
- Tuotantoennusteen alittavan sähkön kattaminen intra-day markkinoilla
- En osaa sanoa.
- Muu, mikä?

3.3. Kuinka näette sähkönvarastoinnilla olevan liiketaloudellista potentiaalia seuraavilla sähkömarkkinoilla?

0 En osaa sanoa; 1 Erittäin vähän potentiaalia – 5 Erittäin paljon potentiaalia

| | | | | | | |
|-----------------------|---|---|---|---|---|---|
| Day-ahead | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Intra-day | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Kapasiteettimarkkinat | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

3.4. Miten uskotte sähkönvarastoinnilla olevan liitetaloudellista potentiaalia seuraavilla kapasiteetti-/reservimarkkinoilla?

| | | | | | | |
|-------|---|---|---|---|---|---|
| FCR-D | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| FCR-N | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| aFRR | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| mFRR | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

4. Tutkimuksen tulokset

Kiitämme vastauksestanne tutkimuskyselyyn. Mikäli haluatte tutkimuksen tuloksista tiivistelmän sähköpostiinne, voitte antaa sähköpostiosoitteen, jonne lähetämme tiivistelmän tutkimuksen valmistuttua.

Sähköposti (ei pakollinen): _____