

LUT Scientific and Expertise Publications

Tutkimusraportit – Research Reports

148

Aki Grönman, Eero Inkeri, Mariia Zhaurova, Mika Luoranen, Tero Tynjälä, Teemu Turunen-Saaresti, Christian Breyer, Dmitri Bogdanov, Rasul Satymov, Sirpa Pulkkinen

Etelä-Karjalan energiavarastoinnin tiekartta

Lappeenrannan-Lahden Teknillinen Yliopisto LUT
Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

LUT Scientific and Expertise Publications
Tutkimusraportit – Research Reports 148

Aki Grönman, Eero Inkeri, Mariia Zhaurova, Mika Luoranen, Tero Tynjälä, Teemu Turunen-Saaresti, Christian Breyer, Dmitri Bogdanov, Rasul Satymov, Sirpa Pulkkinen

Etelä-Karjalan energiavarastoinnin tiekartta



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto



**ETELÄ-
KARJALAN
LIITTO**

ISBN 978-952-335-912-3 (PDF)

ISSN-L 2243-3376

ISSN 2243-3376

Lappeenranta 2022

Esipuhe

Tämä tiekartta on tehty osana Uudenmaan liiton rahoittamaa Euroopan aluekehitysrahaston hanketta, Energiavarastot ja lämpöpumput osana tulevaisuuden energiajärjestelmää, 01.06.2019 - 31.12.2022 välisenä aikana. Hanke on toteutettu LUT Yliopiston ja LAB Ammattikorkeakoulun yhteistyönä. Hankkeen ohjausryhmätoimintaan on osallistunut lisäksi sidosryhmien edustajia Lappeenrannan Energia Oy:ltä, Lappeenrannan kaupungilta, Business Finlandilta, Elstor Oy:ltä, TuuliSaimaa Oy:ltä, Suomen Lämpöpumppuyhdistykseltä sekä rahoittajan edustajana Etelä-Karjalan liitolta. Tiekartan keskeisinä tavoitteina on tehdä ajantasainen katsaus eri energiavarastoteknologioiden nykytilasta ja tarpeista sekä ehdottaa lyhyen ja pitkän aikavälin suuntaviivoja erityisesti Etelä-Karjalan alueen alalla toimiville ja sinne tuloa suunnitteleville toimijoille. Tehty analyysi pyrkii huomioimaan sekä energiajärjestelmien nykytilan, että tulevaisuuden ja suositukset, joita on tehty kansallisessa vetytiekartassa sekä kansallisessa akkustrategiassa. Selvityksen aikana on tapahtunut suuria muutoksia sekä maailmanpoliittisessa että energiamarkkinatilanteessa ja kyseisiä vaikutuksia on pyritty ottamaan huomioon tiekarttaa tehdessä.

Aki Grönman

Lappeenrannassa 9.12.2022

Tiivistelmä

Energian tuotannossa ja markkinoilla on käynnissä murros kohti uusiutuvaan energiaan perustuvaa järjestelmää. Tulevaisuuden järjestelmässä kulutus ja tuotanto eivät välttämättä aina kohtaa. Yksi keino tasata näitä eroja on energian varastointi. Globaalisti energiavarastoihin on ennustettu tulevaisuudessa useiden satojen miljoonien eurojen investointeja. Energian varastoinnille on keskeistä, että varastointitarpeita on lukuisia ja yksi teknologia ei pysty vastaamaan kaikkiin tarpeisiin. Koska ala on vielä kehittymässä ja Etelä-Karjalassa on huomattavaa aihepiiriin liittyvää osaamista tarjolla, pyrkii tämä tiekartta löytämään toisaalta potentiaalisimmat panostuksen kohteet ja toisaalta myös ehdottamaan sekä lyhyen että pitkän aikavälin toimenpiteitä, joilla maakunta saa entistä vahvemman aseman alalla.

Tässä tiekartassa esitetään analyysi, jossa tarkastellaan eri energiavarastoteknologioiden julkaisu- ja patenttitrendejä sekä teknologista kypsyyttä. Saadut tulokset kytketään Etelä-Karjalan osaamiseen ja mahdollisuuksiin. Keskeisinä tuloksina havaittiin, että paikallisesta näkökulmasta potentiaalisimpia teknologioita ovat: Power-to-X, adiabaattiset ilmavarastot, lämpövarastot, painovoimaiset energiavarastot, PHES, yli- ja transkriittiset hiilidioksidivarastot, sekä pumped heat.

Tiekartassa annettiin myös kahdeksan lyhyen aikavälin ja kuusi pitkän aikavälin suositusta alueellisiksi toimiksi ja tavoitteiksi. Näihin toimiin kuuluvat muun muassa alan koulutuksen kehittäminen eri asteilla, kansainvälistyminen sekä uusien investointien löytäminen.

Avainsanat: energiavarastot, energiamurros, uusiutuva energia.

Abstract

Energy production and markets are in transition towards a fully renewable system. In future system, the production and demand do not necessarily meet each other every day. One approach to level these differences is to store the energy during over production. In this area, global investments of hundreds of millions of Euros have been predicted in future. A key feature for energy storages is that there are multiple storage needs, and a single technology cannot answer all those needs. The whole area is still evolving and South Karelia has considerable amount of suitable knowledge to offer. Therefore, this road map aims to find the most potential technologies where to put the local efforts and to suggest long and short-term actions that can help the region to have a stronger position in the field.

This report presents an analysis which studies the trends of scientific publications and patents and the technological readiness levels of energy storage technologies. The results of the analysis are further connected to the local knowledge and possibilities. The main findings were that from local point of view the most potential technologies are: Power-to-X, ACAES, heat storages, gravitational energy storages, pumped hydro storages, trans and supercritical CO₂ storages and pumped heat.

The road map also suggested eight short term and six long term actions. These actions include for example development of energy storage related education in different educational levels, internationalization, and finding new investments.

Keywords: energy storages, energy transition, renewable energy.

Sisällysluettelo

Esipuhe

Tiivistelmä

Abstract

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Johdanto | 6 |
| 2 | Globaali tilanne ja markkinaennusteet | 7 |
| 2.1 | Markkinat | 7 |
| 3 | Energiavarastojen teknologiat..... | 8 |
| 3.1 | Teknologioiden luokittelu ja asennettu kapasiteetti..... | 8 |
| 3.2 | Energiavarastojen ominaisuudet | 10 |
| 3.3 | Energiavarastojen käyttökohteet | 12 |
| 3.4 | Teknologioiden kypsyysasteet, kustannukset ja T&K-panostukset globaalisti..... | 12 |
| 3.4.1 | Sähkökemialliset energiavarastot..... | 17 |
| 3.4.2 | Kemialliset energiavarastot | 17 |
| 3.4.3 | Mekaaniset varastot | 19 |
| 3.4.4 | Sähkömagneettiset varastot..... | 23 |
| 3.4.5 | Termiset varastot | 24 |
| 3.5 | Energiavarastojen päästö- ja kestävyystarkastelut..... | 27 |
| 4 | Etelä-Karjalan energiavarastoihin liittyvä yritys- ja T&K-toiminta | 27 |
| 4.1 | Nykytila | 27 |
| 4.2 | SWOT | 28 |
| 5 | Energiavarastopilotit..... | 31 |
| 5.1 | Esimerkkitapaukset | 31 |
| 5.2 | Muita potentiaalisia pilotteja | 33 |
| 6 | Etelä-Karjalan energiajärjestelmä | 33 |
| 7 | Suositukset | 36 |
| 8 | Yhteenveto..... | 37 |
| 9 | Lähdeluettelo | 37 |

1 Johdanto

Energian tuotanto on globaalissa murroksessa. Esimerkiksi Suomessa sähköntuotanto perustuu karkeasti siihen, että vesivoimalla tasataan tuotannon vaihtelut ja mm. ydinvoimalla tuotetaan perusvoimaa. Energiantuotanto on kuitenkin muuttumassa kohti laajempaa aurinkoenergian ja tuulivoiman hyödyntämistä, joiden yhtenä haasteena on epätasainen tuotanto vuorokauden ja vuodenaikojen vaihtuessa. Esimerkiksi Suomessa on arvioitu, että nykyinen energiajärjestelmä voisi kestää ilman suurempia muutoksia noin 16 TWh/a tuulivoimaa [1] ja yhden arvion mukaan on mahdollista, että tämä raja saavutettaisiin jo vuoteen 2025 mennessä [2]. Samanaikainen aurinkosähkön lisääminen myös laskee tätä rajaa hieman. Energiaturroksen aikana on jo tapahtunut se, että esimerkiksi ydinvoimala ei enää aina tuota nimellistehoaan, vaan sitä voidaan myös hyödyntää säädössä. Toisaalta vuoden 2022 aikana alkanut energiakriisi on vaikuttanut osaltaan siihen, että esimerkiksi sähkön hinta on noussut merkittävästi ja erilaisten investointien kannattavuuteen on tullut ennakoimattomia muutoksia.

Energian tuotannon voimakas vaihtelu ja ajoittain haastavakin ennustettavuus luovat tulevaisuudessa uusia haasteita, mutta ne voivat myös avata uusia liiketoimintamahdollisuuksia sekä nykyisille että uusille teknologioille. Mahdollisia teknologisia ratkaisuja ovat sekä säätövoimakapasiteetin lisääminen, että energian varastointi. Säätövoimakapasiteetin lisäämisestä aiheutuu muun muassa se haaste, että mikäli säätövoima perustuu fossiilisiin polttoainesiin, ei merkittävältä hiilidioksidipäästöiltä voida välttyä ilman hiilidioksidin talteenottoa. Toisaalta esimerkiksi kemiallisiin energiavarastoihin luokiteltavat power-to-x-prosessit mahdollistavat hyvin matalapäästöisen synteettisen maakaasun valmistamisen, jolla voidaan muun muassa korvata varavoimaloina käytettävien kaasuturbiinilaitosten fossiilista polttoainetta.

Energiaa pitää olla saatavilla eri muodoissa, jolloin pelkkä sähkön varastointi ei riitä, vaan lisäksi pitää olla esimerkiksi lämpöä saatavilla. Toisaalta myös paikallisen ilmaston vaikutus energian kulutukseen ja tuotantoon on huomioitava, ja voidaankin olettaa, että esimerkiksi pohjoismaissa tarvitaan erilaista energiajärjestelmää kuin Euroopan eteläosissa [3]. Vuoden 2018 sähköenergian kulutus oli Suomessa noin 87 TWh, kun koko energiankulutus oli 384 TWh. [4] Tästä rakennusten lämmitykseen kului 79 TWh ja kaukolämpöä käytettiin eri kohteissa noin 35 TWh ja liikenteen osuus oli noin 50 TWh. Energiavarastoihin kohdistuu myös erilaisia vaatimuksia muun muassa varastointiajan ja purkunopeuden suhteen. Varastoitavat energian määrät voivat myös olla hyvin suuria. On arvioitu, että mikäli energiaa varastoidaan kahdeksaksi tunniksi (karkeasti yön ajaksi) olisi kapasiteetin tarve esimerkiksi Saksassa 1.6 TWh ja vastaavasti noin 1.7 miljoonan asukkaan Phoenixissa 0.05 TWh [5].

Energiavarastoihin liittyviä hankkeita on tällä hetkellä Suomessa käynnissä useita, joissa on toimijoina sekä kotimaisia että ulkomaisia yrityksiä. Esimerkiksi Australialainen Critical Metal Ltd suunnittelee Porin Tahkoluotoon terästeollisuuden kuonaa hyödyntävää vanadiinin tuotantolaitosta, jonka on tarkoitus valmistua vuoden 2024 loppuun mennessä. Hankkeesta on tehty ympäristövaikutusten arviointi vuonna 2021 [6]. Vanadiinilla on käyttöä esimerkiksi virtausakkujen raaka-aineena. Lisäksi BASF rakentaa akkumateriaalitehdasta Harjavaltaan. Hankkeessa on erityisesti huomioitava se, että hankkeen ympäristölupa kumottiin vuonna 2021 ja asian käsittely palautettiin aluehallintovirastolle [7]. Harjavaltaan on myös tarkoitus alkaa suuren kokoluokan vihreän vedyn tuotantolaitoksen ja metanointiyksikön rakentaminen syksyllä 2022 ja laitoksen pitäisi valmistua 2024. Investoinnin suuruus on 70 miljoonaa euroa [8]. Myös Lahti Energia on ilmoittanut 250 miljoonan euron Power-to-gas vihreän vedyn ja metaanin tuotantolaitoksen suunnittelusta ja ensimmäisen vaiheen rakentaminen voi alkaa

2023 [9]. Lisäksi Tampereella on ilmoitettu toteutettavuussuunnittelun aloittamisesta 150 M€n Power-to-gas-laitokseen liittyen [10]. Laitoksen elektrolyyseiteho on 60 MW ja se voisi valmistua 2028. Vastaavista 100 M€n suunnitelmista on myös ilmoitettu Mikkelissä, missä ensimmäisen vaiheen on tarkoitus valmistua 2026 [11]. Kymenlaaksossa Suomen Malmijalostus ja kiinalainen CNGR ilmoittivat 200–300 miljoonan euron akkumateriaalitehdasinvestoinnista, jonka on tarkoitus valmistua 2024. Lopullinen investointipäätös on tulossa vuoden 2022 aikana [12]. Suuria kausilämpövarastohankkeita on ilmoitettu useita, joista Helsingin Mustikkamaalla oleva vanhojen öljyluolien muokkaus 260 000 m³ lämpövarastoksi tuottaa jopa 120 MW lämpötehoa neljän vuorokauden ajan [13]. Toisaalta myös Vantaalle on suunnitteilla jopa 900 000 m³ paineistettu vesivarasto, joka on samalla maailman suurin ja voi varastoida 90 GWh energiaa [14]. Lisäksi Lappeenrantaan on suunniteltu 21 GWh:n lämpöakku kalkkikivikaivoksen yhteyteen, akku olisi vesitilavuudeltaan 450 000 m³ [14].

Tämä tiekartta pyrkii antamaan kattavan katsauksen energiavarastojen luomiin mahdollisuuksiin erityisesti Etelä-Karjalan näkökulmasta. On myös hyvä huomata, että monet tässä raportissa annetut suositukset ja esitetyt tulokset soveltuvat laajempaankin käyttöön maakunnan ulkopuolella. Kappaleessa 2 esitetään energiavarastoihin liittyviä markkinaennusteita ja sovelluskohteita. Kappaleessa 3 keskitytään teknologioiden ominaisuuksiin, huomioiden esimerkiksi round trip-hyötysuhteet ja teknologiset kehitysasteet sekä maailmanlaajuiset T&K-panostukset, jotta löydetään potentiaalisimmat kehityskohteet. Kappale 4 taas keskittyy Etelä-Karjalan erityispiirteisiin ja SWOT-analyysiin. Lisäksi kappaleessa tuodaan esille aihepiiriin sopivia esimerkkejä onnistumisista muualta Suomesta. Kappaleessa 5 käsitellään sekä alueellisesti tehtyjä pilotteja ja arvioidaan vielä toteutumattomia mahdollisuuksia. Kappaleessa 6 esitetään miltä Etelä-Karjalan energijärjestelmä näyttää tällä hetkellä ja miltä se voi näyttää tulevaisuudessa. Toiseksi viimeisessä kappaleessa ennen yhteenvetoa esitetään alueellisia toimenpidesuosituksia sekä lyhyellä, että pidemmällä aikavälillä.

2 Globaali tilanne ja markkinaennusteet

2.1 Markkinat

Energiavarastojen markkinoiden ennustetaan kasvavan merkittävästi sekä lähitulevaisuudessa että pidemmällä aikavälillä, vaikka kasvun kohteissa on hieman eriäviä ennusteita. Globaalisti voidaan hieman yleistäen sanoa, että Yhdysvallat panostavat erityisesti erilaisiin akkuteknologioihin, Yhdistyneet Kuningaskunnat nesteytetyn ilman varastoihin ja muu Eurooppa Power-to-x-teknologioihin. Aasiassa etenkin Kiina on mukana voimakkaasti energiavarastoihin liittyvässä toiminnassa.

Vuonna 2019 julkaistussa energiavarastoinnin markkinaraportissa [15] ennustettiin energiavarastojen markkinoiden kasvavan 59 miljardista USD:sta aina 546 miljardiin vuoteen 2035 mennessä. Raportti keskittyi erityisesti akkuteknologiaan ja mainitsi kasvun kannalta keskeisiksi teknologioiksi virtausakut ja kiinteät akut (solid state batteries). Heidän ennusteessaan liikkumiseen (esim. sähköautot) liittyvä varastointi olisi selkeästi suurin tekijä, mutta kiinteät varastot ohittavat elektroniikan vuonna 2023. Lyhyellä tähtämellä vuoteen 2022 mennessä kiinteiden varastojen osalta merkittävintä kasvua ennustettiin asumiseen liittyviin sovelluksiin (residential storages). Vuoteen 2035 mennessä yli 40 % kasvusta ennustetaan tapahtuvan Kiinassa, Intiassa, Kaakkois-Aasiassa ja Afrikassa. Seuraavien 15 vuoden aikana ennustetaan, että akkujen kierrätys, sähköinen ilmakuu, virtausakut, ohutfilmi- kiinteät akut ovat keskeisiä alan kasvun kannalta. Conca [16] kirjoitti Forbes-lehdessä, että lähitulevaisuudessa Li-ion akut dominoivat henkilökohtaisissa laitteissa ja sähköautoissa, mutta utility-kokoluokan

akkuihin tarvitsemme suurempia järjestelmiä, jotka kestävät pidempään. Hän nosti vaihtoehdoksi Vanadiini-virtausakut, jotka eivät esimerkiksi väsy käytössä yhtä nopeasti kuin Li-ion akut ja Vanadiinia tuotetaan kaksinkertainen määrä Litiumiin verrattuna vuosittain. Lisäksi lyhyemmällä tähtäimellä Allied Market Research ennusti, että vuodesta 2015 vuoteen 2022 merkittävimmät kasvut energian varastoinnissa tapahtuvat PHES ja CAES teknologioissa [17]. Toisaalta IRENA ennusti 2017 pidemmällä aikavälillä, että PHES:n osuus kokonaiskapasiteetista voi pudota yhdessä skenaariossa vuoteen 2030 mennessä jopa alle 50 % (96 % vuonna 2017) [18].

Keskeisenä tekijänä tulevaisuuden energiavarastoinnin kehittymisen osalta Holzinger et al. [15] nostivat esiin virtuaaliset voimalaitokset. Osana tulevaisuutta he myös keskustelivat pitkän aikavälin varastoinnin ja sen vaihtoehtona ylijäämäsiähkön siirtämisestä esimerkiksi liikennekäyttöön vetynä olevan yksi aiheista, joka tulee heidän mukaansa muokkaamaan liikkumista vuosikymmenien ajan. Vedyn käytöstä onkin viime aikoina keskusteltu esimerkiksi pitkän matkan lentoliikenteen polttoaineena ja Airbus ilmoittikin syksyllä 2020 tuovansa markkinoille vetykäyttöisen matkustajalentokoneen vuoteen 2035 mennessä. Tällä hetkellä vetyä käytetään henkilöautojen lisäksi esimerkiksi paikallisjunissa.

Schmidt et al. [19] pitivät yksittäiseen sähköenergian varastointitekologiaan tehtäviä kumulatiivisia 175–510 miljardin Yhdysvaltain dollarin investointeja saavutettavana vuosiin 2027–2040 mennessä. He myös arvioivat, että kiinteiden (stationary) sähkövarastojen hinnat lähestyvät 340 ± 60 USD/kWh, kun globaali asennettu kapasiteetti lähestyy yhtä terawattituntia teknologiasta riippumatta. Heidän tutkimuksessaan esimerkiksi pumppuvesivoimalaitosten (PHES) kustannuksen ei ennustettu laskevan. Yhtenä huomiona on myös mainitsemisen arvoista, että Redox-virtausakulle arvioidaan 11 prosentin kustannusten laskua ja vuoteen 2040 mennessä se voisi saavuttaa PHES:n ja liittävän 500 \$/kWh (tätä on käytetty rajana kypsälle teknologialle) jo ennen vuotta 2025. Polttokennojen osalta on myös hyvä mainita, että ennusteessa 500 \$/kWh raja alitettaisiin vuosien 2025 ja 2030 välillä, tällä tiedolla erityisesti merkitystä, mikäli energiaa varastoidaan esimerkiksi vetyyn tai metaaniin tulevaisuudessa kasvavissa määrin.

Lämpövarastojen osalta ennustetaan myös merkittävää kasvua. Vuoteen 2023 mennessä on ennustettu, että veden, sulasuolan ja faasimuutosmateriaalien osalta markkinat kasvaisivat noin kaksinkertaisiksi vuodesta 2016 alkaen. Erityisesti kasvua on ennustettu utility-tasolla [20].

3 Energiavarastojen teknologiat

Eri menetelmien toimintaperiaatteiden tarkkoja kuvauksia on laajasti saatavilla julkisessa kirjallisuudessa, minkä takia tässä raportissa teknologioiden yksityiskohtia käsitellään hyvin rajallisesti.

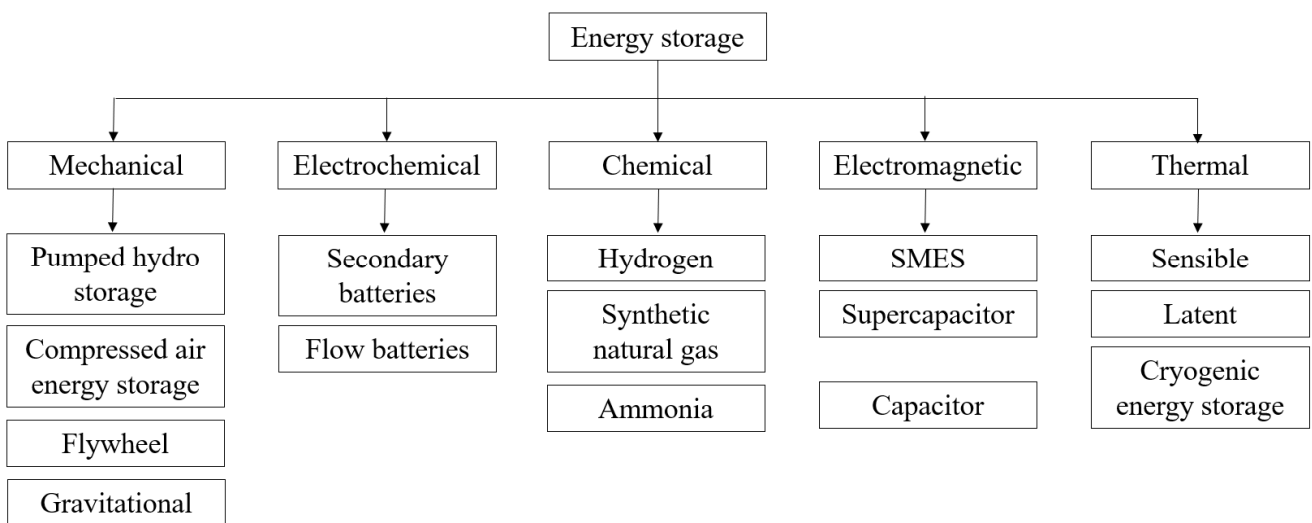
3.1 Teknologioiden luokittelu ja asennettu kapasiteetti

Energiavarastot voidaan jakaa kuvan 1 mukaisesti mekaanisiin, sähkökemiallisiin, kemiallisiin, sähkömagneettisiin ja termisiin varastoihin. Mekaanisiin varastoihin kuuluvat pumppuvesivarastot (PHES), paineistetut ilmavarastot (CAES), vauhtipyörät ja painovoimaiset varastot. Näiden lisäksi esimerkiksi ylikriittiseen tai transkriittiseen hiilidioksidiprosessiin perustuvat varastot (SCO₂/TCO₂) voidaan luokitella tähän luokkaan. CAES-varastojen alle kuuluu useita erilaisia teknologioita, mukaan lukien adiabaattinen CAES eli ACAES. PHES:n keskeinen idea on se, että energiaa varastoidaan pumppaamalla vettä esimerkiksi ylempänä sijaitsevaan patoaltaaseen ja varastoitu potentiaalienergia muutetaan sähköenergiaksi

turbiinien avulla tarpeen mukaan. CAES-prosessissa energiaa varastoidaan paineistettuun ilmaan käyttämällä ilmavarastona esimerkiksi luolaa. Perinteisessä CAESissa prosessia lämmitetään fossiililla polttoaineilla ennen kuin fluidi paisuu turbiinin läpi ja tuottaa sähköä. Tähän ongelmaan voidaan vastata ACAES-laitoksella, jossa puristuksen aikana kehittynyt lämpö otetaan talteen ja vapautetaan samalla kun fluidia paisutetaan sähkön tuotannossa. Painovoimaista varastointia on esitetty yhdeksi vaihtoehdoksi PHES:lle, jolloin esimerkiksi maankäyttöön liittyvät ongelmat vähenevät.

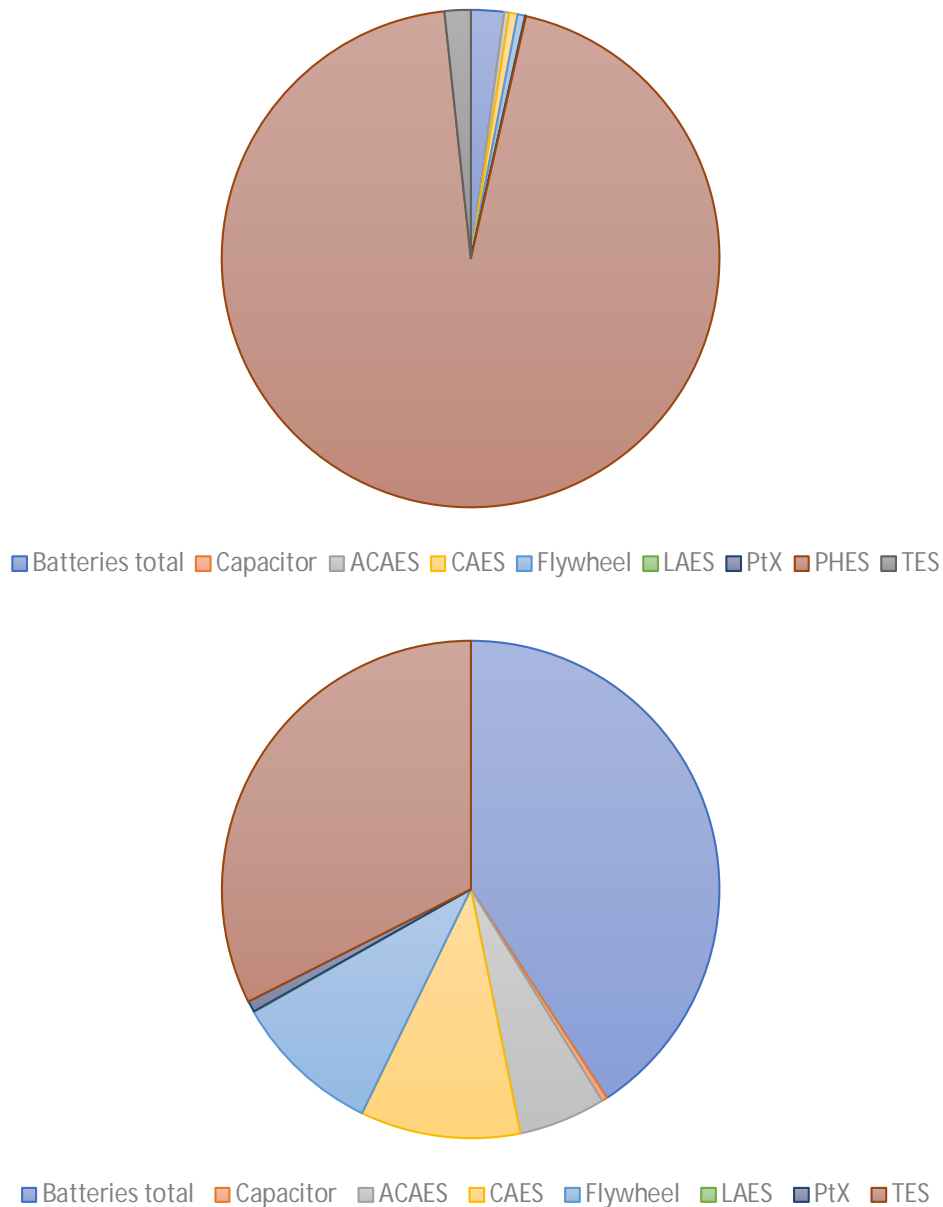
Sähkökemiallisiin varastoihin taas kuuluvat erilaiset akut ja kemiallisiin varastoihin lasketaan kuuluviksi muun muassa synteettisesti power-to-x-prosesseissa valmistetut synteettinen vety ja maakaasu (SNG) sekä erityisesti meriteollisuuden polttoaineeksi suunniteltu ammoniakki. Näiden varastomenetelmien tuotteiden osalta korostetaan myös usein sitä, että niiden tuotanto perustuu sähkөөn (esim. englanniksi e-methane ja e-ammonia). Akkuteknologioista on syytä mainita erityisesti virtausakut, joilla on potentiaalia varastoida energiaa tulevaisuudessa suuressa mittakaavassa. Virtausakkujen kohdalla Redox-akut, kuten Vanadiini ja Sinkki-Bromi ovat yleisimmät teknologiat. Virtausakku koostuu positiivisesta ja negatiivisesta elektrolyyttisäiliöstä sekä positiivisesta ja negatiivisesta elektrodista että niiden välissä olevasta membraanista.

Elektromagneettisiin varastoihin luokitellaan sekä kondensaattorit että superkondensaattorit. Myös suprajohtavat magneettiset energiavarastot (SMES) kuuluvat samaan ryhmään. Termisiin energiavarastoihin kuuluvat sekä tuntuvat (sensible) varastot, kuten vesi, että latentit varastot, kuten faasimuutosmateriaalit. Lisäksi kryogeeniset varastot voidaan luokitella termisiksi varastoiksi. Näihin varastoihin kuuluvat myös nesteytetyn ilman varastot (LAES).



Kuva 1. Energiavarastojen luokittelu [5, 21].

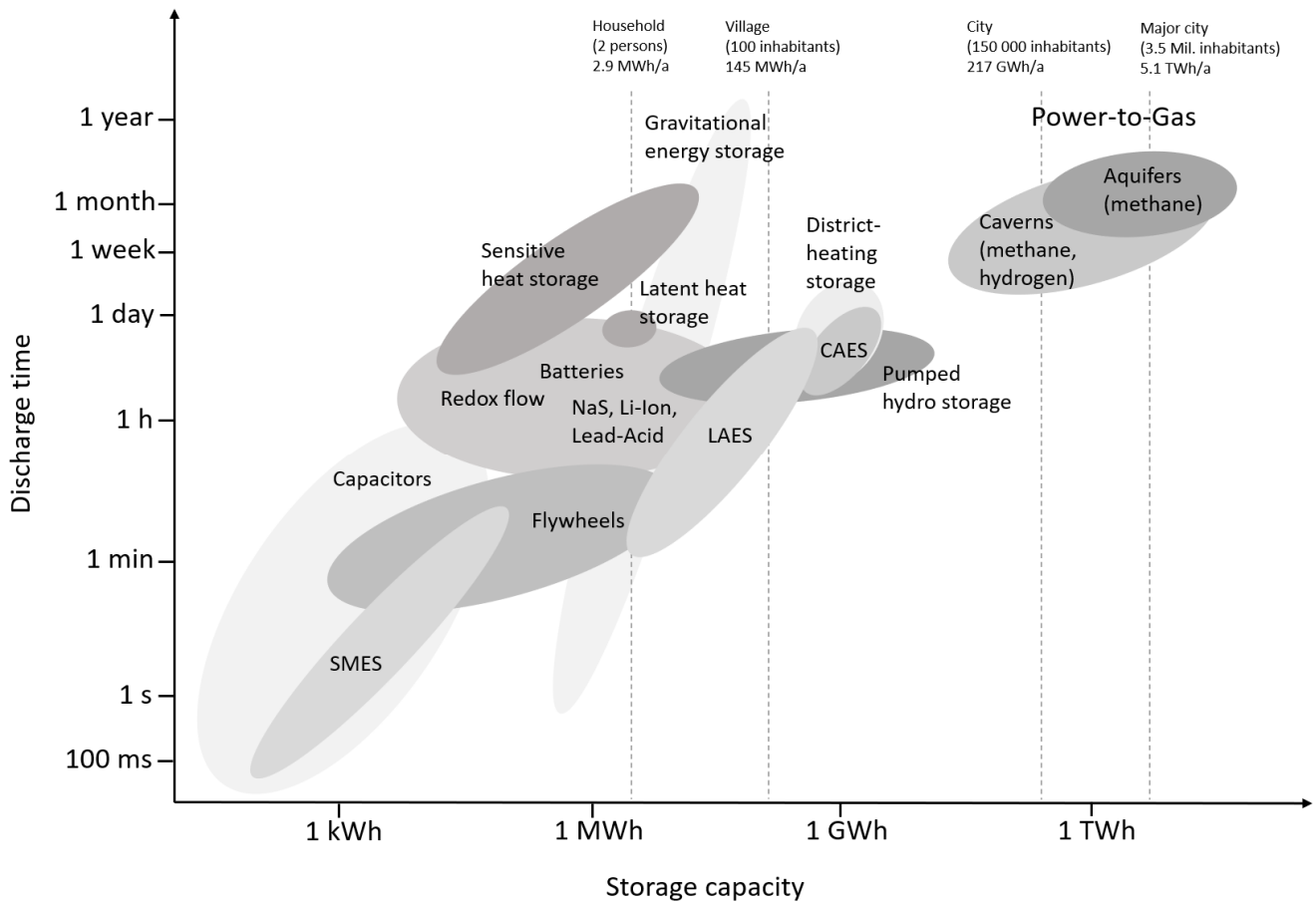
Maailmanlaajuisesti suurin osa tämänhetkisestä varastokapasiteetista on keskittynyt PHES-laitoksiin, jotka vastaavat yli 94 %:n kokonaisuudesta kuvan 2 mukaisesti. Muista teknologioista akkujen osuus on merkittävä ja lähes samaan suuruusluokkaan pääsevät lämpövarastot. Myös vauhtipyörien ja CAES sekä ACAES-laitosten asennettu teho on syytä mainita.



Kuva 2. Verkkoon kytkettyjen energiavarastojen maailmanlaajuinen jakautuminen yläkuvassa ja alakuvassa jakautuminen muiden paitsi PHEs:n osalta. Osuudet on laskettu asennetun tehon MW mukaan (kokonaisteho 192 GW). [22, 23]

3.2 Energiavarastojen ominaisuudet

Energiavarastoja löytyy hyvin nopean vasteen ja melko matalan energiamäärän teknologioista aina erittäin suuren kokoluokan varastoihin, kuten kuvasta 3 voidaan havaita. Erityisesti lyhytaikaiseen (alle vuorokauden) varastointiin sopivia teknologioita on paljon, mutta suuressa kokoluokassa ja pitkän aikavälin varastoinnissa power-to-gas nousee selkeästi esille ja vaihtoehdot vähenevät. Yhtenä potentiaalisena pitkän aikavälin varastointiin sopivana teknologiana tästä kuvasta nousee myös esille painovoimaiset (gravitational) varastot. On hyvä myös huomioida, että kuvan kokoluokat perustuvat suurelta osin Saksan tilanteeseen (LAES ja painovoimaiset varastot lisätty muista lähteistä) ja antavat ainoastaan karkeat suuntaviivat tämän hetken yleistilanteeseen eivätkä kuvaa maksimipotentialiaa. Kuten tässä raportissa on jo aiemmin mainittu esimerkkien kautta, yksi mahdollisuus kausivarastointiin ovat vesivarastot, joiden suunnitellut kokoluokat nousevat kymmenien GWh:n tasolle.



Kuva 3. Energiavarastojen kapasiteetti ja purkuaika eri teknologioille. Muokattu lähteestä [24].

Taulukko 1 esittelee erilaisten varastoteknologioiden keskeisiä ominaisuuksia. Yleisesti voidaan sanoa, että lämpövarastoilla on matalimmat ilmastovaikutukset ($\text{g CO}_2\text{eq/kWh}$) ja monien teknologioiden kohdalla vaihteluväli on merkittävä. Keskeisiä syitä kasvihuonekaasupäästöjen syntymiselle ovat valmistuksen aikaiset päästöt sekä toisaalta käytön aikana syntyvät päästöt, mikäli energian lähde ei ole uusiutuva. Esimerkiksi yhden tutkimuksen mukaan Power-to-gas-to-power prosessin päästöistä yli 75 % muodostuu elektrolyysistä [25]. Hyvä esimerkki materiaalien aiheuttamista päästöistä on se, että ACAES-prosessin osalta on arvioitu, että painevarasto ja turbokoneet tuovat 99 % kasvihuonekaasupäästöistä, mutta lämpövaraston vaikutus on merkityksellinen [25]. Toisaalta materiaalien tehokkaampi kierrätys mahdollistaa ominaispäästöjen laskun, tästä esimerkkinä on Vanadiini, josta voidaan kierrättää jopa 97 %, kun esimerkiksi tutkimuksen laskuissa kierrätysprosentti oli 50 % [26]. Materiaalinen kierrätys auttaa myös vastaamaan osaltaan varastojen valmistukseen liittyvien resurssien riittävyyden haasteisiin. Tästä hyvänä esimerkkinä on Lithiumin riittävyys, jonka turvaamiseksi tehokas materiaalin kierrätys on tulevaisuudessa keskeisessä osassa [27]. Muiden ympäristövaikutusten osalta erityisesti PHES nousee esille maankäyttöön liittyvien haasteiden vuoksi. Round trip-hyötysuhde (RTE) vaihtelee myös huomattavasti teknologioiden välillä ja erityisesti sähkömagneettisten ja sähkökemiallisten varastojen maksihyötysuhteet ovat melko korkeita. Toisaalta synteettisen vedyn ja maakaasuun RTE on vielä kehitysvaiheessa ja parannuspotentiaalia liittyy erityisesti elektrolyysiin. Järjestelmien elinikä taas on matalinta yleisesti akkuteknologioilla. On myös huomion arvoista, että päivittäinen itsenäinen purkautuminen vaihtelee suuresti menetelmien välillä. Taulukossa esitetään myös varastoitavan energian määrää massaa ja tilavuutta kohti.

Tässä tarkastelussa erityisesti vety nousee esille korkeimmilla arvoilla ja toisaalta PHES ja painovoimainen varasto ovat tämän kategorian heikoimpia.

3.3 Energiavarastojen käyttökohteet

US Department of Energyn verkkoon liitettyjen energiavarastojen tietokannan [22] mukaan yleisimmät energiavarastojen käyttökohteet on luokiteltu taulukossa 2. Nämä käyttökohteet sisältävät sekä tuotannon että verkon puolen tarpeita. Kaiken kaikkiaan esimerkiksi Luo et al. [28] listaa pelkästään 24 erilaista sähköenergian varastointivaihtoehtoa. Tämä taulukko antaa kuitenkin hyvän yleiskuvan, siitä mihin tarkoitukseen varastoja erityisesti käytetään tällä hetkellä. On myös hyvä huomioida, että tulevaisuudessa on odotettavissa etenkin kausivarastojen merkityksen kasvavan ja varastomarkkinoiden kehittyessä erilaisia liiketoimintamahdollisuuksia saattaa aueta erilaisille sovelluksille. Yksi huomionarvoinen asia on se, että yhdistämällä eri varastoteknologiota hybridivarastoksi voidaan vastata useampiin sähköverkon tarpeisiin kerralla [21].

Taulukko 2. Verkkoon liitettyjen energiavarastojen yleisimmät käyttötarkoitukset. Yhdellä varastolla voi olla myös useita käyttökohteita. [22]

| Lukumäärä | Käyttökohde | Selite |
|-----------|-----------------------------|---|
| 1251 | Time-shift | Varastoidaan energiaa matalan tarpeen aikana ja puretaan korkeamman tarpeen aikana. |
| 488 | Electric Supply Capacity | Pyritään vähentämään/välttämään keskitetysti tuotetun sähkön ostamista tai voidaan tarjota varastokapasiteettia markkinoille. |
| 443 | Electric bill management | Pyritään välttämään huippukysynnän aikaista sähkön ostamista, kun esim. aurinkovoimala ei tuota sähköä. |
| 369 | Renewables Capacity Firming | Pyritään lieventämään uusiutuvan energian tuotannon nopeiden muutosten vaikutuksia. |
| 339 | Frequency Regulation | Sähköverkon taajuuden säätö. |
| 214 | Voltage Support | Sähköverkon jännitteen ylläpito ja palauttaminen halutulle tasolle. |

3.4 Teknologioiden kypsyysasteet, kustannukset ja T&K-panostukset globaalisti

Taulukossa 3 esitetään teknologioiden kypsyysasteiden (Technology Readiness Level, TRL) tilannetta vuosien 2019 ja 2021 välillä. Tiedot on kerätty useista lähteistä ja yli- sekä transkriittisen hiilidioksidin varastojen osalta arvio perustuu LUTin arvioon. Taulukosta voidaan havaita, että suurin osa teknologioista ei ole vielä saavuttanut täyttä kypsyttä (TRL 9) ja toisaalta lähteestä riippuen kypsyysasteet voivat vaihdella melko paljon. Tämä heilahtelu voi johtua esimerkiksi siitä, että teknologiaa kehitetään useaa eri polkua pitkin ja niiden kehityskaaret ovat eri vaiheissa. Erityisesti tästä taulukosta voidaan nostaa esiin ACAES, painovoimavarastot, latentit lämpövarastot, pumped heat, LAES, synteettinen vety ja maakaasu, synteettinen rikki, SMES, yli- sekä transkriittistä hiilidioksidia hyödyntävät varastot ja virtausakut. Kuten aiemmin on mainittu, Schmidt et al. [19] mukaan varastointiteknologian kypsyttä voidaan myös arvioida kustannusten avulla, johon keskitytään tarkemmin myöhemmin tässä kappaleessa.

Taulukko 1. Energiavarastoteknologioiden ominaisuuksia (RTE=round trip efficiency).

| Technology | g CO ₂ eq/kWh | | Environmental impact | RTE % | | Wh/kg | kWh/m ³ | Lifetime (years) | Daily self discharge |
|------------------------------------|--------------------------|------|----------------------|-------|-----|----------|--------------------|------------------|----------------------|
| | Min | Max | | Min | Max | | | | |
| PHES | 5.43 | 650 | High | 65 | 87 | 0.5-1.5 | 0.2-2 | 30-60 | No, very small |
| SCO ₂ /TCO ₂ | | | | 39 | 63 | | 8.07 | | |
| CAES | 27.1 | 740 | Medium | 42 | 54 | 3-60 | 0.4-20 | 20-60 | No, small |
| ACAES | 161 | 272 | | 24 | 79 | | 0.5-20 | 20-40 | |
| Flywheels | 159 | | Very low | 80 | 95 | 5-200 | 0.3-400 | 15 | 1 |
| Gravitational | | | | 75 | 86 | 1.06 | 0.5-1.5 | 30+, 40+ | |
| Sensible thermal storage | 5 | 47 | Low | 50 | 90 | 10-120 | 25-120 | | 0.05–1 |
| Latent heat storage | 9 | 34 | Low | 50 | 90 | 150-250 | 100-370 | | 0.05–1 |
| Pumped heat | | | | 50 | 72 | | 110-770 | 20-40 | |
| LAES | 30.2 | 232 | Medium | 50 | 80 | | 150-200 | 20-40 | Small |
| Hydrogen | 50.6 | 1620 | Low | 17 | 50 | 400-1000 | 190-3000 | 5-20 | 0 |
| SNG | | | Medium | 12 | 38 | | 1000 | | |
| SMES | 416 | | Low | 95 | 98 | 0.3-75 | 0.2-14 | 20+ | 10-15 |
| Supercapacitor | | | Medium | 84 | 97 | 1-15 | 1-35 | 10-30 | 20-40 |
| Lead battery | 21.91 | 770 | Medium | 60 | 90 | 10-50 | 25-90 | 3-15 | <0.1-0.2 |
| Nickel battery | 32.5 | 607 | Very low - Medium | 50 | 90 | 10-80 | 15-150 | 5-20 | 0.2-0.3 |
| Li-Ion battery | 72.3 | 600 | Very low | 85 | 98 | 60-300 | 90-750 | 5-20+ | 1-5 |
| NaS battery | 37.9 | 640 | Very low | 65 | 90 | 100-250 | 150-350 | 10-15 | No |
| V flow battery | 7.26 | 279 | Low | 60 | 90 | 10-50 | 10-70 | 5-20 | 0.03-12 |
| Zn-Br flow battery | | | Low | 65 | 85 | 70-90 | | 5-15 | Very small |

Taulukko 3. Energiavarastoteknologioiden kypsyyssasteita (TRL) vuosilta 2019-2021.

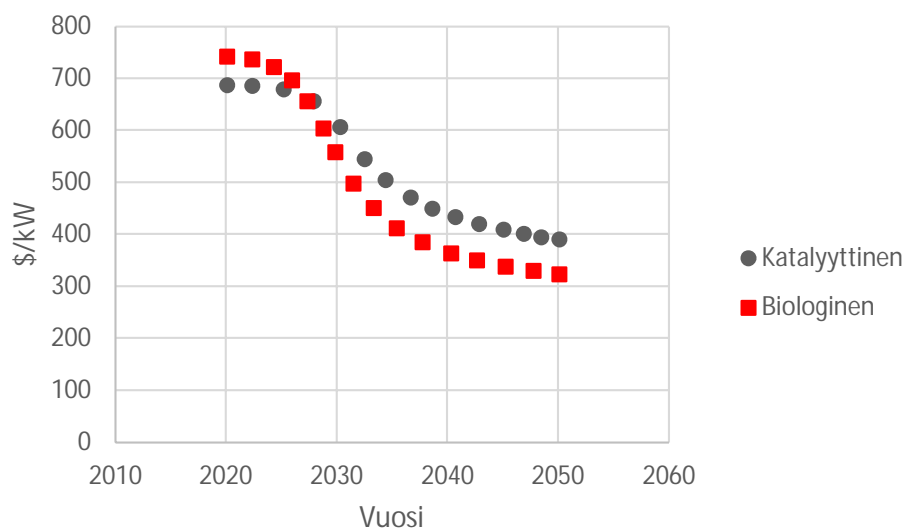
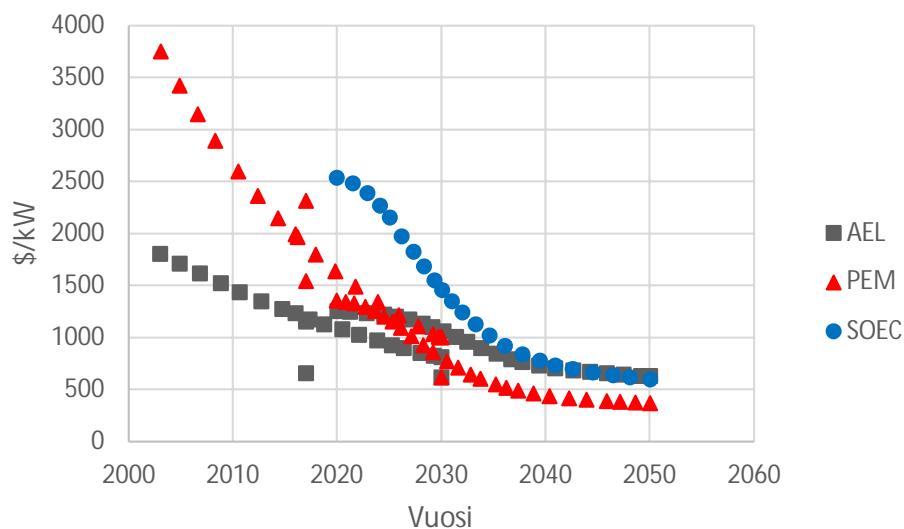
| | 2019 | 2020 | 2021 |
|------------------------------------|------|------|------|
| PHES | 9 | 9 | 9 |
| CAES | 9 | 6-7 | |
| ACAES | 5-6 | 6-7 | 5 |
| Flywheels | 9 | 8-9 | |
| Gravitational | 4-5 | | |
| Sensible thermal storage | 9 | 9 | |
| Latent heat storage | 4 | 7-8 | |
| Pumped heat | 2-4 | | 4-5 |
| Liquid air | 6-7 | | 5-6 |
| Hydrogen | 3-9 | | |
| SNG | | 6-8 | |
| Sulfur | 3-5 | | |
| SMES | | 5-6 | |
| Supercapacitor | | 7 | |
| Power to Heat | | 8 | |
| SCO ₂ /TCO ₂ | | | 1-2 |
| Lead battery | | 9 | |
| Nickel battery | | 8-9 | |
| Li-Ion battery | | 7-8 | 9 |
| NaS battery | | 7-8 | 9 |
| Vanadium flow battery | 7-9 | 6-7 | 9 |
| Zn-Br flow battery | | | |

Teknologioiden kustannuksia voidaan tarkastella joko tehon tai energian suhteen, hieman teknologiasta ja datan saatavuudesta riippuen. Esimerkiksi painovoimaisille varastoille kustannukset ovat olleet vuonna 2016 välillä 800-1000 USD/kW, joka on lähellä NaS-akkujen maksimihintaa vuonna 2019 (1200 USD/kW) ja hieman matalampi kuin LAESilla vuonna 2019 (1100 USD/kW). Kustannuksia arvioitaessa on myös tarpeellista huomioida, että lukuarvot ovat suuntaa antavia ja vuosien välillä voi olla suurtakin heilahtelua lähteiden välillä. Lisäksi raportoitujen lukujen sisältämät järjestelmärajaukset voivat vaikuttaa tuloksiin. Toisaalta myös yhden teknologiaotsikon alle voi sisältyä useita erilaisia menetelmiä, joiden kustannukset vaihtelevat. Näin ollen tässä raportissa esitetyt luvut antavatkin kuvan ainoastaan karkeasta suuruusluokasta eri teknologioille.

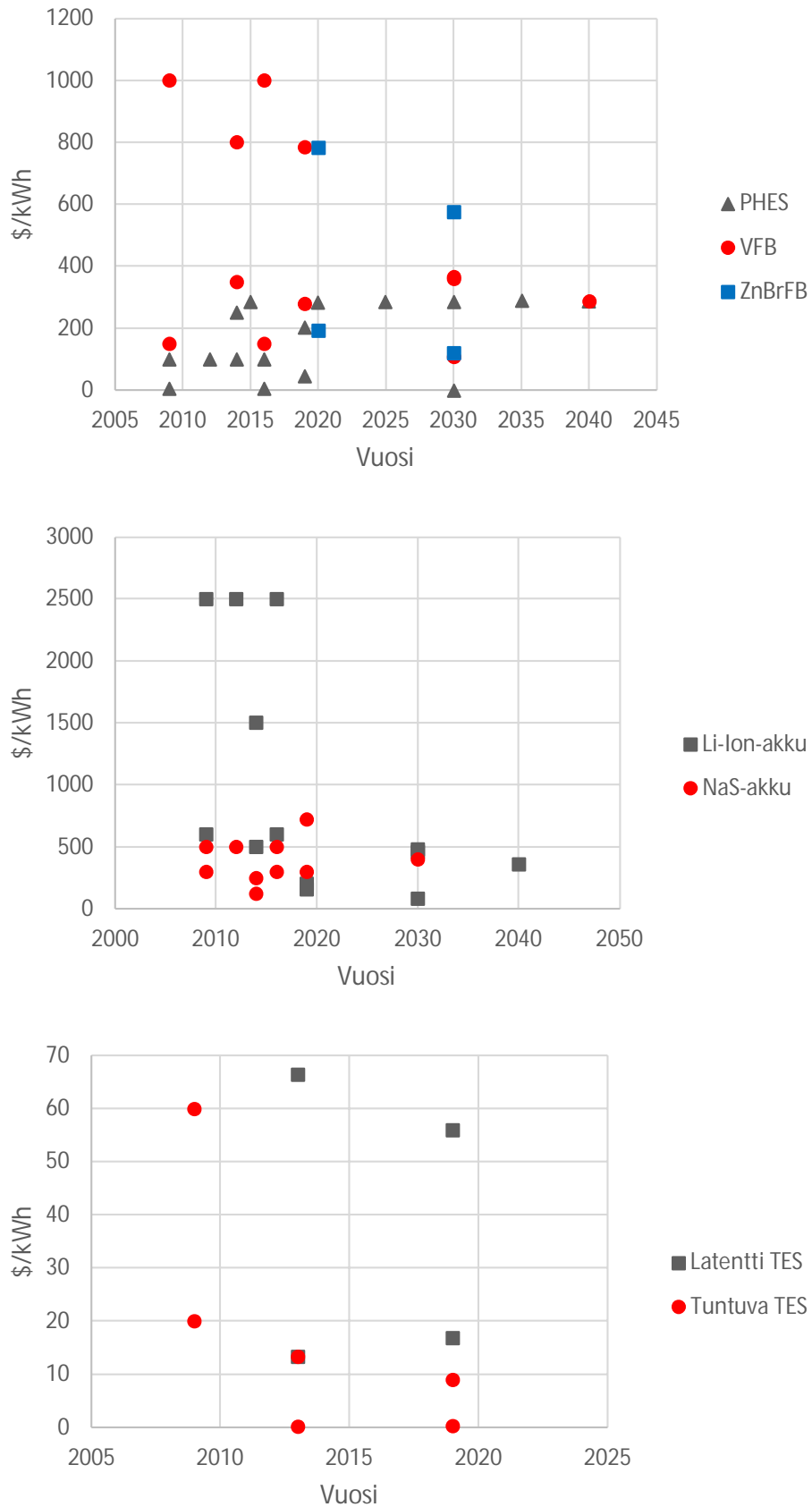
Asennetun kapasiteetin ja teknologisen kehityksen myötä hinnat voivat laskea merkittävästikin. Esimerkiksi Etelä-Karjalan osalta tärkeän power-to-x:n liittyvän synteettisen vedyn valmistuksessa keskeisessä osassa olevan elektrolyysin hinnan on ennustettu laskevan tulevaisuudessa kuvan 4 mukaisesti. Vastaavaa trendiä on myös ennustettu sekä katalyyttiselle että biologiselle metanointiprosessille, joilla voidaan valmistaa synteettistä maakaasua.

Tarkasteltaessa teknologioiden hintojen kehitystä kuvassa 5, voidaan havaita, että esimerkiksi Li-Ion akkujen kustannukset ovat laskeneet melko nopeasti vuoden 2009 tasosta, toisaalta esimerkiksi NaS-akkujen kustannukset eivät ole laskeneet samalla vauhdilla. On myös huomionarvoista, että kypsällä teknologialla, kuten PHES, ei odoteta kustannusten laskua tulevaisuudessa. Sähkövarastojen hinnat myös laskevat ennusteissa lähelle Schmidtin 500

USD/kWh kypsän teknologian rajaa. Toisaalta lämpövarastoissa kustannukset ovat selkeästi matalammalla tasolla ja niidenkin osalta on havaittavissa laskua. Liitteessä 1 esitetään lisäksi muiden tarkasteltujen energiavarastojen kustannuksia. Näistä teknologioista on erityisesti huomionarvoista se, että myös pumped heat-teknologian kustannukset ovat matalalla tasolla verrattuna sähkövarastoihin. Lisäksi datan vähyyden vuoksi liitteestä 1 puuttuvista Power-to-x-prosesseista synteettisen vedyn kustannukset arvioitiin vuonna 2019 olevan 1512 USD/kWh ja SNG:n vastaavasti 1120 USD/kWh.



Kuva 4. Elektrolyysin hintojen kehitys eri teknologioilla (yläkuva) ja metanoinnin hinnan kehitys eri teknologioilla (alakuva). Elektrolyysiteknologiat on jaoteltu alkali (AEL), polymeeri (PEM) ja kiinteäoksidi-teknologioihin (SOEC).



Kuva 5. Energiavarojen kustannusten muutos ajan suhteen sekä sähkö- että lämpövarastoille.

3.4.1 Sähkökemialliset energiavarastot

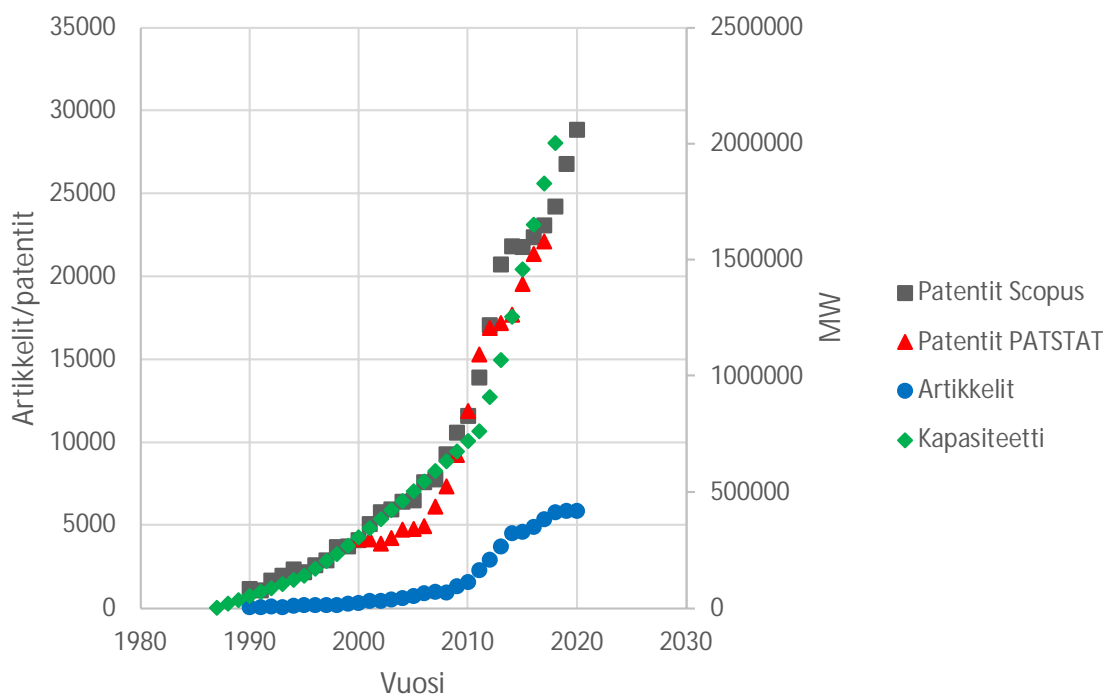
Globaaleja panostuksia tutkimukseen ja tuotekehitykseen tarkastellaan analysoimalla patentti- ja julkaisutietokantoja. Patenttien osalta keskitytään ensiksi PATSTATin tarjoamaan dataan ja laajennetaan toisessa vaiheessa Scopuksen patenttietokantaan. PATSTATin tietokantaa käytetään validoimaan Scopuksen tietokannan tuloksia, sillä Scopuksesta on saatavilla tietoa hieman joustavammin eri hakusanoilla. Lisäksi tutkimusjulkaisuita analysoidaan Scopus-tietokannan avulla, mikä on yksi johtavista tutkimustietokannoista. Patenttiselvityksen alussa hyödynnettiin hankkeen aikana tehtyä yrityskyselyä käyttämällä kyselystä nousseita hakusanoja ja myöhemmin hakusanoja laajennettiin tarpeen mukaan.

Patenttien osalta tyypillisesti teknologian kehityskulussa alkuvaiheen kasvua seuraa tasaisempi vaihe, jolloin jokin teknologia demonstroi potentiaalia suurempaan kilpailuasetelman muutokseen, mutta se ei ole vielä realisoitunut. Kun sopiva avainteknologia löytyy, alkaa kasvu kohti kypsää teknologiaa ja patenttien vuotuinen määrä lähtee uudelleen nousuun. Kun teknologia on kypsä, voi patenttien määrä lähteä jopa laskemaan.

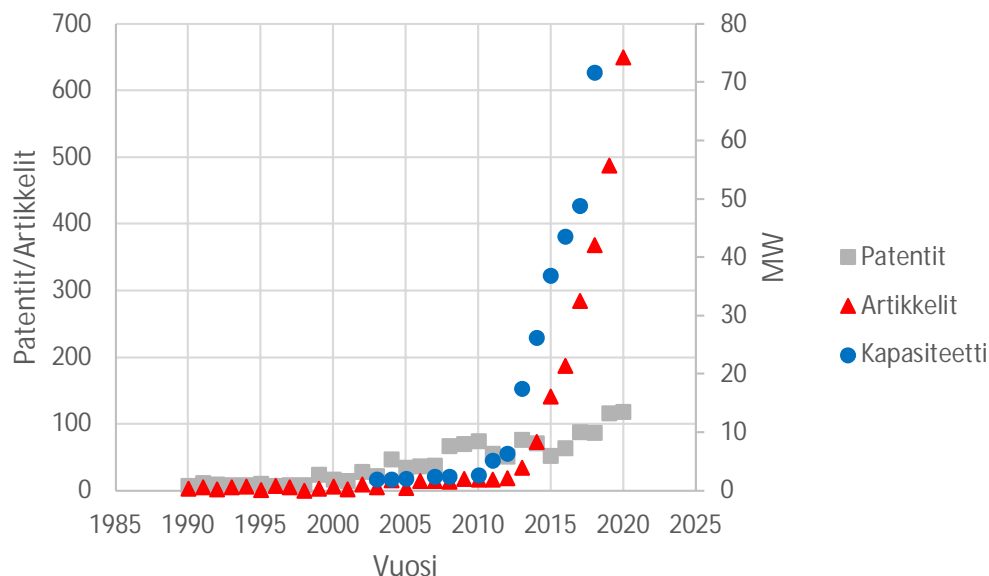
Akkuihin liittyen on saatavilla hyvin tietoa ja kuvasta 6 voidaankin havaita, että patenttien määrä on molempien tarkasteltavien tietokantojen perusteella kasvanut selvästi voimakkaammin kuin tutkimusjulkaisuiden määrä. Myös voimakkain kasvu patenteissa on alkanut hieman julkaisuiden vastaavaa aiemmin. Toisaalta voidaan myös havaita, että verkkoon asennetun kapasiteetin kehitys on ollut voimakasta ja se on alkanut kiihtyä karkeasti samaan aikaan kuin julkaisutoimintakin. Tarkemmassa teknologiakohtaisessa tarkastelussa havaittiin, että Li-Ion akut tuottavat suurimman osan sekä julkaisuista, että patenteista. Patenttien lukumäärän ollessa Scopuksessa noin 20000 Li-Ion patenttia ja toiseksi suurimmalla Nikkeli-akuilla vastaava määrä on noin 5000 patenttia. Ero Li-Ion akkujen ja muiden välillä on julkaisuissa vielä suurempi. Akkujen osalta voidaankin todeta, että teknologian kehitys on näiden tulosten valossa tuotekehitysvetoinen eikä tutkimusvetoinen ala, sillä tutkimuksen määrän trendit seuraavat patenteja viiveellä ja määrät ovat selkeästi matalampia. Analyysin yhteenvedona matalamman kypsyysasteen (TRL) ja matalamman julkaisumäärän teknologioita ovat sekä virtausakut että NaS-akut. Virtausakkujen osalta on hyvä huomata niiden hyvä odotettu potentiaali suuren kokoluokan akkujärjestelmissä. Toisaalta pidemmällä aikajänteellä on nostettu esiin mahdollisina tulevaisuuden teknologioina Lithium-ilma-, Lithium-Rikki- ja Natrium-Ioni-akut [29].

3.4.2 Kemialliset energiavarastot

Suurin osa power-to-x-teknologian kapasiteetista/projekteista on synteettisen vedyn tai maakaasun valmistukseen liittyvää [22, 23] ja keskittynyt erityisesti Eurooppaan. Saksa on ahkerin tiedejulkaisujen julkaisija aihepiirissä, mikä on isossa kuvassa poikkeuksellista. Toisaalta jos katsotaan keskisiä teknologioita, kuten elektrolyysiä ja metanointia, on Kiina suurin julkaisija. Verrattuna akkuihin, trendien kehitys on enemmän tutkimusvetoista (Kuva 7) ja patenttien määrä seuraa hieman jäljessä artikkelien määrän kehitystä. Patenttien trendi on myös hyvin heikko ja volyymi selkeästi matalampi kuin akuilla (pätee myös julkaisuihin). Toisaalta on myös mielenkiintoista huomata, että kapasiteetin ja artikkelien määrän jyrkempi kasvu alkavat karkeasti samaan aikaan sekä kemiallisilla varastoilla, että sähkökemiallisilla varastoilla.



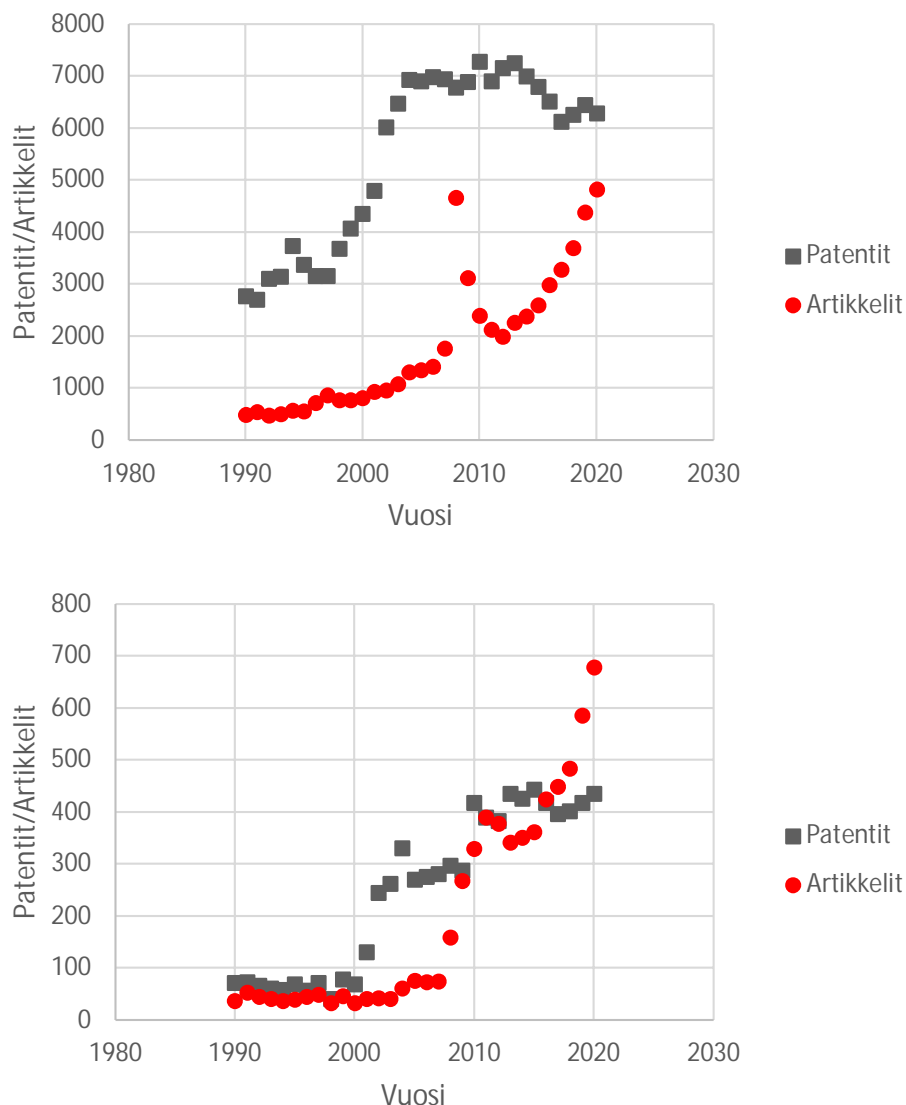
Kuva 6. Akkuihin liittyvien tiedeartikkelien vuotuinen määrä suhteessa patenttien määrään kahdessa tietokannassa. Lisäksi kuvassa esitetään globaalin verkkoon asennetun kumulatiivisen kapasiteetin kehitys.



Kuva 7. Power-to-x patentit ja tutkimusjulkaisut sekä kumulatiivinen kapasiteetti.

Tarkempi tarkastelu elektrolyysiin ja metanointiin kuvassa 8 paljastaa, että elektrolyysiin liittyvien patenttien määrä on ollut vuosittain korkealla tasolla vaikkei se ole enää kasvanut juurikaan 2000-luvun alun jälkeen. Toisaalta artikkeleissa on tapahtunut voimakas nousu 2007 jälkeen ja uusi kasvu on alkanut 2013. Tämä havainto kuvaa sitä, että tällä hetkellä tutkimuksen määrä on tällä alalla voimakkaassa kasvussa. Hieman samantyylinen havainto voidaan tehdä myös metanoinnin suhteen, vaikka lukumäärät ovat karkeasti 10 kertaa matalampia. Metanoinnissa julkaisuiden määrä on jopa ylittänyt patenttien määrän viime vuosina. Teknologiselta kypsyysdeltään molemmat teknologiat ovat TRL-tasojen 3 ja 9 välissä,

eli tutkimus ja kehityspanoksia tarvitaan jatkossakin. Voimakkainta kustannusten laskua odotetaan erityisesti vuoteen 2035 asti, kuten kuvassa 4 esitetään. Lisäksi on arvioitu [30], että vedyn valmistusteknologia saavuttaisi saturaatiopisteen noin vuonna 2030 ja vastaavasti vedyn varastointiteknoologia 2030-luvulla, minne asti on odotettavissa patenttimäärien vuotuista kasvua.

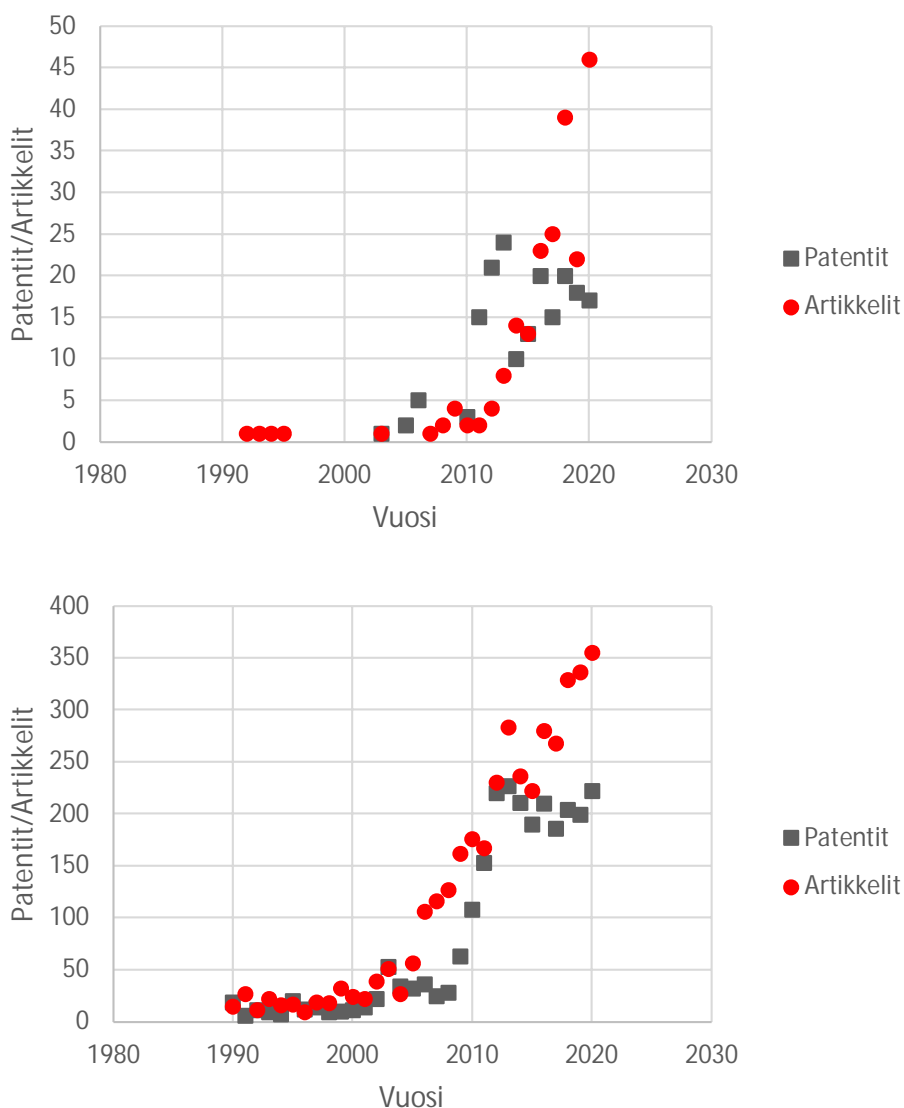


Kuva 8. Elektrolyysiin (yläkuva) ja metanointiin (alakuva) liittyvien patenttien ja tutkimusjulkaisuiden määrän kehitys vuodesta 1990.

3.4.3 Mekaaniset varastot

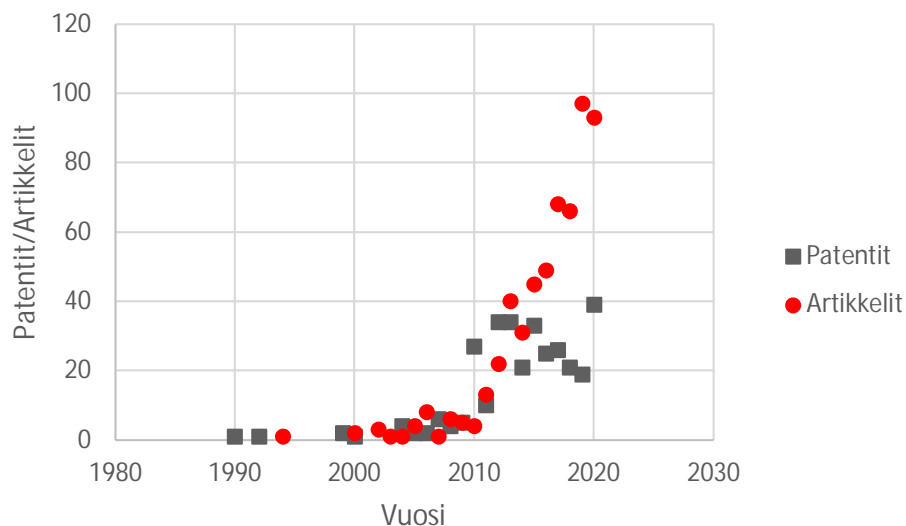
Verrattuna sähkökemiallisiin varastoihin ovat mekaanisten varastojen sekä patenttien, että julkaisujen määrät selkeästi matalampia. Kuvasta 9 voidaan havaita, että ACAESin kohdalla patentti- ja julkaisumäärät ovat hyvin matalia. Kun lisäksi huomioidaan se, että teknologian kypsyysaste on välillä 5–7, voi siihen liittyä merkittävää panostusten kasvupotentiaalia ja mahdollisuuksia. CAES-teknologian osalta julkaisu- ja patenttimäärät ovat ACAESia korkeampia ja tutkimusjulkaisuiden määrä näyttää johtavan kasvua, jota patentit seuraavat hieman viiveellä. Tämä käyttäytyminen eroaa akkujen vastaavasta, mutta on samantyylinen kuin power-to-x:llä. Toisaalta metanoinnissa patentit ovat olleet julkaisuiden edellä määrässä vuosituhaten alussa, mutta niiden keskinäinen järjestys on muuttunut viimeisten vuosien aikana. CAESin osalta on myös hyvä huomioida, että vaikka perusteknologia on kypsä, voi

tämän hakusanan alle kuuluu myös uusia kehitettäviä ilmavarastoja, jolloin kuvan 9 (alakuva) trendit luultavasti kuvaavatkin laajemmin eri teknologioiden kokoelmaa. Kun huomioidaan patenttien määrän tyypillinen käyttäytyminen teknologian elinkaaren aikana ja jyrkkä artikkelien määrän kasvu, CAES ja elektrolyysi sekä metanointi voivat olla tilanteessa, jossa patenttien määrä saattaa kasvaa voimakkaasti tulevaisuudessa. Poikkeavaa suuremmassa kuvassa on se, että Brasilia on suurin julkaisija selkeästi ennen Kiinaa ja Yhdysvaltoja. CAESIin liittyvien projektien määrä on ollut DOEn tietokannan mukaan 19 ja vuonna 2021 julkaistu katsaus [31] listaa 14 merkittävää projektia. Tarkempi analyysi paljastaa, että vuoteen 2010 mennessä alkaneita projekteja oli neljä kappaletta, vuosina 2013 ja 2014 alkoi kumpanakin yksi projekti ja loput kahdeksan projektia ovat alkaneet vuodesta 2017 alkaen [31]. Hankkeista osa on ollut onnistuneita, kun taas osa on päätynyt ilman haluttua lopputulosta. Käynnissä olevista hankkeista merkittävä osa sijaitsee Kiinassa, mutta myös esimerkiksi Yhdysvalloissa on ollut projekteja vuosien saatossa. Aktiivisten projektien määrän kasvu vuodesta 2017 alkaen antaa myös tukea odotettavissa olevalla patenttien määrän kasvulle.



Kuva 9. ACAES teknologian (yläkuva) ja CAESin (alakuva) patenttien ja tiedejulkaisuiden määrän kehitys vuodesta 1990 alkaen.

Globaalisti suurimman kapasiteetin omaavan energiavaraston PHES:n patenttien ja tutkimusjulkaisuiden trendi seuraa melko hyvin ACAESin trendejä. Julkaisuvolyymi on hieman alle 100 artikkelia vuonna 2020, kuvan 10 mukaisesti, Kiina on suurin julkaisija pienellä erolla Yhdysvaltoihin, jonka jälkeen kolmantena on Saksa. Määrät ovat hyvin maltillisia suhteessa teknologian yleisyyteen, toisaalta teknologia on kypsää, joten merkittävät teknologiset parannukset vaativat luultavasti suuria panostuksia. Lisäksi kustannuksiin ei ole ennustettu enää pudotusta tulevaisuudessa. Yhtenä haasteena tällä teknologialla on se, että helposti hyödynnettäviä kohteita ei ole esimerkiksi Euroopassa saatavilla. Pidentämällä putkiston/kanaviston (penstock) pituutta saadaan potentiaalia kasvatettua, mutta samalla kustannukset kasvavat. Uusina mahdollisina teknologioina mainittiin äskettäisessä katsauksessa [32] merivettä hyödyntävät laitokset sekä maanalaiset laitokset, joista jälkimmäinen voi hyödyntää esimerkiksi olemassa olevia kaivoksia, mutta vaadittava putouskorkeus voisi olla jopa 500 m. Vuoden 2010 molemmilla puolilla on tapahtunut asennetun varastokapasiteetin voimakasta kasvua Kiinassa [33], joka voi myös heijastua kasvaneisiin patentti- ja julkaisumääriin.

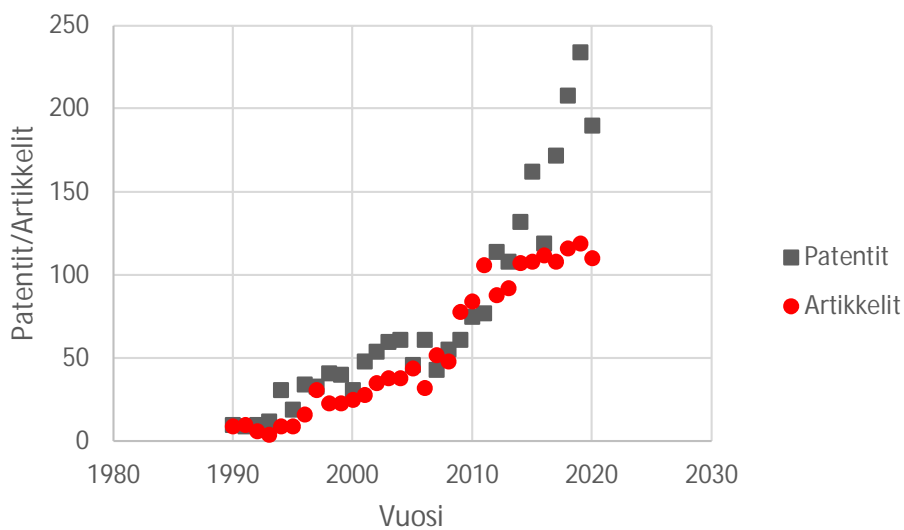


Kuva 10. PHES:n liittyvä patenttien ja tiedejulkaisuiden määrän kehittyminen vuodesta 1990 alkaen.

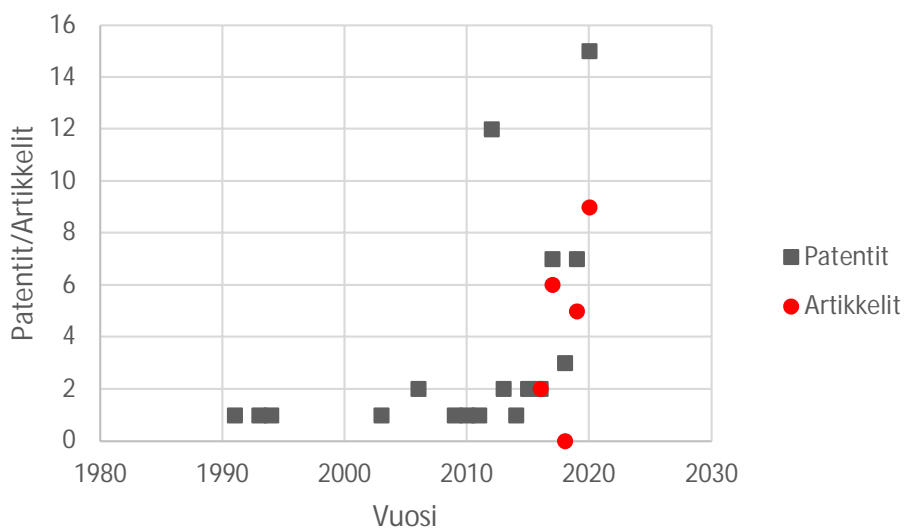
Vauhtipyöriin liittyvien patenttien määrä on ollut kasvussa noin vuodesta 2010 lähtien (Kuva 11). Toisaalta myös tutkimusartikkelien määrä on kasvanut, vaikkakin hitaammin. Teknologia lasketaan kypsäksi, mutta kehitystyötä tehdään edelleen ja useita tulevaisuuden kehityskohteita mainitaan äskettäisessä katsauksessa [33] sisältäen esimerkiksi uudet materiaalit ja vauhtipyörän rakenne. Toisaalta esimerkiksi laakeriton sähkökone listataan yhtenä teknologiavaihtoehtona ja siihen liittyen on T&K-toimintaa parhaillaankin käynnissä Etelä-Karjalassa. Yhtenä vauhtipyörien suurimpana haasteena on niiden korkea hinta, joka voi olla jopa kymmenkertainen Li-Ion-akkuihin verrattuna.

Painovoimaisten varastojen osalta sekä julkaisu- että patenttimäärät ovat erittäin matalia (Kuva 12) ja teknologia on tällä hetkellä demo/pilot-vaiheessa (TRL=4-5). Viimeisten vuosien aikana on havaittavissa myös pientä kasvua artikkelien ja patenttien määrissä. Tietävästi ensimmäinen painovoimaan perustuva 50 kWh prototyyppi valmistui Kaliforniaan viime vuosikymmenellä. Sen jälkeen eri teknologiaan perustuva pilot-laitos valmistui vuonna 2018 Sveitsiin, lisäksi 2020 valmistui kaupallinen demonstraatiolaitos saman yrityksen (Energy Vault) toimesta. Myös Edinburghissa aloitettiin Gravitricityn demolaitoksen rakentaminen

vuonna 2020 ja se tuotti energiaa vuonna 2021. Kyseinen yritys aikoo myös saada täyden skaalan prototyyppin toimintaan vuonna 2023. Lisäksi ainakin kaksi (Saksasta ja Yhdysvalloista) yritystä työskentelee painovoimaisten varastojen parissa [34]. Nämä uudet projektit saattavatkin olla selittämässä vuonna 2017 alkanutta orastavaa patenttien ja artikkelien määrän kasvutrendiä. Tätä taustaa vasten voidaan todeta, että näiden varastojen osalta on potentiaalia olemassa suuremmallekin kasvulle, kun huomioidaan vielä odotettavissa oleva kohtalaisen korkea hyötysuhde, kohtuulliset kustannukset, soveltuvuus pitkän aikavälin varastointiin sekä mahdollisuus hyödyntää esimerkiksi olemassa olevia kaivoksia [35, 36]. Koko alaan liittyen on myös tärkeää huomioida, että Gravitricity tekee yhteistyötä hissivalmistaja Huismanin kanssa. Suomen vahva hissiosaaminen voikin tuoda hyviä yhteistyömahdollisuuksia tälle alalle.



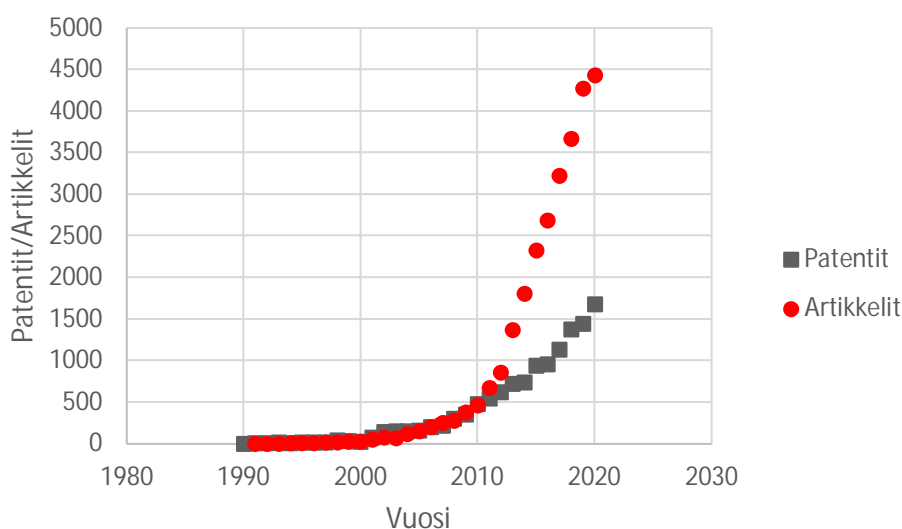
Kuva 11. Vauhtipyöriin (Flywheels) liittyvä patenttien ja tiedejulkaisuiden määrän kehittyminen vuodesta 1990 alkaen.



Kuva 12. Painovoimaisiin (Gravitational) energiavarastoihin liittyvien patenttien ja tiedejulkaisuiden määrän kehittyminen vuodesta 1990 alkaen.

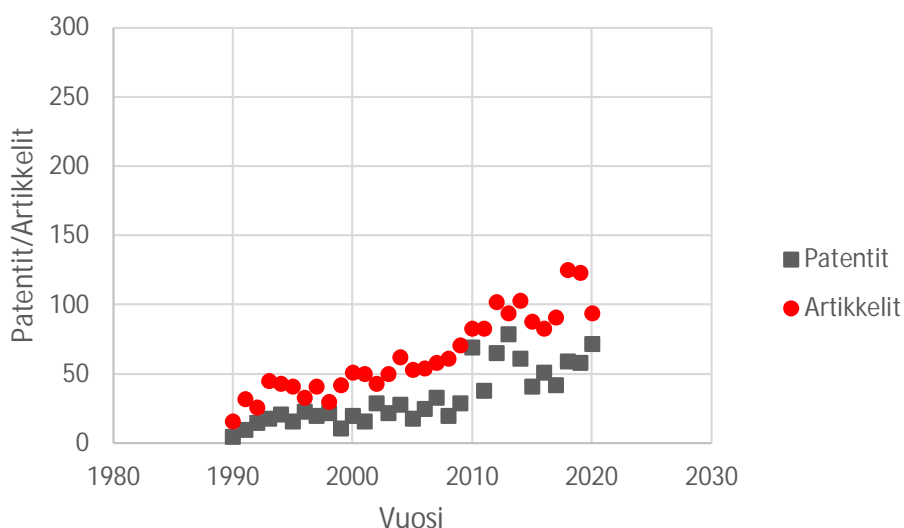
3.4.4 Sähkömagneettiset varastot

Superkondensaattoreiden osalta sekä patentti- että julkaisumäärät kasvavat (Kuva 13) ja erityinen huomio kiinnittyy siihen, että tutkimusjulkaisuiden ja patenttien määrä kasvoivat samaa vauhtia noin vuoteen 2010. Tämän jälkeen julkaisuiden määrä lähti kasvamaan selkeästi nopeammin ja antaa kuvan siitä, että tutkimuspanostukset ovat kasvaneet merkittävästi 2010 luvulla. Verrattuna muihin teknologioihin, ovat julkaisumäärät samalla tasolla kuin akuilla. Vuonna 2021 julkaistun katsauksen [37] perusteella on grafeeniin perustuvien elektrodien kehitys ollut merkittävää viimeisen vuosikymmenen aikana, mikä myös saattaa näkyä julkaisumäärissä. Seuraavan askeleen ottamisen kannalta korostettiin direct laser writing (DLW)-valmistusmenetelmän potentiaalia. Toisaalta on myös mielenkiintoista havaita, että superkondensaattoreiden kohdalla ei teknologian elinkaaren tyypillisiä vaiheita ole havaittavissa patenteissa. Toisaalta patenttien määrä on selkeästi esimerkiksi akkuja matalammalla tasolla. Kun huomioidaan vielä se, että teknologia on kirjallisuuden mukaan kypsyydeltään tasolla 7, voidaan varsin perustellusti odottaa kypsymisen edistymistä jatkossakin. Toisaalta superkondensaattoreita on DOEn mukaan asennettu jo useisiin kohteisiin [22].



Kuva 13. Superkondensaattoreihin liittyvien patenttien ja tiedejulkaisuiden määrän kehittyminen vuodesta 1990 alkaen.

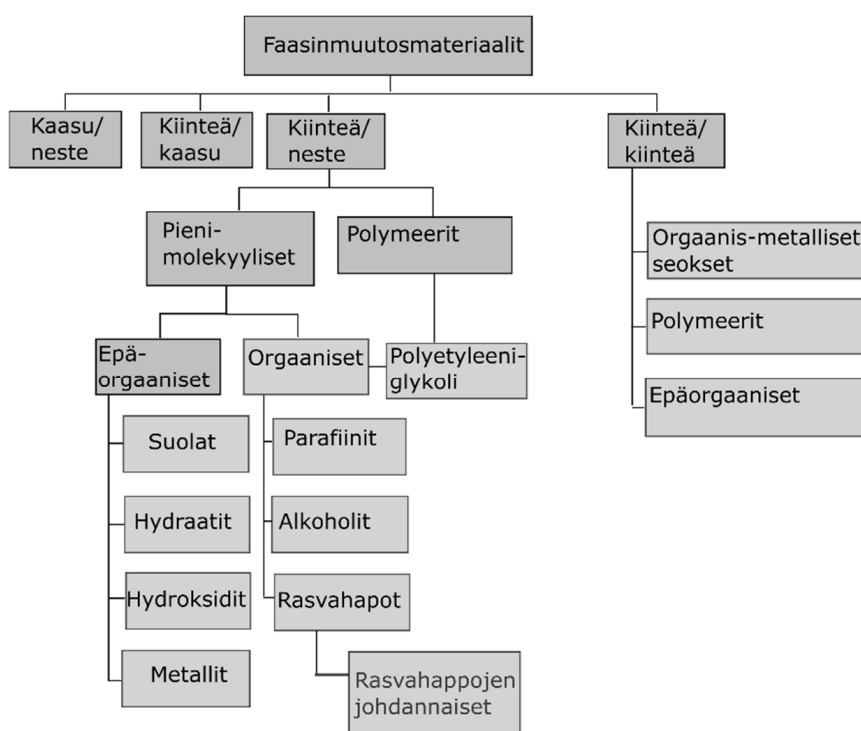
SMES-teknologian patentti- ja julkaisumäärät ovat kehittyneet melko hitaasti kuvan 14 mukaisesti ja monilla muilla teknologioilla nähty jommankumman määrän nopea kasvu puuttuu. Kypsyysasteeltaan SMES on tasolla 5–6 ja toisin kuin monilla muilla teknologioilla on Yhdysvallat vasta neljänneksi suurin julkaisija (Kiina on johtava maa julkaisumäärissä). Äskettäisen katsauksen mukaan matalalämpötilaisia SMES-varastoja on jo saatavilla, mutta korkealämpötilaisten kustannukset ovat vielä liian korkeita [38]. Tälle teknologialle onkin ominaista se, että suprajohtava kela on kryogeenisessä lämpötilassa ja jäähdytyslaitteeseen liittyy häviötä, vaikka itse kela on lähes häviötön. Esimerkiksi vuonna 2021 on julkaistu osittaisia tutkimustuloksia ranskalaisen BOSSE-hankkeen osalta, jossa on tavoitteena tehdä maailmanennätys kelan energianvarastointimäärässä.



Kuva 14. Suprajohtaviin magneettisiin energiavarastoihin (SMES) liittyvien patenttien ja tiedejulkaisuiden määrän kehittyminen vuodesta 1990 alkaen.

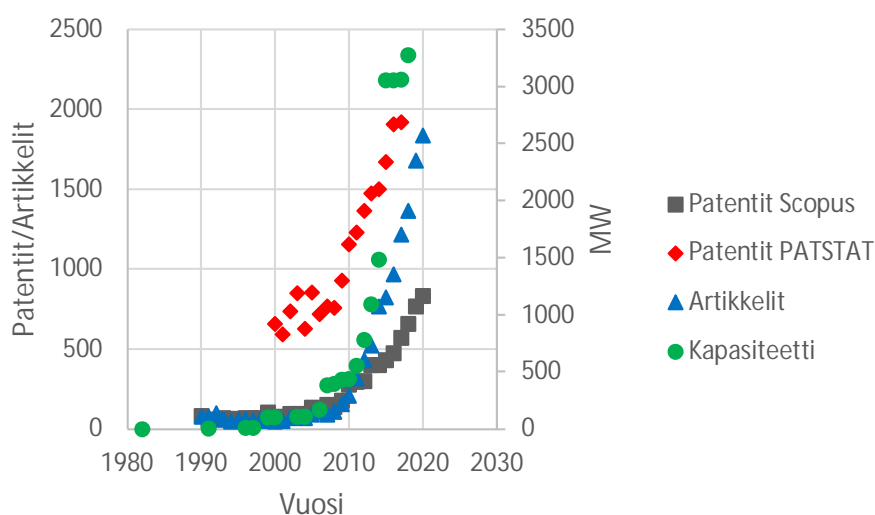
3.4.5 Termiset varastot

Verkkoon asennetun kumulatiivisen lämpövarastokapasiteetin kehitys on ollut nopeaa vuoden 2010 jälkeen, kuvan 15 mukaisesti. Tähän kokonaisuuteen kuuluu sekä kiinteitä varastoja kuten jää, betoni ja kivi että vesivarastoja. Patenttietokantojen välillä on selkeä ero määrissä, mutta yleiset trendit näyttävät nopeaa kasvua. Myös tutkimusjulkaisuiden osalta on havaittavissa samalla ajanjaksolla vastaavaa trendiä. Teknologian elinkaaren osalta tuntuvat (sensible) lämpövarastot näyttävät siirtyneen kypsymisvaiheeseen, jota myös tukee TRL-tason 9 maininnat kirjallisuudessa. Koska tuntuvat lämpövarastot lasketaan kirjallisuudessa pääosin kypsäksi teknologiaksi, tarkastellaan seuraavassa tarkemmin vielä kypsymisvaiheessa olevia faasinmuutosmateriaaleja, joihin kuuluu kuvan 15 mukaisesti useita erilaisia vaihtoehtoja, joista kiinteä-neste muutos on usein käytännöllisin.

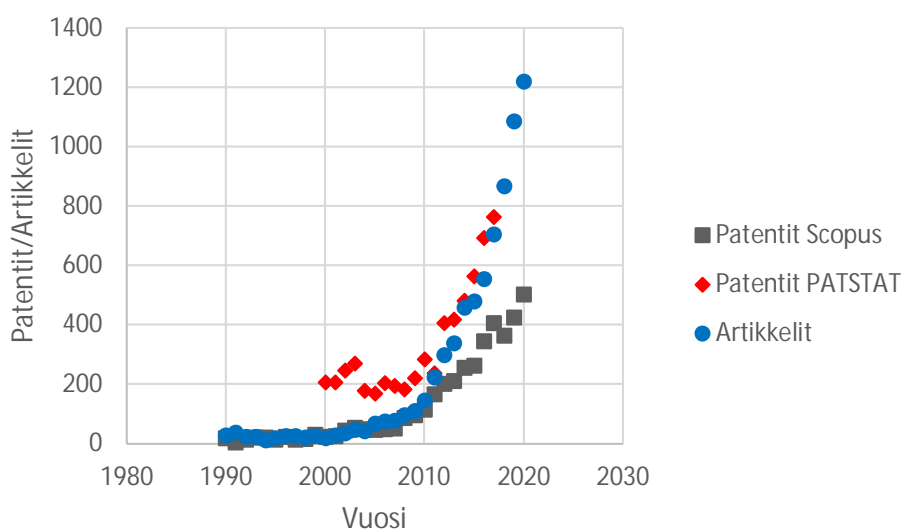


Kuva 15. Faasinmuutosmateriaalien jaottelu faasimuunnosten perusteella.

Faasinmuutosmateriaalien osalta voidaan havaita kuvassa 17 samanlaista trendiä kuin yleisemminkin lämpövarastoilla. Patentti- ja julkaisumäärät ovat kuitenkin hieman matalampia, toisaalta vielä TRL-tasoilla 4–8 oleva teknologia avaa mahdollisuuksia nykyistä suuremmille T&K-panostuksille tulevaisuudessa. Kaiken kaikkiaan lämpövarastoille on ennustettu kapasiteetin kaksinkertaistumista vuosien 2016 ja 2023 välille ja kasvun odotettiin tapahtuvan erityisesti utility tasolla. Kun katsotaan kuvan 16 verkkoon liitettyä varastojen kapasiteettiä, voidaan havaita, että tarkastellun viimeisen seitsemän vuoden aikana kapasiteetti on lähes kuusikertaistunut. Esiitetty data antaa hyvän perustan olettaa, että lämpövarastojen osalta kasvu voi olla merkittävää jatkossakin. Lämpövarastojen puolesta puhuu myös se, että niiden kustannukset ovat kilpailukykyisiä muihin varastoihin verrattuna. Tämä näkyy myös suomessa siinä, että tällä hetkellä on useampi suuri lämpövarastohanke joko valmisteilla tai rakenteilla. Myös markkinoilla on useita yrityksiä, jotka toimittavat lämpövarastosovelluksia varten räätälöityjä materiaaleja: PCM products, Rubitherm, Pluss, Axiotherm, Microtek, Va-Q-tec, Croda, Puretemp, Global-e-systems, Ruhr tech, Sunamp, S.lab, Sasol, ISU chemical.



Kuva 16. Lämpövarastoihin liittyvien patenttien ja tiedejulkaisuiden määrän kehittyminen. Lisäksi kuvassa esitetään verkkoon asennetun kumulatiivisen kapasiteetin kehitys.



Kuva 17. Latentteihin faasinmuutosmateriaaleihin liittyvien energiavarastojen patenttien ja tiedejulkaisuiden määrän kehittyminen.

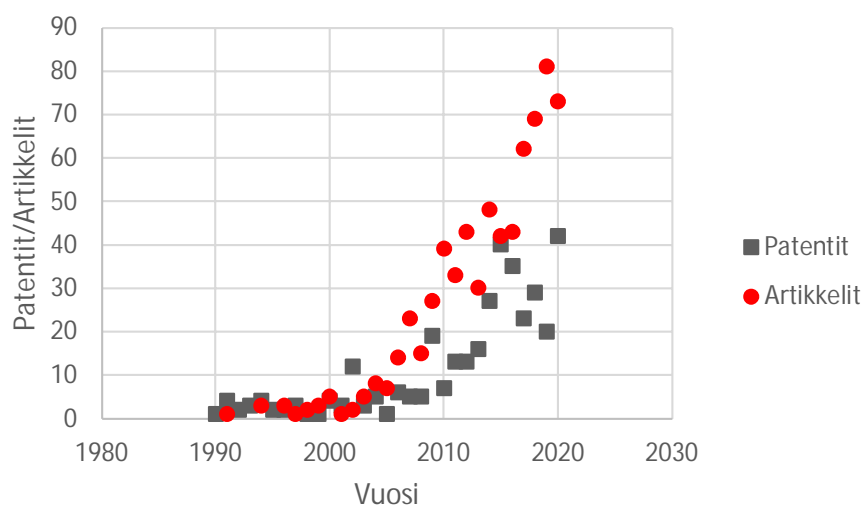
Käytännön toimissa lämpövarastoa valittaessa on otettava huomioon muun muassa seuraavat reunaehdot:

- Energia- ja tehovaatimukset
- Lämpötila-alue
- Rajoitteet varaston ulkomitoille
- Energiatiheys
- Haluttu lämmönsiirtoneste tai –kaasu
- Turvallisuus (paineistus, palaminen, myrkyllisyys)
- Kustannukset
- Korroosio
- Materiaalien kestävyys

Toisaalta uusien lämpövarastomateriaalien käyttöönotossa on huomioitava, että:

- Materiaalin ominaisuudet voivat muuttua lämpötilarasituksen takia, tai syklisessä käytössä
- Yleistetyt materiaalityyppien ominaisuudet eivät päde kaikille materiaaleille
- Materiaalien testaaminen on tärkeää

Nesteytetyn ilman varastojen tutkimusartikkelien määrä on kasvanut tasaisesti vuosituhatien alkupuolelta saakka hieman nopeammin kuin patenttien määrä (kuva 18). Molempien volyymit ovat kuitenkin verrattain matalia. Patenttien osalta on myös hyvä huomioida, että vuonna 2011 otettiin käyttöön ensimmäinen pilot-laitos Englannissa, jonka jälkeen patenteja tuli kiihtyvällä tahdilla vuoteen 2015, jolloin toinen pilot-laitos ja esikaupallinen demolaitos valmistuivat myös Englantiin. Sen jälkeen patenttien määrän kasvu on taittunut vuoden jälkeen, joka voi tarkoittaa sitä, että sopivan avainteknologian löytyessä patenttien määrä voi jälleen lähteä kasvuun. Tutkimustoiminnassa patenttien määrän kasvun hidastuminen ei näy, joten on oletettavaa tutkimuksen jatkuvan jopa kasvavissa määrin. Tutkimus on keskittynyt Yhdysvaltojen lisäksi erityisesti Yhdistyneisiin Kuningaskuntiin (UK) sekä Japaniin. Melko maltillisten T&K-panostusten sekä TRL-tason 5–7 kehitysasteen ja esimerkiksi kohtuullisen hyötysuhteen sekä kohtuullisten kustannusten perusteella, teknologialla on syytä olettaa olevan hyvä potentiaali kasvaa suuremmaksi tulevaisuudessa.



Kuva 18. LAES teknologiaan liittyvien energiavarastojen patenttien ja tiedejulkaisuiden määrän kehittyminen.

3.5 Energiavarastojen päästö- ja kestävyystarkastelut

Kirjallisuudesta löytyy kohtalainen määrä eri varastoteknologioiden kestävyystarkasteluja, mutta etenkin uusimpien teknologioiden kohdalla esiintyy vielä puutteita tieteellisessä tiedossa. Teknologioita on kestävyuden (sustainability) lisäksi mahdollista myös vertailla esimerkiksi päästökertoimien avulla. Yleisesti lämpövarastoilla on matalimmat ominaispäästökertoimet, mutta esimerkiksi akkujen hyvä potentiaali on syytä mainita. Ominaispäästöihin vaikuttavat valmistuksenkin aikana tulleet päästöt, jolloin esimerkiksi valmistusmaalla voi olla vaikutusta tuloksiin.

Kestävyystarkasteluissa sekä PHES että lämpövarastot pärjäävän ajoittain hyvin, mutta tulokset voivat vaihdella kohtuullisen paljonkin [39, 40]. Akkuteknologioiden osalta yleensä Li-lon-akut pärjäävät lyijyakkuja paremmin ja toisaalta myös NaS-akut sijoittuvat kohtalaisen hyvin arvioinneissa. Yksi vertailuissa heikoimmin pärjäävistä teknologioista on SMES. On myös hyvä huomata, että teknologioiden kypsyydellä on vaikutusta kestävyys-rankingeissa, jolloin vähemmän kypsät (esim. NaS-akut ja Zn-Br-virtausakut) mutta kuitenkin kohtalaisesti pärjäävät teknologiat omaavat potentiaalia kohti parempia sijoituksia jatkossa.

4 Etelä-Karjalan energiavarastoihin liittyvä yritys- ja T&K-toiminta

4.1 Nykytila

Etelä-Karjalassa toimii Greenreality network, jossa on mukana useita energiavarastoalaan joko suoraan tai välillisesti liittyviä toimijoita. Joukosta löytyy sekä uusien teknologioiden ja ohjelmistojen kehitykseen, että toisaalta myös loppukäyttöön liittyviä yrityksiä. Useiden vielä kypsymissä vaiheissa olevien varastointitekologioiden osalta on merkittävää osaamista saatavilla. Lämpövarastoihin liittyen Lappeenrannassa on jo olemassa liiketoimintaa (Elstor) sekä tutkimustoimintaa ja lisäksi Lappeenrantaan on suunnitteilla 21 GWh lämpövarastohanke [14]. Toisaalta esimerkiksi Power-to-X-prosesseihin liittyen tehdään T&K-toimintaa useissa LUTin tutkimusryhmissä ja Joutsenoon on tehty toteutettavuusselvitys Power-to-X pilot-laitoksesta LUTin ja laajan yrityskonsortion yhteistyönä [41]. Viimeisimpänä Lappeenrantaan on uutisoitu suunniteltavan 100 miljoonan euron uusiutuvan metanolin tuotantolaitosta, jolle on myönnetty 35 miljoonan euron investointituki [42]. Etelä-Karjalassa on myös vahvaa suurnopeustekniikkaan liittyvää osaamista sekä yritys- että tutkimuskentässä, jota voidaan hyödyntää useissa varastosovelluksissa (esim. ACAES ja pumped heat). Esimerkiksi Aurelia Turbinesin kaasuturbiineja voidaan käyttää joko vedyllä tai metaanilla, joita voidaan tuottaa osana Power-to-gas-prosessia. Akkupuolella on myös aiheellista mainita akkuteknikoihin keskittynyt professuuri LUT Yliopistossa ja sen tuomat mahdollisuudet. Myös kehityksenä alkuvaiheissa olevilla yli- ja transkriittisiin hiilidioksidiprosesseihin perustuvilla energiavarastoilla on LUT Yliopistolla osaamista. Lisäksi painovoimaisten energiavarastojen kehittämiseen on alueella soveltuvaa osaamista saatavilla. Ei ole myöskään syytä unohtaa Imatran pitkää historiaa vesivoimassa ja sen tuomaa osaamista, jota on mahdollista hyödyntää PHES-laitosten kehittämisessä.

Uusia pilotteja suunniteltaessa on myös hyvä arvioida mahdollisia rakennusprojektien kestoja. Aneke ja Wangin katsauksen [43] ainoa 2000-luvulla toteutettu PHES-rakennushanke kesti 7 vuotta, vauhtipyörähankkeet kestivät kaikki yhden vuoden ja 2011 vuonna Teksasissa aloitetun CAES-hankkeen rakentaminen kesti yhden vuoden. Akkuvastojen osalta rakennusajat olivat yleisesti matalimpia pääosin kuukausien rakennusajoilla. Lämpövarastojen osalta rakennushankkeiden kestot olivat yleisesti vuoden luokkaa. Toki merkittävää louhintaa vaativat projektit vievät tätä pidempään, esimerkiksi Vantaan 90 GWh:n kausivaraston

rakentaminen on arvioitu ajoittuvan vuosille 2022–2026. Toisaalta pienen kokoluokan modulaaristen varastojen osalta projektien oletetut kestot voivat olla mainittua lyhyempiä.

Hankkeen alussa toteutettiin LAB Ammattikorkeakoulun johdolla Etelä-Karjalaisten yritysten energiavarastoinnin tarpeiden ja alalla toimimiseen liittyvän mielenkiinnon selvitystyö, jossa hyödynnettiin myös Greenreality networkia. Selvitys tehtiin laajemmin ensiksi kyselytutkimuksena ja sitä tarkennettiin haastatteluilla. Kyselytutkimuksen alussa yrityksille annettiin lisäksi tiivistetty perusmateriaali energiavarastoista aiheeseen perehtymistä varten. Keskeisenä tuloksena voidaan todeta, että alueella on runsaasti mielenkiintoa pilotointia kohtaan. Alueellisesti näyttäisi olevan yleisesti tarvetta ja mielenkiintoa etenkin lämmön varastoinnille sekä lämpöpumpuille. Lämpövarastot mainittiin kahdeksan toimijan kohdalla ja korkealämpötilavarastot neljän kohdalla (kysely lähetettiin 51 toimijalle). Sähkön varastointi nousi esille kolmella toimijalla ja lämpöpumput yhdeksällä toimijalla. Alueellisesti oli myös mielenkiintoa järjestelmien kehitykseen yhteensä neljällä toimijalla ja rakennusautomaatio tai energiankäytön optimointi nousi esiin kuudella toimijalla. Korkealämpötilalämpöpumppujen suuntaan kiinnostusta ilmaisi kolme yritystä. Yleisellä tasolla teknologian kehityksestä kiinnostuneita oli kuusi. Huomionarvoista on myös, että aurinkoenergian mainitsi yhteensä seitsemän toimijaa. Yhteenvetona voidaan todeta, että tutkimuksen perusteella alueellisesti löytyy mielenkiintoa energiavarastopiloteille ja toisaalta myös halukkuutta kehittää teknologioita sekä komponentti- että järjestelmätasolla.

4.2 SWOT

Swot analyysi on toteutettu keräämällä ensiksi projektin sisäisesti ehdotuksia ja palautetta sekä ohjausryhmältä että projektissa työskenteleviltä. Tämän jälkeen hankkeen vuosiseminaarissa esitettiin tammikuussa 2022 alustavan analyysin tulokset ja avattiin seminaarin osallistujille mahdollisuus kommentointiin. Lopullinen SWOT-analyysi esitetään taulukossa 4.

Etelä-Karjalassa on energiavarastoihin liittyen aloitettu useita myöhemmin tässä raportissa suositeltuja toimia, ja ala on kehittynyt viime vuosina nopeasti. Tässä LUT Yliopistolla on ollut keskeinen rooli muun muassa osaajien kouluttajana, tutkimuksen toteuttajana sekä kansallisena ja kansainvälisenä verkostoitujana. LUT on esimerkiksi mukana Climate Leadership Coalitionissa (CLC), joka on Euroopan suurin voittoa tavoittelematon ilmastoon liittyvä liiketoimintaverkosto. Toisaalta alueella on useita hyviä esimerkkejä, jossa tutkimuksesta on saatu tehtyä liiketoimintaa esimerkiksi suurnopeustekniikan alalta, joten käytännön osaaminen ideasta tuotteeksi on alueella olemassa. Myös paikallisia investoijia on mahdollista löytää ja yhteistyö esimerkiksi Lappeenrannan kaupungin ja LUT Yliopiston kesken on toimivaa. Etelä-Karjalalla onkin useita vahvuuksia, joista lisäksi kansallisessa vetytiekartassa mainittiin keskeinen osa Suomen vetyteollisuuden arvoketjussa. Tämä voidaan nähdä myös mahdollisuutena toisaalta Power-to-X-prosesseissa ja toisaalta myös pilot/demolaitosten alustana.

Useiden vahvuuksien ohella Etelä-Karjalalle tunnistettiin selkeitä heikkouksia. Maakunnan sijainti sisämaassa aiheuttaa sen, että esimerkiksi syväsatamaan on kohtalaisesti etäisyyttä. Toisaalta maakunta sijaitsee syrjässä Keski-Euroopasta ja tarve sujuvalle yhteydelle Helsinki-Vantaan lentokentälle on tärkeä. Sujuva yhteys käsitetään tässä raportissa siten, että Etelä-Karjalasta olisi mahdollista pystyä käymään Keski-Euroopassa tarpeen tullen ilman yöpymisiä, jonka aikaiset ja myöhäiset liityntäkuljetukset mahdollistavat. Myös energiavarastoalan toimijoiden organisoituminen on vasta alussa ja yhteistyön kaikkia mahdollisuuksia ei vielä hyödynnetä täysimittaisesti, mikä nähdään toisaalta myös mahdollisuutena ja uhkana. Vaikka

Etelä-Karjalassa on paljon yrittäjyyttä, on kasvuyrityksistä puutetta. Toisaalta myös veturiyritysten vähäisyys johtaa siihen, että yhteistyökumppaneita on haettava, joko muualta Suomesta tai ulkomailta. Tämä puute voidaan toisaalta nähdä myös mahdollisuutena. Raja-alueen läheisyys vaikuttaa myös negatiivisesti uusien tuulipuistojen rakentamiseen ja välillisesti myös puistojen yhteyteen muodostuviin mahdollisiin energiavarastoinvestointeihin.

Alueellisesti yksi keskeisistä mahdollisuuksista on vahva asema alan koulutuksessa eri koulutusasteilla, missä LUT Yliopistolla on keskeinen rooli. Kansallisella tasolla voidaan tällä hetkellä nähdä eri laajuisia kursseja sekä valmistautumista tulevaisuuden osajien koulutukseen. Esimerkiksi LUT Yliopistolla on tarjolla kursseja, joilla käsitellään joko suoraan tai välillisesti energiavarastoihin liittyviä aihepiirejä. Yliopistolla on myös aihepiiriin liittyviä professuureja. Kansallisella tasolla on tarjottu energiavarastoihin liittyviä kursseja ainakin LUTin, Aalto yliopiston, Vaasan yliopiston ja Tampereen yliopiston toimesta osana verkostoyliopisto Fitechiä. Tampereen yliopisto aloittaa myös syksyllä 2023 energiamurroksen DI ohjelman. Energiavarastojen perusteiden opetusta tarjotaan ammattikorkeakouluista ainakin XAMKissa. Lisäksi Satakunnan ammattikorkeakoulussa valmistui vuonna 2022 oppinäytetyö, jossa selvitettiin energia-alan asentajien koulutustarpeita [44].

Uusissa teollisissa sovelluksissa esimerkiksi Stora Enson Sunilan tehtaalla on valmistettu pilot-laitoksessa puupohjaisia akkumateriaaleja ja tämä voi avata uusia mahdollisuuksia myös Etelä-Karjalaan. Toisaalta vahva kansallinen ja kansainvälinen yhteistyö sekä osallistuminen päätöksen tekoon ovat keskeisessä asemassa vahvan energiavarastoklusterin rakentumisessa ja puutteet näissä voidaan nähdä uhkina. Tehdyn analyysin perusteella Etelä-Karjalaisen osaamisen kannalta on useita potentiaalisia teknologioita, joihin on mahdollista panostaa. Näiden lisäksi on myös syytä korostaa tarvetta kestävyystarkasteluille sekä kiertotalouden osaamiselle, joihin liittyen on osaamista eri toimijoilla. Pilot- ja demomahdollisuuksien tarjoaminen uusille teknologioille nähdään myös hyvänä mahdollisuutena toisaalta osaamisen kehittämiseksi, mutta myös uusille investoinneille, joiden puute etenkin teollisessa mittakaavassa nähdään uhkana tulevaisuudessa.

Muita tunnistettuja uhkia ovat esimerkiksi se, että Etelä-Karjalan edustajat eivät ole mukana päättävissä elimissä sekä Suomessa, että kansainvälisesti. Tämä uhka liittyy osaltaan maantieteelliseen sijaintiin, jolloin verkostoituminen on keskeistä näkyvyyden kannalta. Lisäksi puutteet pitkäjänteisessä tuotekehityksen rahoituksessa voidaan nähdä uhkana, etenkin kun luodaan uutta teknologiaa voi polku ideasta tuotteeksi olla melko pitkä. Osaavan työvoiman siirtyminen pois alueelta nähdään myös todellisena uhkana, mikäli työvoiman tarve ja tarjonta eivät kohtaa. Lopuksi on hyvä tunnistaa myös se, että suuret toimijat voivat saada pienempien tekijöiden etumatkan kiinni resurssiensa ansiosta.

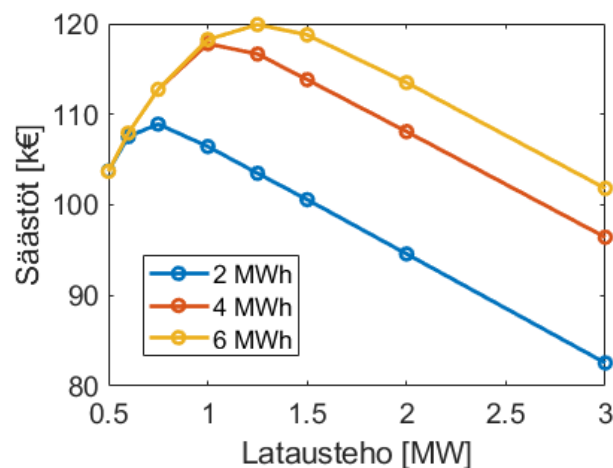
Taulukko 4. Etelä-Karjalan energiavarastointiin liittyvä SWOT-analyysi.

| Vahvuudet | Heikkoudet |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Etelä-Karjala on tärkeä osa Suomen vetyteollisuuden arvoketjua • Osa suositelluista toimista tehty tai aloitettu • Alueella olevat pilotit ja suunnitelmat uusille piloteille/investoinneille • Paikallinen energiavarastojen osaaminen ja LUTin vahva rooli • Kyky kehittää uusia teknologioita ideasta tuotteeksi • Paikallisia investoijia ideoille • Osallistuminen kansallisiin ja kansainvälisiin verkostoihin • Yhteistyö Lappeenrannan kaupungin ja LUTin kesken | <ul style="list-style-type: none"> • Sijainti sisämaassa ja syrjässä Keski-Euroopasta • Yhteys Keski-Eurooppaan ei ole riittävän kehittynyt • Energiavarasto-alan toimijoiden organisoituminen on vasta kehittymässä • Veturiyritysten puute • Rajan vaikutus tuulipuistoihin ja edelleen välillisesti energiavarastoihin • Kasvuyritysten vähäisyys |
| Mahdollisuudet | Uhat |
| <ul style="list-style-type: none"> • LUTin vahva rooli alan koulutuksessa ja laajemmin alueen vahva rooli koulutuksessa eri koulutusasteilla • Puupohjaiset akkumateriaalit • Energiavarasto-alan vahvempi organisoituminen • Vahva kansallinen ja kansainvälinen yhteistyö sekä osallistuminen päätöksen tekoon • Useita teknologioita, jotka ovat paikallisen osaamisen näkökulmasta potentiaalisia • Kestävyydestarkasteluiden sekä kiertotalouden osaamisen tarve • Pilot- ja demomahdollisuuksien tarjoaminen toimijoille • Kasvu- ja veturiyritysten löytyminen • Biopohjaisen CO₂:n saatavuus sähköön perustuvien hiilivetyjen synteesisissä | <ul style="list-style-type: none"> • Ei mukana päättävissä elimissä Suomessa ja kansainvälisesti • Alkuvaiheen tuotekehitykseen ei saada riittävästi rahoitusta riittävän pitkäksi ajaksi (5–10 vuotta ideasta tuotteeksi) • Osaajien siirtyminen ulkomaille, muihin maakuntiin ja pääkaupunkiseudulle • Teollisuuden investointien puuttuminen • Alueellisen yhteistyön hidas käynnistyminen • Suuret toimijat voivat saada teknologisen etumatkan kiinni • Rajan läheisyys |

5 Energiavarastopilotit

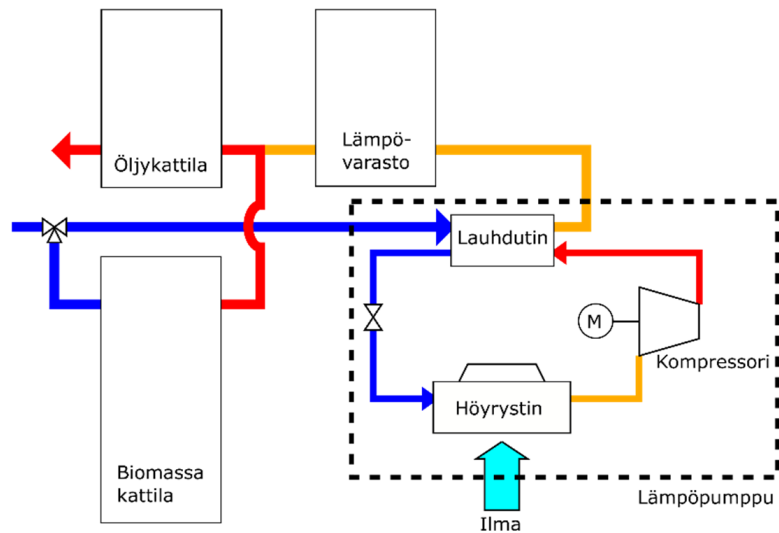
5.1 Esimerkkitaupukset

Tässä kappaleessa esitetään tiivistetysti kahdelle eri pilot-kohteelle tehtyjen mallinnusten tuloksia. Tulosten avulla pyritään demonstroimaan erilaisten energiavarastojen vaikutusta käytännön sovelluksien kustannuksiin. Ensimmäinen mallinnettu kohde on lämpövarasto, jossa käytetään suoraa sähkölämmitystä. Sähkön hinta- ja säätiedot ovat vuodelta 2020. Järjestelmän tavoitteena on hyödyntää ajoittain edullista sähkön hintaa ja toisaalta vähentää vaihtoehtona olevaa maakaasun polttamista ja laskea sekä päästöjä että kustannuksia. Kuvassa 19 esitetään keskeisiä tuloksia eri kokoisille lämpövarastoille (2–6 MWh). Voidaankin havaita, että varaston koon ja lataustehon kasvattaminen suurentaa lämpövaraston tuomia säästöjä, mutta toisaalta samaan aikaan nouseva tehomaksu (1000 €/MW/kk) syö säästöjä. Myös varaston kasvattaminen nostaa optimaalista lataustehoa kuvan mukaisesti.



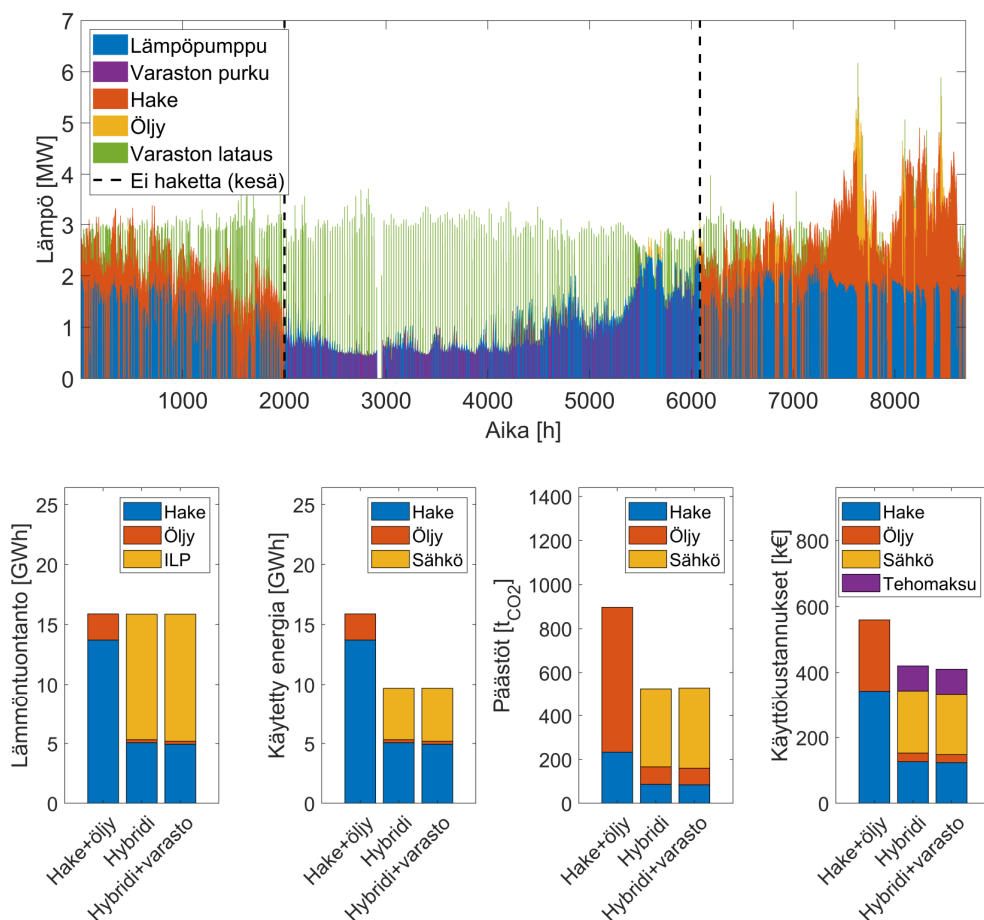
Kuva 19. Suoralla sähkölämmityksellä toimivan lämpövaraston tuomat säästöt lataustehon funktiona eri kokoisille lämpövarastoille.

Toisena pilot-kohteena käsitellään kuvassa 20 olevaa hybridilämpölaitosta, jossa on biomassakattila, ilmalämpöpumppu, lämpövarasto ja öljykattila. Biomassakattilan varalämmönlähteenä käytetään öljyä. Jos lämpöpumpun tuottama lämpötila ja/tai teho ei riitä, loput lämmöstä tuotetaan polttamalla. Järjestelmän tavoitteina ovat kustannusten, päästöjen ja polttamisen vähentäminen, biomassan säästö, öljynkäytön vähentäminen, sekä lämmityksen sähköistys. Järjestelmän optimoinnilla pyritään vastaamaan kysymyksiin: Milloin poltetaan ja mitä, milloin käytetään lämpöpumppua, milloin ladataan ja puretaan varastoa? Optimoinnin tekemiseksi on käytettävissä tuntikohtainen mittausdata (Lämmöntarve, lämpötilataso, lämmöntuotanto polttoaineittain, ulkolämpötila) ja tiedetään, ettei biokattilan kapasiteetti yksissään ole riittävä. Laitoksen käyttö on optimoitu tuntikohtaisesti polttoaineiden ja sähkön käyttökustannusten perusteella.



Kuva 20. Pilot-kohteen hybridilämpölaitoksen prosessikenttä.

Kuvassa 21 esitetään hybridilämpölaitoksen toiminta yhden vuoden ajalta ja laitoksen tunnuslukuja erilaisissa käyttötiloissa. On myös hyvä huomioida, että hake ja öljykattilat ajetaan alas kesän ajaksi. Tuloksista voidaan havaita, että ilmalämpöpumpulla voidaan tuottaa merkittävä osa lämmöntarpeesta eikä varastolla ole tässä kohtaa vaikutusta järjestelmän tunnuslukuihin, lukuun ottamatta pientä laskua käyttökustannuksissa. Ilmalämpöpumpun avulla voitiin tässä tapauksessa laskea päästöjä noin 40 % ja toisaalta myös käyttökustannukset laskivat merkittävästi.



Kuva 21. Hybridilämpölaitoksen tuntitasoinen toiminta vuoden aikana sekä järjestelmän tunnusluvut eri käyttötavoilla.

5.2 Muita potentiaalisia pilotteja

Etelä-Karjalassa on hankkeen alussa tehdyn selvityksen perusteella runsaasti mielenkiintoa energiavarastojen pilotointia kohtaan. Erityisesti lämpövarastot nousivat esille tuloksista ja esimerkiksi Lappeenrannan Mustolassa pilotoidaankin uudenlaista lämpöakkua [45]. Tässä kappaleessa pyritään lisäksi laajentamaan analyysiä myös muihin erilaisiin mahdollisuuksiin maakunnan alueella.

Yleisesti voidaan todeta, että pienen kokoluokan pilotteja ja koelaitteita voidaan testata esimerkiksi LUT Yliopiston alueella [46] ja laboratorioissa. Toisaalta myös Mustolan kaltaiset paikallisen lämpöverkon pilotit tarjoavat hyviä mahdollisuuksia uusien teknologioiden testaamiseen. Näitä voivat olla lämpövarastojen lisäksi esimerkiksi erilaisten lämpöpumppuratkaisujen kytkeminen kaukolämpöverkkoon. Myös paineistetun ilman varastojen ACAES pilotointi on yksi potentiaalinen vaihtoehto. Alueella on huomattavaa osaamista teknologian keskeisillä osa-alueilla, kuten turbokoneissa, sähkökoneissa sekä lämpövarastoissa. Erityisesti pienemmän mittakaavan ACAES-pilotti voi olla varteen otettava vaihtoehto, mikäli ilma varastoidaan maanpäälliseen paineastiaan. Alustavassa selvityksessä Etelä-Karjalasta ei noussut esille yhtä selkeää ilmavarastoksi soveltuvaa suurempaa luolaa.

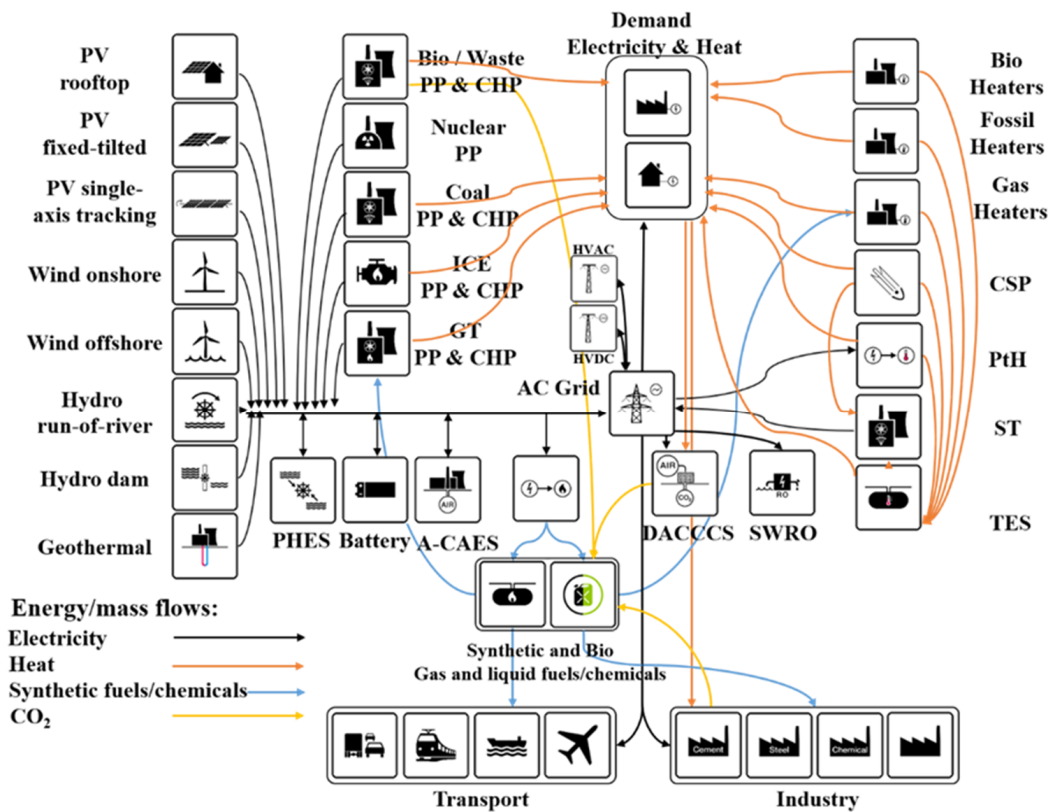
Toisaalta on myös syytä mainita ideana mahdollinen Vuoksen käyttö PHES-vesivarastona, jolloin alavirrasta pumpattaisiin vettä ylävirtaan takaisin Vuokseen varastointitarpeen aikana. Tämän vaihtoehdon kohdalla on kuitenkin syytä huomioida esimerkiksi mahdolliset haasteet vesien ja muun ympäristön suojelun näkökulmasta.

6 Etelä-Karjalan energiajärjestelmä

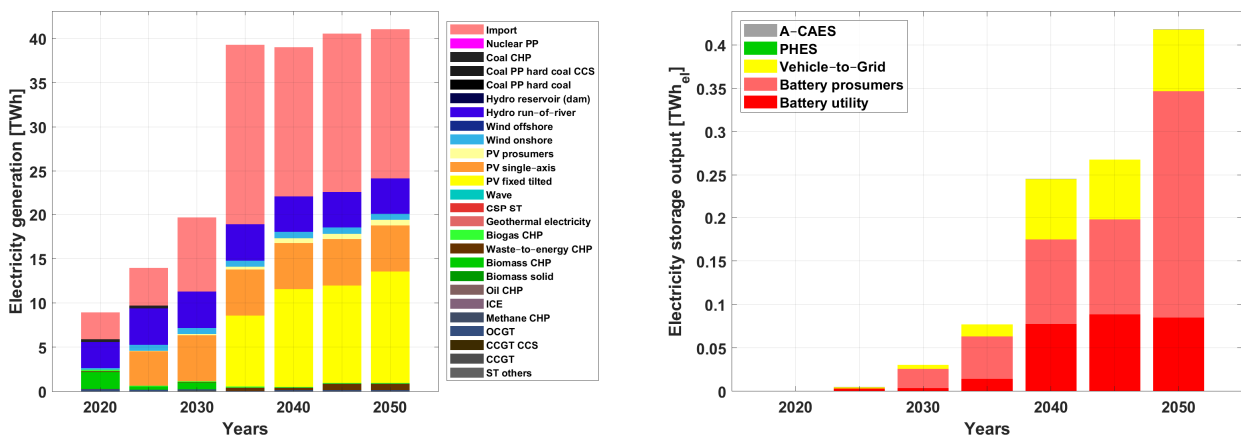
Tässä kappaleessa esitetään kaksi näkemystä siitä, miltä Etelä-Karjalan/Kaakkois-Suomen energiajärjestelmä voi näyttää tulevaisuudessa, olettaen kasvavissa määrin sekä lämpöpumppuja että lämpövarastoja. Ensimmäisessä skenaariossa Kaakkois-Suomessa on runsaasti aurinkosähköä ja toisessa skenaariossa tuulivoiman osuus on noussut merkittävästi. Mallinnus on tehty LUT Energy System Transition-mallilla (LUT-ESTM) [47], jossa mallinnetaan koko Suomen energiajärjestelmää jakamalla maa seitsemään toisiinsa kytkettyyn alueeseen, jonka yhtenä osana on Kaakkois-Suomi. Käytettyä mallia on visualisoitu Kuvassa 22. Malli huomioi sekä sähkön, lämmön, kuljetuksen että teollisuuden osuudet tunnin aikaresoluutiolla.

Mallinnuksen keskeisiä tuloksia esitetään Kaakkois-Suomen osalta Kuvissa 23–27. Mallinuksissa on käytetty lähtökohtana vuoden 2020 tilannetta. Sähköntuotannon osalta keskeinen havainto on, että alueelle tuodaan tulevaisuudessa runsaasti sähköä muualta Suomesta. Tämä tuontisähkö on maan luoteisosassa tuotettua tuulisähköä. Toisaalta tuulivoiman lisäämisellä tuontisähkön määrää voidaan vähentää. Sähkön varastoinnissa taas ennustetaan akuille suurta roolia molemmissa skenaarioissa. Lämmöntuotannossa suoran sähkölämmityksen roolin ennustetaan kasvavan merkittävästi tulevaisuudessa. Myös synteettisen vedyn ja metaanin roolin ennustetaan kasvavan tulevaisuudessa, jolloin ne toimivat keskipitkän aikavälin varastoina tasaamassa teollisuuden energian tarvetta. Tuulivoiman määrän kasvu myös kasvattaa alueellisten vetyvarastojen kapasiteettia. Toisaalta lämpövarastoille ennustetaan lämmöntarvetta tasaavaa lyhyen aikavälin varastointiroolia ja tuulivoiman lisääntyessä korkealämpötilan lämpövarastoiden tuotantoa (output) korvataan kaukolämpövarastoilla. Asumiseen liittyvässä lämmityksessä lämpöpumppujen roolin ennustetaan kasvattavan osuuttaan riippumatta skenaariosta kuvan 27 mukaisesti.

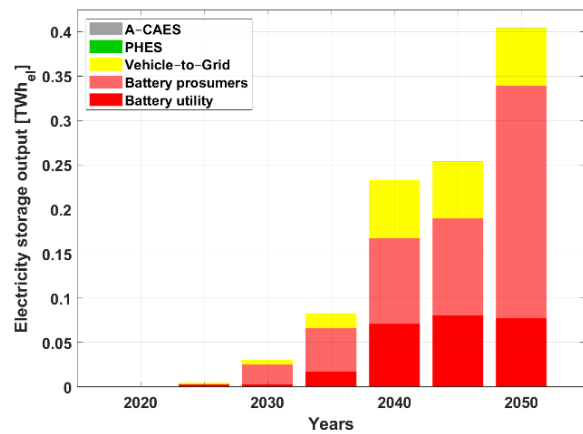
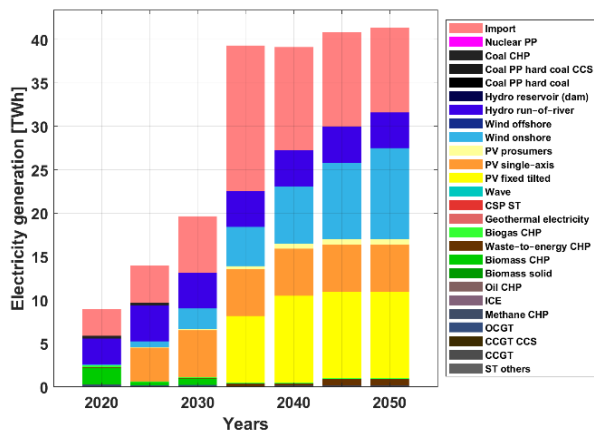
Mallinnuksen lopputuloksena Kaakkois-Suomen nettohiilidioksidipäästöt ovat alle 0.3 MtCO₂ vuonna 2035, mikä on Suomen hiilineutraaliustavoitteen mukainen.



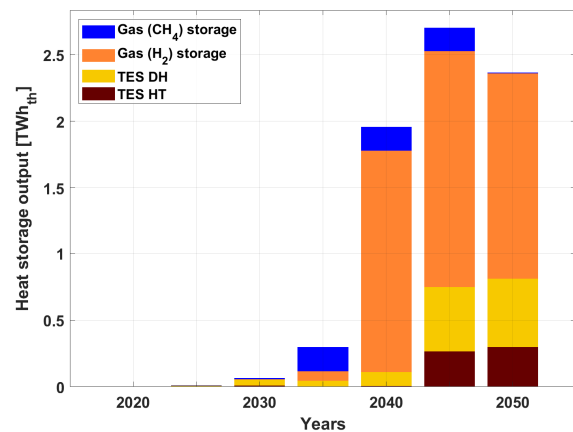
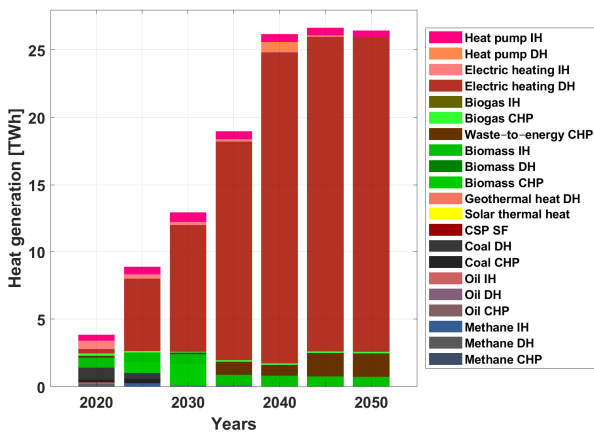
Kuva 22. LUT Energy System Transition-mallinvisualisointi.



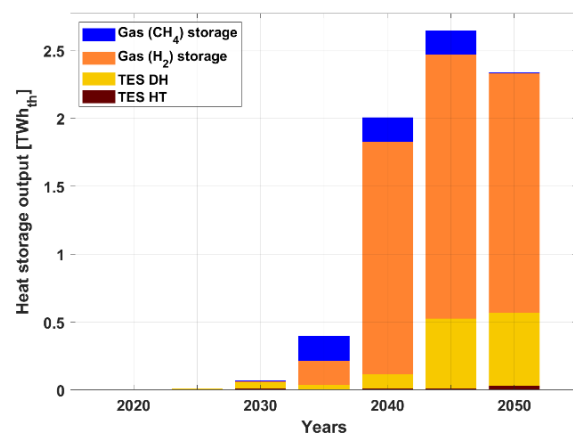
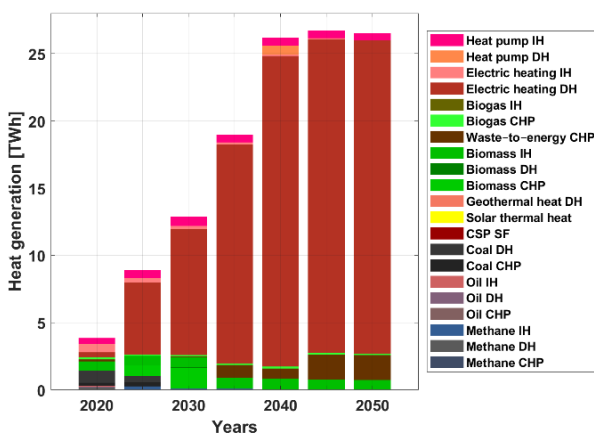
Kuva 23. Ennustettu sähköntuotanto ja varastointi ajan funktiona Kaakkois-Suomessa ilman maksimaalista tuulivoimaa alueella.



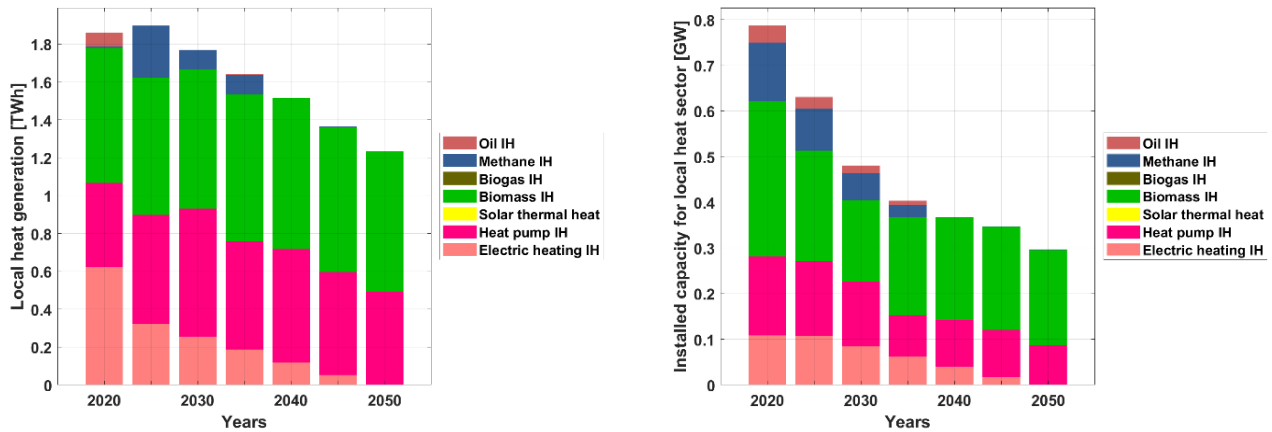
Kuva 24. Ennustettu sähköntuotanto ja varastointi ajan funktiona Kaakkois-Suomessa alueen maksimaalisella tuulivoiman tuotannolla.



Kuva 25. Ennustettu lämmöntuotanto ja varastointi ajan funktiona Kaakkois-Suomessa ilman maksimaalista tuulivoimaa alueella.



Kuva 26. Ennustettu lämmöntuotanto ja varastointi ajan funktiona Kaakkois-Suomessa alueen maksimaalisella tuulivoiman tuotannolla.



Kuva 27. Ennustettu asumiseen liittyvä lämmöntuotanto ja tuotantokapasiteetti ajan funktiona Kaakkois-Suomessa. Tulokset eivät eroa skenaarioiden välillä.

7 Suositukset

Hankkeen aikana luotiin myös suuntaviivoja lyhyen ja pitkä aikavälin toiminnalle. Alustavat suositukset esitettiin hankkeen vuosiseminaarissa tammikuussa 2022, jolloin hankkeen ulkopuolisetkin tahot saivat mahdollisuuden antaa palautetta sisältöön. Suosituksissa huomioidaan tässä hankkeessa hankitun ymmärryksen lisäksi sekä kansallisen akkustrategian että kansallisen vetytiekartan antamat suositukset. Analyysin lopputuloksena Etelä-Karjalan maakunnan alueelle suositellaan seuraavia toimia ja tavoitteita lyhyellä aikavälillä (alle 5 vuotta):

- Rahoitettu verkosto, joka auttaa erityisesti Pk-yrityksiä osallistumaan rahoitushakuihin (Business Finland, EU, ym.), mutta helpottaa lisäksi yritysten kansainvälistymistä ja yhteistyötä.
- Lyhyen ja pitkän aikavälin energiavarastoihin liittyvä koulutusstrategian luominen ja koulutuksen käynnistäminen eri koulutustasoilla
- Aktiivinen rooli kansallisissa ja kansainvälisissä verkostoissa
- Uusia pilotteja, demoja sekä T&K-hankkeita
- Uusia investointeja sekä uusiutuvaan energiaan että energiavarastoihin
- Aktiivinen tiedotus alueellisista tavoitteista ja saavutuksista
- Keski-Euroopan liikenneyhteyksien parantaminen
- Alueellisesta näkökulmasta potentiaalisimpien varastoinnin alojen löytäminen

Rahoitetun verkoston kohdalla on esimerkiksi tunnistettu, että yrityksille on tarjolla tukea Lappeenrannassa Wirman kautta. Myös kasvuhaluille yrityksille on olemassa LAB ammattikorkeakoulun Business Mill antamassa maksutonta tukea. Tässä yhteydessä rahoitetulla verkostolla tarkoitetaankin verkostoa, josta erityisesti Pk-yritykset voivat saada rahallista tukea projektihakemusten valmisteluun, mikäli jo olemassa olevat tukitoimet eivät riitä. Tämä rahoitus voisi olla kytkettynä jo olemassa oleviin verkostoihin, kuten Greenreality networkiin. Pidemmällä 5–10 vuoden aikavälillä suositellaan lisäksi seuraavia toimia ja tavoitteita:

- Johtava rooli kansallisissa ja kansainvälisissä verkostoissa
- Koulutuksen vakiinnuttaminen
- Uuden teollisen energiavarastoliiketoiminnan käynnistäminen
- Investointien määrän kasvattaminen

- T&K-toiminnan määrän kasvattaminen
- Verkoston kehittäminen vahvaksi ja ketteräksi toimijaksi

8 Yhteenveto

Tiekartan alussa toteutettiin yleiskatsaus erilaisiin energiavarastoihin sekä alan tulevaisuuden näkyymiin, joiden ennustettiin olevan hyvinkin valoisat. Tämän jälkeen keskityttiin eri energiavarastoteknologioiden T&K-trendeihin sekä hintojen kehitykseen. Analyysin avulla pystyttiin selvittämään eri teknologioiden kehitystasot sekä saatiin yleiskuva tutkimus- ja kehitystyön panostusten globaaleista määristä tiedejulkaisujen ja patenttien trendien sekä lukumäärien avulla. Saatuja tuloksia peilattiin myös alueelliseen osaamiseen ja analyysin perusteella löydettiin, että alueellisesta näkökulmasta erityisen lupaavia teknologioita ovat:

- Power-to-X
- ACAES
- Lämpövarastot
- Painovoimaiset energiavarastot
- PHES
- Yli- ja transkriittiset hiilidioksidiprosessit
- Pumped heat

SWOT-analyysin avulla arvioitiin Etelä-Karjalan alueellisia vahvuuksia, heikkouksia, mahdollisuuksia sekä uhkia energiavarastoihin liittyen. Analyysissä pyrittiin huomioimaan myös projektin aikana muuttuneet maailmanpolitiikan ja energiamarkkinoiden tilanteet. Lisäksi käsiteltiin esimerkkien avulla lämpövarastoihin ja lämpöpumppuihin liittyviä pilot-kohteiden mallinnuksia, keskusteltiin alueen potentiaalisista piloteista sekä ennustettiin Etelä-Karjalan energijärjestelmän mahdollisia tulevaisuuden muutoksia. Tiekartan lopussa annettiin lopputuloksena kahdeksan lyhyen aikavälin ja kuusi pitkän aikavälin suositusta alueellisiksi toimiksi ja tavoitteiksi.

9 Lähdeluettelo

[1] Zakeri B., Syri S., Rinne S. Higher renewable energy integration into the existing energy system of Finland – Is there any maximum limit? Energy, 2015, vol. 92, no. 3., <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.01.007>.

[2] Passila, N. Tuulivoiman tuotannon kehittyminen Suomessa, Kandidaatintyö, Lappeenrannan-Lahden Teknillinen Yliopisto, 2020.

[3] Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030. Työ- ja elinkeinoministeriö 2017.

[4] Suomen virallinen tilasto (SVT): Energian hankinta ja kulutus [verkkójulkaisu]. ISSN=1799-795X. Helsinki: Tilastokeskus. Saatavilla: <http://www.stat.fi/til/ehk/tau.html>, viitattu: 30.4.2020.

[5] Allison, T.C., Moore, J., Smith, N. R., Tom, B. and McClung, A. Overview of Grid-Scale Energy Storage Systems and Technologies. Tutorial session in ASME Turbo Expo, Phoenix, Arizona, USA, June 17-21, 2019, GT2019-92145.

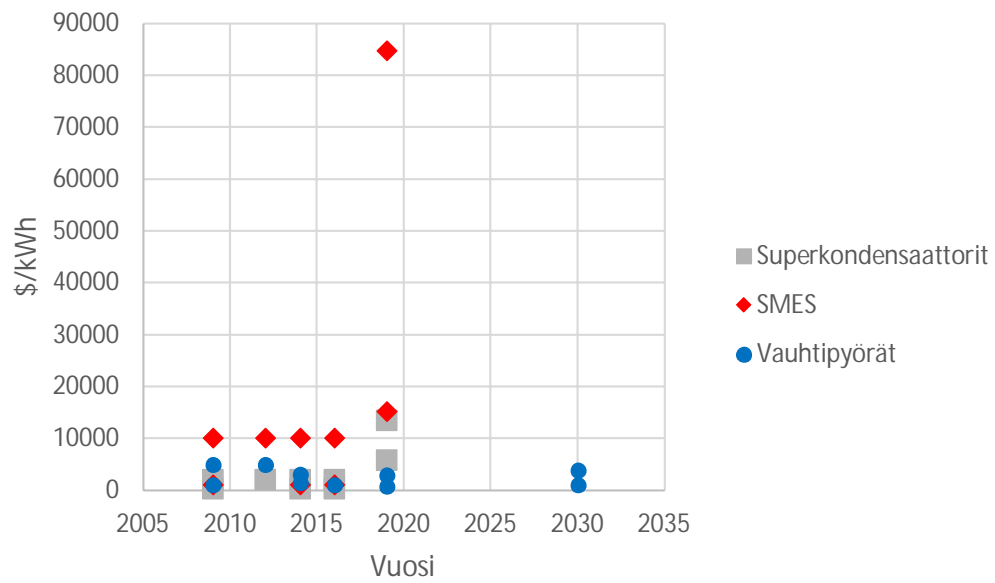
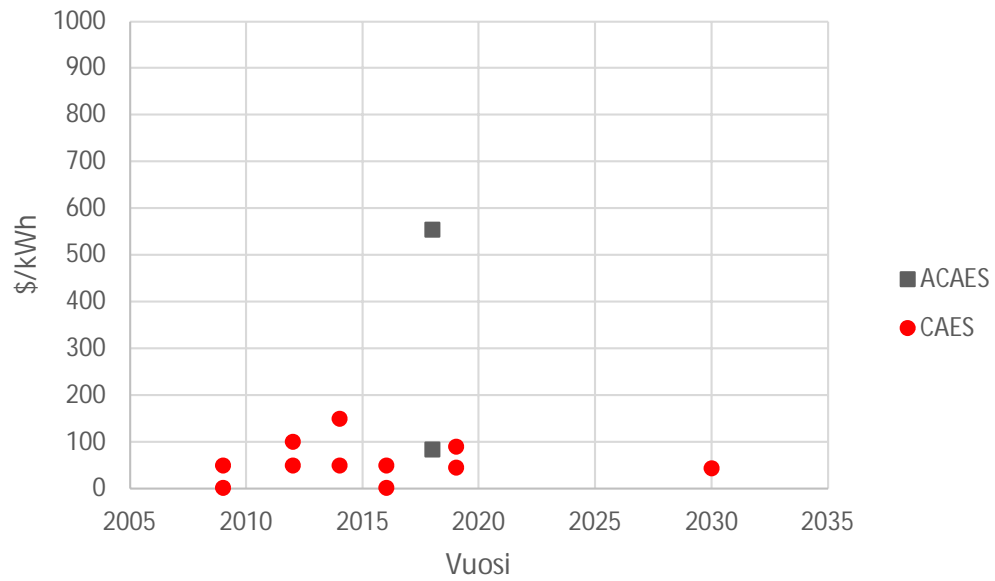
[6] Porin vanadiinintalteenottolaitoksen YVA-selvitys, saatavilla: <https://www.ymparisto.fi/criticalmetalsporiYVA>, viitattu 14.2.2022.

- [7] Uutinen Harjavallan akkumateriaalitehdashankkeesta, saatavilla: <https://yle.fi/uutiset/3-11993129>, viitattu 14.2.2022.
- [8] Uutinen Harjavallan vihreän vedyn hankkeesta, saatavilla: <https://yle.fi/uutiset/3-12298263>, viitattu 14.2.2022.
- [9] Uutinen Lahden P2G-hankkeesta, saatavilla: <https://yle.fi/uutiset/3-12276311>, viitattu 14.2.2022.
- [10] Uutinen Tampereen vetylaitoksesta, saatavilla: <https://www.rakennuslehti.fi/2022/02/ren-gas-suunnittelee-vetylaitosta-tampereelle-toteutuessaan-yli-150-miljoonan-euron-investointi/>, viitattu 17.2.2022.
- [11] Uutinen Mikkelin vetylaitoksesta, saatavilla: <https://yle.fi/uutiset/3-12296376>, viitattu 17.2.2022.
- [12] Uutinen Haminan akkumateriaalitehtaasta, saatavilla: <https://yle.fi/uutiset/3-12228067>, viitattu 14.2.2022.
- [13] Helenin Mustikkamaan lämpövarastohanke, saatavilla: <https://www.helen.fi/helen-oy/vastuullisuus/ajankohtaista/blogi/2020/mustikkamaa>, viitattu 14.2.2022.
- [14] Afryn lämpövarastoesitys Lappeenrannassa 26.1.2022.
- [15] Holzinger, C., Robinson, C., Gretjak, T. and Pelletier, T. Global Energy Storage Market Forecast 2019. Lux Research.
- [16] Conca, J. Energy's Future - Battery and Storage Technologies. Saatavilla: <https://www.forbes.com/sites/jamesconca/2019/08/26/energys-future-battery-and-storage-technologies/#295b55a844cf>, viitattu 2.4.2020.
- [17] Energy Storage Systems Market Outlook – 2030. Saatavilla: <https://www.alliedmarketresearch.com/advanced-energy-storage-systems-market>, viitattu 2.4.2020.
- [18] IRENA, Electricity storage and renewable: Costs and markets to 2030. 2017.
- [19] Schmidt, O., Hawkes, A., Gambhir, A. and Staffell, I. The future cost of electrical energy storage based on experience rates. Nature Energy, 2017, vol. 2, 17110. <https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.110>
- [20] Thermal Energy Storage Market Research, 2030. <https://www.alliedmarketresearch.com/thermal-energy-storage-market>, viitattu 2.4.2020.
- [21] Zhao, H. et al. Review of energy storage system for wind power integration support. Applied Energy, 2015, vol. 137, pp. 545-553.
- [22] DOE Global Energy Storage Database. Saatavilla: <https://sandia.gov/ess-ssl/gesdb/public/index.html>
- [23] Wulf, C., Linßen, J. and Zapp, P. Review of Power-to-Gas Projects in Europe, Energy Procedia, 2018, vol. 155, pp. 367-378, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.041>.
- [24] Sterner, M. and Stadler, I. Handbook of Energy Storage: Demand, Technologies, Integration. Translation of 2nd German edition, Springer, Berlin, Germany. ISBN 978-3-662-55504-0 (eBook). <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55504-0>.

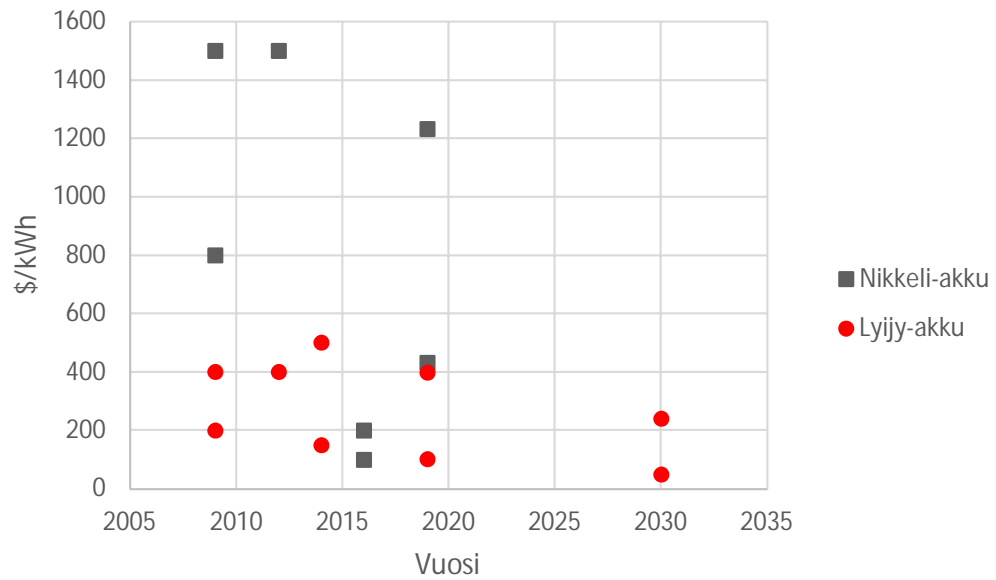
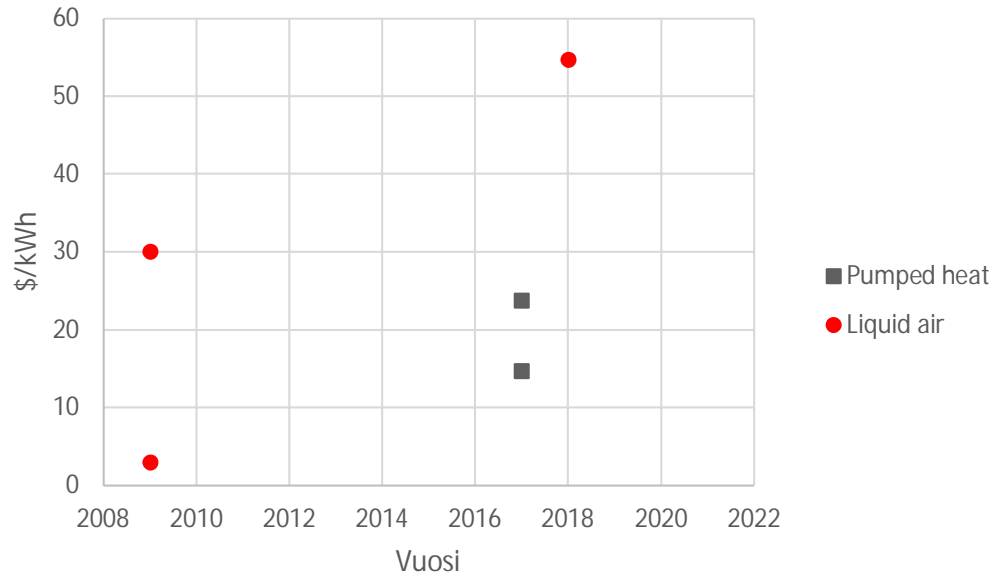
- [25] Abdon, A., Zhang, X., Parra, D., Patel, M. K., Bauer, C. and Worlitschek, J. Techno-economic and environmental assessment of stationary electricity storage technologies for different time scales. *Energy*, 2017 vol. 139, pp. 1173-1187, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.097>.
- [26] da Silva Lima, L., Quartier, M., Buchmayr, A., Sanjuan-Delmás, D., Laget, H., Corbisier, D., Mertens, J. and Dewulf, J. Life cycle assessment of lithium-ion batteries and vanadium redox flow batteries-based renewable energy storage systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, vol. 46, 101286, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101286>.
- [27] Greim, P., Solomon, A.A. and Breyer, C. Assessment of lithium criticality in the global energy transition and addressing policy gaps in transportation. *Nature Communications*, 2020, vol. 11, 4570, <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18402-y>.
- [28] Luo, X., Wang, J., Dooner, M. and Clarke, J. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*, 2015, vol. 137, pp. 511-536.
- [29] Aaldering, L. J. and Song, C. H. Tracing the technological development trajectory in post-lithium-ion battery technologies: A patent-based approach. *Journal of Cleaner Production*, 2019, vol. 241, 118343, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118343>.
- [30] Chen, Y.-H., Chen, C.-Y. and Lee, S.-C. Technology forecasting and patent strategy of hydrogen energy and fuel cell technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, vol. 36, Issue 12, 2011, pp. 6957-6969, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.03.063>.
- [31] King, M., Jain, A., Bhakar, R., Mathur, J. and Wang, J. Overview of current compressed air energy storage projects and analysis of the potential underground storage capacity in India and the UK. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, vol. 139, 110705, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110705>.
- [32] Frate, G. F., Ferrari, L. and Desideri, U. Energy storage for grid-scale applications: Technology review and economic feasibility analysis. *Renewable Energy*, 2021, vol. 163, Pages 1754-1772, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.070>.
- [33] Li, X. and Palazzolo, A. A review of flywheel energy storage systems: state of the art and opportunities. *Journal of Energy Storage*, 2022, vol. 46, 103576, <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103576>.
- [34] Gravity energy storage will show its potential in 2021. *Saatavilla* <https://spectrum.ieee.org/gravity-energy-storage-will-show-its-potential-in-2021>, viitattu 7.2.2022.
- [35] Morstyn, T., Chilcott, M. and McCulloch, M. D. Gravity energy storage with suspended weights for abandoned mine shafts. *Applied Energy*, 2019, vol. 239, pp. 201-206, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.226>.
- [36] Hunt, J. D., Zakeri, B., Falchetta, G., Nascimento, A., Wada, Y. and Riahi, K. Mountain Gravity Energy Storage: A new solution for closing the gap between existing short- and long-term storage technologies. *Energy*, 2020, vol. 190, 116419, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116419>.

- [37] Martinez, J. et al. Recent trends in graphene supercapacitors: from large area to microsupercapacitors. *Sustainable Energy Fuels*, 2021, vol. 5, 1235.
- [38] Koochi-Fayegh, S and Rosen, M. A. A review of energy storage types, applications and recent developments. *Journal of Energy Storage*, 2020, vol. 27, 101047, <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101047>.
- [39] Zhang, C., Chen, C., Streimikiene, D. and Balezentis, T. Intuitionistic fuzzy MULTIMOORA approach for multi-criteria assessment of the energy storage technologies. *Applied Soft Computing*, 2019, vol. 79, pp. 410-423.
- [40] Balezentis, T., Streimikiene, D. and Siksnyte-Butkiene, I. Energy storage selection for sustainable energy development: The multi-criteria utility analysis based on the ideal solutions and integer geometric programming for coordination degree. *Environmental Impact Assessment Review*, 2021, vol. 91, 106675.
- [41] Uutinen Joutsenon Power-to-X-hankeesta, saatavilla https://www.lut.fi/uutiset/-/asset_publisher/h33vOeufOQWn/content/synteettisten-polttoaineiden-p2x-tuotantolaitos-joutsenossa-olisi-harppaus-kohti-paastotonta-liikennetta, viitattu 14.2.2022.
- [42] Uutinen Lappeenrannan uusiutuvan metanolin tuotantolaitokselle myönnetystä tuesta, saatavilla: <https://yle.fi/uutiset/3-12645816>, viitattu 31.10.2022.
- [43] Aneke, M and Wang, M. Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review. *Applied Energy*, 2016, vol. 179, pp. 350-377, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.097>.
- [44] Harju, J. Energia-alan asentajien koulutustarpeet 2021-2031. Satakunnan ammattikorkeakoulu, 2022.
- [45] Uutinen Lappeenrannan Mustolan lämpöakusta, saatavilla: <https://www.lappeenrannanenergia.fi/ajankohtaista/uusiutuva-sahkoa-kayttava-lampoakku-vahentaa-co2-paastoja>, viitattu 15.2.2022.
- [46] Uutinen ilmasta ruokaa pilotista, saatavilla: <https://yle.fi/uutiset/3-10833123>, viitattu 14.2.2022.
- [47] Bogdanov, D., Ram, M., Aghahosseini, A., Gulagi, A., Oyewo, A. S., Child, M., Caldera, U., Sadovskaia, K., Farfan, J., De Souza Noel Simas Barbosa, L., Fasihi, M., Khalili, S., Traber, T. and Breyer, C. Low-cost renewable electricity as the key driver of the global energy transition towards sustainability. *Energy*, 2021, Vol. 227, 120467, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120467>.

Liite 1. Energiavarastoteknologioiden hintakehitys.



Liite 1. Energiavarastoteknologioiden hintakehitys.



ISBN 978-952-335-912-3 (PDF)

ISSN-L 2243-3376

ISSN 2243-3376

Lappeenranta 2022

 LUT
University