



Kestävän energiajärjestelmän suunnittelu

Vetytalouden ja uusiutuvan sähköntuotannon integrointi

Matti Kwick

Opinnäytetyö, AMK

Joulukuu 2023

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma (AMK)

Kvick, Matti

Kestävän energiajärjestelmän suunnittelu. Vetytalouden ja uusiutuvan sähköntuotannon integrointi

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Joulukuu 2023, 53 sivua

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

Tiivistelmä

Ilmastonmuutoksen pysäyttämiseksi yhä suurempi osa tuotetusta energiasta on peräisin uusiutuvista energianlähteistä. Uusiutuvasta energiantuotannosta tuuli- ja aurinkovoima ovat vahvasti sidoksissa vallitseviin olosuhteisiin aiheuttaen yhä suurempia hetkittäisiä eroja sähkön kysynnän ja tarjonnan välillä. Tämä luo tarvetta energian varastoinnille. Yhtenä ratkaisuna tähän ongelmaan voisi olla vety ja vetytalous.

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia, miten vetyjärjestelmä voi toimia osana sähköjärjestelmää ja millaisia mahdollisia haasteita ja ratkaisuja tästä seuraisi. Samalla tuli selvittää miten vihreää vetyä pystytään valmistamaan elektrolyysin avulla, miten vetyä voidaan varastoida ja miten vetyjärjestelmä voi osaltaan tukea sähkön kysyntäjoustoa.

Tutkimus toteutettiin kirjallisuuskatsauksena, jossa teoriapohja muodostettiin tutustumalla vetyyn, vedyn valmistukseen ja sen varastointiin. Tämän jälkeen muodostettiin kokonaisuus, josta pystyttiin havainnollistamaan vedyn mahdollinen rooli nykyisessä sähköjärjestelmässä ja millaisia mahdollisuuksia ja haasteita vety osana sähköjärjestelmää voisi tarjota.

Valmistamalla uusiutuvien energianlähteiden avulla vetyä, voisi vety toimia tällöin energian varastojana. Kannattavinta tämä olisi hetkinä, joina sähkön tuotanto ylittää kulutuksen. Varastoitua vetyä voitaisiin myöhemmin jatkojalostaa polttoaineiksi tai muuntaa polttokennojen avulla takaisin sähköksi hetkinä joina kulutus ylittää tuotannon. Tämän avulla tasattaisiin kysynnän ja tuotannon hetkellistä eroa ja tuettaisiin kysyntäjoustoa sekä nykyistä sähköverkkoa. Vedyn suurimpia haasteita ovat sen huono edestakainen hyötysuhde ja vaadittavat suuret investoinnit elektrolyysilaitteistoihin, polttokennoihin sekä vedyn varastointiin ja siirtoon. Vastauksena näihin ongelmiin on vetyyn liittyvän teknologian kehitys tehokkaammaksi ja halvemmaksi tulevaisuudessa. Tämä mahdollistaisi vihreän vedyn kilpailukykyisen hinnan ja kustannustehokkuuden energiankantajana.

Avainsanat (asiasanat)

vety, uusiutuva energia, elektrolyysi, kysyntäjousto, energiansiirto

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

-

Kvick Matti

Designing a sustainable energy system. Integration of the hydrogen economy and renewable electricity production

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, December 2023, 53 pages

Degree Programme in Electrical and Automation Technology. Bachelor's thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

To stop climate change, an increasingly larger portion of the produced energy comes from renewable energy sources. Wind and solar power, as part of renewable energy production, are heavily dependent on prevailing conditions, causing significant momentary differences between electricity demand and supply. This creates the need for energy storage. One solution to this problem could be hydrogen and a hydrogen-based economy.

The purpose of this thesis was to investigate how a hydrogen system could function as part of the electricity system and what potential challenges and solutions would arise from this. Simultaneously, it was essential to determine how green hydrogen could be produced through electrolysis, how hydrogen could be stored, and how the hydrogen system could support demand response within the electricity grid.

The research was conducted as a literature review, forming a theoretical basis by exploring hydrogen, its production, and storage. Subsequently, an overview was created to illustrate the potential role of hydrogen in the current electricity system and the possibilities and challenges it might offer.

By producing hydrogen through renewable energy sources, hydrogen could serve as an energy storage solution. This would be most beneficial during periods when electricity production exceeds consumption. The stored hydrogen could later be refined into fuels or converted back to electricity through fuel cells during periods when consumption exceeds production. This process would help balance the momentary gap between demand and production and support demand response, as well as the current electricity grid. The major challenges of hydrogen include its poor round-trip efficiency and the substantial investments required in electrolysis equipment, fuel cells, hydrogen storage, and transmission. The response to these issues lies in advancing hydrogen-related technologies to become more efficient and cost-effective in the future. This would enable green hydrogen to become a competitive and cost-effective energy carrier.

Keywords/tags (subjects)

hydrogen, renewable energy, electrolysis, demand response, energy transfer

Miscellaneous (Confidential information)

-

Sisältö

1	Johdanto	8
2	Yleistä tietoa vedystä	9
2.1	Vedyn väriluokittely ja vihreä vety.....	10
3	Vedyn valmistus elektrolyysillä vedestä	10
3.1	Veden alkalielektrolyysi	12
3.2	Protoninvaihtomembraani elektrolyysi (PEM).....	14
3.3	Kiinteäoksidi elektrolyysikenno (SOEC).....	15
4	Vedyn varastointi	16
4.1	Vedyn varastoiminen paineistettuna	17
4.2	Vedyn varastoiminen nestemäisenä	19
4.3	Vedyn varastoiminen metallihybrideissä	20
4.4	Vedyn varastoiminen orgaanisissa kantajaneiteissä (LOHC).....	21
4.5	Vedyn säilöminen metalliorgaanisissa runkorakenteissa (MOF)	23
5	Vedyn muuttaminen takaisin sähköksi	24
5.1	Vety-happi höyrygeneraattori.....	24
5.2	Vedyllä toimivat polttokennot	25
6	Uusiutuva sähköntuotanto Suomessa	28
6.1	Vesivoima Suomessa	28
6.2	Tuulivoima Suomessa.....	29
6.3	Aurinkovoima Suomessa	30
7	Vety osana nykyistä sähköjärjestelmää	32
7.1	Haasteet	33
7.1.1	Vedyn huono edestakainen hyötysuhde	33
7.1.2	Vetyjärjestelmän vaatimat investointikustannukset.....	34
7.1.3	Vedyn kilpailukykyisyys energiavarastona	36
7.2	Ratkaisut ja mahdollisuudet.....	38
7.2.1	Joustavuutta sähköjärjestelmään	38
7.2.2	Siirtokapasiteetin nousu energiansiirtoverkossa	40
7.2.3	Teknologian kehitys ja hukkaenergian hyödyntäminen	42
8	Johtopäätökset	45
9	Pohdinta	47
	Lähteet	49

Kuviot

Kuvio 1. Eri polttoaineiden energiatiheyksiä alemman lämpöarvon avulla esitettynä (EERE n.d)	9
Kuvio 2. Vedyn väriluokittelu (Global Energy Infrastructure 2021).....	10
Kuvio 3. Kansainvälinen elektrolyysikapasiteetti teknologioittain vuosina 2019–2023 ja tulevaisuudennäkymät vuodelle 2030 (IEA 2023, 69)	12
Kuvio 4. Veden alkalielektrolyysikennon toimintaperiaate (Ursua ym. 2012, 418)	13
Kuvio 5. PEM-elektrolyysikennon toiminta. (Ursua ym. 2012, 419).....	14
Kuvio 6. SOEC:in toimintaperiaate (Ursua ym. 2012, 420)	16
Kuvio 7. Vedyn varastointitapoja kategorioittain (Southall & Lukashuk 2022, 249).....	17
Kuvio 8. Suolaluola vedyn varastona. (NEA-group N.d).....	18
Kuvio 9. Vedyn diffuusiotuminen metallihybridin hilarakenteeseen (Boudellal 2018, 112).....	20
Kuvio 10. LOHC-konseptin toimintaperiaate. (Hurskainen 2019, 11).....	22
Kuvio 11. MOF rakenne. (Meena ym. 2023, 4)	23
Kuvio 12. Vety-happi höyrygeneraattorin rakenne. (Alabbadi 2012, 14).....	25
Kuvio 13. Polttokennon toimintaperiaate (FCHEA, N.d).....	26
Kuvio 14. Bipolaarisen levyn avulla sarjaan kytkettyjä polttokennoja (Dicks & Rand 2018, 13)	27
Kuvio 15. Tuulivoiman tuotanto Suomessa vuonna 2022. (Fingrid 2023).....	30
Kuvio 16. Aurinkovoiman tuotanto Suomessa vuonna 2022 (Fingrid 2023).....	31
Kuvio 17. Vesivoiman tuotanto ja tuotantopotentiaali Euroopan eri maissa vuonna 2020 (Schleiss ym. 2023, 6)	33
Kuvio 18. Kuvaus vetytalouden eri skenaarioista vaadittavien toimenpiteiden osalta. (Fingrid & Gasgrid Finland 2023, 8)	35
Kuvio 19. Arvio vaadittavista investoinneista eri skenaarioiden toteutumiseksi. (Fingrid & Gasgrid Finland 2023, 19).....	36
Kuvio 20. Vasemmalla yhdistetty tuuli- ja aurinkovoiman tuotantoprofiili ja oikealla saman tuotannon siirtoverkkoon syötettävä osuus 45 MW elektrolysaattorilaitteiston koordinoitun käytön avulla. (Hovsavian 2017, 29.).....	39
Kuvio 21. Energiansiirron pääomakustannuksia vertailtuna. (Gasgrid Finland & Fingrid 2022, 8)	41
Kuvio 22. Kaasuputkien ja suurjänniteverkon häiriöt yhdeksän vuoden tarkastelujaksolta Australiassa. (APGA N.d, 8)	42
Kuvio 23. Elektrolyysiteknologian kehityksen ja uusiutuvan energian hinnan laskun potentiaalinen vaikutus vihreän vedyn hintaan kehityskohdittain. (IRENA. 2021, 12)	44

Taulukot

Taulukko 1. Metallihybridien ominaisuuksia. (Boudellal 2018, 113).....	21
Taulukko 2. LOHC-nesteiden ominaisuuksia. (Hurskainen 2019, 12)	22
Taulukko 3. Erilaisten energian säilöntämenetelmien ominaisuuksia. (Achhari & Fadar 2018) 37	
Taulukko 4. Eri elektrolyysiteknologioiden suorituskyky nykyisin ja IRENA:n visio vuodelle 2050. (IRENA 2021, 14)	43

Lyhenteet:

NTP	normaalilämpötila- ja paine, 101 325 Pa ja 20 °C (Normal Temperature and Pressure)
PHES	pumppuvoimalaitos (Pumped Hydroelectric Energy Storage)
CAES	paineilmavarasto (Compressed-Air Energy Storage)
BESS	akkukäyttöinen energiavarasto (Battery Energy Storage System)
ESOI	Energy Stored On Investment
FCR-D	taajuusohjattu häiriöreservi (Frequency Containment Reserve for Disturbances)

1 Johdanto

Ilmastonmuutoksen ja kasvihuonepäästöjen vähentämiseksi energia-ala on jatkuvasti siirtymässä kohti puhtaampia tapoja tuottaa energiaa. Vuonna 2015 laaditun Pariisin ilmastopöytäkirjan mukaan globaali ilmaston lämpeneminen pyritään pitämään alle kahdessa asteessa verrattuna esiteolliseen aikaan. Tämän sopimuksen ohjaamana Suomi pyrkii olemaan hiilineutraali valtio vuoteen 2035 mennessä.

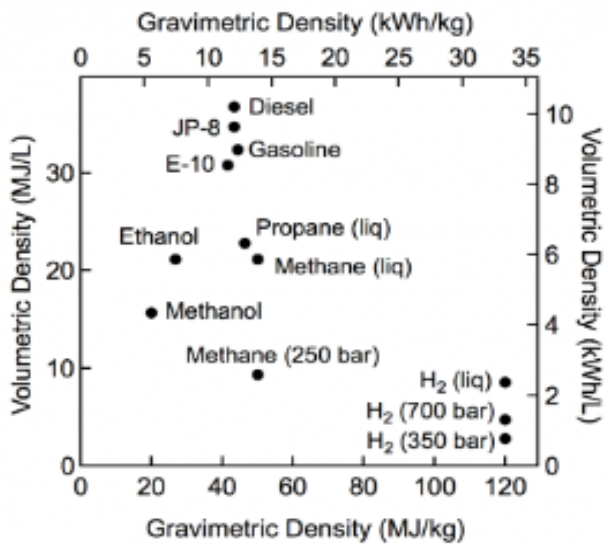
Tähän tavoitteeseen ratkaisuja energia-alan osalta tarjoaa vety ja vetytalous. Uusiutuvilla energianlähteillä tuotetulla vihreällä vedyllä on mahdollisuus näytellä suurta roolia siirryttäessä kohti vähähiilistä yhteiskuntaa. Vedyllä voidaan korvata fossiilisia polttoaineita ja sähköistää uusia teollisuudenaloja sekä varastoida energiaa. Mutta miten vetyä voidaan valmistaa ja miksi sitä kannattaa valmistaa? Miten sitä voidaan hyödyntää ja säilöä? Mitä tämä kaikki vaatii ja onko se kannattavaa? Muun muassa näihin kysymyksiin pyritään tässä opinnäytetyössä vastaamaan.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on olla kirjallisuuskatsaus, jossa tutkitaan ja perehdytään uusiutuvien energianlähteiden avulla vedyn tuottamiseen käyttäen elektrolyysiä, vedyn eri varastointimenetelmiin ja vedyn muuntamiseen takaisin sähköksi. Tämän jälkeen tarkoituksena on muodostaa analyysi, jossa pohditaan millaisia mahdollisia haasteita, mahdollisuuksia ja ratkaisuja vetyjärjestelmä voi tarjota osana nykyistä energiajärjestelmää. Tarkoituksena on siis tutkia taloudellisesta ja teknisestä näkökulmasta vedyn roolia osana laajempaa energiajärjestelmää.

2 Yleistä tietoa vedystä

Vety (H) on maailmankaikkeuden yleisin alkuaine. Tavallisissa olosuhteissa vety esiintyy vetykaasuna (H_2), joka koostuu kahdesta vetyatomista, joiden välillä on kovalenttinen sidos. Luonnossa vetyä esiintyy muiden alkuaineiden kanssa yhdisteinä erilaisissa kaasuissa, nesteissä ja kiinteissä aineissa. Alkuaineena vetyä ei esiinny, vaan se on tuotettava erottamalla vety erilaisilla menetelmillä esimerkiksi vedestä, fossiilisista polttoaineista tai biomassasta. (Jolly 2023; EIA 2023.)

Itsessään vety ei ole energian lähde, vaan energiankantaja. Energian kantajana vedyn etuina esimerkiksi bensiinin verrattuna on korkea energiatiheys painoyksikköä kohden. Bensiinin lämpöarvon ollessa 44 MJ/kg, on vedyn vastaava arvo 120 MJ/kg. Tällöin kiloon vetyyn voi varastoida noin kolminkertaisen määrän energiaa bensiiniin verrattuna. Toisaalta, jos samaa energiasisältöä tarkastellaan tilavuuden kannalta, on bensiinin lämpöarvo litraa kohden 32 MJ/L ja vedyn vastaava arvo vain 8MJ/L. Tämän takia kaasumainen vety joudutaan varastoimaan hyvin korkealla paineella. (EERE N.d.) Kuviossa 1 on esiteltyä erilaisten polttoaineiden energiatiheysä.



Kuvio 1. Eri polttoaineiden energiatiheysä alemman lämpöarvon avulla esitettyinä (EERE n.d)

2.1 Vedyn väriluokittely ja vihreä vety

Vedystä puhuttaessa käytetään yleensä vedyn eri värejä kuvaamaan vedyn valmistamiseen käytettyä energian lähdettä ja valmistusteknologiaa. Jotta vetyä voitaisiin kutsua vihreäksi vedyksi, tulisi vedyn olla tuotettu elektrolyysillä käyttäen uusiutuvia energianlähteitä. Kuviossa 2 on esiteltyä yleisesti käytössä oleva vedyn väriluokittelu.

	Terminology	Technology	Feedstock/ Electricity source	GHG footprint*
PRODUCTION VIA ELECTRICITY	Green Hydrogen	Electrolysis	Wind Solar Hydro Geothermal Tidal	Minimal
	Purple/Pink Hydrogen		Nuclear	
	Yellow Hydrogen		Mixed-origin grid energy	Medium
PRODUCTION VIA FOSSIL FUELS	Blue Hydrogen	Natural gas reforming + CCUS Gasification + CCUS	Natural gas coal	Low
	Turquoise Hydrogen	Pyrolysis	Natural gas	Solid carbon (by-product)
	Grey Hydrogen	Natural gas reforming		Medium
	Brown Hydrogen	Gasification	Brown coal (lignite)	High
	Black Hydrogen		Black coal	

*GHG footprint given as a general guide but it is accepted that each category can be higher in some cases.
The hydrogen colour spectrum

Kuvio 2. Vedyn väriluokittelu (Global Energy Infrastructure 2021)

3 Vedyn valmistus elektrolyysillä vedestä

Puhtain tapa tuottaa vetyä on hajottaa vettä sähköenergian avulla elektrolyysissä vedyksi ja hapeksi. Tarvittavan suuren sähkömäärän vuoksi tuotantotapa on kuitenkin paljon kalliimpi verrattuna kemiallisiin tuotantotapoihin. Veden kemiallinen hajoamisreaktio vedyksi ja hapeksi NTP olosuhteissa on esitetty kaavassa 1. (Motiva 2023; Sankir & Sankir 2017, 232–233.)

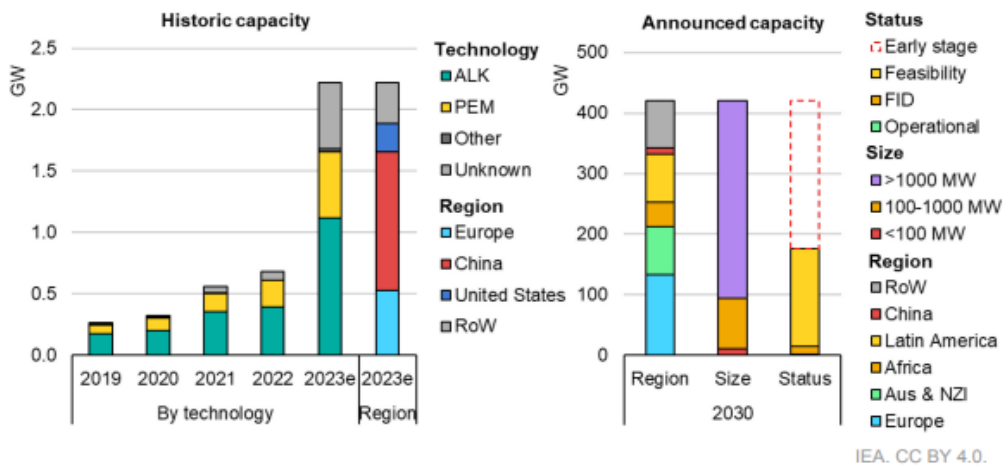


Veden elektrolyysissä tasavirtaa johdetaan veden läpi sen molekyylien erottamiseksi vedyksi ja hapeksi. Virta kulkee kahden toisistaan erotetun elektrodin lävitse, jotka ovat upotettuina elektrolyyt-

tiin ionijohtavuuden lisäämiseksi. Tätä kokonaisuutta kutsutaan elektrolyysikennoksi. Elektrolyysikennossa anionit virtaavat toiselle elektrodille saaden sen polarisoitumaan negatiiviseksi. Tätä negatiivista elektrodia kutsutaan anodiksi. Anodilla tapahtuu hapettumisen puolireaktio, jossa syntyy vetyä. Samalla kationit virtaavat toiselle elektrodille saaden sen polarisoitumaan positiiviseksi. Tätä positiivista elektrodia kutsutaan katodiksi, ja sen pinnalla tapahtuu pelkistymisen puolireaktio, jossa syntyy happea. (Ursua, Gandía & Sanchis 2012, 412.)

Käytettävä elektrolyytti sekä elektrodien ja niitä erottavan kalvon valmistusmateriaali määrittelevät elektrolyysikennon tyyppin. Yleisimpiä elektrolyysimenetelmiä ovat veden alkalielektrolyysi, protoninvaihtomembraani elektrolyysi (PEM) ja kiinteäoksidi elektrolyysikemmo (SOEC). (Ursua ym. 2012, 412.) Kyseiset menetelmät ovat esitelty tarkemmin seuraavissa luvuissa.

Vuonna 2023 elektrolyysillä tuotetun vihreän vedyn osuus kaikesta maailmalla tuotetusta vedystä oli vain 0,1 %:a, mutta asennettavien elektrolyysilaitteistojen kapasiteetti ja uusien projektien määrä on merkittävässä kasvussa. Vuoden 2022 loppuun mennessä asennettujen elektrolyysilaitteistojen kapasiteetti saavutti 700 MW. IEA:n arvion mukaan, vuoden 2023 loppuun mennessä tämän kapasiteetin arvioidaan nousevan 2,0 GW asti. Jos tarkastellaan julkistettuja ja myös esisuunnitteluvaiheessa olevia projekteja maailmanlaajuisesti, vuoteen 2030 mennessä elektrolyysilaitteistojen kapasiteetti voi nousta jopa 420 GW:in asti. (IEA 2023, 68–70.) Kuviossa 3 on esitetty maailmalla käytössä olevien elektrolyysilaitteistojen kapasiteetti käytetyn elektrolyysimenetelmän ja maanosan mukaan eriteltyinä, sekä tulevaisuuden näkymät vuodelle 2030.

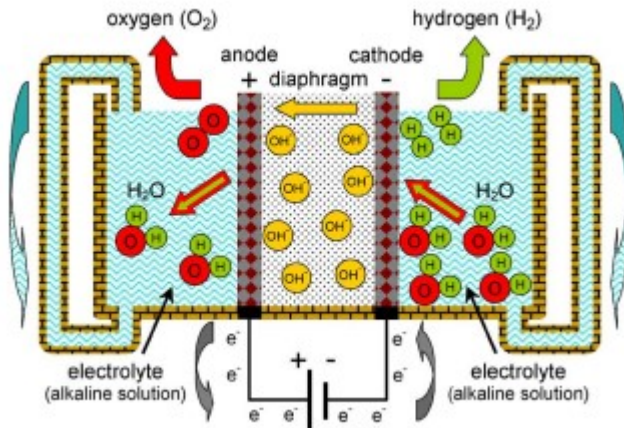


Notes: ALK = alkaline electrolyzers; FID = final investment decision and under construction; PEM = proton exchange membrane electrolyzers; RoW = rest of world; Aus & NZI = Australia and New Zealand; 2023e = estimate for 2023 capacity, based on projects planned to start operations in 2023 and that have at least reached FID. "Other" technology refers to solid oxide electrolysis, anion exchange membrane electrolysis or a combination of different technologies. The unit is GW of electrical input. Only projects with a disclosed start year are included.

Kuvio 3. Kansainvälinen elektrolyysikapasiteetti teknologioittain vuosina 2019–2023 ja tulevaisuudennäkymät vuodelle 2030 (IEA 2023, 69)

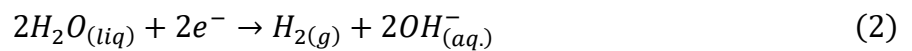
3.1 Veden alkali-elektrolyysi

Veden alkali-elektrolyysi on nykyisin yleisimmin käytetty elektrolyysimenetelmä. Nykyisistä elektrolyysimenetelmistä se soveltuu parhaiten vedyn laajamittaiseen tuotantoon. Veden alkali-elektrolyysaattorit ovat turvallisia ja luotettavia, ja laitteiston käyttöikä voi olla jopa 15 vuotta. Elektrolyysikennon koostuu kahdesta elektrodista, jotka ovat erotettuina kaasutiiviillä kalvolla vedyn ja hapen pitämiseksi erillään. Tämä kokonaisuus on upotettuna nestemäiseen elektrolyyttiin, joka on tyypillisesti parhain ionijohtavuuden saavuttamiseksi 25 – 30 %:sta kaliumhydroksidi (KOH) vesiliuosta. Elektrolyyttinä on myös mahdollista käyttää natriumhydroksidia (NaOH) tai natriumkloridia (NaCl), mutta tämä on harvinaisempaa. (Ursua ym. 2012, 416–417.) Veden alkali-elektrolyysikennon toimintaperiaate on esitetty kuviossa 4.



Kuvio 4. Veden alkali-elektrolyysikennon toimintaperiaate (Ursua ym. 2012, 418)

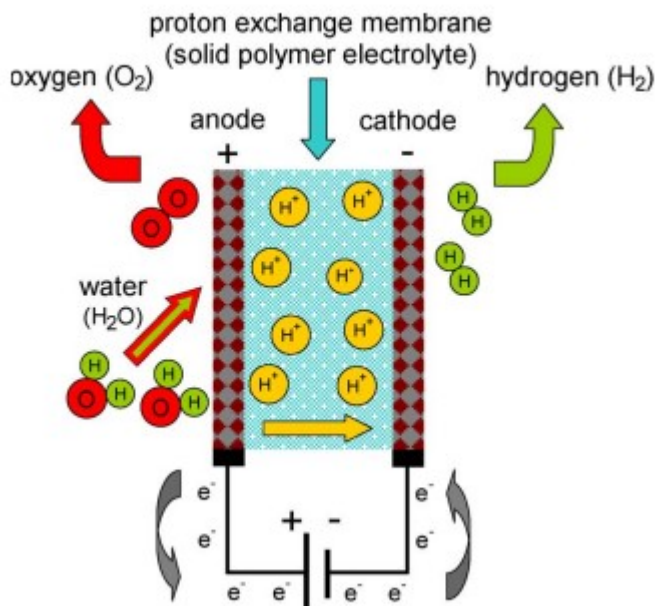
Vety syntyy katodilla, missä vesi pelkistyy muodostaen vetykaasua reaktioyhtälön (2) mukaisesti. Reaktiossa vapautuvat vedyn anionit kulkeutuvat erotinkalvon lävitse anodille ulkoisen virtalähteen luoman sähkökentän avulla. Vedyn anionit yhdistyvät anodin pinnalla reaktioyhtälön (3) mukaisesti synnyttäen happea. (Ursua ym. 2012, 417–418.)



Alkali-elektrolyysin hyötysuhde on tavallisesti 47 - 82 %. Lopputuotteena syntyvän vedyn puhtausaste on 99,9 % ilman erillisten puhdistuslaitteiden käyttöä. Alkali-elektrolyysin haittapuolena on käytettävän elektrolyytin vahva emäksisyys, joka aiheuttaa ongelmia korroosion kanssa. Myös prosessissa käytettävän veden on oltava erittäin puhdasta elektrodien suojaamiseksi ja laitteiston operoimiseksi turvallisesti. (Ursua ym. 2012, 418.)

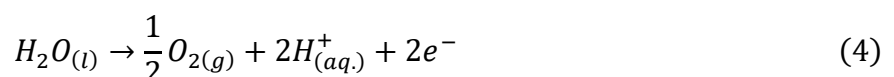
3.2 Protoninvaihtomembraani elektrolyysi (PEM)

PEM-elektrolyysi on alkalielektrolyysiä harvemmin käytetty tekniikka. Tähän vaikuttavat PEM-laitteistojen rajoitettu tuotantokapasiteetti, suhteellisen lyhyt käyttöikä ja korkeat investointikustannukset. PEM-elektrolysaattoreissa elektrolyytinä toimii ohut, alle 0,2 mm paksu kaasutiivis polymeerikalvo. Polymeerikalvo sisältää sulfonihappoa (SO_3H), jonka funktionaaliset ryhmät mahdollistavat protonien kulkeutumisen materiaalin lävitse ioninvaihto-ominaisuuksiensa avulla. Sulfonihapon vahvan happamuuden takia elektrodien valmistusmateriaalina käytetään yleensä jalometalleja, kuten platinaa tai iridiumia. (Ursua ym. 2012, 418.) PEM-elektrolyysikennon toiminta on esitetty kuviossa 4.



Kuvio 5. PEM-elektrolyysikennon toiminta. (Ursua ym. 2012, 419)

PEM-elektrolyysikennossa vettä pumpataan anodille, missä se hajoaa protoneiksi, vedeksi ja elektroneiksi reaktioyhtälön (4) mukaisesti. Protonit kulkeutuvat erotinkalvon lävitse katodille ja elektronit kulkevat ulkoisen virtapiirin kautta katodille. Katodin puolella protonit ja elektronit yhdistyvät uudelleen, tuottaen vetyä reaktioyhtälön (5) mukaisesti. (Kumar & Himabindu 2019.)

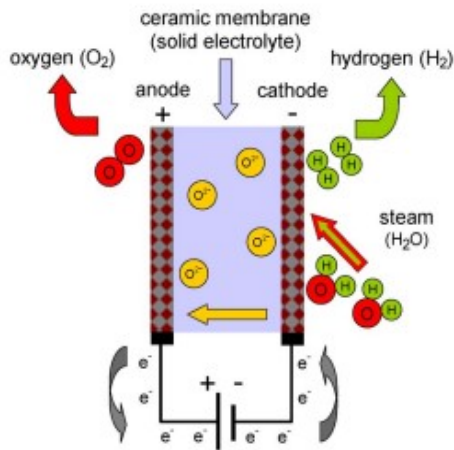




PEM-elektrolyysin etuina alkalielektrolyysiin verrattuna on sen yleisesti parempi hyötysuhde sekä lopputuotteena syntyvän vedyn suurempi puhtaus (yli 99,99 %). PEM-elektrolysaattoreilla on myös ominaisuus toimia vaihtelevissa tehonsyöttöjärjestelmissä. Protonien kulkeutuminen polymeerikalvon lävitse reagoi nopeasti tehonvaihteluihin. Alkalielektrolyysissä ionien kuljettamiseen käytettävä nestemäinen elektrolyytti omaa suuremman inertian. (Ursùa ym. 2012, 419.)

3.3 Kiinteäoksidi elektrolyysikeno (SOEC)

Kiinteäoksidi elektrolyysikeno eli SOEC on verrattain uusi ja edistynyt tapa tuottaa vetyä. Verrattuna alkalielektrolyysiin ja PEM-elektrolyysiin, SOEC elektrolyysissä käytetään korkeaa lämpötilaa (600-900°C) ja katodille tuotava vesi on höyrymäisessä muodossa, jolloin mahdolliset veden epäpuhtaudet ja suola ovat jo poistuneet. Tämä mahdollistaa korkeamman hyötysuhteen ja epäpuhtaan veden käyttämisen. SOEC:n elektrolyyttinä käytetään keraamista kaasutiivistä kalvoa, joka on valmistettu yttriumoksidien (Y_2O_3) ja zirkoniumoksidien (ZrO_2) yhdisteestä eli yttriumoksidilla stabiloidusta zirkoniumoksidista (YSZ). Kiinteäoksidi elektrolyysikennossa katodi on kovametallia, joka on yleensä valmistettu nikkelistä ja YSZ:sta ja anodi on perovskiidistä ja YSZ:sta valmistettua komposiittimateriaalia. (Maddaloni, Marchionni, Abbá, Mascia, Tola, Carpanese, Bertanza & Artioli 2023; Ursùa ym. 2012, 419–420.) Kiinteäoksidi elektrolyysikennon toiminta on havainnollistettu kuviossa 6.



Kuvio 6. SOEC:in toimintaperiaate (Ursua ym. 2012, 420)

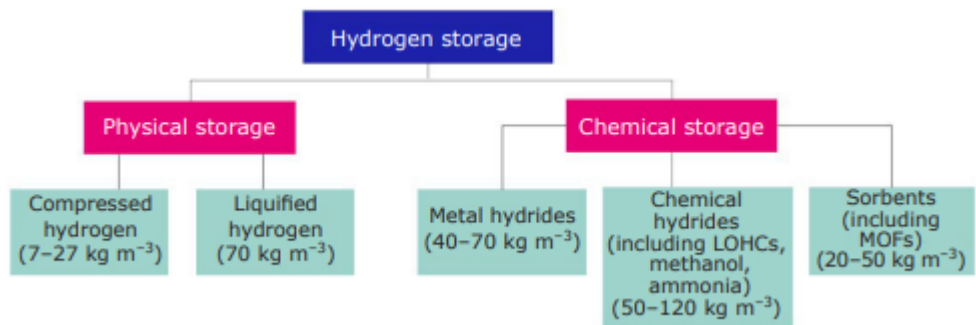
Kun ulkoisen virtapiirin kautta tuotavat elektronit ja höyrymäinen vesi yhdistyvät katodilla, pelkistyy vesi vedyksi ja happi anioneiksi reaktioyhtälön (6) mukaisesti. Hapen anionit kulkeutuvat elektrolyytinä toimivan keraamisen kalvon lävitse ja yhdistyvät reaktioyhtälön (7) mukaisesti muodostaen happea ja sulkien virtapiiriin vapautuvien elektronien avulla. (Ursua ym. 2012, 419.)



4 Vedyn varastointi

Jotta vihreää vetyä pystytään tulevaisuudessa hyödyntämään hiilineutraaliustavoitteiden saavuttamiseksi, on ensin löydettävä tehokas tapa varastoida vetyä. Vedyn varastoinnista haastavaa tekee vedyn pieni energiatiheys tilavuusyksikköä kohden ja kaasumaisen vedyn ominaisuus muodostaa hapen kanssa herkästi syttyviä yhdisteitä. Siinä missä 1 kg kaasumaista vetyä on tilavuudeltaan 12.15 m^3 , saman energiasisällön (33,5 kWh) sisältävä määrä bensiiniä vie tilavuudeltaan vain $0,0038 \text{ m}^3$. Tästä syystä, jotta vety pystyisi kilpailemaan energiantantajana nykyisten fossiilisten polttoaineiden kanssa, on sen tilavuuspainoa saatava pienemmäksi. (Southall & Lukashuk 2022, 248; Sankir & Sankir 2017, 4.)

Vedyn tilavuuspainoa saadaan pienemmäksi muuntamalla se nestemäiseen muotoon tai varastomalla vety korkeassa paineessa. Toinen vaihtoehto on sitoa vety kemiallisesti metallihybrideihin, kemiallisiin hybrideihin tai sorbentteihin. (Southall & Lukashuk 2022, 248.) Kuviossa 7 on esitelty vedyn eri varastointimenetelmiä jaoteltuina fyysisiin ja kemiallisiin varastointitapoihin.



Kuvio 7. Vedyn varastointitapoja kategorioittain (Southall & Lukashuk 2022, 249)

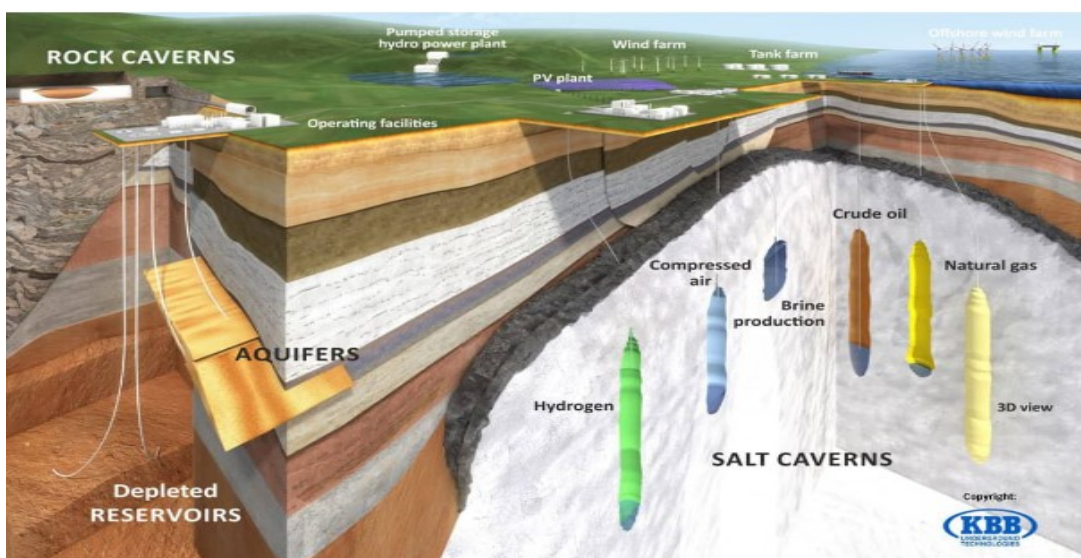
Vedyn käyttökohde ja -tarkoitus määrittelevät kriteerit käytettävälle vedylle. Esimerkiksi PEM-polttokennossa on erityisen tärkeää vedyn suuri puhtaus, toisissa sovelluksissa taas vedyn nopea vapautuminen sidosaineesta on järjestelmän toiminnan kannalta välttämätöntä. Tästä syystä vedyn varastoinnissa on paljon tilaa erilaisille varastointimenetelmille. (Andersson & Grönkvist 2019, 11915.)

4.1 Vedyn varastoiminen paineistettuna

Vedyn varastoiminen paineistettuna vaatii sopivan säiliön ja paineistuslaitteiston. Suuremmissa erissä säilöttynä vetyä ei yleensä varastoida maanpäällisissä säiliöissä yli 100 baarin paineessa ja maanalaisissa säiliöissä vastaava yläraja on 200 baaria. 100 baarin paineessa ja 20°C lämpötilassa vetykaasun tilavuus on noin $7,8 \text{ kg/m}^3$. Vetyä on mahdollista varastoida myös jopa 700 baarin paineessa, mutta tällöin varastointiin käytettävien säiliöiden valmistukseen vaaditaan kalliita materiaaleja kuten hiilikuitua, jolloin laajamittaisessa varastoinnissa investointikustannukset nousisivat huomattavan suuriksi. Maanalaisissa säiliöissä etuna on niiden mahdollistama korkeampi varastointipaine, maanalaisen sijoittelun luoma suoja luonnonilmiöitä ja ulkoisia vaurionaiheuttajia vastaan sekä maan luoma luonnollinen eristekerros. Toisaalta säiliöiden eheyden tarkastaminen mm. korroosion varalta on haastavampaa. (Voorde, 2021, 145; Andersson & Grönkvist 2019, 11903.)

Yksinkertaisimmillaan vetyä voidaan säilöä maan alla muutaman metrin syvyyteen kaivetuissa, suhteellisen lyhyissä, n. 1,4 metriä halkaisijaltaan olevissa putkissa, joiden kummatkin päät ovat suljettuina. Tällöin 100 baarin paineessa varastoitua vetyä voitaisiin 1000 metrin pituiseen putkeen säilöä noin 12 t. Vastaavaa säilöntämenetelmää käytetään nykyisin jo maakaasun varastointiin, mutta vedyn tapauksessa menetelmä on kalliimpi vedyn putkille aiheuttaman haurastumisen takia. Toinen vaihtoehto on käyttää isoja, sylinterimäisiä säiliöitä. Tällöin säilytyspaine voi olla korkeampi, mutta säiliö vaatii vahvemman rakenteen. (Voorde, 2021, 145.)

Yksi mahdollinen vaihtoehto on käyttää kaasumaisen vedyn varastointiin maanalaisia suolaluolia. Euroopassa suolaluolia sijaitsee etenkin pohjoisen Saksan ja Puolan alueilla. Tyypillisesti suolaluolat sijaitsevat 500 – 2500 metrin syvyydellä maanpinnasta ja niiden halkaisija vaihtelee 50 – 100 metrin välillä korkeuden ollessa 100 – 500 metriä. Tyypillisesti tällaiset suolaluolat mahdollistaisivat vedyn varastoinnin 100 – 250 baarin paineessa. On kuitenkin huomattava, että vedyn varastointi suolaluolissa asettaa erinäisiä vaatimuksia. On tärkeää säilyttää tasainen paine, koska liian suuri paine voi saada luolan seinämät halkeilemaan ja liian matala paine voi aiheuttaa seinämien luhistumisen. Tästä syystä sisään ja ulos virtaavan vetykaasun määrää on rajoitettava, jotta paine pysyisi tasaisena. (NEA-group N.d; Voorde, 2021, 143.) Kuviossa 8 on havainnollistettu suolaluolan käyttämistä vedyn varastointiin.



Kuvio 8. Suolaluola vedyn varastona. (NEA-group N.d)

Käytettäessä suolaluolia vedyn varastointiin on huomioitava, että 1/3 luolan tilavuudesta on varattava puskurikaasulle, jolla ylläpidetään luolan eheyttä. Tällöin 2/3 tilavuudesta jäisi täytettäväksi vedyllä. Edellä mainitut rajoitteet huomioon ottaen suolaluolat sopisivat osaksi suurempaa vedyn varastointikokonaisuutta, jossa ne toimisivat osana vedyn säilömistä maanalaisiin putkiin. Tällöin ne toimisivat varareservinä putkiin säilötylle vedylle. (Linde hydrogen N.d; NEA-group N.d)

4.2 Vedyn varastointi nestemäisenä

Varastoimalla vety nestemäisessä muodossa saavutetaan suurempi energiatiheys paineistettuun vetyyn verrattuna. Tällöin myös vedyn kuljettaminen pidempiä matkoja helpottuu. Haastavaa vedyn säilömisestä nestemäisenä tekee sen erittäin alhainen kiehumispiste -252.8°C ja vedyn nesteytykseen kuluva suuri energiamäärä. Arvioiden mukaan 30 – 40 % vedyn energiasisällöstä kuluu vedyn nesteytykseen, kun vastaava prosentuaalinen määrä paineistetun vedyn kohdalla on noin 15 %. Moderneimmista nesteytyslaitoksista vedyn nesteyttämiseen tarvittava energiamäärä on 10 kWh/kg luokkaa, mutta tämän luvun uskotaan putoavan lähemmäs 6 kWh/kg prosessia parantamalla. Tämä huomioon ottaen, luovat nesteytyslaitokset silti suuren kustannuserän, joka myös näkyy nestemäisen vedyn hinnassa. (IRENA N.d; Andersson & Grönkvist 2019, 11904.)

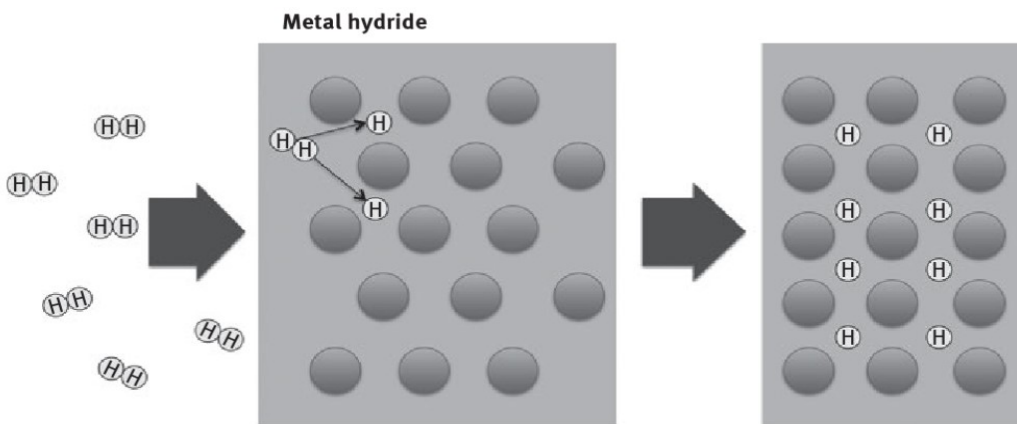
Kun vety on nestemäisessä muodossa, on erityisen tärkeää estää vedyn haihtuminen. Haihtumista aiheuttaa ulkopuolelta tulevan lämmön johtuminen ja kulkeutuminen varastointisäiliöissä olevaan vetyyn. Tämän takia säiliöissä käytetään hyvin kehittyneitä, monikerroksista eristystä ja säiliöt valmistetaan pallon muotoiseksi, jolloin minimoidaan säiliön vaipan pinta-ala. Näin vältetään vedyn nesteytykseen kuluneen energian sekä väistämättä nestemäisen vedyn sisältämän energian menetykset, koska höyrystynyt vety joudutaan poistamaan tankista venttiilien kautta. Tällä tavalla vältetään paineen nousuminen varastointisäiliöissä. (Andersson & Grönkvist 2019, 11904.)

Edellä mainituista toimenpiteistä huolimatta vedyn höyrystymiseltä ei kuitenkaan voida täysin välttyä. Osa vedystä pääsee aina höyrystymään takaisin kaasumaiseen muotoon. Tätä höyrystyneen vedyn osuutta kutsutaan ns. boil -off asteeksi. Tavallisesti suurilla, pallonmuotoisilla säiliöillä tämä aste on alle 0,1 % säiliön sisällöstä per päivä. Tämäkin ongelma voidaan välttää, jos varastointiin käytettävät säiliöt ja nesteytyslaitos sijaitsevat lähekkäin. Tällöin höyrystynyt vety voidaan syöttää takaisin nesteytysprosessiin, jolloin menetetään pelkästään vedyn nesteytykseen kulunut energiamäärä. (Andersson & Grönkvist 2019, 11904.)

4.3 Vedyn varastoiminen metallihybrideissä

Vedyn varastoiminen metallihybrideihin on yksi lupaavimmista tavoista säilöä vetyä, joskin kyseinen menetelmä on käytössä vasta kokeellisissa sovelluksissa (SFC-energy N.d).

Kyseisessä menetelmässä vedyn varastointiin käytetään metalleja tai metalliyhdisteitä, jotka pystyvät muodostamaan vedyn kanssa metallihybridin. Vedyn absorptio metalliin tapahtuu metallin pinnalla, jonka jälkeen vety diffusoituu metallin hilarakenteeseen. Vedyn vapautuminen metallihybridistä tapahtuu lämmön avulla, jolloin vety vapautuu metallin rakenteesta. (Boudellal 2018, 112). Peruseriaate vedyn diffusoitumiselle metallihybridiin on esitettyä kuviossa 9.



Kuvio 9. Vedyn diffusoituminen metallihybridin hilarakenteeseen (Boudellal 2018, 112)

Etuina kyseisessä säilöntätavassa on sen turvallisuus, lähes olemattomat säilytyksenaikaiset häviöt (vrt. vedyn varastoiminen nestemäisenä) ja mahdollisuus varastoida vetyä ilman erityisiä säiliöitä ja tiettyä painetta. Toisaalta metallihybridien paino on suuri suhteessa siihen varastoidun vedyn määrään. (Boudellal 2018, 112.) Jotta saataisiin parempi kuva metallihybridien ominaisuuksista, taulukossa 1 on esitettyä muutaman metallihybridin vedyn vapautumiseen vaadittava lämpötila sekä teoreettinen maksimaalinen vedyn osuus koko metallihybridin massasta.

Taulukko 1. Metallihybridien ominaisuuksia. (Boudellal 2018, 113)

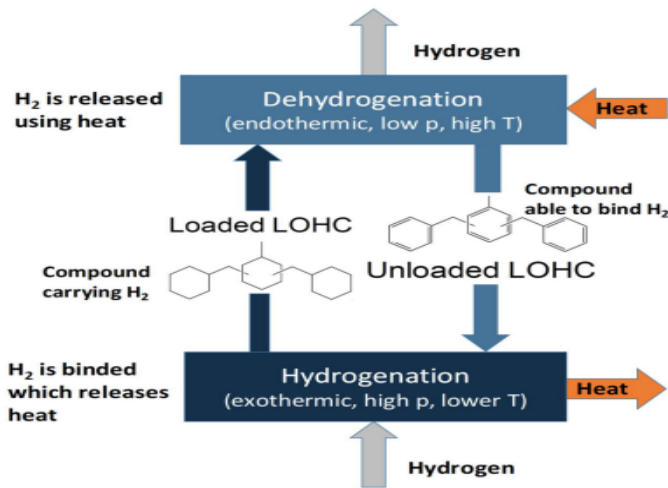
Hydride	Hydrogen storage % mass	Desorption temperature at 1 bar in °C
La Ni ₅ H ₆	1.4	25
TiV ₂ H ₄	2.6	40
ZrMn ₂ H ₃	1.8	167
NaAlH ₄	5.0	220
MgH ₂	7.6	>300

Taulukosta 1 voidaan havaita, että vedyn vapautumiseen vaadittava lämpötila vaihtelee, asettaen tästä syystä rajoitteita metallihybridien varastoinnille sekä sovelluksille, joissa metallihybridejä halutaan käyttää vedyn varastoimiseen.

4.4 Vedyn varastoiminen orgaanisissa kantajanesteissä (LOHC)

Nestemäiset orgaaniset vedyn kantajat (LOHC), ovat nesteitä, joihin voidaan lisätä vetyä tai joista voidaan poistaa vetyä (Hurskainen 2019, 11). Vedyn lisääminen tapahtuu kyllästyttämällä nesteen piisidokset vedyllä. Vedyn vapauttaminen tapahtuu vastakkaisella prosessilla. Kun vety on vapautunut kantajanesteestä, palautuu kantajaneste alkuperäiseen tilaansa, ja on uudelleen käytettävissä vedyn varastointiin. (Hurskainen 2019, 11; Abdin, Tang, Liu & Catchpole 2021, 2.)

Vedyn lisääminen kantajanesteeseen tapahtuu yleensä 100 – 240°C lämpötilassa ja 10 – 50 baarin paineessa katalyyttiä apuna käyttäen. Reaktio on eksoterminen, joka tarkoittaa, että reaktiossa vapautuu lämpöä. Päinvastaisesti vedyn vapauttaminen kantajanesteestä vaatii vedyn sitoutumisessa syntyneen määrän lämpöä, ollen täten endoterminen reaktio. Tämä reaktio toteutetaan yleensä 150 – 400°C lämpötilassa ja alle 10 baarin paineessa. (Hurskainen 2019, 11.) Kuviossa 10 on esiteltyä LOHC-konseptin periaate.



Kuvio 10. LOHC-konseptin toimintaperiaate. (Hurskainen 2019, 11)

Varastoitaessa vetyä LOHC-menetelmällä varastointi voidaan toteuttaa normaalissa ilmanpaineessa ja lämpötilaolosuhteissa ilman, että vetyä pääsisi vapautumaan itseksensä LOHC-nesteestä (Voorde 2021, 369–370). Myöskään varastoitaessa vetyä LOHC-nesteissä ei synny varastoinnin aikaisia häviöitä, jonka takia LOHC-nesteet soveltuvat hyvin vedyn pitkäaikaiseen varastointiin. Kolmas hyvä puoli on LOHC-nesteiden soveltuvuus jo olemassa olevaan infrastruktuuriin niiden nestemäisen olomuodon ansiosta. Vapautuva vety on puhtaudeltaan 99,99 %:sta, joten se soveltuu käytettäväksi suurimpaan osaan erilaisista polttokennoista, poissulkien PEM-polttokennot, joissa käytettävän vedyn puhtausasteen täytyy olla suurempi. (Hurskainen 2019, 11–13.) Taulukossa 2 on lueteltuna kolmen potentiaalisen LOHC-nesteen ominaisuuksia.

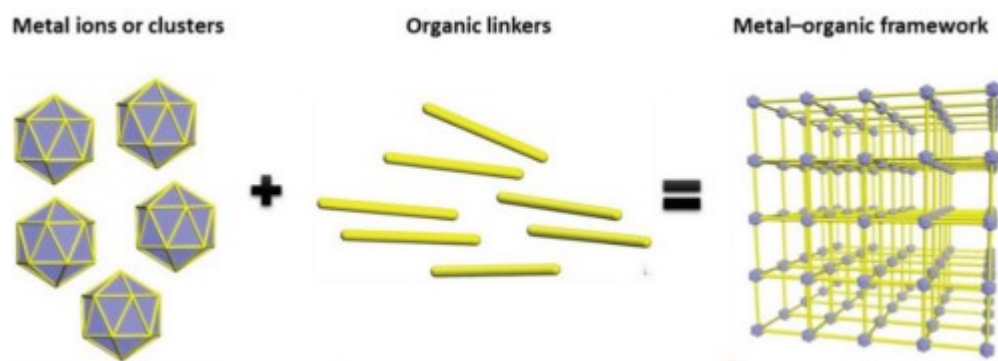
Taulukko 2. LOHC-nesteiden ominaisuuksia. (Hurskainen 2019, 12)

Property		Dibenzyltoluene-perhydro-dibenzyltoluene (DBT-H18-DBT)	N-Ethyl-Carbazole-dodecahydro-N-ethylcarbazole (NEC-H12-NEC)	Toluene-Methylcyclohexane (TOL-MCH)
Storage density		2.05 MWh/Nm ³	2.01 MWh/Nm ³	1.58 MWh/Nm ³
Melting point / boiling point	Loaded	-39 °C / 390 °C	69.1 °C / 348 °C	-95 °C / 111 °C
	Unloaded		/ 280 °C	-127 °C / 101 °C
Hydrogenation	Pressure	30–50 bar	70 bar	10–50 bar
	Temperature	150 °C	150 °C	50–100 °C
	Reaction enthalpy	-65 kJ/mol H ₂ (27% of H ₂ LHV)	-53 kJ/mol H ₂ (22% of H ₂ LHV)	-68.3 kJ/mol H ₂ (28% of H ₂ LHV)
Dehydrogenation	Pressure	1 bar	1 bar	3 bar
	Temperature	320 °C	220 °C	350 °C
	Reaction enthalpy	65 kJ/mol H ₂ (27% of H ₂ LHV)	53 kJ/mol H ₂ (22% of hydrogen LHV)	68.3 kJ/mol H ₂ (28% of hydrogen LHV)
Toxicity		-	⚠	⚠ ⚠ ⚠
Flammability		Low	Low	High
Price		<4 €/kg	>\$40 /kg	<1€/kg

Taulukossa 2 on vertailtuna kolmen lupaavimman LOHC-nesteen ominaisuuksia. Taulukosta voidaan havaita, että jokaisella nesteellä vedyn vapautumiseen vaadittava entalpiamuutos on suhteellisen suuri. Tutkimuksessaan Hurskainen (2019) nostaa LOHC-menetelmän ongelmaksi mainitun suhteellisen suuren entalpiamuutoksen. Kun LOHC-nesteeseen lisätään vetyä, vapautuvasta lämmöstä menetetään osa lämmönsiirron häviöiden takia. Jos prosessissa vedyn vapauttamiseen haluttaisiin käyttää vedyllä tuotettua lämpöä, tulisi 25 – 30 % vapautuvasta vedystä polttaa, jotta katettaisiin lämmönsiirron häviöt ja vedyn vapautumiseen tarvittava energiamäärä. Olisikin tärkeää, että vedyn lisäämisvaiheessa syntyvä lämpö pystyttäisiin hyödyntämään, jotta prosessista saataisiin energiatehokkaampi ja kannattavampi. (Hurskainen 2019, 12.)

4.5 Vedyn säilöminen metalliorganisisissa runkorakenteissa (MOF)

Metalliorganiset runkorakenteet (MOF) ovat huokoisia rakenteita, jotka valmistetaan metalli-ioneista ja orgaanisista linkkereistä. Niiden suuren pinta-alan (jopa 6000 m²/g), säädettävissä olevan huokoiskoon, rakenteellisen joustavuuden ja lämpöstabiiliuden ansiosta MOF:iin uskotaan olevan yksi lupaavimmista tavoista säilöä vetyä. (Meena, Dixit & Tripathi 2023, 1–2.) Kuviossa 11 on esiteltynä MOF:n rakenne.



Kuvio 11. MOF rakenne. (Meena ym. 2023, 4)

MOF:iin huokoisuus sopivat hyvin yhteen vedyn kineettisen halkaisijan kanssa, jolloin vety pääsee helposti absorboitumaan MOF:n rakenteisiin. Vedyn absorptio MOF:iin tapahtuu van der Waalsin voiman avulla, jolloin myös vedyn vapauttaminen tapahtuu pienellä määrällä energiaa. Tällä

hetkellä MOF:ien suurimpana haasteena on niiden huono vedyn varastointikyky huoneen lämmössä, johtuen vetymolekyylien keskinäisistä heikoista vuorovaikutuksista MOF:ien rakenteissa. (Meena ym. 2023, 7–13.)

5 Vedyn muuttaminen takaisin sähköksi

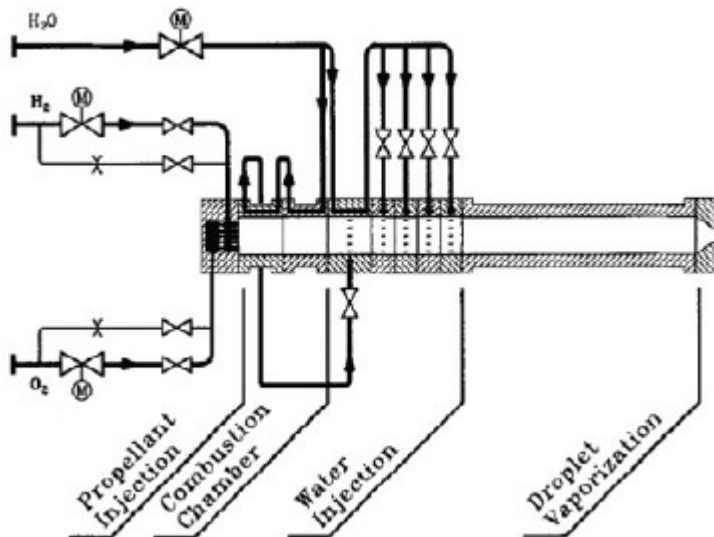
Jotta vetyyn varastoitunut energia saataisiin muunnettua takaisin sähköksi, tarkastelemme kahden eri menetelmän toimintaa. Tarkasteltavat menetelmät ovat vety-happi höyrygeneraattori, jonka avulla pyöritetään turbiinia ja polttokenno, jossa sähkökemiallisen reaktion avulla hapesta ja vedystä saadaan sähköä.

5.1 Vety-happi höyrygeneraattori

Vety-happi höyrygeneraattorin toiminta pohjautuu rakettimoottorien toimintaperiaatteeseen. Poltettaessa puhtaasta hapesta ja vedystä valmistettua stoikiometrista seosta, syntyy erittäin kuumaa vesihöyryä. Syntynyttä höyryä käytetään pyörittämään laitteistossa olevaa höyryturbiinia. (Alabbadi 2012, 13). Hapen ja vedyn palamisreaktio on esitetty kaavassa 5.



Koska kyseinen palamisreaktio on erittäin eksoterminen, prosessiin lisätään nestemäistä vettä laskemaan syntyvän höyryn lämpötilaa höyryturbiinille sopivaksi. (Alabbadi 2012, 14) Vety-happi höyrygeneraattorin toimintaperiaate on esitetty kuviossa 12.

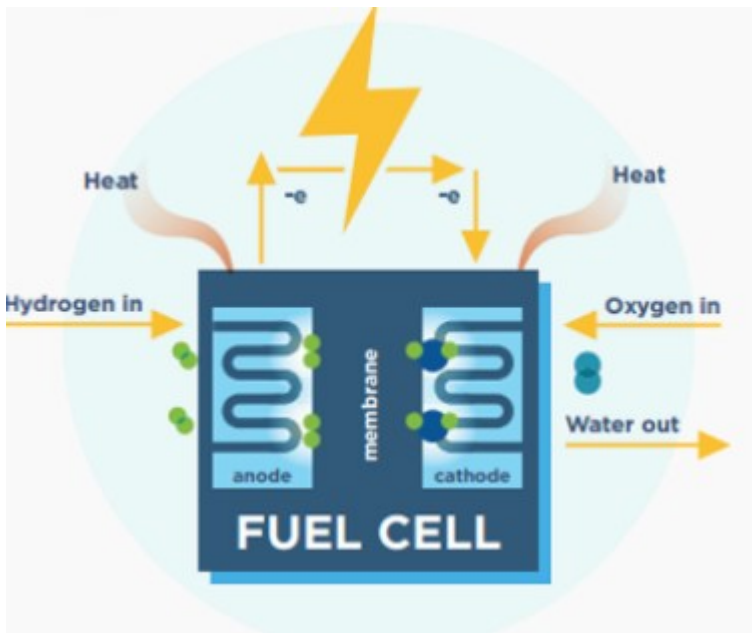


Kuvio 12. Vety-happi höyrygeneraattorin rakenne. (Alabbadi 2012, 14)

Vedyn ja hapen seos sytytetään sytytyskammiossa, jonka jälkeen varsinainen palamisreaktio tapahtuu palamiskammiossa. Palamiskammion lämpötilaa kontrolloidaan suihkuttamalla kammioon nestemäistä vettä. Varsinainen vesihöyry muodostuu höyrystyskammiossa, josta se johdetaan höyryturbiinille. (Alabbadi 2012, 14) Vety-happi höyrygeneraattorilla turbiinia varten tuotettava vesihöyry ei tuota haitallisia päästöjä. Laitteisto saavuttaa myös käynnistyksen jälkeen nimellistehonsa erittäin nopeasti, alle 10 sekunnissa. Tästä syystä vety-happi generaattori sopii erittäin hyvin sovelluksiin, joissa sitä halutaan käyttää vara- tai hätäkeinona tuottaa sähköä poikkeustilanteissa. (Schastlivtsev & Borzenko 2017.)

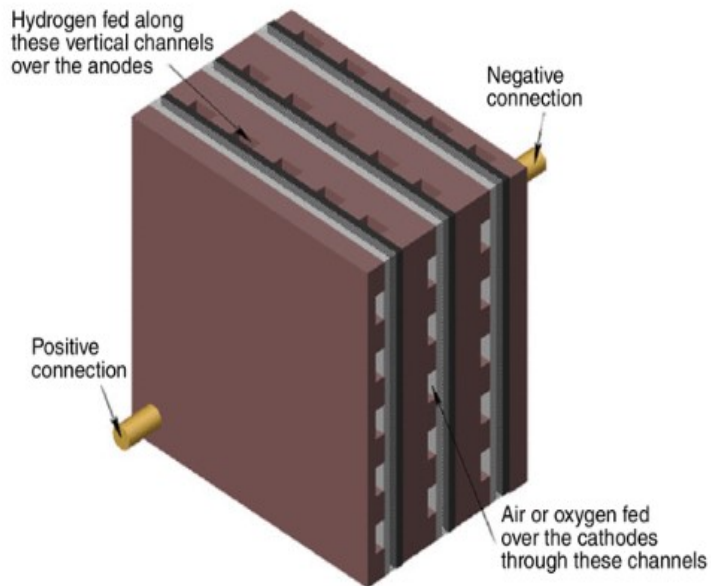
5.2 Vedyllä toimivat polttokennot

Polttokennoihin pätee sama periaate kuin elektrolyysikennoihin. Käytettävä elektrolyytti, elektrodeissa käytetty materiaali ja kalvon tyyppi määrittelevät polttokennon (Dicks & Rand 2018, 7). Polttokennossa vedystä tuotetaan sähköä sähkökemiallisella reaktiolla, jossa vetyä ja happea yhdistämällä syntyy sähköä, lämpöä ja vettä. Polttokennoilla vihreästä vedystä tuotettu sähkö on täysin hiilivapaata. (FCHEA, N.d.) Kuviossa 13 on esitetty yleisesti polttokennon toimintaperiaate.



Kuvio 13. Polttokennon toimintaperiaate (FCHEA, N.d)

Polttokennossa vetyä syötetään anodille, jolloin vetyatomit luovuttavat elektroninsa. Positiivisesti varautuneet protonit kulkeutuvat erotinkalvon lävitse katodille ja negatiivisesti varautuneet elektronit kulkevat virtapiiriin tuottaen sähköä. Kuljettuaan virtapiiriin lävitse, yhdistyvät elektronit protonien ja hapen kanssa, tuottaen polttokennon sivutuotteita, vettä ja lämpöä. (Dicks & Rand 2018, 7; FCHEA, N.d.) Koska polttokennot toimivat matalalla jännitteellä, voidaan polttokennoja yhdistää kytkemällä ne sarjaan halutun jännitteen saavuttamiseksi. Kytkemällä useita kennoja sarjaan muodostuu ns. kennokasoja. Paras tapa tasomaisten kennojen yhdistämiseen on käyttää kaksinapaisia sähköä johtavia levyjä, jolloin levy koskettaa toisen kennon positiivista elektroodia ja seuraavan kennon negatiivista elektroodia. Samalla tämä bipolaarinen levy toimii tapana syöttää anodille vetyä ja katodille happea levyn kummallekin puolelle koneistettujen tai valettujen kanaviensa kautta. (Dicks & Rand 2018, 11–12.) Kuviossa 14 on esitettyä bipolaaristen levyjen avulla sarjaan kytkettyjä polttokennoja.



Kuvio 14. Bipolaarisen levyn avulla sarjaan kytkettyjä polttokennoja (Dicks & Rand 2018, 13)

Vaikka kyseinen tapa kytkeä polttokennot sarjaan on periaatteeltaan yksinkertainen, on levyjen rakenteella ja suunnittelulla suuri vaikutus polttokennojen suorituskykyyn. Ihannetilanteessa levyjen pitäisi olla mahdollisimman ohuita, jolloin yksittäisten kennojen välinen resistanssi olisi mahdollisimman pieni ja kennokasojen koko pysyisi mahdollisimman kompaktina. Tämä johtaa samalla väistämättä myös hapen ja vedyn kuljettamiseen käytettävien kanavien pieneen kokoon, jolloin kaasujen pumppaamiseen tarvittavilta pumpuilta vaaditaan suurempaa kapasiteettia. Samalla kennojen välinen yhteys sähkön kulkua varten tulisi toteuttaa tavalla, jossa kontaktipisteiden pinta-ala olisi mahdollisimman suuri, mutta tämä taas heikentää hyvää kaasujen virtausta elektrodeille. Edellä mainituista tekijöistä johtuen levyjen rakenteesta voi tulla hyvin monimutkainen, mikä johtaa levyjen korkeisiin valmistuskustannuksiin. (Dicks & Rand 2018, 12–14.)

Polttokennojen hyviä puolia ovat niiden luotettavuus, tehokkuus ja skaalautuvuus. Polttokennoissa ei ole liikkuvia osia, joten ne ovat myös hiljaisia. Koska polttokennot pohjautuvat kemialliseen reaktioon, niiden avulla voidaan saavuttaa myös korkeampi hyötysuhde kuin perinteisillä energiantuotantomenetelmillä, kuten polttomoottoreilla ja höyryturbiineilla. Jos polttokennojen hyötysuhdetta halutaan vielä edelleen nostaa, voidaan polttokennoja yhdistää järjestelmään, joka kerää syntyneen hukkalämmön talteen käyttäen sitä erilaisiin lämmitys- tai jäähdytyssovelluksiin. (FCHEA)

6 Uusiutuva sähköntuotanto Suomessa

Jotta vihreää vetyä voitaisiin hyödyntää sähkön varastoinnissa, on tärkeää tarkastella vedyn tuotantoon soveltuvia energiantuotantomuotoja, kyseisten energialähteiden haasteita ja mahdollisuuksia tuotannon lisäämiseen sekä sähköntuotannon määrää suhteessa kulutukseen.

Kuviosta 2 voidaan nähdä vihreän vedyn valmistukseen soveltuvat energialähteet, joita ovat aurinko-, tuuli- ja vesienenergia sekä maalämpö. Viidentenä vaihtoehtona Suomen kohdalla on puupohjainen energia, joka perustuu metsäteollisuuden sivutuotteina syntyvän mustalipeän, sahanpurun ja puunkuoren käyttämiseen energialähteinä. (Maa- ja metsätalousministeriö N.d.) Maalämpöä ei Suomessa käytetä sähkön tuottamiseen johtuen Suomen epäsuotuisista geologisista olosuhteista (Kallio 2019, 3). Puupohjaisen energian tuotanto kattaa nykyisin huomattavan osuuden Suomessa tuotetusta uusiutuvasta energiasta, mutta samalla se on sidoksissa metsäteollisuuden tarvitsemaan raakapuun määrään ja täten vaikeasti skaalattavissa suhteessa tarvittavaan energiantuotantoon. Edellä mainituista syistä johtuen tässä opinnäytetyössä käsitellään vain aurinko- tuuli- ja vesivoimaa.

Vuonna 2022 Suomessa kulutettiin sähköä noin 82 TWh, josta kotimaisella tuotannolla katettiin noin 69 TWh ja sähkön tuonnilla noin 13 TWh. Kotimaisen tuotannon osuudesta 54 % tuotettiin uusiutuvilla energialähteillä, aurinkovoiman kattaessa 0,5 % kokonaistuotannosta, tuulivoiman 16,7 % ja vesivoiman 19,3 %. Kokonaisuudessaan nämä kolme tuotantomuotoa kattoivat 36,5 % Suomessa vuonna 2022 tuotetusta sähköstä. (Tilastokeskus, 2023.)

6.1 Vesivoima Suomessa

Vesivoimalla tuotettiin vuonna 2022 Suomessa 13,3 TWh edestä sähköä (Tilastokeskus, 2023). Vesivoima ei ole riippuvainen vallitsevista hetkellisistä sääolosuhteista tai vuorokaudenajasta, mutta vuotuiset sademäärät ja kevättulvat vaikuttavat saatavilla olevan vesivoiman määrään. Tuotettavan vesivoiman määrää voidaan säätää turbiinille menevän veden virtauksen avulla. Tällöin vesivoimalan yhteydessä toimiva vesistöallas toimii eräänlaisena akkana, jonka avulla voidaan säädellä energiantuotannon määrää. Näistä syistä vesivoima soveltuu hyvin tasaamaan kulutuksen ja kysynnän vaihteluja. (Energiateollisuus, N.da.)

Suomessa löytyy vielä mahdollisuuksia vesivoiman lisäämiselle, mutta suurin osa mahdollisesta vesivoimasta on jo valjastettu, ja vesivoimaloiden ympäristövaikutusten takia uusia vesivoimaloita Suomeen tuskin tullaan rakentamaan. Tästä syystä realistisin tapa vesivoiman lisäämiselle Suomessa on olemassa olevien vesivoimaloiden tehon nostaminen. Edullisimmin tämä tapahtuu voimaloiden peruskorjausten yhteydessä. (Motiva 2021a.)

6.2 Tuulivoima Suomessa

Tuulivoimalla tuotettiin vuonna 2022 Suomessa 11,5 TWh edestä sähköä (Tilastokeskus, 2023). Vuodesta 2018 Suomen tuulivoiman tuotanto on kaksinkertaistunut, ja Suomen Tuulivoimayhdistyksen (N.d) arvion mukaan Suomella olisi vuoteen 2030 mennessä mahdollisuus tuottaa vuosittain 30 TWh sähköä tuulivoiman avulla.

Tuulivoiman tuotanto vaihtelee tuulen määrän mukaan. Yleisesti ottaen tuulivoimalat alkavat tuottamaan sähköä tuulen nopeuden noustessa yli 3 m/s, mutta jotta tuulivoimala olisi kannattava, halutaan yleensä tuulen keskinopeuden alueella olevan yli 6,4 m/s. (Breeze 2015, 12.) Suomessa tuulivoiman tuotanto on keskittynyt tämän takia suurilta osin Pohjanmaalle ja Pohjois-Suomeen, kun taas suurin osa sähkön kulutuksesta syntyy Etelä-Suomessa. Tämä luo tarvetta nykyisen kantaverkon vahvistamiselle. Suuren hetkittäisen vaihtelunsa takia tuulivoima tarvitsee myös muuta sähköntuotantoa tasaamaan syntyvää eroa kysynnän ja tarjonnan välillä. (Motiva 2021b). Kuviossa 15 on Fingridin julkaisema tuulivoiman tuotanto päivittäin vuoden 2022 osalta. Kuvajasta on havaittavissa tuulivoiman tuotannon suuri vaihtelu.

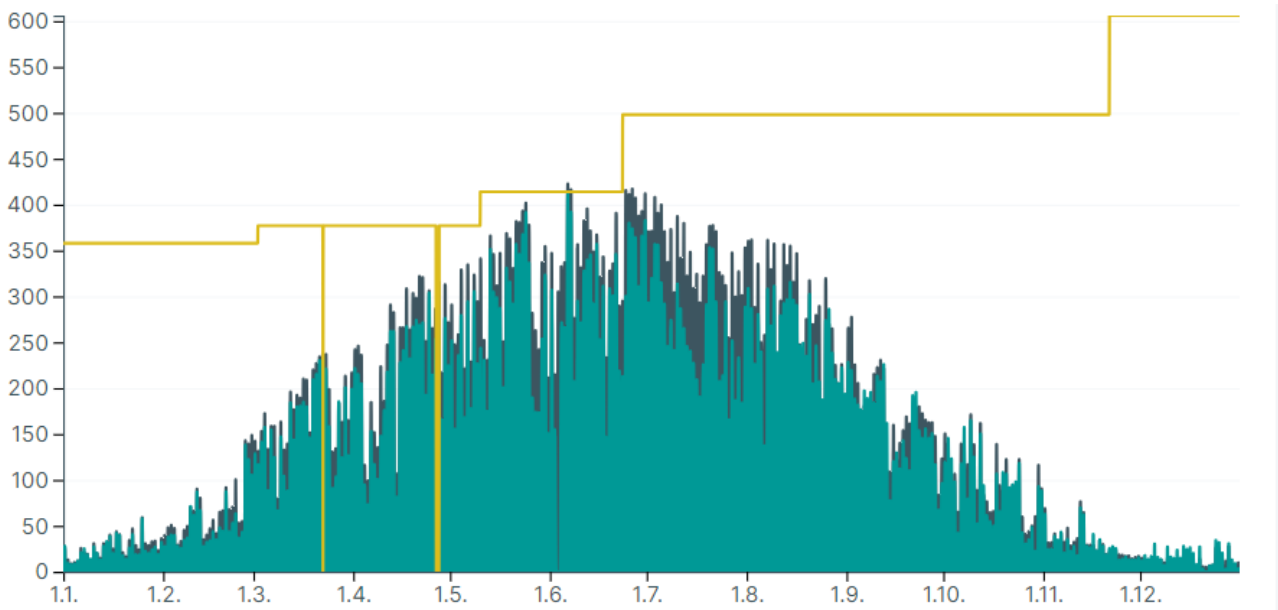


Kuvio 15. Tuulivoiman tuotanto Suomessa vuonna 2022. (Fingrid 2023)

Vaikka tuulivoima onkin yksi kustannustehokkaimmista ja helpoiten saatavissa olevista uusiutuvista energianlähteistä, löytyy siitäkin huonoja puolia ja haasteita. Useimmiten alueet, joilla vallitsee parhaimmat tuuliolosuhteet sijaitsevat syrjäisillä seuduilla. Tästä syntyy haasteita sähkön siirrolle, jolloin myös tuulivoimaprojektien kustannukset nousevat. Tuulivoimaloiden suuri koko vaikuttaa maisemaan ja voimaloiden lavoista syntyy ympäröiviä asukkaita haittaavia ääniä. Tuulivoimalat voivat myös vaikuttaa haitallisesti ympäröivän alueen elämistöön. (EERE N.d.)

6.3 Aurinkovoima Suomessa

Aurinkovoimalla tuotettiin vuonna 2022 Suomessa 0,392 TWh sähköä (Tilastokeskus, 2023). Aurinkotuotannon määrä nousi 31,5 % vuoteen 2021 verrattuna. Aurinkoenergian määrä Suomessa vaihtelee vuodenaikojen mukaan, jolloin luonnollisesti talvella aurinkoenergiaa tuotetaan vähemmän kuin talvella. Tästä syystä aurinko- ja tuulivoima muodostavat hyvän parin. Tuulivoimalla suurin tuotanto saavutetaan talvisin ja aurinkovoimalla kesäisin. Vaikka Suomi sijaitsee pohjoisessa, saavutetaan Etelä-Suomessa Keski-Euroopan tasoa vastaava vuotuinen säteily määrä, minkä lisäksi Suomen viileän ilmaston takia aurinkoenergian hyötysuhde on suurempi. (Energiateollisuus N.db.) Vuodenaikojen välisten vaihtelujen lisäksi aurinkoenergian tuotantoon vaikuttavat myös vuorokaudenajat ja vallitseva sää. Aurinko ei aina paista samalla intensiteetillä. Tästä syystä aurinkovoimalla tuotetun sähkön määrä vaihtelee. (Newton 2015, 70–72) Kuviossa 16 on Fingridin julkaisema aurinkovoiman tuotanto päivittäin vuodelta 2022. Kuvaajasta voidaan havaita aurinkovoiman tuotannon sijoittuvan suurilta osin kesän kuukausille.



Kuvio 16. Aurinkovoiman tuotanto Suomessa vuonna 2022 (Fingrid 2023)

Aurinkovoiman hyviä puolia on monia. Aurinkoenergia on luotettavaa, aurinko nousee joka puolella maailmaa jokaisena päivänä vuodesta, vaikkakin pilvisyys voi vaikuttaa saatavilla olevan aurinkoenergian määrään. Aurinkopaneelien hinnat ovat olleet jo pitkään laskussa, jolloin investointikustannukset uusien voimaloiden suhteen laskevat. Nykyisin käytössä oleva tuntinetotus kannustaa kotitalouksia aurinkovoiman asentamiseen, tuotetulla aurinkoenergialla voidaan vähentää kotitalouksien sähkölaskua ja ylijäämätuotanto voidaan myydä eteenpäin. Alkuperäisen investoinnin jälkeen aurinkovoimalan ylläpidoksi riittää aurinkopaneelien peseminen tarvittaessa. (Newton 2015, 98.) Aurinkovoimalla on myös mahdollista sähköistää kohteita, joissa sähköverkkoa ei ole saatavilla (Energiateollisuus N.db).

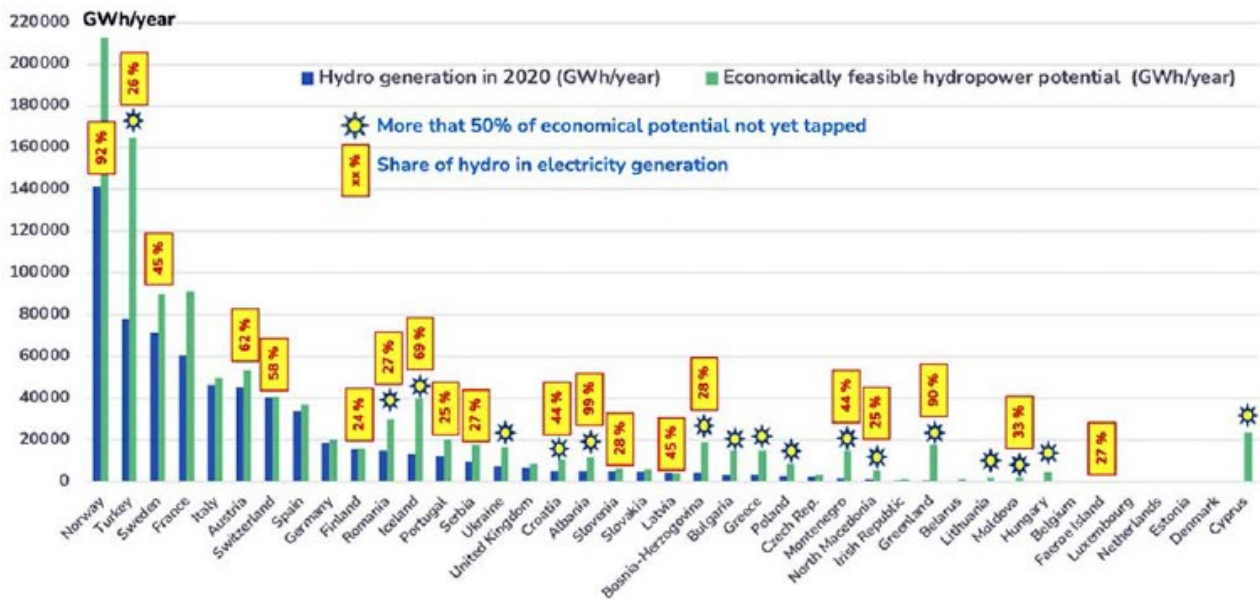
Aurinkovoiman haittapuolia ovat aurinkopaneelien valmistukseen käytettävien materiaalien harvinaisuus ja rajallisuus, joka näkyy myös aurinkopaneelien hinnassa. Suuret aurinkovoimalat vievät myös paljon tilaa, jolloin ne kilpailevat maa-aloista mm. maatalouden ja kaupunkien kanssa. (Parres 2023.) Aurinkovoimalan optimitilanteessa aurinkopaneelit tulisi suunnata etelään, ja niiden kallistuskulman tulisi olla 35 – 45 astetta. 15 asteen poikkeama optimaalisesta kulmasta aiheuttaa noin 5 % pudotuksen vuosituotannossa. (Motiva 2023b.) Jos aurinkovoimalan tuotanto halutaan maksimoida, tulee nämä seikat ottaa huomioon. Tämä tuottaa lisäkustannuksia ja mahdollisia rajoitteita aurinkovoimalle.

7 Vety osana nykyistä sähköjärjestelmää

Tämän osan tarkoituksena on analysoida ja pohtia millaisia mahdollisuuksia, haasteita ja ratkaisuja vety voi tarjota osana nykyistä sähköjärjestelmää. Tulevaisuudessa sähkön kulutus Suomessa tulee kasvamaan. Fingridin (2022, 23) julkaisemassa Suomen sähköjärjestelmän tulevaisuuden skenaariot luonnoksessa Suomen sähkönkulutuksen oletetaan nousevan vuonna 2035 noin 120–125 TWh tasolle. Koska Suomen tavoitteena on vuoteen 2035 mennessä olla hiilineutraali, on selvää, että valtaosa tästä energiatarpeen kasvusta tullaan kattamaan uusiutuvilla energianlähteillä.

Käytettäessä uusiutuvia energianlähteitä sähkön tuotantoon enenevissä määrin törmätään myös niiden ongelmiin suuremmissa mittakaavassa. Kuten aiemmissa tuuli- ja aurinkovoimaa käsittelevissä kappaleissa todetaan, on näiden energianlähteiden tuottama energian määrä sidoksissa valitseviin olosuhteisiin, jolloin energiantuotanto ei ole tasaista. Suomessa tästä syntyvää kysynnän ja tarjonnan eroa on korjattu käyttämällä vesivoimaa säätövoimana tai hankkimalla tarvittava energia Nordpoolin kautta.

Jos otetaan huomioon lähtökohta, jossa globaalisti energian kulutus tulee tulevaisuudessa kasvamaan ja yhä suurempi osa tästä tarvittavasta energiasta tullaan tuottamaan uusiutuvilla energianlähteillä, tarvitaan myös entistä enemmän säätövoimaa. Vesivoiman resurssit tämän tehtävän täyttämiseen ovat rajalliset. Tällä hetkellä 65 % Euroopan mahdollisesta vesivoimapotentialista on käytössä (Schleiss, Fry & Morris 2023, 5). Tarkemmin vesivoiman määrää maakohtaisesti voidaan tarkastella kuviosta 17.



Kuvio 17. Vesivoiman tuotanto ja tuotantopotentiaali Euroopan eri maissa vuonna 2020 (Schleiss ym. 2023, 6)

Vety tarjoaa mahdollisuuden säilöä uusiutuvilla energianlähteillä tuotettua sähköä. Tätä vedyn avulla säilötyä energiaa voidaan käyttää säätövoimana tasapainottamaan yhä suurenevia kysynnän ja tarjonnan eroja. Vetyä on myös mahdollista jatkojalostaa P2X-tekniologioiden avulla esimerkiksi polttoaineeksi.

7.1 Haasteet

Tässä kappaleessa on tarkoitus käsitellä vedyn keskeisimpiä haasteita. Näistä suurimpia ovat vedyn huono edestakainen hyötysuhde, vetyjärjestelmän vaatimat suuret investointikustannukset ja vedyn nykyinen kilpailukykyisyys muihin energian varastointi keinoihin verrattuna. Kyseisiä aiheita käsitellään seuraavissa alaluvuissa.

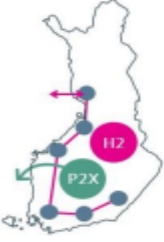
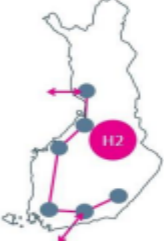
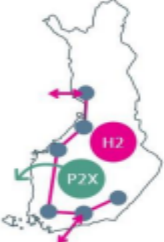
7.1.1 Vedyn huono edestakainen hyötysuhde

Yksi isoimmista haasteista käytettäessä vetyä energian säilömiseen ovat suuret häviöt. Jokainen muunnosvaihe johtaa energiahäviöihin. Kokonaishäviötä voimme tarkastella edestakaisen hyötysuhteen (round-trip efficiency) avulla. Esimerkkinä tässä voidaan käyttää Pellowin, Emmottin, Barnhartin ja Bensonin (2015) tutkimuksessa käytettyä esimerkkitalannetta. Jos oletetaan, että käytössä

olevan alkalielektrolysaattorin hyötysuhde on 70 % ja vedyn muuntamiseksi takaisin sähköksi käytettävän PEM-polttokennon hyötysuhde on 47 %, saadaan edestakaiseksi hyötysuhteeksi 32,9 %. (Pellow ym. 2015, 1938.) Tässä esimerkissä ei ole otettu huomioon mahdollisia säilytyksestä ja vedyn kuljetuksesta aiheutuvia häviöitä. Nämä häviöt riippuvat käytettävistä kuljetus- ja säilöntämenetelmistä, mutta kuten aikaisemmin teoriaosuudessa on huomattu, ovat säilytyksen aikaiset häviöt minimaaliset. Kuljetuksen aikaisista häviöistä voidaan esimerkkinä nostaa esille vedyn häviöt kuljettaessa vetyä kaasumaisena putkilinjaa pitkin. Tutkimuksessaan DeSantis, James, Houchins, Saur ja Lyubovsky (2021, 4) toteavat vedyn kuljetuksesta kaasumaisena 1000 mailin matkan putkilinjaa pitkin aiheutuvan noin 1,94 % häviön kuljetetusta energiamäärästä.

7.1.2 Vetyjärjestelmän vaatimat investointikustannukset

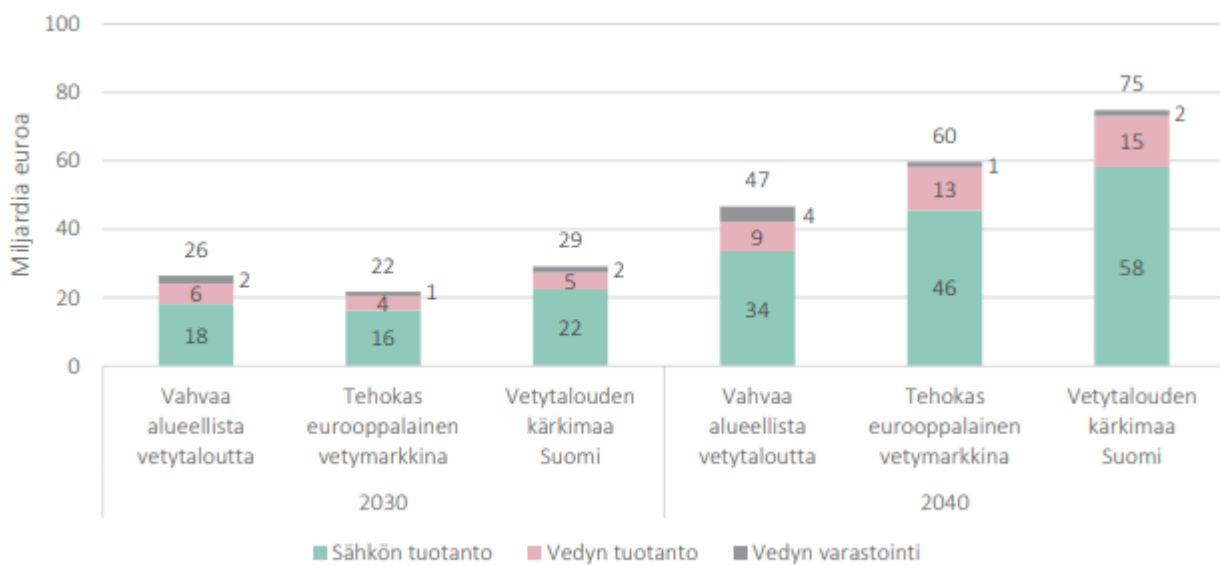
Toinen suuri haaste on vihreän vedyn vaatimat investoinnit siirtoverkkoon, uusiutuvaan sähköntuotantoon, sekä elektrolyysi- ja polttokennolaitteistoihin. Jotta tarvittavia investointeja voitaisiin havainnollistaa, tarkastelemme Fingridin ja Gasgrid Finlandin (2023) tuottamaa Energian siirtoverkot vetytalouden ja puhtaan energiajärjestelmän mahdollistajina – Skenaariot -selvitystä. Selvityksessä luotiin kolme erilaista skenaariota; vahvaa alueellista vetytaloutta, tehokas eurooppalainen vetymarkkina ja vetytalouden kärkimaa Suomi (Fingrid ja Gasgrid Finland 2023, 9–10). Skenaarioiden tarkemmat kuvaukset ovat nähtävissä kuviossa 18.

SKENAARIO	KUVAUS
Vahvaa alueellista vetytaloutta 	<p>Sähkön tuotanto ja siirto</p> <ul style="list-style-type: none"> Suomeen rakennetaan paljon uutta uusiutuvaa sähköntuotantoa, painopiste maatuulivoimassa Suunnitellut sähkön rajasiirtoyhteydet rakennetaan Pohjois-Ruotsiin ja Viroon <p>Vedyn tuotanto ja käyttö</p> <ul style="list-style-type: none"> Suomen nykyinen vetyä käyttävä teollisuus siirtyy puhtaaseen vetyyn Suomesta kehittyy merkittävä P2X-tuotteiden viejämaa <p>Vedyn siirtoinfrastruktuuri</p> <ul style="list-style-type: none"> Rajat ylittävää vedyn siirtoinfrastruktuuria rakennetaan Pohjois-Ruotsiin <p>Vedyn varastointi</p> <ul style="list-style-type: none"> Suomeen rakennetaan useita vetyvarastoja Suomi ei voi hyödyntää Keski-Euroopan suuria vetyvarastoja, koska tarvittavaa vedynsiirtoinfrastruktuuria ei skenaariossa rakenneta
Tehokas eurooppalainen vetymarkkina 	<p>Sähkön tuotanto ja siirto</p> <ul style="list-style-type: none"> Suomeen rakennetaan paljon uutta uusiutuvaa sähköntuotantoa, painopiste maatuulivoimassa Suunnitellut sähkön rajasiirtoyhteydet rakennetaan Pohjois-Ruotsiin ja Viroon <p>Vedyn tuotanto ja käyttö</p> <ul style="list-style-type: none"> Suomen nykyinen vetyä käyttävä teollisuus siirtyy puhtaaseen vetyyn Suomesta kehittyy merkittävä vedyn viejämaa <p>Vedyn siirtoinfrastruktuuri</p> <ul style="list-style-type: none"> Vedyn laajamittaista vientiä varten rakennetaan putkisiirtoinfrastruktuuria sekä Pohjois-Ruotsiin että Keski-Eurooppaan <p>Vedyn varastointi</p> <ul style="list-style-type: none"> Suomeen rakennetaan vetyvarastoja Suomi voi hyödyntää Keski-Euroopan suuria vetyvarastoja vedynsiirtoinfrastruktuurin myötä
Vetytalouden kärkimaa Suomi 	<p>Sähkön tuotanto ja siirto</p> <ul style="list-style-type: none"> Suomeen rakennetaan erittäin paljon uutta uusiutuvaa sähköntuotantoa, painopiste maatuulivoimassa Suunnitellut sähkön rajasiirtoyhteydet rakennetaan Pohjois-Ruotsiin ja Viroon <p>Vedyn tuotanto ja käyttö</p> <ul style="list-style-type: none"> Suomen nykyinen vetyä käyttävä teollisuus siirtyy puhtaaseen vetyyn Suomesta kehittyy erittäin merkittävä vedyn ja P2X-tuotteiden viejämaa <p>Vedyn siirtoinfrastruktuuri</p> <ul style="list-style-type: none"> Vedyn laajamittaista vientiä varten rakennetaan putkisiirtoinfrastruktuuria sekä Pohjois-Ruotsiin että Keski-Eurooppaan <p>Vedyn varastointi</p> <ul style="list-style-type: none"> Suomeen rakennetaan vetyvarastoja Suomi voi hyödyntää Keski-Euroopan suuria vetyvarastoja vedynsiirtoinfrastruktuurin myötä

Kuvio 18. Kuvaus vetytalouden eri skenaarioista vaadittavien toimenpiteiden osalta. (Fingrid & Gasgrid Finland 2023, 8)

Kaikissa skenaarioissa oletetaan Suomen tuuli- ja aurinkovoiman tuotannon määrän yltävän vuoteen 2030 mennessä 100 – 115 TWh tasolle, jatkaen edelleen kasvuaan. Vuonna 2040 tuuli- ja aurinkovoiman yhteistuotanto saavuttaisi 215 – 290 TWh tason. Uuden teollisuuden, liikenteen, uusien datakeskuksien, vedyn tuotannon ja sähkölämmityksen lisääntymisen takia Suomen sähkönkulutus nousisi vuoteen 2030 mennessä 163 – 180 TWh tasolle, saavuttaen vuoteen 2040 mennessä 246 – 324 TWh tason. Tällaisen lopputuloksen saavuttamiseksi, jossa nykyinen energian-

kulutus vuoteen 2040 mennessä lähes nelinkertaistuisi ja pääosa tästä kasvaneesta energiankulutuksesta katettaisiin aurinko- ja tuulivoiman avulla, vaatisi skenaariosta riippuen uusia investointeja sähkön ja vedyn tuotantoon sekä vedyn varastointiin vuoteen 2030 mennessä 22-29 miljardia euroa ja vuoteen 2040 mennessä 47-75 miljardia euroa. Näissä investointiarvioissa esimerkiksi energiansiirtoon ja vedyn jatkojalostamiseen vaadittavia investointeja ei ole huomioitu. (Fingrid & Gasgrid Finland 2023, 16–19.) Kuviossa 19 on havainnollistettuna vaadittavat investoinnit skenaarioittain sekä investointien kustannusjakauma.



Kuvio 19. Arvio vaadittavista investoinneista eri skenaarioiden toteutumiseksi. (Fingrid & Gasgrid Finland 2023, 19)

7.1.3 Vedyn kilpailukykyisyys energiavarastona

Kolmantena haasteena esiin nousee vetyjärjestelmän kilpailukykyisyys verrattuna muihin saatavilla oleviin uusiutuvan energian säilöntäjärjestelmiin. Toisin kuin muilla aloilla, tehokkuus ja investointikustannukset eivät ole ainoa indikaattori sopivan energiasäilöntäteknologian valinnassa. Valintakriteereihin joihin tulisi kiinnittää huomiota ovat mm. varastointikapasiteetti, käytettävissä oleva teho, purkausteho, purkausaika, autonomia, hinta ja ympäristövaikutukset. (Achkari & Fadar 2018) Vedyn lisäksi erilaisista säilöntämenetelmistä voidaan mainita mm. veden pumppuvarastointi (PHES), energian varastointi paineilmaan (CAES), vauhtipyörä, erilaiset akut ja superkapasitaattorit (European patent office N.d). Koska vetyä tultaisiin analysoitavassa tilanteessa käyttämään energian

varastointiin osana sähköjärjestelmää, tärkeää olisi painottaa seuraavia ominaisuuksia: varastointikapasiteetti, purkausaika, käytössä oleva suuri teho lisääntyvien uusiutuvien energianlähteiden takia ja ympäristövaikutukset johtuen pyrkimyksestä hiilineutraaliuteen. Taulukossa 3 on vertailtuna erilaisten säilöntämenetelmien ominaisuuksia.

Taulukko 3. Erilaisten energian säilöntämenetelmien ominaisuuksia. (Achkari & Fadar 2018)

Technology	Capacity	Power	Response time	Investment cost (€/kW)	Life time (Charge/Discharge cycle)
PHES	1 to 10 GWh	0,1 to 2 GW	10 min	600 to 1 500	11 000
CAES	10 MWh to 10 GWh	15 to 200 MW	1 min	400 to 1 200	11 000
Hydrogen	10 kWh to 10 GWh	1 kW to 1 GW	100 ms	3000 to 5 000	25 ans
Batteries	1 kWh to 10 MWh	0,01 to 10 MW	1 ms	300 to 3 000	500 to 4 000
flywheel	0,5 to 10 kWh	2 to 40 MW	5 ms	3 000 to 10 000	> 10 000
Super capacitors	3 kWh	Tension : 2,5 V	3 s	-	> 10 000
Superconducting Magnetic Energy Storage	0,3 to 30 kWh	-	8 ms	-	> 10 000

Otettaessa huomioon painotettavat valintakriteerit ja taulukossa 3 mainitut ominaisuudet, vety sopisi hyvin laajamittaiseen uusiutuvan energian säilöntään. Onko se sitten paras vaihtoehto? Yksiselitteistä vastausta tähän ei löydy. Achkarin ja Fadarin (2018) mukaan veden pumppuvarastointi soveltuu parhaiten laajassa mittakaavassa energian säilöntään ja IEA:n (N.d) mukaan se on nykyisin laajimmin käytössä oleva tapa uusiutuvan energian säilöntään, mutta Guerra, Zhang, Eichman, Denholm, Kurtz ja Hodge (2022) toteavat vuodelle 2050 arvioitujen teho- ja energiakapasiteetin pääomakustannusten perusteella, että yli 2 viikkoa kestävä vedyn säilöntä pystyisi kilpailemaan kustannustehokkuudessa PHES-järjestelmien kanssa.

Toinen mahdollinen lähestymiskulma on vertailla eri säilöntämenetelmien ESOI-arvoja. ESOI-arvolla mitataan, kuinka paljon energiahyötyä saadaan jokaista energiavaraston rakentamiseen käytettyä energiayksikköä kohden, jolloin korkeampi ESOI-arvo indikoi varaston rakentamisen olevan kannattavampaa suhteessa sen rakentamiseen käytettyyn energiaan (Pellow ym. 2015, 1938). ESOI-arvon laskemisen periaate on esitetty kaavassa 6.

$$ESOI = \frac{\text{Varaston käyttöaikana sen kautta verkkoon siirtynyt energiamäärä}}{\text{Varaston rakentamiseen kulunut energiamäärä}} \quad (6)$$

Tutkimuksessaan Pellow ja kumppanit (2015) laskivat esimerkkitapauksena RHFC-systeemin ESOI-arvon, ja vertailivat sitä muihin saatavilla olevien säilytysteknologioiden vastaaviin arvoihin. RHFC-järjestelmä (Regenerative hydrogen fuel cell) sisältää elektrolysaattorin, laitteiston vedyn paineistamiseen ja säilytystankin sekä polttokennon. Lopputuloksena esimerkkitapauksen RHFC-systeemin ESOI-arvoksi saatiin 59. Vastaavasti esimerkiksi litiumioniakun ESOI-arvo on 35 ja PHES-järjestelmä 830. Huolimatta ESOI-arvoista, energian säilytysjärjestelmien edestakaisella hyötysuhteella on kuitenkin enemmän painoarvoa säilytysmenetelmää valittaessa. (Pellow ym. 2015, 1943.)

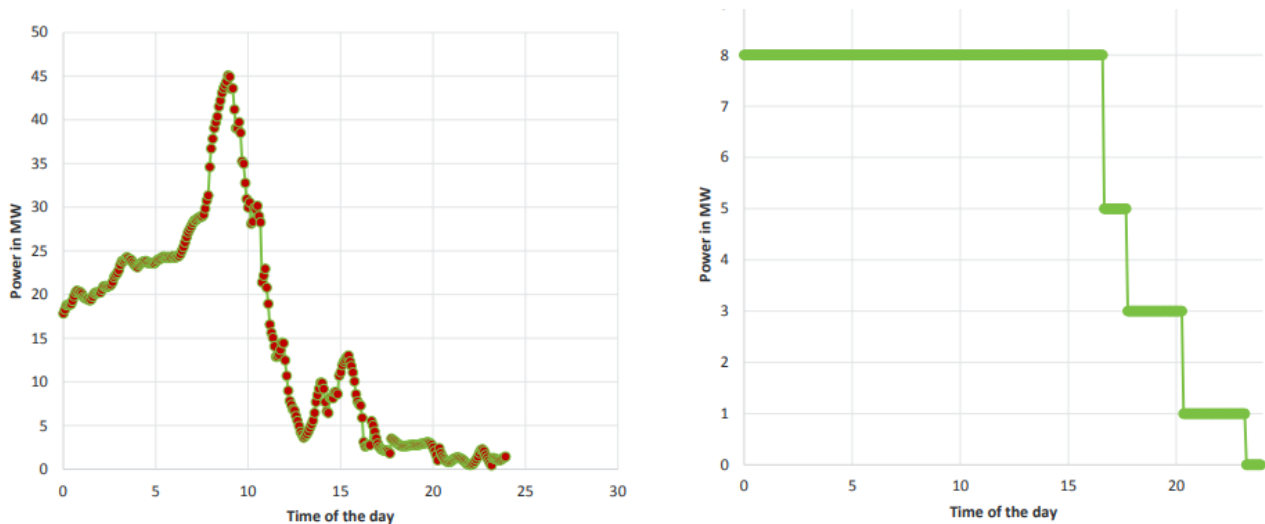
7.2 Ratkaisut ja mahdollisuudet

Seuraavissa alaluvuissa käsittelemme vetyjärjestelmän mahdollisuuksia ja sen tarjoamia ratkaisuja osana energijärjestelmää. Pääpainona ovat vetyjärjestelmän tarjoamat hyödyt energiansiirtoverkolle.

7.2.1 Joustavuutta sähköjärjestelmään

Lisääntyvän uusiutuvan sähkön tuotannon liittäminen verkkoon kuormittaa nykyistä siirtoverkkoa. Vaihteleva tuotanto aiheuttaa taajuuden vaihtelua verkossa. Tässä kohtaa elektrolyysereitä voitaisiin käyttää verkossa rajoittamaan esimerkiksi tuulivoiman aiheuttamia hetkellisiä tuotantohuippuja muuntamalla osa tuotetusta sähköstä vedyksi. (Hovsapian 2017, 9). Tällöin esimerkiksi sähkön siirtoverkkoa ei välttämättä tarvitsisi mitoittaa tuulivoimaloiden huipputehon mukaan, vaan siirtokapasiteetin ylittävä osuus voitaisiin elektrolyysin avulla muuntaa vedyksi. Kyseinen järjestely palvelisi sekä siirtoverkon haltijaa, että tuulivoimalan omistavaa tahoja tilanteessa, jossa vihreän vedyn tuottaminen sen hetkellä sähkön hinnalla olisi kannattavaa.

Sopiviin paikkoihin asennettuina elektrolyysilaitteistot voivat verkonhaltijalle mahdollistaa esimerkiksi tarvittavien uusien verkon vahvistusprojektien lykkäämisen samalla silti mahdollistaen uuden tuotannon liittämisen verkkoon nopeallakin aikataululla. (Meegahapola, L. 2023). Elektrolyysilaitteistojen potentiaalia uusiutuvan sähköntuotannon siirtoverkolle aiheuttamien taajuusvaihteluiden hallitsemiseen voidaan tarkastella kuvion 20 avulla.



Kuvio 20. Vasemmalla yhdistetty tuuli- ja aurinkovoiman tuotantoprofiili ja oikealla saman tuotannon siirtoverkkoon syötettävä osuus 45 MW elektrolysaattorilaitteiston koordinoitun käytön avulla. (Hovsabian 2017, 29.)

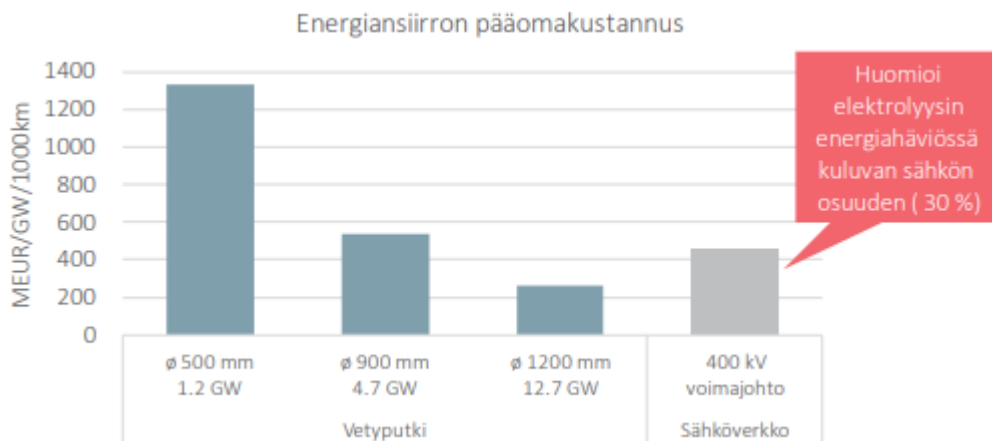
Tilanteessa, jossa elektrolyysilaitteistojen omistajana toimii jokin muu taho kuin siirtoverkon omistaja, on elektrolyysilaitteistojen omistajalla mahdollisuus saada lisätuottoa taajuusohjatun häiriöreservin kautta. Tutkimuksissa on todettu, että elektrolyserit voivat toimia säädettävänä kuormana, ilman negatiivisia vaikutuksia niiden käyttöikään. (Samani, D'Amicis, Kooning, Bozalakov, Silva & Vandeveldel 2020, 3071.) Tällöin vetyjärjestelmä, johon sisältyy elektrolyysilaitteisto ja vetyvarasto, voi toimia taajuusohjatun häiriöreservin FCR-D ylös ja FCR-D alas tuotteena. Jos järjestelmään liitetään polttokennojen avulla mahdollisuus tuottaa varastoidusta vedystä sähköä, lisää se kyseisen järjestelmän FCR-D ylös potentiaalia huomattavasti. Tutkimuksessaan Samani ja muut (2020, 3077) löysivät tutkittavassa tapauksessa olleen 25 MW elektrolyysilaitteiston tuottavuuden kannalta optimaalisimmaksi ratkaisuksi käyttää sitä 55-prosentilla maksimitehosta vedyn tuottamiseen ja tarjota loput kapasiteetista taajuusohjattuun käyttö- ja häiriöreserviin.

Ominaisuuksiltaan PEM-elektrolysaattori soveltuu hyvin taajuusohjatun häiriöreservin vaatimukseen. PEM-elektrolysaattori saavuttaa paineistetusta valmiustilasta täyden tehonsa alle 3 sekunnissa. Jos PEM-elektrolysaattori on jo käynnissä, saavuttaa se täyden tehonsa alle sekunnissa. (Samani ym. 2020, 3072.) Näiden ominaisuuksien lisäksi PEM-elektrolysaattorin muutosnopeus (slew-rate) on korkea (+/- 1 kW/s), mahdollistaen laitteiston nopean säätelyn (Hovsabian 2017, 18).

Edellä mainittujen ominaisuuksiensa takia vetyjärjestelmää voitaisiin käyttää tukemaan sähkön kysyntäjoustoa. Vetyjärjestelmän avulla kysyntäjoustoa voidaan toteuttaa joko hinnan suhteen optimoitavana kulutuksena tai kysyntää leikkaavana joustona. Hinnan suhteen optimoitavassa joustossa vaaditaan vetyvaraston rakentamista ja elektrolyysilaitteistojen ylivoimittamista. Tällöin vedyn tuotantoa ohjataan sähkön hintasignaalien mukaan. Sähkön ollessa edullista vetyä tuotetaan yli vedyn kysynnän ja ylituotanto varastoidaan. Varastoidulla vedyllä voidaan tällöin kattaa vedyn kysynnän ja tarjonnan ero hetkinä, joina vedyn tuottaminen ei hetkellisesti ole kannattavaa kalliin sähkön vuoksi. Kysyntää leikkaavassa joustossa vedyn tuotannon kapasiteetin täytyy olla korkeampaa kuin keskimääräinen vedyn kysyntä. Tällöin vedyn käyttäjä reagoi hintapiikkeihin vähentämällä kulutustaan samalla tasaten sähkön hintapiikkejä. (Sivill, Bröckl, Semkin, Ruismäki, Pilpola, Laukkanen, Lehtinen, Takamäki, Vasara & Patronen 2022, 193.)

7.2.2 Siirtokapasiteetin nousu energiansiirtoverkossa

Seuraavana tarkastelemme energiansiirron hyötyjä, joita energiansiirto vetynä putkia pitkin mahdollistaa. Yleisesti ottaen suurien energiamäärien siirtäminen on energiansiirron pääomakustannusten ja tehokkuuden osalta kannattavampaa kaasuna putkilinjoja pitkin kuin sähköinä sähköverkossa (DeSantis ym. 2021, 4; Gasgrid Finland & Fingrid 2022,9). Tätä on havainnollistettu kuviossa 21, josta voimme myös havaita käytettävän kaasuputken halkaisijan vaikuttavan suuresti energiansiirron pääomakustannuksiin. Energiansiirtokapasiteetiltaan yksi vedyn siirtoon tarkoitettu DN1200-putki vastaa 15 kappaletta 400 kV voimajohtoa, jolloin myös kaasuputken etu maankäytännöllisestä näkökulmasta on järkevämpi vaihtoehto suurilla energiamääriä siirrettäessä (Gasgrid Finland & Fingrid 2022, 9).



Kuvio 21. Energiansiirron pääomakustannuksia vertailtuna. (Gasgrid Finland & Fingrid 2022, 8)

Kun osa uusiutuvasta energiantuotannosta muutetaan elektrolysaattoreiden avulla vedyksi, voidaan tämä osa tuotetusta energiasta säilöä, tai kuljettaa putkilinjoja pitkin kulutuskohteisiin. Tapauksessa, jossa elektrolyysi tapahtuu lähellä tuotantopaikkaa ja vedyn siirto suoritetaan tuotannon sijaintipaikalta kulutuskohteisiin vetyputkia pitkin, vältetään elektrolyysin aiheuttaman hukkaenergian siirtäminen. Jos taas energiansiirto tuotannon sijaintipaikalta suoritetaan sähköverkkoa pitkin kulutuskohteisiin ja elektrolyysi tapahtuu tällöin vasta kulutuskohteiden lähellä, joudutaan myös elektrolyysistä aiheutuva hukkaenergia siirtämään. (Fingrid & Gasgrid Finland 2023, 25–26.) Tästä syystä onkin kiinnitettävä huomiota elektrolyysilaitteistojen sopivaan sijoitteluun energiansiirtoverkossa, jotta välttyttäisiin elektrolyysissä syntyvän hukkaenergian kuljettamiselta pitkiä matkoja.

On myös hyvä tarkastella energiansiirrossa syntyviä häviöitä kummallakin menetelmällä. Vertailtaessa energiansiirtoa 1000 km matkalla, syntyy vetyputkissa häviötä alle 1 % siirrettävästä energiasta. HVDC-verkossa vastaava arvo on noin 3 % ja HVAC-verkossa noin 7 % (Patonia, Lenivova, Poudineh & Nolden 2023, 5; IEA-ETSAP 2014, 1). Nämä häviöt korostuvat erityisesti siirrettäessä yhä suurempia määriä energiaa entistä pidempiä matkoja.

Vetyputket voisivat toimia tilapäisenä energian varastona. Kun vetyputkelta vaadittava vedyn siirtokapasiteetti on tiedossa, voidaan yksinkertaisesti nostaa vetyputken halkaisijan kokoa vastaamaan haluttua siirto- ja säilytyskapasiteettia vastaavaksi. Putken halkaisijan nostamisesta aiheutuva lisäkustannus määrittelee tällöin kyseisellä tavalla toteutetun varaston kustannuksen. Tällöin kyseisellä tavalla toteutettu uusiutuvan energian varasto tulee olemassa olevia PHES ja BESS järjestelmiä

kustannustehokkaammaksi. (APGA N.d, 11) Edellisessä kappaleessa esitelty 13 GWh Dn1200-vetyputki mahdollistaisi energiamäärällisesti 100 GWh säilömisen vetynä 1000 km matkalle, jolloin mahdollistettaisiin vedyn käyttäminen tilanteissa, joissa vedyn tuottaminen ei hetkellisesti ole kannattavaa johtuen uusiutuvalla energialla tuotetun sähkön hinnasta (Gasgrid Finland & Fingrid 2022, 10).

Yleisesti ottaen kaasuputkien toimintavarmuus on myös parempi. Toimintavarmuutta voidaan tarkastella jakeluhäiriöitä aiheuttaneiden vikojen määrällä suhteessa tarkasteltavan ajanjakson ja siirtoverkon pituuteen (APGA N.d, 8). Kuviossa 22 on esitettyä toimintavarmuuden vertailua suurjännitelinjoiden ja kaasuputkien osalta. Esimerkkitarkastelu on suoritettu Australian olosuhteissa, jolloin tulokset eivät ole suoraan verrannollisia esimerkiksi Suomen tilanteessa, mutta antavat kuitenkin suuntaa tilanteessa, jossa kaasuputket ovat asennettuina maan alle.

Infrastructure	Period of Review	Approximate length	Loss of Supply Events	Event per annum (average)	Events per annum per km installed
Gas pipelines	9 years (2009-2018) ³	39,000	10 (9 leaks, 1 rupture)	1.1	0.03
HV Powerlines	9 years (2010-2019) ³	43,000	164	18.2	0.42

Kuvio 22. Kaasuputkien ja suurjänniteverkon häiriöt yhdeksän vuoden tarkastelujaksolta Australiassa. (APGA N.d, 8)

Nestemäisenä tai kaasumaisena vety ei ole välttämättä riippuvainen olemassa olevasta sähkön- tai kaasun siirtoverkosta. Tarvittaessa vedyn kuljetus voidaan suorittaa maanteitse tai laivojen avulla varastointipaikalta käyttökohteeseen. Tällöin esimerkiksi poikkeustilanteessa, jossa muuten energiansiirto on tilapäisesti estynyt, voidaan vedyn saatavuus sitä käyttävissä kohteissa varmistaa, vahvistaen näin Suomen energiaturvallisuutta.

7.2.3 Teknologian kehitys ja hukkaenergian hyödyntäminen

Vety energiankantajana on tällä hetkellä erittäin tutkittu aihe, johon liittyy paljon eri teknologioita elektrolyysin, varastoinnin, kuljettamisen ja vedyn energiaksi muuttamisen osalta. Kuten olemme havainneet, on edestakainen hyötysuhde vedyn kohdalla alhainen, joka osaltaan johtaa suureen

hukkaenergian määrään. Tästä syystä teknologian kehitys näyttelee suurta roolia siinä, kuinka kilpailukykyinen vihreä vety energiantantajana voi tulevaisuudessa olla. Suurimmat häviöt syntyvät elektrolyysissä, jolloin käytettävästä teknologiasta riippuen keskimäärin noin 30 % energiasta menetetään, jolloin suurin yksittäinen kehityksen kohde on elektrolyysiteknologioiden kehittäminen entistä tehokkaammiksi. IRENA:n tulevaisuuden visioita elektrolyysilaitteistojen suorituskyvystä on esitetty taulukossa 4.

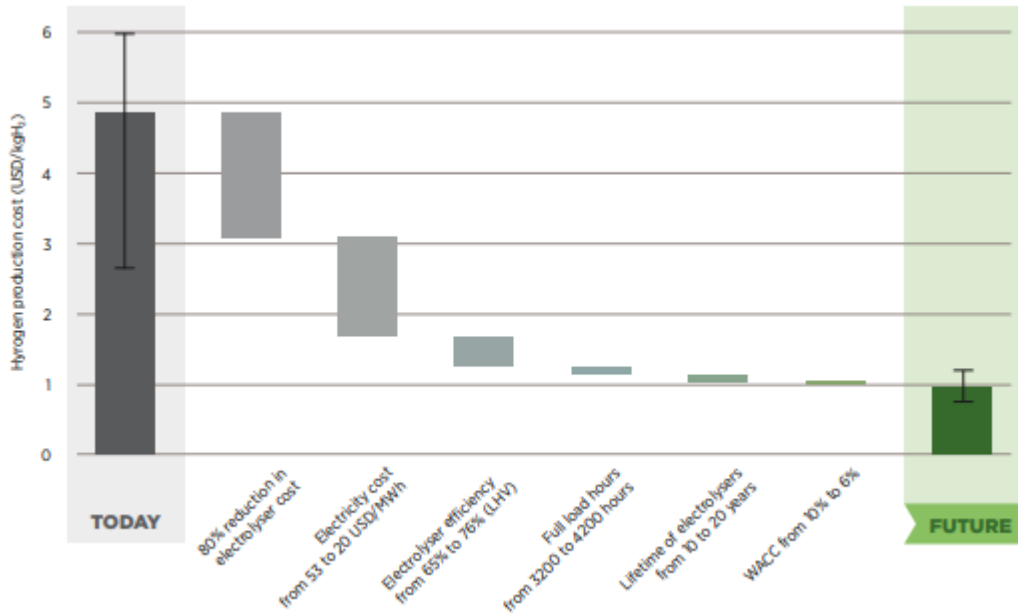
Taulukko 4. Eri elektrolyysiteknologioiden suorituskyky nykyisin ja IRENA:n visio vuodelle 2050.

(IRENA 2021, 14)

	2020				2050			
	Alkaline	PEM	AEM	SOEC	Alkaline	PEM	AEM	SOEC
Cell pressure [bar]	< 30	< 70	< 35	< 10	> 70	> 70	> 70	> 20
Efficiency (system) [kWh/kgH ₂]	50-78	50-83	57-69	45-55	< 45	< 45	< 45	< 40
Lifetime [thousand hours]	60	50-80	> 5	< 20	100	100-120	100	80
Capital costs estimate for large stacks stack-only, > 1 MW) [USD/kW _{el}]	270	400	-	> 2 000	< 100	< 100	< 100	< 200
Capital cost range estimate for the entire system, >10 MW [USD/kW _{el}]	500-1000	700-1400	-	-	< 200	< 200	< 200	< 300

Taulukosta 4 voimme havaita IRENA:n odottavan huomattavaa kehitystä tulevaisuudessa elektrolyysiteknologioiden hyötysuhteissa ja elektrolyysikemien käyttäisissä. Vedyn sisältäessä energiaa 33,5k WH/kg, voidaan laskea kuvasta esimerkiksi PEM-elektrolyysin hyötysuhteen nousevan nykyisestä 0,40 – 0,67 vuoteen 2050 mennessä yli 0,75. Tämä on jo huomattava kehitys nykyiseen verrattuna. Samalla uusiutuvan energian tuotannon lisääntyessä, tulee sen hinta laskemaan. Yhdessä uusiutuvan energian ja elektrolyysilaitteistojen hinnan laskun sekä elektrolyysilaitteistojen käyt-

töiän ja hyötysuhteen nousun avulla voidaan vihreän vedyn hinnasta saada entistä kilpailukykyisempää, lisäten vetyjärjestelmän kannattavuutta osana nykyistä energiajärjestelmää. Mainittujen tekijöiden yhteisvaikutusta vihreän vedyn hintaan voidaan tarkastella kuvion 23 avulla.



Kuvio 23. Elektrolyysiteknologian kehityksen ja uusiutuvan energian hinnan laskun potentiaalinen vaikutus vihreän vedyn hintaan kehityskohdittain. (IRENA. 2021, 12)

Vaikka elektrolyysi- ja polttokennoteknologiat kehittyvätkin tulevaisuudessa, menetetään silti aina osa energiasta häviöinä. Kayalin (2023) mukaan elektrolyysilaitteistojen kohdalla kokonaisenergiankulutuksesta 20 % kuluu lämpöhäviöihin. Syntyvän lämmön takia joudutaan elektrolyysilaitteistoa jäähdyttämään, jotta säilytetään elektrolyysin kannalta optimaalinen lämpötila. Yleensä tähän tarkoitukseen käytetään vesijäähdytystä, jolloin jo itse jäähdytysjärjestelmän käyttämiseen kuluu energiaa, huonontaen näin elektrolyysin hyötysuhdetta entisestään. Tähän yksinkertaisena ratkaisuna olisi integroida elektrolyysissä käytettävä jäähdytysjärjestelmä osaksi kaukolämpöjärjestelmää, jolloin elektrolyysissä syntyvää lämpöä voitaisiin käyttää esimerkiksi asuintilojen lämmittämiseen. (Kayali 2023, 9.) Vastaavasti Wilberforcen, Olabin, Muhammadin, Alaswadin, Sayedin, Ahmedin, Husseinin, Elsaidin ja Abdelkareemin (2022) mukaan polttokennojen kohdalla 45 – 60 % käytetyn vedyn energiasisällöstä menetetään lämpöhäviöinä. Onkin huomattava, että vaikka elektrolyysissä ja polttokennoissa menetetään paljon energiaa hukkalämpönä, on suuri osa tästä energiasta silti hyödynnettävissä esimerkiksi kaukolämpöjärjestelmän avulla.

8 Johtopäätökset

Jatkuvasti kasvava uusiutuvien energianlähteiden käyttäminen energiantuotannossa luo suuria haasteita nykyiselle energiajärjestelmälle. Aurinko- ja tuulivoiman tuotanto vaihtelee vallitsevien olosuhteiden mukaan, joten voidaankin pohtia, mihin asti nykyisin saatavilla olevan säätövoiman potentiaali riittää ja mihin asti energiajärjestelmää voidaan tasapainottaa saatavilla olevilla säätöresursseilla.

Tämä on ongelma joka täytyy ratkaista. Uusiutuvat energianlähteet ovat välttämättömiä hiilineutraaliuden saavuttamiseksi ja ilmastonmuutoksen pysäyttämiseksi. Joustoa energiajärjestelmään voivat tuoda erilaiset menetelmät varastoida energiaa. Tällöin itse energiajärjestelmä voi toimia joustavasti, ilman että energian loppukäyttäjille asetetaan liian suuria vaatimuksia osana kysyntäjoustoa. Vetyjärjestelmä voi toiminnallaan osallistua kysyntäjoustoan ja PEM-teknologia soveltuu ominaisuuksiltaan käytettäväksi taajuusohjatussa häiriöreservissä. Nämä ominaisuudet tuovat lisäarvoa vetyjärjestelmälle. Samalla vedyn mahdollistama uusiutuvan energian siirto putkia pitkin voi tukea nykyisen sähkönsiirtoverkon toimintaa ja luoda yhdessä sen kanssa entistä suorituskykyisemmän, kustannustehokkaamman ja toimintavarmemman energiansiirtoverkon.

Vedyllä on potentiaalia toimia tulevaisuuden energiavarastona. Vaikka vedyn edestakainen hyötysuhde on alhainen, voidaan suuri osa elektrolyysissä ja vedyn takaisin sähköksi muuntamisessa syntyvistä häviöistä käyttää hyödyksi. Teknologian kehittyessä ja hyödynnettäessä syntyvä hukkaenergia, voidaan vedyn edestakaista hyötysuhdetta parantaa huomattavasti. Samalla monet erilaiset vedyn varastointitavat mahdollistavat energiavaraston helpon skaalaamisen, ja yhdistelemällä esimerkiksi suolaluolia ja vedyn siirtoputkia, voidaan luoda energiansiirtoverkko, johon yhdistyy energiavarasto. Vedyn monet varastointitavat antavat paljon mahdollisuuksia erilaisille sovelluksille, joissa tarvitaan energian varastointia, mutta esimerkiksi vedyn säilöminen kaasumaisena ei ole mahdollista. Vetyä on myös mahdollista jatkojalostaa erilaisten P2X-teknologioiden avulla esimerkiksi liikenteen polttoaineiksi. Tällöin uusiutuvan energiantuotannon avulla voidaan vähentää myös liikenteen päästöjä.

Mitä kaikkea ja millaisia toimenpiteitä tämä kaikki sitten vaatisi? Kuten Fingridin ja Gasgrid Finlandin toteuttamasta Energian siirtoverkot vetytalouden ja puhtaan energiajärjestelmän mahdollistajina –

Skenaariot selvityksestä voidaan huomata, vaatii laajan vetyjärjestelmän integroiminen osaksi nykyistä energijärjestelmää valtavia investointeja. Uusiutuvan energian ja vedyn tuotannon sekä vedyn varastoinnin lisäksi investointeja vaaditaan energiansiirtoverkkoon. IEA:n (2023) arvion mukaan Pariisin ilmastopöytäkirjan mukaisten maakohtaisten tavoitteiden saavuttamiseksi vaadittaisiin kansainvälisesti yhteensä 80 miljoonan kilometrin edestä olemassa olevien ja uusien energiansiirtoverkkojen rakentamista ja parantamista.

Suuri vastuu muutosten mahdollistamisesta kuuluu täten valtiollisille toimijoille. Nykyisiä uusiutuvan energian rakentamisprojekteja tulee mahdollisuuksien mukaan tukea ja lupaprosesseja nopeuttaa. Samalla on varmistettava, että energiansiirtoverkko pystyy vastaamaan nopealla tahdilla lisääntyvään uusiutuva energian tuotantoon. Ennakoimalla vaadittavaa siirtokapasiteetin kasvua vältetään tilanteilta, joissa energiansiirtoverkko hidastaisi kehitystä kohti hiilineutraalia yhteiskuntaa. Valtioiden tulisi myös tukea vetytalouteen liittyviä tutkimuksia, jolloin mahdollistettaisiin esimerkiksi elektrolyysilaitteistojen kehittyminen haluttuun suuntaan nopeammalla aikataululla.

Toki kuluttajallakin on aina oma vastuunsa tässä prosessissa. Kysyntä luo tarjontaa. Jokaisen tulisi miettiä omalla kohdallaan, millaisen yhteiskunnan haluaa jälkipolvilleen jättää ja muokata kulutustottumuksiaan tukemaan vähähiiliseen yhteiskuntaan siirtymistä, vaikka se ei aina halvin vaihtoehto olisikaan.

Suomen tulisi ottaa mallia maailmalta, jossa on jo menossa useita vedyn pilottiprojekteja. Esimerkiksi Kiinassa ollaan demonstroimassa laajamittaista siirtymistä vetytalouteen rakentamalla Rurgaosta ensimmäinen vetykaupunki. Pilottiprojektien avulla voidaan pienemmässä mittakaavassa tutkia vetytalouden haasteita käytännön tasolla, ja kehittää ratkaisuja esille nousseisiin ongelma-kohtiin ennakoivasti ennen mahdollista siirtymistä laajamittaisempaan vetytalouteen.

9 Pohdinta

Opinnäytetyö toteutettiin kirjallisuuskatsauksen muodossa. Toimeksiannon mukaisesti tutkimusongelmana oli selvittää, miten vetytaloutta ja uusiutuvaa sähköntuotantoa voidaan integroida osaksi kestäväää energijärjestelmää. Aihe on hyvin ajankohtainen ja voi tarjota arvokasta tietoa ja näkökulmia lukijalle miten erilaisista elementeistä voidaan rakentaa hiilineutraaliuden mahdollistava energijärjestelmä. Henkilökohtaisesti opin valtavasti uutta opinnäytetyötä kirjoittaessani itselleni osittain lähes vieraasta aihealueesta. Tarkempia yksittäisiä tutkimuskysymyksiä olivat seuraavat kysymykset:

- Miten vetyä voidaan tuottaa uusiutuvan energian avulla käyttäen elektrolyysiä?
- Millaisia eri vedyn varastointimenetelmiä on olemassa ja kuinka tehokkaita ne ovat?
- Miten vetyjärjestelmä voi toimia osana sähköjärjestelmää ja tukea sähkön kysyntäjoustoa?
- Millaisia haasteita ja mahdollisuuksia uusiutuva sähköntuotanto ja vetyjärjestelmä luovat?

Opinnäytetyössä onnistuttiin vastaamaan näihin kysymyksiin, ja teoriakokonaisuuksista saatiin muodostettua johdonmukainen yhteenveto. Aiheen rajaaminen oli paikoittain haastavaa. Vedyn varastointimenetelmistä jouduttiin monia yleisesti käytettyjä varastointikeinoja rajaamaan pois (esim. metanoli ja ammoniakki) ja pyrittiin keskittymään vain kaasumaisen vedyn varastointiin ja uusiin potentiaalisimpiin varastointimenetelmiin. Myös esimerkiksi erilaisten energianvarastointijestelmien vertailemista on jouduttu käymään lävitse vain pintapuolisesti. Aiheiden tarkempi tutkiminen olisi kasvattanut opinnäytetyön kokonaisuuden liian suureksi. Esimerkiksi erilaisten energiansäilöntämenetelmien teknistaloudellinen vertailu olisi hyvä jatkotutkimuskohde.

Lähdeaineistoa valittaessa on pyritty käyttämään mahdollisimman luotettavia kansainvälisiä lähteitä, ja tarpeen vaatiessa vertailtu ja varmistettu lähdeainestossa esitettyjä tietoja käyttämällä

useampia eri lähteitä. Tällä tavalla on kasvatettu opinnäytetyössä käsiteltyjen ja esitettyjen tietojen luotettavuutta. Tähän haasteita loi englanninkielisen asiatekstin sisällön kääntäminen suomeksi.

Eettisyyteen opinnäytetyössä on kiinnitetty huomiota esittämällä lähdeaineistosta lainattu tieto asianmukaisten viittausten kera ilman plagiontia. Lähteistä lainattua tietoa ei ole kaunisteltu tai muokattu harhaanjohtavaksi.

-

-

Lähteet

Abdin, Z., Tang, C., Liu, Y. & Catchpole, K. 2021. Large-scale stationary hydrogen storage via liquid organic hydrogen carriers. *iScience*, 24, 9. Viitattu 30.11.2023.

<https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102966>

Achkari O. & Fadar A.E 2018. Renewable Energy Storage Technologies - A Review. *Conférence Internationale en Automatique & Traitement de Signal (ATS-2018) Proceedings of Engineering and Technology – PET*, 35, 69–79. Viitattu 7.12.2023. https://www.researchgate.net/publication/326352395_Renewable_Energy_Storage_Technologies-A_Review

Alabbadi, S.A. 2012. Hydrogen Oxygen Steam Generator Integrating with Renewable Energy Resource for Electricity Generation. *Energy Procedia*, 29, 2012, 12–20. Viitattu 1.12.2023. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.09.003>

Andersson, J. & Grönkvist, S. 2019. Large-scale storage of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 23, 11901–11919. Lainattu 4.11.2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.063>

APGA. N.d. Pipelines vs Powerlines: a summary : Least-cost energy transport and storage in a net zero future. Raportti APGA verkkosivuilla. Viitattu 5.12.2023. https://www.apga.org.au/sites/default/files/uploaded-content/field_f_content_file/pipelines_vs_powerlines_-_a_summary.pdf

Boudellal, M. 2018. *Power-to-gas : renewable hydrogen economy*. Boston : De Gruyter. Viitattu 29.11.2023. ISBN: 3-11-055889-0

Breeze, P. 2015. *Wind Power Generation*. Amsterdam, Netherlands : Academic Press. Viitattu 1.12.2023. ISBN: 0-12-805192-2

DeSantis, D., James, B.D., Houchins, C., Saur, G. & Lyubovsky, M. 2021. Cost of long-distance energy transmission by different carriers. *iScience*, 24, 12, 2021. Viitattu 7.12.2023. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.103495>

Dicks, A. L. & Rand, D. A. J. 2018. *Fuel cell systems explained*. Third edition. Hoboken, New Jersey ; Chichester, England: Wiley. Viitattu 26.11.2023. ISBN: 1-118-61352-X

EERE. N.d. Advantages and Challenges of Wind Energy. Artikkel EERE verkkosivuilla. Viitattu 6.12.2023. <https://www.energy.gov/eere/wind/advantages-and-challenges-wind-energy>

EIA. 2023. Hydrogen explained. Verkkosivu. Viitattu 20.10.2023. <https://www.eia.gov/energyexplained/hydrogen/>

Energiateollisuus. N.da. Vesivoima. Verkkosivu. Viitattu 30.11.2023 <https://energia.fi/energiatie-toa/energiantuotanto/sahkontuotanto/vesivoima/>

Energiateollisuus. N.db. Aurinkovoima. Artikkel energiategollisuuden verkkosivuilla. Viitattu 7.12.2023. <https://energia.fi/energiatieto/energiantuotanto/sahkontuotanto/aurinkovoima/>

European Patent Office. N.d. Energy storage and other enabling technologies. Artikkele EPO verkkosivuilla. Viitattu 3.12.2023. <https://www.epo.org/en/news-events/in-focus/clean-energy/energy-storage>

FCHEA. N.d. Fuel cell basics. Verkkosivu. Viitattu 26.11.2023. <https://www.fchea.org/fuelcells>

Fingrid & Gasgrid Finland. 2023. Energian siirtoverkot vetytalouden ja puhtaan energiajärjestelmän mahdollistajina – Skenaariot. Raportti Gasgrid Finlandin verkkosivuilta. Viitattu 9.12.2023. <https://gasgrid.fi/wp-content/uploads/Gasgrid-Fingrid-vetytaloushankkeen-skenaariot-5-2023.pdf>

Fingrid. 2022. Fingrid's electricity system vision 2022 – draft scenarios for the future electricity system. Tiedote Fingridin verkkosivuilla. Viitattu 10.12.2023. https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/en/news/fingrid_electricity_system_draft_scenarios.pdf

Fingrid. 2023. Sähkön tuotanto ja kulutus. Avointa dataa Fingridin verkkosivuilta. Viitattu 9.12.2023. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinainformaatio/kulutus-ja-tuotanto/>

Gasgrid Finland & Fingrid. 2022. Väliraportti: Energian siirtoverkot vetytalouden ja puhtaan energiajärjestelmän mahdollistajina. PDF-tiedosto Gasgrid Finlandin verkkosivuilla. Viitattu 4.12.2023 https://gasgrid.fi/wp-content/uploads/Fingrid-Gasgrid_Valiraportti_Energian-siirtoverkot-vetytalouden-ja-puhtaan-energiajarjestelman-mahdollistajina.pdf

Guerra, O.J., Zhang, J., Eichman, J., Denholm, P., Kurtz, J. & Hodge, B.M. 2022. The value of seasonal energy storage technologies for the integration of wind and solar power. Energy & Environmental Science, 4. Viitattu 2.12.2023. <https://doi.org/10.1039/D0EE00771D>

Hovsabian, R. 2017. Role of Electrolyzers in Grid Services. PDF-tiedosto EERE:n verkkosivuilla. Viitattu 3.12.2023. https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/06/f34/fcto_may_2017_h2_scale_wkshp_hovsabian.pdf

Hurskainen, M. (2019). Liquid organic hydrogen carriers (LOHC): Concept evaluation and techno-economics. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Research Report No. VTT-R-00057-19. Viitattu 30.11.2023. <https://cris.vtt.fi/en/publications/liquid-organic-hydrogen-carriers-lohc-concept-evaluation-and-tech>

Hydrogen-data telling a story. 2021. Global Energy Infrastructure. Verkkosivu. Viitattu 20.11.2023. <https://globalenergyinfrastructure.com/articles/2021/03-march/hydrogen-data-telling-a-story/>

IEA. 2023a. Electricity Grids and Secure Energy Transitions : Enhancing the foundations of resilient, sustainable and affordable power systems. Julkaisu IEA verkkosivuilla. Viitattu 6.12.2023. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ea2ff609-8180-4312-8de9-494bcf21696d/Electricity-GridsandSecureEnergyTransitions.pdf>

IEA. 2023b. Global Hydrogen Review 2023. Viitattu 23.10.2023. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>

IEA. 2023c. Lack of ambition and attention risks making electricity grids the weak link in clean energy transitions. Uutinen IEA:n verkkosivuilla. Viitattu 12.12.2023. <https://www.iea.org/news/lack-of-ambition-and-attention-risks-making-electricity-grids-the-weak-link-in-clean-energy-transitions>

IEA. N.d. Grid-scale Storage. Verkkosivu. Viitattu 2.12.2023. <https://www.iea.org/energy-system/electricity/grid-scale-storage>

IEA-ETSAP. 2014. Electricity Transmission and Distribution - Technology Brief E12. PDF-tiedosto IEA-ETSAP verkkosivuilla. Viitattu 4.12.2023. https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/E12_el-t&d_KV_Apr2014_GSOK.pdf

IRENA. 2021. Making the breakthrough: Green hydrogen policies and technology costs. Viitattu 5.12.2023. ISBN: 978-92-9260-314-4

IRENA. N.d. Liquefied hydrogen storage. Artikkelin IRENA verkkosivuilla. Viitattu 28.11.2023. <https://www.irena.org/Innovation-landscape-for-smart-electrification/Power-to-hydrogen/6-Liquefied-hydrogen-storage>

Jolly, W.L. 2023. Hydrogen. Britannica-tietosanakirja. Viitattu 20.10.2023. <https://www.britannica.com/science/hydrogen>

Kallio, J. 2019. Geothermal Energy Use, Country Update for Finland. PDF-tiedosto. Lainattu 26.11.2023. <https://europeangeothermalcongress.eu/wp-content/uploads/2019/07/CUR-10-Finland.pdf>

Kayali, F. 2023. Integrating Waste Heat from Hydrogen Production into District Heating. Master Thesis. Lunds Universitet. Viitattu 5.12.2023. <https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=download-File&recordId=9123887&fileId=9123897>

Kumar, S.S. & Himabindu, V. 2019. Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. Materials Science for Energy Technologies, 2, 3, 442–454. Viitattu 29.11.2023. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.03.002>

Maa- ja metsätalousministeriö. N.d. Bioenergia. Verkkosivu. Viitattu 30.11.2023 <https://mmm.fi/biotalous/bioenergia>

Maddaloni, M., Marchionni, M., Abbá, A., Mascia, M., Tola, V., Carpanese, M.P., Bertanza, G. & Artioli, N. 2023. Exploring the Viability of Utilizing Treated Wastewater as a Sustainable Water Resource for Green Hydrogen Generation Using Solid Oxide Electrolysis Cells (SOECs). Water 2023, 15, 2569. Viitattu 3.12.2023. <https://doi.org/10.3390/w15142569>

Meegahapola, L. 2023. Grid Integration of Hydrogen Electrolyzers and Fuel-Cells: Opportunities, Challenges and Future Directions. Artikkelin IEEE verkkosivuilla. Viitattu 3.12.2023. <https://smart-grid.ieee.org/bulletins/march-2023-1/grid-integration-of-hydrogen-electrolyzers-and-fuel-cells-opportunities-challenges-and-future-directions>

Meena, K., Dixit, S. & Tripathi, B. 2023. Metal-Organic Frameworks (MOFs) as Solid State Hydrogen Storage System: A Critical Review. *Energy and Environment Focus*, 7,1, 1–16, 2023. Viitattu 30.11.2023. <https://doi.org/10.1166/eef.2023.1271>

Metal hybride storage. N.d. Artikkele SFC-energyn verkkosivuilla. Viitattu 28.11.2023. <https://www.sfc.com/en/glossar/metal-hydride-storage/>

Motiva. 2021a. Vesivoima. Verkkosivu. Viitattu 30.11.2023. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/vesivoima

Motiva. 2021b. Voimalan sijoittaminen. Verkkosivu. Viitattu 1.12.2023. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima/tuulivoima_suomessa/voimalan_sijoittaminen

Motiva. 2023a. Vety. Verkkosivu. Viitattu 24.10.2023. https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/valitse_auto_viisaasti/energialahteet/vety

Motiva. 2023b. Aurinkopaneelien asentaminen. Artikkele Motivan verkkosivuilla. Viitattu 4.12.2023. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/hankinta_ja_asennus/aurinkopaneelien_asentaminen

Newton, D.E. 2015. *Solar energy : a reference handbook*. Santa Barbara, California : ABC-CLIO. Viitattu 7.12.2023. ISBN: 978-1-61069-696-8

Parres, A. 2023. Solar power: the benefits, the challenges and the future. Blogi kirjoitus Hitachi Energyn verkkosivuilla. Viitattu 6.12.2023. <https://www.hitachienergy.com/news/blogs/2023/11/solar-power-the-benefits-the-challenges-and-the-future>

Patonia, A., Lenivova, V., Poudineh, R. & Nolden, C. 2023. Hydrogen pipelines vs. HVDC lines: Should we transfer green molecules or electrons? PDF-tiedosto OIES verkkosivuilla. Viitattu 4.12.2023. https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2023/11/ET27-Hydrogen-pipelines-vs.-HVDC-lines_HG_AP_2.pdf

Pellow, M.A., Emmott, C.J.M., Barnhart, C.J. & Benson, S.M. 2015. Hydrogen or batteries for grid storage? A net energy analysis. *Energy Environ. Sci.*, 2015, 8, 1938–1952. Viitattu 4.12.2023. Doi: 10.1039/C4EE04041D

Samani, A.E., D'Amicis, A., Kooning, J.D.M., Bozalakov, D., Silva, P. & Vandeveld, L. 2020. Grid balancing with a large-scale electrolyser providing primary reserve. *IET Renewable Power Generation*, 14, 16, 3070–3078. Viitattu 12.12.2023. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2020.0453>

Sankir, M. & Sankir, N.D. 2017. *Hydrogen production technologies*. Hoboken, New Jersey : Scriver Publishing. ISBN: 9781119283645

Schastlivtsev, A.I. & Borzenko, V.I. 2017. Hydrogen-oxygen steam generator applications for increasing the efficiency, maneuverability and reliability of power production. *J. Phys.: Conf. Ser.* 891, 012213. Viitattu 1.12.2023. Doi: 10.1088/1742-6596/891/1/012213

- Schleiss, A.J., Fry, J.J. & Morris, M. 2023. The energy crisis in Europa reveals the importance of reliable hydropower as a catalyst and enabler for the clean and safe energy transition. Hydrolink, 2,2023. Viitattu 4.12.2023. <https://www.iahr.org/library/infor?pid=28041>
- Southall, E. & Lukashuk, L. 2022. Hydrogen Storage and Transportation Technologies to Enable the Hydrogen Economy: Liquid Organic Hydrogen Carriers : Overview and perspectives on liquid organic hydrogen carriers technology. Johnson Matthey Technology Review, 3, 246–258. Lainattu 4.11.2023. <https://doi.org/10.1595/205651322X16415717819428>
- Storing Hydrogen in Underground Salt Caverns. N.d. Artikkelin Linde hydrogenin verkkosivulla. Viitattu 28.11.2023. <https://www.lindehydrogen.com/technology/hydrogen-storage>
- Storing hydrogen. N.d. Artikkelin NEA-groupin verkkosivulla. Viitattu 28.11.2023. <https://www.neu-man-esser.de/en/company/media/blog/hydrogen-storage-in-salt-caverns/>
- Suomen tuulivoimayhdistys. N.d. Tuulivoimaennusteita. Verkkosivu. Viitattu 30.11.2023. <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoima-suomessa-ja-maailmalla/tuulivoimaennusteita>
- Tilastokeskus. 2023. StatFin tietokanta. Viitattu 10.12.2023. https://pxdata.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_salatuo/?tablelist=true
- Ursua, A., Gandía, L.M. & Sanchis, P. 2012. Hydrogen Production From Water Electrolysis: Current Status and Future Trends. Proceedings of the IEEE, 100, 2, 410–426. Viitattu 26.10.2023. doi: 10.1109/JPROC.2011.2156750
- Voorde, M. 2021. Hydrogen Storage for Sustainability, Volume II. De Gruyter. Lainattu 5.11.2023. ISBN: 978-3-11-059623-6
- Wilberforce, T., Olabi, A.G., Muhammad, I., Alaswad, A., Sayed, E.T., Ahmed, G.A.K., Hussein, M.M., Elsaid, K. & Abdelkareem, M.A. 2022. Recovery of waste heat from proton exchange membrane fuel cells – A review. International Journal of Hydrogen Energy. Viitattu 6.12.2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.069>