

Henrik Aikivuori

VETYTALOUS

Vedyn hyödyntämisen nykytilanne ja kehityssuunta

VETYTALOUS

Vedyn hyödyntämisen nykytilanne ja kehityssuunta

Henrik Aikivuori
Opinnäytetyö
Syksy 2022
Energiatekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Energiatekniikka

Tekijä: Henrik Aikivuori

Opinnäytetyön nimi: Vetytalous

Työn ohjaaja: Jukka Ylikunnari

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Syksy 2022

Sivumäärä: 52

Opinnäytetyön aiheena oli selvittää vetytalouden nykytilanne ja kehityssuunta. Työssä tarkasteltiin vetyä energianlähteenä ja varastointimenetelmänä, sen asemaa energiankulutuksessa, etuja ja haittoja. Lisäksi selvitettiin, miten siihen liittyvät tahot, kuten valtiot ja yritykset suhtautuvat vetytalouteen.

Työssä tehtiin kirjallisuusselvitys, jonka pohjana oleva teoria perustui eri vedyn ”värien” määrittämiseen ja selventää, mitä ne tarkoittavat. Vedyn nykyasemaa käsiteltiin käymällä läpi muutamia vedyn tuottajia ja kuluttajia (yrityksiä ja valtioita) ja sen käyttöä energiana. Vedyn haasteita tarkasteltiin vedyn tuottamisen, varastoinnin, siirron ja käytön näkö-kulmasta. Vedyn tulevaisuuden asemaa selvitettiin käymällä lyhyesti läpi muutaman yrityksen, Euroopan unionin ja usean valtion vetystrategia ja/tai vetytiekartta tai vaihtoehtoisesti niiden linjaus vetyyn jos vetystrategiaa/tiekarttaa ei ole.

Vedyn käytössä energiankulutuksessa ollaan siirtymävaiheen alussa, jossa tiedetään vedyn ominaisuudet, mutta sen käyttöä vielä tutkitaan. Vedyn potentiaali tiedostetaan maailmanlaajuisesti ja sille on puhtaana energiamuotona kysyntää. Vetytalouden kehitykseen vaikuttavat eri maiden yksittäiset tilanteet ja resurssit, kansainväliset sopimukset ja kansainvälisten tilanteiden vaikutukset. Nämä tekijät voivat muuttaa sekä valtioiden että yritysten vetyyn liittyviä linjauksia ja sitoumuksia. Vetyyn liittyviä projekteja on käynnissä ympäri maailmaa. Kun olennainen infrastruktuuri on valmistunut ja kun on selvinnyt, ovatko valtiot ja yritykset onnistuneet vetyyn ja muuhun uusiutuvaan energiaan keskittyvissä tavoitteissa, tiedetään paremmin, kuinka paljon kysyntää vedylle tulee olemaan. Vedyn tilannetta vielä tarkkaillaan ja nykyiset tiedot saattavat vanhentua tai muuttua virheelliseksi, jos valtiot ja yritykset muuttavat vetystrategioitaan.

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree Programme in energy technology

Author: Henrik Aikivuori
Title of thesis: Hydrogen economy
Supervisor: Jukka Ylikunnari
Term and year when the thesis was submitted: Fall 2022
Number of pages: 52 pages

The goal of thesis was to form a report on hydrogen economy's current situation and future development. In the work, hydrogen was examined as an energy source and storage method, its position in energy consumption, advantages and disadvantages. In addition, it was found out how related entities, such as governments and companies, approach the hydrogen economy.

In the work, a literature survey was carried out, the underlying theory of which was based on determining the different hydrogen "colors" and clarifying what they mean. The current status of hydrogen was discussed by reviewing a few producers and consumers of hydrogen (companies and states) and its use as an energy source. The challenges of hydrogen were examined from the perspective of hydrogen production, storage, transfer and use. The future position of hydrogen was clarified by briefly reviewing the hydrogen strategy and/or hydrogen roadmap of a few companies, the European Union and several states, or alternatively their alignment with hydrogen if there is no hydrogen strategy/roadmap.

As a result of literature survey, it has been concluded that the usage of hydrogen in energy consumption is at the beginning of a transition phase, where the properties of hydrogen are known, but its use is still being researched. The potential of hydrogen is recognized worldwide and there is a demand for it as a clean form of energy. The development of the hydrogen economy is influenced by the individual situations and resources of different countries, international agreements and the effects of international situations. These factors can change the policies and commitments of both governments and companies related to hydrogen. Hydrogen-related projects are underway around the world. When the essential infrastructure has been completed and when it has become clear whether the states and companies have succeeded in the goals focused on hydrogen and other renewable energy, it will be better known how much demand there will be for hydrogen. The hydrogen situation is still being monitored and current information may become outdated or incorrect if states and companies change their hydrogen strategies.

Keywords: hydrogen, hydrogen economy, hydrogen strategy, environmental goals

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	ERIVÄRISET VEDYT	8
2.1	Harmaa vety	8
2.2	Sininen vety	9
2.3	Vihreä vety	9
2.4	Ruskea/musta ja purppura vety	9
3	VEDYN TUOTANTO JA KÄYTTÖ	11
3.1	Käyttökohteet	11
3.2	Tuotanto	12
4	VEDYN HAASTEET	14
4.1	Tuotanto	14
4.2	Kuljetus	15
4.3	Varastointi	15
4.4	Käyttö	18
5	VETYTALOUDEN STRATEGIAT	19
5.1	Yritysten vetystrategioita Suomessa	19
5.2	EU	19
5.3	Suomi	21
5.4	Saksa	23
5.5	Alankomaat	25
5.6	Iso-Britannia	26
5.7	Ranska	27
5.8	Espanja	28
5.9	Italia	30
5.10	Ruotsi	31
5.11	Norja	32
5.12	Tanska	34
5.13	Baltian maat	35
5.14	Afrikka	36
5.15	Aasia	37

5.16	Australia ja Kanada	38
5.17	Yhdysvallat ja Chile	38
6	VEDYN TUOTANTOTEKNOLOGIOITA	40
6.1	Alkalinen elektrolyysi	40
6.2	Kiinteä oksidikenno	41
6.3	Mikrobielektrolyysi	42
6.4	Termolyysi	43
6.5	Pyrolyysi	44
6.6	Vedyn tuottaminen hiilestä	46
6.7	Vedyn valmistus selluteollisuudessa	46
7	YHTEENVETO	48
	LÄHTEET	50

1 JOHDANTO

Ihmiskunnan aiheuttaman fossiilisten polttoaineiden ja energiantuotantoon pohjautuva ilmastonmuutos on tullut yhä enemmän tiedostetuksi. Sen seuraukset on motivoinut kansainvälisiä ryhmittymiä, kuten EU, erillisiä valtioita ja jopa yksityisiä yrityksiä uudistamaan energiankulutustaan vähempipäästöiseksi, ensisijaisesti laskemaan hiilidioksidipäästöjä aina hiilineutraaliuteen asti. Tämän seurauksena on etsitty ja tutkittu erilaisia vaihtoehtoja fossiilisille polttoaineille ja niihin perustuviin energiantuotantotapoihin. Näkyvimpiä esimerkkejä näistä puhtaista ja uudistuvista energiantuotantotavoista ovat tuuli -ja aurinkoenergia, mutta nämä eivät nykyään, saati tulevaisuudessa energiankulutuksen lisääntyessä yksin riitä ilmastonmuutoksen ehkäisemiseksi. Tämä on yksi syy, miksi on suunnattu katse kohti vetyä ja sen tuomia mahdollisuuksia. Ensisijainen syy vedyn ja vetytalouden viime aikoina saamalle huomiolle kuitenkin on uusiutuvan sähkön varastointi- esimerkiksi talvikuukausille, jolloin pohjoismaissa auringonvalo on vähäisempää ja kesäkuukausina varastoitu energia tulee tarpeeseen energiankulutuksen nousemisen myötä.

Vety on maailman yleisin alkuaine, selvä enemmistö maailmankaikkeuden aineksesta on vetyä, peräti yhdeksäs kymmenesosa. Vedyn polttaminen ei aiheuta haitallisia päästöjä ja sen lämpöarvo tekee siitä polttoaineena maakaasua tehokkaamman polttoaineen (maakaasun lämpöarvo on 38 - 50 MJ/kg ja vetykaasun 119 MJ/kg). Pitää kuitenkin huomioida, että vedyn käyttö on vain niin puhdasta kuin sen valmistamiseen käytetty energia on ja huolimatta vedyn suuresta osuudesta maan aineksesta, sitä ei ole maassa sellaisenaan vaan se pitää erottaa muusta aineesta, keskeisesti vedestä esim. elektrolyysillä. (Renovablesverdes 2022.)

Työn tavoitteena on selvittää, millainen rooli vetytaloudella on maailman energiataloudessa nyt ja tulevaisuudessa yleisellä tasolla. Tämä toteutetaan käsittelemällä vedyn tuotantotapoihin perustuvia vedyn eri 'värejä', eri vedyn hyödyntämistapoja energiantuotannossa ja polttoaineena ja sen käyttäjiä ja mainitsemalla muutama esimerkki vedyn valmistajista / toimittajista. Lisäksi pohditaan vedyn käytön haasteita sen valmistuksessa, kuljetuksessa, säilömisessä ja käytössä. Lopuksi käydään läpi eri vetytalouden strategioita eri maiden, kansainvälisten ryhmien ja yritysten ja organisaatioiden osalta.

2 ERIVÄRISET VEDYT

Vedyn erilaisten tuotantoteknologioiden erottelussa käytetään värejä kuvaamaan tuotantometodin aiheuttamia hiilipäästöjä. Tällä perusteella teknologiat on jaettu harmaaseen, siniseen, vihreään, purppuraan ja ruskeaan/mustaan vetyyn yleistetysti. Näiden värien lisäksi on tarkemmassa jaotte- lussa turkoosi vety ja keltainen vety taulukon 1 mukaisesti.

TAULUKKO 1 Vedyn väriluokittelu (Globalenergyinfrastructure 2021)

	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.

2.1 Harmaa vety

Suurinta osaa maailmalla käytetystä vedystä voidaan pitää harmaana vetyä. Harmaa vety tuote- taan maakaasulla ja näin ollen siitä syntyy hiilidioksidipäästöjä. Harmaa vety on tällä hetkellä yleisin ja halvin vedyn tuotantotapa, vaikka kustannusten odotetaan nousevan hiilidioksidipäästöoikeuk- sien hinnan vuoksi. Yhden tonnin H₂-tuhkan tuotanto tuottaa 2–9 tonnia hiilidioksidia. (Renovables- verdes 2022.)

2.2 Sininen vety

Kuten harmaassa vedyssä, sinisen vedyn tuotannossa käytetään myös fossiilisia polttoaineita, kuten maakaasua mutta päästöjä vähennetään CCS-tekniikalla (Carbon Capture and Storage). Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että syntynyt hiilidioksidi otetaan talteen ja varastoidaan ja sitä voidaan esimerkiksi synteettisten polttoaineiden valmistamiseen. Sinisen vedyn tuotanto ei kuitenkaan ole kokonaan hiilineutraalia, sillä toimitusketjun aikana vetyä pääsee karkaamaan ilmakehään muun muassa hiilidioksidivarastoista. Ongelmallista on myös se, ettei ole määritelty, kuinka paljon hiilidioksidia pitää ottaa talteen, jotta voidaan puhua vedyn tuotannosta sinisenä eikä harmaana. (Kiesilä 2021.)

2.3 Vihreä vety

Vihreä vety on kokonaan uusiutuvilla energianlähteillä, kuten aurinko- ja tuulivoimalla tuotettu ja sen tuotanto tapahtuu tyypillisesti elektrolyysillä. Elektrolyysissä sähkön avulla hajotetaan vesi hapoksi ja vedyksi. Kun prosessiin käytetty sähkö tuotetaan uusiutuvalla energialla, on tuotettu vety päästötöntä. Alle 0,7 % vedyn tuotannosta maailmanlaajuisesti on peräisin uusiutuvista energianlähteistä tai fossiilisista energianlähteistä, joiden käytössä on hyödynnetty CCS-tekniikkaa. Vihreän vedyn haasteina ovat matalat hyötysuhteet, korkeat investointikustannukset ja saatavuus vain pienessä mittakaavassa. Vihreä vety on kallein, mutta kun uusiutuvan energian ja elektrolyysilaitteiden kustannukset laskevat, sen hinnan odotetaan laskevan asteittain. Vihreää vetyä tuotetaan myös biokaasusta käyttämällä karjaa (lanta), maatalous- ja/tai yhdyskuntajätettä. (Kiesilä 2021; Renovablesverdes 2022.)

2.4 Ruskea/musta ja purppura vety

Ruskeaksi vedyksi, kutsutaan vetyä, joka tuotetaan käyttämällä hiilivety-yhdisteitä, kuten hiiltä kaasuttamalla. Ruskean vedyn tuotanto aiheuttaa hiilidioksidipäästöjä. Ruskeaa vetyä tuotetaan polttamalla ruskohiiltä. Kun ruskean vedyn sijaan on puhe mustasta vedystä, on silloin poltettu kivihiihtä.

Purppura vety on tuotettu elektrolyysillä ydinvoimalla tuotetulla sähköllä. Ydinvoimalla tuotettu vety ei tuota hiilidioksidipäästöjä, joten se ei ole harmaata tai ruskeaa vetytuotantoa. Toisaalta koska se

käyttää uraania, joka ei ole uusiutuva luonnonvara ja joka tuottaa välttämättömästi radioaktiivista ydinjätettä ei sitä voi luokitella myöskään vihreäksi vedyksi.

3 VEDYN TUOTANTO JA KÄYTTÖ

Vetytalous voidaan jakaa kahteen osaan, itse vedyn ja vetylaitteiden tuottajiin ja vedyn käyttäjiin. Vetyä voidaan hyödyntää sekä laboratorio-olosuhteissa että kaupallisissa olosuhteissa. Vaikka vetyä on valjastettu jo pidemmän aikaa energianlähteenä, on sen laaja käyttö vasta alkamassa ja suurelta osin vielä suunnitteluvaiheessa. Tämä pätee niin teollisuudessa kuin yhteisöissä ja yksityisissä talouksissa.

3.1 Käyttökohteet

Pääasiallinen vedyn käyttökohde Suomessa on teollisuus ja polttoaineena vedyn käyttö on ollut toistaiseksi vielä hyvin vähäistä. Vetyä käytetään energiantuotannon lisäksi myös teollisen ammoniakin valmistukseen. Tähän tarkoitukseen käytetään nykyään peräti noin puolet harmaasta vedystä. Ammoniakkia käytetään pääasiassa lannoitteena mutta sitä käytetään myös laivojen polttoaineena. Ammoniakin tuottajayhtiöitä on esimerkiksi norjalainen Yara International. Toinen energiantuoton epäsuora käyttökohde on öljynjalostus, jossa lopputuloksena saadaan dieseliä ja autojen moottoreissa käytettävää bensiiniä. Öljynjalostusta harjoittaa esimerkiksi Neste Oyj Porvoon Kilpilahden jalostamolla. (Kemiamedia 2022.)

Vetyä käytetään myös metanolin valmistuksessa antamalla vedyn reagoida hiilimonoksidin eli häkäkaasun kanssa vesikaasusta hydraamalla. Tämä on helpoin tapa, muttei ainoa. Esimerkiksi kemikaalinvalmistaja MasterChem tuottaa metanolia tällä tavalla. (MasterChem 2022.)

Vaikka polttokennoautot ovat saaneet eniten huomiota vetytaloudessa, suurin potentiaali vedyn käytössä polttoaineena on teollisuudessa. Ihmisen aiheuttaman ilmastonmuutoksen näkyvyyden kasvaessa on teollisuudessa aloitettu toimenpiteitä hiilineutraaliin tai kokonaan päästöttömään tilaan pääsemiseksi seuraavien vuosikymmenien aikana ja vety on huomattava tekijä tässä tavoitteessa. Vedyllä aiotaan esimerkiksi korvata Raahen terästehtaan tuotannossa kooksi teräksen pelkistyksessä vedyllä ja sähköllä. Vety voi olla myös osittainen ratkaisu kotitalous – ja teollisuuslämmitykseen. Lisäksi olemassa olevaa infrastruktuuria (kuten maakaasuverkkoja) voidaan käyttää kysynnän lisäämiseen. Itse asiassa jopa 20 tilavuusprosentin vedyn sekoittaminen olemassa olevaan

maakaasuverkkoon vaatii minimaalisia muutoksia loppukäyttäjän verkkoon tai laitteisiin. (Renovablesverdes 2022; KU 2021.)

Energiantuotantolaitokset, kuten turbiinilaitokset voidaan muuttaa hybridilaitoksiksi, kunhan oleelliset muutokset on tehty. Siinä tapauksessa asiakkaan pitää vain uusia sähkö Sopimus ajan tullessa, koska laitos on kytketty jo olemassa olevaan sähköverkkoon ja uudet laitokset voidaan kytkeä suoraan verkkoon. Loppukäyttäjän laitemuutoksia saattaa olla esimerkiksi uudet energiamittarit kuluksen seuraamiseksi. Fortumin aurinkoteknologiapäällikkö Eero Vartiainen mielestä vedyllä tulee olemaan merkittävä rooli myös asuntojen lämmityksessä erityisesti Keski-Euroopassa, jossa suuri osa taloista lämpiää maakaasulla. Liikenteen kannalta Vartiainen arvioi, että polttokennoilla kulkevat henkilöautot eivät tule olemaan tärkein vedyn käyttökohde liikenteessä, vaan että maanteiden raskas liikenne, eli käytännössä rekat ja lentoliikenne tulevat sen sijaan olemaan vedyn suurkäyttäjää. Vety on kevyt polttoaine suhteessa energiasisältöön. Se soveltuu näin liikenteeseen, jossa paino on ratkaiseva tekijä. (Renovablesverdes 2022; KU 2021.)

3.2 Tuotanto

Suomessa Woikoski Oy:tä, jonka pääkonttori sijaitsee Mäntyharjussa, voidaan pitää vety-talouden edelläkävijänä, koska yhtiö kehitti jo 1920–1930-luvulla vedyllä toimivan mäntämoottorin. Woikoski Oy osallistui vuonna 2015 mukana hankkeeseen, jonka tavoitteena oli rakentaa Pohjoismaihin 20–30 vetyautojen tankkauspistettä, mutta joutui luopumaan hankkeesta vuonna 2017 kysynnän puutteen vuoksi. Yhtiö ehti kuitenkin rakentaa kolme tankkauspistettä Mäntyharjulle, Vuosaaren sekä Göteborgiin. Vähäisten kävijämäärien vuoksi esimerkiksi Vuosaaren tankkauspiste on suljettu. Woikoski kuitenkin tuottaa edelleen vetyä teollisuuden käyttöön verkkosähköllä vesielektrolyysin avulla, laitos myös kerää sivutuotevetyä eli hukkavetyä, jolloin prosessi on lähes päästötöntä. Suomessa teollisuus tuottaa hukkavetyä niin paljon, että vuodessa sitä riittäisi polttoaineeksi 10 000 autolle noin 20 000 kilometrille. (Minkkinen 2021.)

Toinen vetytalouden toimija Suomessa on Gasgrid Finland Oy, joka on kokonaan valtion omistama. Talouspoliittinen ministerivaliokunta on 22.6.2022 puoltanut valtion kokonaan omistaman Gasgrid Finland Oy:n toimialan laajentamista konsernitasolla vedyn siirtoinfrastruktuuriin ja siihen liittyvän vetymarkkinan kehittämiseen Suomessa. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että Gasgrid perustaa vetytalouteen omistautuvan tytäryhtiön VetyVerkko Oy:n, joka kehittää Suomeen vetyverkkoa vetytalouteen liittyvän infrastruktuurin kehittämiseksi. (Valtioneuvos 2022 a.)

Esimerkki Suomen ulkopuolella toimivista yrityksistä on Fortum. Fortum ja sen entinen tytäryhtiö (nykyään Saksan julkisesti noteerattu yhtiö) Uniper ovat liittyneet Hydrogen Europeen, joka on Euroopan merkittävin vedyn käyttöä päästöttömässä yhteiskunnassa ajava toimiala- ja tutkimusjärjestö. Uniper omistaa Saksassa kaksi vedyntuotantolaitosta, yhden Falkenhagenissa ja toisen Hampurissa, missä sähköllä tuotettua vetyä voidaan myös metanoida tai siirtää sellaisenaan maakaasuverkkoon ja vähentää näin kaasunkäyttäjien päästöjä. Lisäksi Uniper osallistuu lukuisiin hankkeisiin Keski-Euroopassa ja Isossa-Britanniassa, joiden tavoitteina on tuottaa, varastoida ja käyttää päästötöntä vetyä raskaan liikenteen sekä teollisuuden päästöjen vähentämiseksi. (Fortum 2020.)

Esimerkki vetyä tuottavasta yrityksestä on Ranskalainen Air Liquide –konserni, jolla on muun muassa Suomessa toimiva yhtiö nimeltä Air Liquide Finland Oy. Air Liquide Finland Oy:n päämaja on Oulussa ja sillä on useita tuotantolaitoksia ympäri Suomea, muun muassa Raahessa ja Helsingissä. Yhtiö tuottaa vetykaasua Oulussa elektrolyysillä suurissa vesialtaissa. Yhtiön tuottama vetykaasu tulee kahdessa puhtausasteessa, 99,999 %, jota käytetään autojen ja laivojen polttoaineena ja 99,9999 % jota käytetään kriittisissä laboratorio- ja analysointilaitteistoissa. (Airliquide 2022 a; Airliquide 2022 b.)

Toinen vetykaasua tuottava yritys on Linde plc, jonka pääkonttori on Dublinissa, Irlannissa. Linde plc on monikansallinen teollisuuskaasuyritys, joka tuottaa eri kaasuja muun muassa jäähdytykseen, hitsaukseen ja laboratorioanalyysiin. Linde plc tuottaa vetyä elektrolyysillä ja toimii kaikissa vedyn tuotanto ja käsittelyvaiheissa, eli tuotannon lisäksi Linde plc toimii myös vedyn varastoinnissa ja kuljetuksessa ja muiden yritysten konsultoinnissa koskien vetyä. (Linde-gas 2022.)

4 VEDYN HAASTEET

Vetytalouden hidasteena Suomessa ovat infrastruktuurin puute ja vetyautojen hinta sekä kilpailu sähköautojen kanssa. Nämä ongelmat ovat yleisiä kaikkialla maailmassa, mitä tulee vetytalouteen siirtymisessä. Lisäksi itse vedyn ominaisuudet aineena, kuten syttyvyys ja matala kaasuuntumislämpötila tuovat vedyn varastointiin ja siirtoon omat haasteensa. Osa vetytalouteen siirtymisen haasteista, kuten infrastruktuurin puute helpottuvat, ellei korjaannu kokonaan ajan myötä, kun otetaan huomioon, että nyt ollaan vielä niin sanotusti -tutkimus ja siirtymisvaiheessa vetytalouteen. Sama ilmiö tapahtui aurinkoenergian kanssa, kun paneeleista tuli kehitystyön myötä tehokkaampia ja niiden kysyntä kasvoi.

4.1 Tuotanto

Vaikka vedyn tuotantoon on useanlaisia menetelmiä, kuten elektrolyysi ja hiilestä kaasutus, ilmenee eri tuotantotavoissa eri ongelmia. Luvussa 2 käsiteltiin erivärisiä vetyjä, jossa vedyn `väri´ perustuu sen tuotannossa käytettävään energianlähteeseen. Vedyn käyttöönoton tarkoitus on siirtyä ympäristöystävällisempään energiatalouteen samalla, kun vastataan energiantarpeeseen. Energian kysyntä tulee vain kasvamaan globaalisti ja muut uusiutuvat energianlähteet eivät riitä kattamaan sitä.

Ongelma vedyn tuotannossa tulee esille, kun selvä enemmistö käytössä olevasta vedystä on harmaata vetyä. Saastuttavan tuotantotapansa takia harmaa vety käytännössä mitätöi saadun puhtauden polttoaineena tuoman hyödyn ympäristötavoitteisiin. Vihreä ja sininen vety ovat ympäristöystävällisiä. Vihreä vety tuotetaan kokonaan uusiutuvilla energianlähteillä, kuten tuulivoimalla. Niiden ongelma kuitenkin on tuotannon kalleus. Hinta lieneekin pääasiallinen syy niiden pieneen osuuteen vedyn kokonaistuotannosta. Muita ongelmia vedyn tuotannossa ovat tarvittavan infrastruktuurin puute ja nykyisen kysynnän puute juuri nyt. Tämä vähentää vedyntuottajien motivaatiota, kunnes enemmän kuluttajia, toisin sanoen asiakkaita on tekemässä toiminnasta taloudellisesti kannattavaa.

4.2 Kuljetus

Vetyä voidaan kuljettaa putkessa, joko puhtaana tai sekoitettuna esim. maakaasuun tai paineistetuna/nesteytettynä, joko säiliöautoilla -tai junilla. Putkilinjat ovat vanhaa teknologiaa ja olemassa olevaa putkistoa on paljon mm. LänsiEuroopassa ja Meksikonlahdella. Paineet näissä putkistoissa on 30 - 80 bar g (käyttöpaine). Vertauksena Suomen maakaasun kantaverkon paine on 50 - 80 bar g. Putkilinjat ovat kustannustehokkain vedyn siirtotapa, mutta se vaatii runsaasti infrastruktuuria. Ongelma vedyn kuljetuksessa on, että vety läpäisee useimmat materiaalit. Tämä johtaa maakaasuun nähden moninkertaisiin vuotoihin, jolla on silti hyvin pieni taloudellinen vaikutus. Lisäksi vety on erittäin helposti syttyvä kaasu ja sen lämpöarvo on merkittävästi pienempi tilavuusperusteisesti. (Afray 2022.)

Paras tapa kuljettaa suuria määriä vetyä, kuten myös maakaasua, on kaasuputki. Suuren vety määrän korkeapaineiseen siirtoon tarvittava kaasuputki on erilainen kuin maakaasun kuljetukseen käytettävä putki (käytettävään materiaaliin nähden). Vedyn kuljetukseen soveltuvia putkistoja on jo tuhansia kilometrejä eri puolilla maailmaa. Tulevaisuudessa vetyputket tehdään todennäköisesti komposiittimuoveista. Vetyä voidaan kuljettaa myös rekoilla tai laivoilla, mutta tämä on selvästi kalliimpaa kuin kaasuputkien käyttö. (Fortum 2020.)

4.3 Varastointi

Vedyn suurimpia haasteita siirron ohella, on sen kemiallisesta luonteesta johtuen varastointi. Maanalaiset suolaesiintymät ovat lupaavia vedyn varastointipaikkoja. Nykyään vain kuutta tällaista luolaa käytetään vedyn varastointiin koko maailmassa, mutta maakaasua varastoidaan tuhansiin luoliin. Vetyä voidaan varastoida luolien lisäksi ammoniakkinä, nestemäisenä vetynä tai nestemäisinä orgaanisina yhdisteinä. Paineistetut säiliöt soveltuvat parhaiten pienempien määrien varastointiin. (Fortum 2020.)

Vedyn energiasisältö massayksikköä kohden on erittäin hyvä, lähes kolminkertainen bensiiniin ja dieselöljyyn verrattuna, mutta pienen tiheyden takia tilavuuteen suhteutettu energiatiheys on kuitenkin erittäin huono. Siksi vedyn varastoinnissa kaasumaisena on käytettävä erittäin korkeaa painetta; nykyisin käytössä on jopa 700 bar:n paine. Vetysäiliössä yhdistyy tiivis, teräksestä valmistettu sisäsäiliö ja hiilikuitukomposiitista tehty ulkovaippa, joka kantaa paineen aiheuttamat voimat. Vaihtoehtoisesti vety voidaan muuttaa nestemäiseen olomuotoon jäädyttämällä se $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$:n

lämpötilaan. Nesteytetyn vedyn säiliöissä on myös kaksikuorinen rakenne, jossa kuorten välissä on tehokas lämpöeristys. Nesteytettyä vetyä varten käytössä oleva säiliö vaatii käytännössä jatkuvaa jäähdyttämistä, sillä muuten vety muuttuu takaisin kaasuksi. Siksi nestemäinen vety soveltuu parhaiten autoihin, jotka ovat jatkuvassa käytössä. (Motiva 2020.)

Kolmas tapa vedyn varastoinnissa on sitoa vety esimerkiksi metallihydrideihin, mutta kaupallisia sovelluksia siitä ei vielä ole. Tämäkin varastoimismuoto johtaa verrattain painavaan säiliöön, koska parhaatkaan hydridit eivät kykene sitomaan vetyä kuin alle 10 % omasta massastaan. Hydridi on ainakin nykyään turvallisin varastointimuoto, sillä siitä vety ei vuoda itsekseen, vaan hydridiä on lämmitettävä, jotta vety vapautuisi. Autoteollisuus on ryhtynyt aktiivisesti kehittämään polttokennoautoja, koska vety tarjoaa kuitenkin akkuja paljon paremman energiatiheuden sähkön varastointiin. (Motiva 2020.)

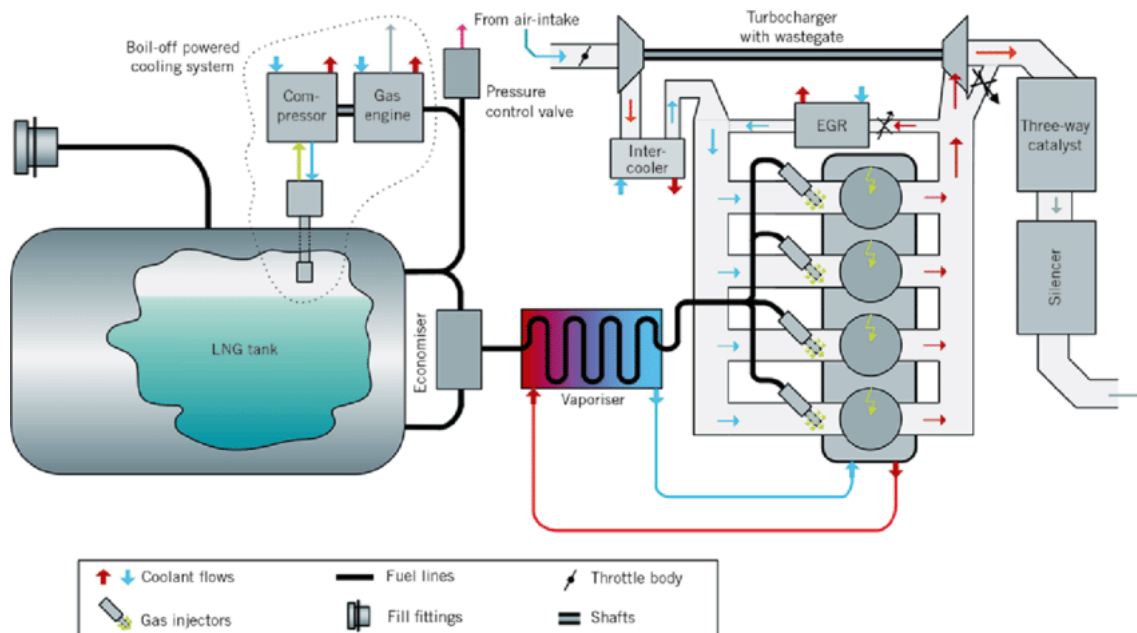
Vetyä voidaan periaatteessa varastoida 5,6 MJ/litra (HHV, ylempi lämpöarvo), jos se ahdetaan 700-kertaiseen ilmakehän paineeseen. Paineistaminen vie energiaa 2,1 % suhteessa vedyn energiasältöön. Vety tihkuu läpi metallisista säiliöistä ja haurastuttaa niitä, mikä on ongelma voimalaitoskäyttöön tarkoitetussa varastoinnissa. Vetysäiliöstä karkaa 25 % sisällöstä kuukaudessa. Myös nesteyttämiseen tarvittava energia on peräti 33 % energiasisällöstä. Käytännössä vety- ja metaanikaasua on hankala varastoida suuria määriä yli satakertaisessa ilmakehän paineessa. 350 ja 700 baarin vetytankkeja on valmistettu, mutta ne ovat tilavuudeltaan vain kymmeniä tai satoja litroja, siis ajoneuvokäyttöön. Nestemäisenä vetyä saisi varastoitua 10 MJ/litra (HHV) $-252,87\text{ °C}$ lämpötilassa. Suhteessa tilavuuteen vedyllä on alhaisempi energiatiheys kuin tunnetuimmilla polttoaineilla: dieselin lämpöarvo on 35,8 MJ/litra ja hiilen 24 MJ/kg. Lisäksi vety on räjähdysherkkää, joten sen varastointiin tarvitsee hyvän tuuletuksen. (Tilanterä 2016.)

Vedyn fyysinen varastointi voidaan jakaa kolmeen tapaan, vedyn kylmäkompressoiminen, varastointiin sellaisenaan korkeassa paineessa (materiaalipohjainen varastointi) ja sen nesteytys.

Vedyn kompressoiminen on sen varastointitavoista yleisimmän käytetty. Tavalliset varastointipaineet ovat 700 barg autoissa ja muissa täyttämistä vaativissa systeemeissä ja 350 barg staattisissa varastoissa. -Mäntä ja kalvokompressoreilla on mahdollista saavuttaa noin 800 barg:n paine. Vedyn liukeneminen metalleihin ja terästen haavoittuvuus paineen vaihdella tekevät kompressoinnista materiaaliteknisesti haastavaa. Etenkin autokäyttöön on olemassa komposiittiratkaisuja, joilla tätä ongelmaa on ratkaistu. (Afy 2022.)

Materiaalipohjaisessa varastoinnissa vety on sidottu toiseen aineeseen ja on toistaiseksi kehittyvä ala. Vaihtoehtoina ovat hybridit, absorbointi pinnoille ja kemiallinen sitominen esim. CH_4 ja NH_3 , joissa on sopivien hiilivetyjen vedytys ja poisto. (Afrý 2022.)

Koska vedyn kriittinen lämpötila on -240 °C (33 K), sen nesteytys vaatii paljon energiaa ja todella matalan lämpötilan. Vedyn nesteytyksen energiantarve tällä hetkellä on 30 - 40 % varastoidun vedyn LHV:stä. Vety pysyy nesteytettynä ilmanpaineessa eristyksen avulla, kiehuva vety jäähdyyttä nestettä, joka tosin vaatii Boil-off-järjestelmän kuten kuvassa 1.



KUVA 1 Boil-off-järjestelmä (researchgate 2016)

LNG (liquefied natural gas) eli nesteytetty maakaasu, on varastoitu säiliöön noin -160 °C lämpötilaan. LNG tankin ja sen ympäröivän tilan lämpötilaeron takia, lämpövirtaa tankkiin ei voida välttää. Lämpövirtaus johtaa jatkuvaan LNG-kaasun höyrystymiseen, joka taas saa säiliön paineen nousemaan, ellei höyrystyvää kaasua poisteta Höyrystyvää LNG-kaasua kutsutaan Boil-off kaasuksi. Kuvan 1 mukaisessa Boil-off-järjestelmässä LNG-kaasusäiliöön kohdistuva lämpövirtaus minimoidaan useakerroksisella tyhjiöeristyksellä. Järjestelmä on suljettu systeemi, joka ei vapauta Boil-off kaasua ennen kuin on saavutettu suurin sallittu paine. LNG-tankit ovat 1.6-2.9 kertaa painavampia ja kooltaan kaksinkertaisia verrattuna dieseltankkeihin, joissa on sama määrä energiaa. Vedyn nesteytyksen käyttö tällä hetkellä on lähinnä erityisen vaativissa kohteissa, kuten mikropiirien valmistaminen ja avaruusteknologiassa. (Afrý 2022; researchgate 2016)

4.4 Käyttö

Vedyn käyttöönoton haasteet tiivistyvät siihen tosiasiaan, että ennen kuin edellä mainitut vedyn valmistukseen, kuljetukseen ja varastointiin liittyvät haasteet on ainakin osittain ratkaistu, on vedyn käyttö ja käyttöönotto huomattavan rajoitettua. Edellä mainittujen vetytalouden osa-alueiden haasteiden lisäksi on itse vedyn käytössä omat ongelmansa. Koska vielä ollaan yleisesti vetytalouden kehitysvaiheessa, ei olla vielä täysin varmoja vedyn käytön käytännön toteutuksesta. Esimerkiksi teollisuudessa ei ole mahdollista siirtyä vanhasta menetelmästä vetyyn, ennen kuin tämä asia on ratkaistu kokonaan.

Toinen ongelma vedyn käytössä on tulevaan kysyntään vastaavien vedyn toimittajien/tuottajien puute, mikä johtuu vedyn käyttöönoton haasteista. On riskialtista siirtyä vetytalouteen, ennen kuin tarvittavan vedyn saanti joka askeleella tuotannosta lähtien on varmistettu, koska vaikka yhdeksän kymmenesosaa maailman aineksesta on vetyä, ei maasta löydy vetyä käyttövalmiissa muodossa vaan se pitää jalostaa itse esimerkiksi vedestä.

Lisäksi vedyn käytön ongelmana on, että vaikka useat maat ovat jo laatineet vetystategian, vety polttoaineena on vielä kehityksen alla, minkä vuoksi nämä suunnitelmat ja kansainväliset sopimukset ja standardit voivat vielä muuttua. Tämän vuoksi yritykset voivat olla halukkaita odottamaan jonkin aikaa, ennen kuin aloittavat uudistamaan toimintamallejaan myöhemprien uudistusten välttämiseksi.

5 VETYTALouden STRATEGIAT

Useissa maissa halutaan kehittää vetyteknologiaa ja edistää teknologian vientiä. Saksa erityisesti osoittaa halukkuutta teknologiajohtajuuden panostukseen. Myös useat muut EU-maat, kuten Ranska, Tanska ja Alankomaat tiedostavat vetyteknologian mahdollisuuksia. Teknologiaviennissä nähdään potentiaalia työllisyyden ja talouskasvun sekä lisäämiseen. (Valtioneuvosto 2022 b.)

5.1 Yritysten vetystrategioita Suomessa

Luvussa 3 mainittujen Suomessa toimivan Gasgridin, Fortumin ja Saksan omistukseen siirtyneen Uniperin lisäksi on muitakin yrityksiä, joilla on vetyyn liittyviä konkreettisia suunnitelmia. Suomen tapauksessa useita toimijoita sisältävät suuren kokoluokan vetyteknologian ja vetytalouden projektit ovat vielä tällä hetkellä harvinaisia. Monet suuret toimijat, kuten SSAB, Wärtsilä ja Neste ovat aloittaneet omia vetyhankkeita markkinoiden kilpailun vuoksi. Esimerkiksi Neste aikoo uusiutuvaa vetyä hyödyntäen vähentää päästöjään sekä pyrkii kehittämään synteettisiä polttoaineita. Suomessa vetyhankkeet liitetäänkin usein osaksi Power to X -teknologiaa. SSAB:n terästehtaan teollisen mittakaavan tutkimusprojektissa tavoitteena on fossiilivapaan teräksen valmistaminen vetypelkistyksen ja puhtaan sähkön avulla korvaamalla Raahen terästehtaan tuotannossa koksi teräksen pelkistyksessä vedyllä ja sähköllä. (Minkkinen 2021.)

5.2 EU

EU:n vihreän kehityksen ohjelman tavoitteiden saavuttaminen edellyttää muiden toimenpiteiden ohella siirtymistä puhtaan eli uusiutuvilla energialähteillä tuotetun vihreän vedyn ja vähähiilisen eli sinisen vedyn tuotantoon ja käyttöön. Tällä hetkellä EU:n jäsenvaltiot osallistuvat laajasti EU-tasoisien lainsäädännön valmisteluun ja määrittelevät kansallisia tavoitteitaan ja toimenpideohjelmiaan. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että jäsenvaltiot muodostavat EU:n ilmastotavoitteita linjaavat vetystrategiansa, jotka sisältävät käytännön suunnitelmia ja tavoitteita vetytalouteen siirtymistä ajatellen. Vaikka vetyprojekteja on EU-maissa käynnissä jo tuhansia, investointipäätöksiä on tehty toistaiseksi vain vähän. Tämä johtuu siitä, että lainsäädäntö on vielä kesken, mikä myös vaikuttaa saatavilla olevan suoran julkisen rahoituksen määrään. (Valtioneuvosto 2022 b.)

EU:n vihreän kehityksen ohjelmassa on asetettu tavoitteeksi ilmastoneutraalisuus vuoteen 2050 mennessä. Haasteina tälle tavoitteelle ovat uusiutuvan sähkön rajoitteet, erityisesti sen varastoinnissa. Esimerkiksi aurinkoenergian niukkuus talvella vähäisen auringonsäteily määrän/säteilyajan vuoksi on ongelma. Lisäksi hiilidioksidipäästöjen vähentäminen raskaassa liikenteessä ja teollisuudessa, joka voi olla hankalaa toteuttaa muilla keinoilla kuin vedyllä. Vedyn lisäämistä liikennepolttoaineena pidetään yhtenä toteutuskelpoisista keinoista. Tämän vuoksi EU:n tavoitteen saavuttamisessa vedyllä on tärkeä rooli. (Valtioneuvosto 2022 b.)

EU:n vetyyn liittyvät esitykset lainsäädäntöön keskittyvät 14.7.2021 julkaistuun Fit-for-55-pakettiin. Sen tarkoituksena on varmistaa EU:n asettama 55 % kasvihuonekaasupäästöjen vähennystavoitteen vuoden 1990 tasosta vuoteen 2030 mennessä saavuttaminen. Käytännön toimia, joita paketissa on esitetty, ovat esimerkiksi nykyisen päästökaupan laajentuminen -meri ja tieliikenteeseen ja ilmaiset päästöoikeudet lakkautettaisiin asteittain. Tämä helpottaisi vetytalouteen siirtymistä, sillä päästökaupan sääntöjen mukaan puhtaan ja vähähiilisen vedyn tuotantolaitokset voisivat saada ilmaisia päästöoikeuksia. Lisäksi on ehdotettu, että Euroopan laajuisen liikenneverkon TEN-T-suunnitelmissa määritellyillä pääväylillä vetytankkausasemia olisi vähintään 150 km välein ja myös keskeisissä liikennehubeissa. Fit-for-55-paketin käsittelyn odotetaan kestävän kahdesta kolmeen vuotta. (Valtioneuvosto 2022 b.)

8.7.2020 Euroopan komissio julkaisi vetystrategian 'Vetystrategia Ilmastoneutraalille Euroopalle', jossa tarkastellaan vedyn tarjoamia mahdollisuuksia, vetytalouden kehittymistä tukevaa sääntelyä ja siihen vaadittavia investointeja sekä markkinoiden kehittymisen edistämistä tutkimus- ja kehityspanostusten avulla. Kyseisin vetystrategian tarkoituksena on vauhdittaa puhtaan ja vähähiilisen vedyn tuotantoa ja hyödyntämistä Euroopassa Tämä vetystrategia on EU-komission laatima strategia, jota ei ole hyväksytty Eurooppa-neuvostossa ja joka ei ole siten jäsenvaltioita sitova asetus tai direktiivi. Eurooppa-neuvosto on vuoden 2020 loppupuolella laatinut ohjeistuksia jatkotyöhön ja strategian soveltamiseen liittyen. Jäsenvaltioiden laillinen sitoutuminen EU:n vetystrategiaan syntyy vasta asianmukaisten lakiesityspakettien, kuten edellä mainitun Fit-for-55-paketin käsittelyn tultua päätökseen. (Valtioneuvosto 2022 b.)

EU:n tärkeimpiä tavoitteita, joita sen komission julkaisemalla strategialla ovat puhtaan vedyn tuotannon lisääminen luomalla kestävä teollinen arvoketju ja puhdasta vetyä tukevan toimintaympäristön luominen, hyvin toimivat markkinat, selkeät säännöt sekä toimiva vetyinfrastruktuuri ja kehittä-

tämällä vedylle dedikoituja logistiikkaratkaisuja. Lisäksi tärkeitä tavoitteita ovat puhtaan vetyteknologian tutkimuksen ja teknologiainnovaatioiden edistäminen, vedyn kysynnän edistäminen teollisuuden ja liikenteen sovelluksissa sekä vetyyn liittyvän investointiputken kehittäminen European Clean Hydrogen Alliancen kautta. EU on myös asettanut tavoitteeksi kehittää yhteistyömahdollisuuksia sen naapurimaiden ja -alueiden kanssa sekä edistää maailmanlaajuisesti vetymarkkinoita. Taulukossa 2 on esitetty EU:n vetystrategia tiivistetysti (Valtioneuvosto 2022 b.)

TAULUKKO 2 EU:n vetystrategia (Valtioneuvosto 2022 b)

 ENSIMMÄINEN VAIHE 2020–2024	 TOINEN VAIHE 2025–2030	 KOLMAS VAIHE 2030–2050
<ul style="list-style-type: none"> • tavoitteena saada käyttöön vähintään 6 GW uusiutuvaa elektrolyysikapasiteettia, joka vastaa 1 milj. tH2 vuosituotantoa • jopa 33 TWh uusiutuvaa vetyä • kemianteollisuuden dekarbonisaatio ja vedyn edistäminen muissakin teollisuusprosesseissa ja raskaassa liikenteessä • tankkausinfrastruktuurin kehittäminen • vähähiilisellä vedyllä rooli (esim. CCS, osin fossiilinen sähkö) • tuotanto ja kulutus pitkälti lähellä toisiaan • Contract-for-Difference ja muiden tukimenettelyjen suunnittelu 	<ul style="list-style-type: none"> • tavoitteena saada käyttöön vähintään 40 GW uusiutuvaa elektrolyysikapasiteettia • vedystä olennainen osa integroitua energiajärjestelmää • panostuksia uusiin käyttökohteisiin mm. terästeollisuus sekä liikenne (raskas liikenne, raideliikenne, osa meriliikenteestä) • panostuksia teollisuuden CCS-ratkaisuihin • energiajärjestelmän joustavuutta lisäävä rooli • paikalliset klusterit ja vedyn siirto • vedyn siirtoinfrastruktuurin ja kansainvälisen kaupan mekanismien kehittäminen 	<ul style="list-style-type: none"> • uusiutuvan vedyn teknologia saavuttaa kypsyyssasteen – käyttöön laajassa mittakaavassa • käyttöön aloilla, joilla hiilestä irtautuminen on vaikeaa • uusiutuvan sähkön tuotantoa lisättävä merkittävästi – neljännes uusiutuvan vedyn tuotantoon 2050 • hiilineutraaliin hiilidioksidin perustuva vety ja vedystä johdetut synteettiset polttoaineet voivat levitä laajemmin (ilmailu, meriliikenne) • infrastruktuuri jo kehittynyt

5.3 Suomi

Suomessa vetytaloudella on mahdollisuuksia niin päästövähennyksissä kuin liiketoiminnassa, ja vedyllä voi olla merkittävä rooli suomalaisen teollisuuden kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä. Suomessa tuotettiin vuonna 2020 arviolta 145 000 tonnia (5 TWh) vetyä teollisuuden tarpeisiin, joka vastaa noin 1,5 prosenttia Euroopassa tuotetusta vedystä. Tämän lisäksi vetyä syntyi vuonna 2020 23 000 tonnia (765 GWh) teollisuuden prosessien sivutuotteena. Vuonna 2020 vetyä

syntyi sivutuotteena. Vetytalouden edellytyksenä on vedylle muodostuva kysyntä ja suhteessa muihin ratkaisuihin kilpailukykyinen tarjonta. Toisin kuin useissa muissa Euroopan maissa, Suomella ei ole erillistä vetystrategiaa, mutta vedyn rooli tiedostetaan muun muassa osana valmisteilla olevaa kansallista ilmasto- ja energiastrategiaa, Fossiilittoman liikenteen tiekartassa (LVM, 2021), sektori-integraatiotyöryhmän loppuraportissa (TEM, 2021), sekä Suomen kestävä kasvun ohjelmassa (VN, 2021b). (Valtioneuvosto 2022 b.)

Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisi kesäkuussa 2021 Fossiilittoman liikenteen tiekartan, jossa tunnistetaan vedyn merkittävä tulevaisuuden hyödyntämispotentiaali erityisesti raskaan liikenteen osalta. Toisaalta tiekartassa todetaan, että vedyn liikennekäyttökohteet, jotka eivät edellytä koko maan kattavaa vedynjakeluinfrastruktuurin rakentamista voisivat olla järkevimpiä, kuten esimerkiksi meriliikenteen satamat. Pitkällä aikavälillä sähköpolttoaineiden ja suoran vedyn käytön rooli päästövähenysten mahdollistajana nähdään pääasiassa liikennemuodoissa, joissa sähköistäminen ei tällä hetkellä näyttäydy mahdollisena. (Valtioneuvosto 2022 b.)

Suomella on sekä vahvuuksia että heikkouksia vetytaloutta ajatellen. Suomen vahvuuksia ovat vahvat sähkönsiirtoverkot ja merkittävä vähähiilisen sähköntuotannon lisärakennuspotentiaali sekä pitkälle edennyt sähköntuotannon dekarbonisaatio. Suomen haasteena on, että Suomella ei ole omia maakaasulähteitä tai geologisia varastointisijainteja, kuten luolia. Sijainti on Suomelle ongelma, koska suomen maakaasuverkko kattaa vain eteläisen-Suomeen ja Suomi ei sijaitse lähellä potentiaalisia päämarkkinoita. Kattava päästöttömän vedyn infrastruktuuri rakentuu sinne, missä kysyntää ja teollista toimintaa on paljon pienellä pinta-alalla, eli esimerkiksi Keski-Euroopan teollisuusalueiden yhteyteen tai niiden yhdistäjäksi. Sijaintinsa vuoksi Suomi ei esiinny kansainvälisesti houkuttelevana sinisen vedyn tuotantomaana mahdollisesta paremmasta kustannuskilpailukyvästä huolimatta. Näiden ongelmien takia Suomi ei todennäköisesti tule tekemään yhtä laajoja investointeja vetytalouteen kuin esimerkiksi Saksalla, joka on sijainniltaan paljon paremmassa asemassa vetytalouden toteutuksessa. Todennäköisemmin Suomi tulee keskittymään vetytaloudessa oman vedyntarpeen tyydyttämiseen ja pyrkii kohti vedyn omavaraisuutta. (Valtioneuvosto 2022 b.)

Suomessa on käynnissä useita uusia puhtaaseen ja vähähiiliseen vetyyn liittyviä investointiprojekteja, jotka pohjautuvat enimmäkseen puhtaan vedyn valmistamiseen ja tuulivoiman hyödyntämiseen energianlähteenä. Suurin osa hankkeista on esiselvitys- tai esisuunnitteluvaiheissa, jotka toimivat pohjana rahoituksen järjestämiselle ja myöhemmin investointipäätöksille. SSAB:n terästeh-

taan teollisen mittakaavan tutkimusprojektissa tavoitteena on fossiilivapaan teräksen valmistaminen vetytelkistyksen ja puhtaan sähkön avulla. Eteläiseen Suomeen on keskittynyt joukko demonstraatiovaiheessa olevia vetyhankkeita koskien puhtaan vedyn tuotantoa ja hyödyntämistä lauttaliikenteessä (Flexens), synteettisen maakaasun tuotantoa (Q Power ja Wärtsilä), vähähiilisen vedyn valmistamista öljyn ja biopolttoneiden jalostamiseen (Neste) ja synteettisen metanolin (Joutsenon yritysconsortio)puhtaan. Kuvassa 2 on esitetty Suomen vetyprojekteja. (Valtioneuvosto 2022 b.)



Kuva 2 Suomen vetyprojekteja (Valtioneuvosto 2022 b)

5.4 Saksa

Saksassa julkaistiin vuonna 2020 kansallinen vetystrategia ja sen lisäksi myös alueellisia vetystrategioita. Saksan valtio panostaa puhtaaseen vetyyn tarjoamalla ainoastaan vihreälle vedylle kansallisia tukia. Vetymarkkinan kehittämiseksi Saksa tarjoaa 7 mrd. euroa tukea vetyyn liittyviin hankkeisiin ja investointeihin ja 2 mrd. euroa on varattu kansainvälisiin yhteistyöhankkeisiin. Saksa on jo allekirjoittanut useita yhteistyösopimuksia eri valtioiden kanssa, kuten Saudi Arabian, Australian Kanadan ja Marokon. (Valtioneuvosto 2022 b.)

Saksan vetystrategiassa vähäpäästöinen eli sininen vety on ylimenovaiheessa, eli sitä voidaan tuoda teollisuuden ja liikennekäytön tarpeisiin. Saksassa teollisuuden kysyntä vedylle on huomattava ja kotimaisen vedyn tuotanto ei riitä kattamaan vedyn tarvetta. Sen takia tuodulla vähäpäästöisellä vedyllä tulee olemaan keskeinen rooli Saksassa pidemmällä tähtäimellä. (Valtioneuvosto 2022 b.)

Saksan vetystrategia tukeutuu pitkälti vedyn tuontiin, jotta ennakoitu teollisuuden suuri vedyn kysyntä saataisiin katettua. Vedyn kysyntäennuste on 90–110 TWh/a vuoteen 2030 mennessä, mistä katettaisiin tuonnilla noin 76–96 TWh/a. Vetyä voitaisiin tuoda aurinkosähköllä tuotettuna Etelä-Euroopan maista ja/tai Baltian sekä Pohjanmeren offshore-tuulivoiman tuotantomaista. Strategiaassa on asetettu tavoitteeksi saavuttaa 5 GW:n elektrolyysikapasiteetti vuoteen 2030 mennessä ja 5 GW kapasiteetin lisäys vuosien 2035 ja 2040 välillä. (Valtioneuvosto 2022 b.)

Saksassa vetyinvestointeja nähdään vaihtoehtona siirtosähkölle ja uusien siirtosähköverkon rakentamiselle. Vetytalouden valtiollisessa tukemisessa keskityttäisiin liikennekäyttöön ja teollisuuteen, jonka ennakoidaan hyötyvän eniten tuista. Keskeisimpiä teollisuuden aloja, jotka ovat tukikysymyksessä esillä ovat kemianteollisuus ja terästeollisuus. (Valtioneuvosto 2022 b.)

Taulukossa 3 on esitetty Saksan vetyprojekteja.

TAULUKKO 3 Saksan vetyprojekteja (Valtioneuvosto 2022 b)

Projekti	Valhe	Vedyn tyyppi	Sijainti	Tavoitteet	Kumppanit
HYBRIDGE		Puhdas	Emsland, Saksa	<ul style="list-style-type: none"> 100 MW elektrolyysilaitos uusiutuvan vedyn tuotantoon Vetyputki lähelle teollisuusalueelle Vedyn varastointi Vedyn syöttö maakaasuverkkoon 	Amprion, Open Grid Europe
H2morrow		Vähähiilinen	Nordrhein-Westfalia, Saksa	<ul style="list-style-type: none"> Vähähiilisen vedyn tuotanto Norjasta maahantuodusta maakaasusta ja 1 GW ATR-kapasiteettia vuoteen 2030 mennessä CCS ja varastointi Pohjanmerelle Vedyn syöttö maakaasuverkkoon 	Equinor, Open Grid Europe
H2 refinery		Puhdas	Lingen, Saksa	<ul style="list-style-type: none"> Vedyntuotanto 50 MW elektrolyserikapasiteetilla tuulivoimalla Investointipäätös 2022 Kaupallinen käyttöönotto 2024 BP pitkäaikais suunnitelma 500 MW elektrolyysikapasiteettia Lingenin öljynjalostamolle 	BP, Ørsted
Green-Hydro-Chem		Puhdas	Leuna/Bad Lauchstädt, Saksa	<ul style="list-style-type: none"> Uusiutuvan vedyn tuotanto tuulivoimalla Sisältää kaksi projektia: Leunan elektrolyseri (100 MW) & energiapuisto Bad Lauchstädt (40 MW) Käyttöönotto 2024 Loppukäyttäjänä paikallinen kemianteollisuus 	Siemens, Linde AG, VNG Gasspeicher GmbH, ONTRAS Gastransport GmbH, Terrawatt Planungsgesellschaft GmbH, DBI Gastechnologisches Institut GmbH, Freiberg, Uniper, 50Hertz Transmission GmbH, Fraunhofer Institute for Microstructure of Materials and Systems IMWS

Esiselvitys
 Konseptisuunnittelu
 Investointipäätös
 Rakentaminen
 Kaupallinen toiminta

5.5 Alankomaat

Alankomaiden vetystrategia pohjautuu maan ilmastopöytäkirjaan. Alankomaat on asettanut tavoitteekseen 49 % vuoteen 2030 mennessä ja 95% vuoteen 2050 vuoden 1990 päästöarvoihin verrattuna ja on liittänyt vetystrategian osaksi toimenpiteitä tämän saavuttamiseksi. Ilmastopöytäkirjassa linjataan, että Alankomaat keskittyvät pääasiassa puhtaaseen, elektrolyysillä tuotettuun vetyyn tuotannossaan. Sinisen vedyn rooli tunnustetaan, mutta se ei saa haitata/rajoittaa vihreän vedyn tuotantoa. (Valtioneuvosto 2022 b.)

Alankomaiden etuna on, että sillä on rinnakkaisia maakaasuverkkoja. Näissä kahdennetuissa verkoissa yhdessä verkossa on matalan lämpöarvon L-kaasua (alle 3500 kcal/Nm³) ja toisessa korkean lämpöarvon k-kaasua yli 3500 kcal/Nm³). Vetystrategiassa tiedostetaan, että Alankomaat voisivat muuttaa osan kahdennetuista verkoista vedyn siirtämiseen. Hallitus suunnittelee sen kaasunsiirronverkon haltijalle Gasumille kannustimia vetyinfrastruktuurin kehitystä varten. (Valtioneuvosto 2022 b; ik-ptz 2022.)

Taulukossa 4 on esitetty Alankomaiden vetyprojekteja.

TAULUKKO 4 Alankomaiden vetyprojekteja (Valtioneuvosto 2022 b)

Projekti	Vaihe	Vedyn tyyppi	Sijainti	Tavoitteet	Kumppanit
Magnum		Vähähiilinen	Eemshaven, Alankomaat	<ul style="list-style-type: none"> Maakaasun höyryreformointi ja CCS Kaasuvoimalaitoksen konversio vetykäyttöiseksi CCGE: 3x440 MW (3 turbiina), joista yksi vetykäyttöiseksi 2023 alkaen 	Gasunie, Vattenfall, Equinor, Mitsubishi Hitachi Power Systems
H-Vision		Vähähiilinen	Rotterdam, Alankomaat	<ul style="list-style-type: none"> Maakaasun höyryreformointi ja CCS Investointipäätös tehdään 2021 aikana 2026: kapasiteetti 3,2 GW ja 700 kt vetyä per vuosi 	Deltalinqs, TNO, Air Liquide, BP, EBN, Engie, Equinor, Gasunie, Gastera, Linde, OCI, Port of Rotterdam Authority, Shell, Taqa, Uniper, Royal Vopak
H2-50		Puhdas	Rotterdam, Alankomaat	<ul style="list-style-type: none"> Uusiutuva vety offshore-tuulivoimalla Investointipäätös vuoden 2022 aikana 2025: 250 MW elektrolyysikapasiteettia vedyntuotantoon 35 000 t/vuosi käytettäväksi öljynjalostukseen 	Port of Rotterdam, BP, Nouryon
Hydrogen Delta		Puhdas / vähähiilinen	Zeelannin alue, Alankomaat	<ul style="list-style-type: none"> Uusiutuvan vedyn tuotanto 2025: 100 MW elektrolyysilaitospilotti 2030: 1 GW elektrolyysikapasiteetti Alkuvaiheessa käytettäisiin vähähiilistä vetyä 	ArcelorMittal, Dow Benelux B.V., Engie, Fluxys, Gasunie, ICI-IP, Impuls/Zeeland, Nederlands Ministerie van Economische Zaken & Klimaat, North SeaPort, Orsted, Provincie Oost-Vlaanderen, Provincie Zeeland, Smart delta Resources, Yara Sluiskil, Zeeland Refinery
NorthH2		Puhdas	Eemshaven, Netherlands	<ul style="list-style-type: none"> Uusiutuva vety offshore-tuulivoimalla Maakaasun infran uudelleenkäyttö Ensimmäiset tuuliturbiinit valmiina vedyntuotantoon 2027 10 GW tuulivoimaa, jolla vetyä 800 ktH₂/vuosi 	Shell, Gasunie, Groningen Seaports
H2ermes		Puhdas	Umuiden, Alankomaat	<ul style="list-style-type: none"> Fossiilittoman teräksen tuotanto tuulivoimalla tuotetuilla vedyllä Investointipäätös vuoden 2021 aikana 2024: 100 MW elektrolyysikapasiteettia (15 kt per vuosi) 	Tata Steel, Nouryon, Port of Amsterdam

Esiselvitys
 Konseptisuunnittelu
 Investointipäätös
 Rakentaminen
 Kaupallinen toiminta

5.6 Iso-Britannia

Iso-Britannia julkisti kansallisen vetystrategiansa elokuussa 2021 ja siihen liittyvä kuuleminen päättyi lokakuussa 2021. Ennen vetystrategian julkaisua, oli jo vuonna 2020 silloinen pääministeri julkaissut tavoitteen nostaa maan vedyntuotantokapasiteetti 5 GW määrään vuoteen 2030 mennessä. Toisin kuin EU maissa, on Iso-Britannian vetystrategiassa asetettu linjaksi tukea molempia, sekä sinistä eli vähäpäästöistä, että vihreää eli puhdasta vetyä. Strategiassa on asetettu tavoitteeksi edistää sekä vedyn kysyntää että tarjontaa. (Valtioneuvosto 2022 b.)

Arvion mukaan Iso-Britanniaan voi muodostua 2030-luvun puoliväliin mennessä kymmeniä tai peräti satoja kilometrejä vetyverkkoa ja vedyn siirtoinfrastruktuurin oletetaan keskittyvän teollisuusklustereihin, missä vedyn kysyntä on suurinta. Siirtoverkoston arvioidaan tulevan kansallisesti kattavaksi vasta 2050-luvulla tai vähän ennen sitä. Maan vähähiilisen vedyn kysyntä klustereihin rajoitettuna olisi vuoteen 2030 mennessä 10 TWh vuodessa ja myös klustereiden ulkopuolella käytettynä 20 TWh. Vähähiilisen vedyn kysynnän pitäisi saavuttaa 45 TWh vuosimäärä vuoteen 2035 mennessä, jotta kansalliset vähähiilisyystavoitteet saavutettaisiin ja liikennesektorilla edellytetään

olevan 20 - 45 TWh vuosittainen kysyntä Ison-Britannian ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi. Liikennesektorilla vuoteen 2030 mennessä vedyllä on potentiaalia olla näkyvästi käytössä raskaassa liikenteessä, junissa ja linja-autoissa ja alkuvaiheessa myös lento -ja meriliikenteen kaupallisessa käytössä (Valtioneuvosto 2022 b.)

Taulukossa 5 on esitetty Ison–Britannian vetyprojekteja.

TAULUKKO 5 Ison–Britannian vetyprojekteja (Valtioneuvosto 2022 b)

Projekti	Vaihe	Vedyn tyyppi	Sijainti	Tavoitteet	Kumppanit
H2 Teesside		Vähähiilinen	Teesside, UK	<ul style="list-style-type: none"> 1 GW vähähiillistä vetyä vuoteen 2030 Investointipäätös 2024 500 MW rakennettuna vuoteen 2027 ja 2030 mennessä 	British Petroleum
Acorn		Vähähiilinen	St Fergus, UK	<ul style="list-style-type: none"> Maakaasusta vähähiillistä vetyä CCUS-laitos Hiilidioksidin kuljettaminen Pohjanmerelle 	PaleBlueDotEnergy, Chrysaor, Shell, Total
H2H Saltend		Vähähiilinen	Humber, UK	<ul style="list-style-type: none"> Maakaasusta vähähiillistä vetyä 600 MW ja 120 kth2/vuosi Investointipäätös 2021–23 Rakentamisen 1. vaihe 2024–26 	Equinor
HyNet		Vähähiilinen	Liverpool & Manchesterin seutu, UK	<ul style="list-style-type: none"> Maakaasusta vähähiillistä vetyä ja CCS Investointipäätös noin 2022 Konseptivaihe 2018–2023 Hiilidioksidin talteenotto ja vedyn toimittaminen vaihtoehtoina 2023–2026 Vetyekosysteemin laajentaminen 2027–2035 	Essar, Cadent, Pilkington, Land& Property, Unilever, CF Industries, eni, SNC Lavalin, Progressive Energy, University of Chester, JM

Esiselvitys
 Konseptisuunnittelu
 Investointipäätös
 Rakentaminen
 Kaupallinen toiminta

5.7 Ranska

Ranska julkaisi ensin vetystrategiansa vuonna 2018 mutta uudisti sitä COVID-19 aiheuttamien tilannemuutosten vuoksi. Strategiassa on asetettu suunnitelmia sekä -vähäpäästöiselle että puhtaalle vedylle. Ranska on asettanut tavoitteeksi kehittyä johtavaksi maaksi vetyteknologiassa ja aikoo edistää vetytaloudessa kansainvälistä yhteistyötä muun muassa Saksan kanssa. (Valtioneuvosto 2022 b.)

Ranskan vetystrategian ensisijainen tavoite on fossiilisen vedyn korvaaminen vähäpäästöisellä vedyllä (harmaan vedyn korvaaminen sinisellä vedyllä). Vuoteen 2023 mennessä 10 % harmaasta vedystä olisi korvattu vähähiilisellä vedyllä, mikä määränä vastaa 90 000 tonnia vuodessa ja vuoteen 2028 mennessä korvattun vedyn osuus nousisi 20 - 40 % määrään (180 000- 360 000 tonnia

vuodessa). Toisena painopisteenä vetystrategiassa on liikenteen uudistaminen. Tavoitteena on, että käytössä olevien polttokennollisten autojen määrä on 5000 vuoteen 2023 mennessä ja autojen määrä nousisi 20 000 - 50 000 vuoteen 2028 mennessä. Polttokennorekkojen määrän tavoitteeksi on asetettu 200 vuodelle 2023 ja 800 - 2000 rekkaa vuodelle 2028. Vedyn tankkausasemien tavoite on 100 vuoteen 2023 mennessä ja 400 - 1000 asemaa vuoteen 2028 mennessä. (Valtioneuvosto 2022 b.)

Vetystrategiassa vetyteknologioiden kehitystä ja vedyntuotantoa tuetaan vuoteen 2030 mennessä 7 mrd. eurolla, josta puolet myönnetään vuoteen 2023 mennessä ja se allokoidaan teollisuuden (54 %), liikenteen (27 %) ja kaupan alan (19 %) välillä. Lämmityssektori ei saa tukia. Liikenteessä tukea myönnettäisiin erityisesti vakioireittien ajoneuvoille, kuten busseille, jättautoille ja pakettiautoille. Vuodelle 2030 on myös asetettu tavoitteeksi saavuttaa elektrolyysillä tuotetun vedyn 6,5 GW kapasiteetti ja ydinvoima on luokiteltu sallittavaksi energianlähteeksi vedyntuotannossa. (Valtioneuvosto 2022 b.)

Taulukossa 6 on esitetty Ranskan vetyprojekteja.

TAULUKKO 6 Ranskan vetyprojekteja (Valtioneuvosto 2022 b)

Projekti	Vaihe	Vedyn tyyppi	Sijainti	Tavoitteet	Kumppanit
La Médégreen H2		Puhdas	Châteauneuf-les-Martigues, Bouches-du-Rhône	<ul style="list-style-type: none"> Uusiutuvan vedyn tuotanto aurinkovoimalla (>100 MW) 40 MW elektrolyyserikapasiteettia, 5 tH₂/d vetyä biopolttoaineiden valmistukseen Totalin La Médé-biojalostamolle Rakentaminen 2022-2023 Tuotanto 2024 	Total, Engie
HyGreen Provence		Puhdas	Luberon/ Verdon	<ul style="list-style-type: none"> Uusiutuvan vedyn tuotanto aurinkovoimalla Pienen kokoluokan tuotanto 56 vetybussille ja 12 MW elektrolyyserikapasiteetti vuonna 2023 Laajentaminen varastomalla suolaesilintymiin ja 130 MW elektrolyyserikapasiteetti vuonna 2024 Elektrolyyserikapasiteetti 435 MW (10,44 ktH₂/vuosi) 2027 	Engie, Air Liquide, DLVA
H2V Normandy		Puhdas ja vähähillinen	Port-Jérôme-sur-Seine	<ul style="list-style-type: none"> 200 MW elektrolyyserikapasiteetti vedyn käyttämiseksi Port Jérôme-sur-Seinen kemiantehtaalla CCS-laitos jo olemassa 	Air Liquide, Siemens Energy

Esiselvitys
 Konseptisuunnittelu
 Investointipäätös
 Rakentaminen
 Kaupallinen toiminta

5.8 Espanja

Vuonna 2020 Espanja julkaisi vetytiekarttansa, jossa keskitytään puhtaan vedyn tuotantoon ja pidemmällä tähtäimellä sen vienti. Investoinnit tiekartan tavoitteisiin vaatii 8,1 mrd. euron investoinnit,

josta 1,5 mrd. tulisi EU:n elvytysrahastosta. Muun muassa Espanja on asettanut tavoitteeksi saavuttaa vuoteen 2030 mennessä vähintään 4 GW elektrolyysikapasiteetti, josta 300-600 MW määrä saavutettaisiin vuoteen 2024 mennessä. Osa suunnitellusta tuesta aiotaan kohdistaa vetylaaksoihin, joissa vetyä tuotetaan uusiutuvalla energialla lähellä teollisuutta. Espanjalla on huomattava aurinkoenergian tuotantopotentiaali, joka sopisi hyvin tähän tarkoitukseen. Tukea myös annettaisiin pilottihankkeiden rahoittamiseen. (Valtioneuvosto 2022 b.)

Vedyn suurin potentiaali Espanjassa on liikenteessä ja teollisuudessa. Vuoteen 2030 mennessä on asetettu tavoitteeksi, että 25 % teollisuuden energiankulutuksesta on vetyä. Liikenteen tavoitteina samalla aikajänteellä ovat raskaassa tavaraliikenteessä (esim. rekat) ja kevyessä liikenteessä saavuttaa 5000 - 7000 vetyajoneuvon määrä ja 150 - 600 valtion linja-autoa sekä tankkausverkostoon tulisi 100 - 150 vetytankkaus pistettä. Liikenteen osalta myös panostettaisiin vetyjuniin ja vedyn hyödyntämiseen lentokentillä ja satamissa. (Valtioneuvosto 2022 b.)

Taulukossa 7 on esitetty Espanjan vetyprojekteja.

TAULUKKO 7 Espanjan vetyprojekteja (Valtioneuvosto 2022 b)

Projekti	Vaihe	Vedyn tyyppi	Sijainti	Tavoitteet	Kumppanit	Investointikustannus (kuten ilmoitettu)
As Pontes		Puhdas	As Pontes, Espanja	<ul style="list-style-type: none"> Elektrolyysikapasiteetti 100 MW ja tuulivoimaa 611 MW 	Endesa	738 MEUR
Huelva		Puhdas	Huelva, Espanja	<ul style="list-style-type: none"> Elektrolyysikapasiteetti 100 MW ja aurinkovoimaa 430 MW 	Endesa	413 MEUR
Teruel		Puhdas	Teruel, Espanja	<ul style="list-style-type: none"> Elektrolyysikapasiteetti 60 MW ja tuuli- ja aurinkovoimaa 335 MW 	Endesa	294 MEUR
La Robla		Puhdas	Leon, Espanja	<ul style="list-style-type: none"> Elektrolyysikapasiteetti 32MW, aurinkovoima 150W Vedyn varastointi 12 tH, per päivä Vety tuotettaisiin vientiin 	Enagas	266 MEUR
Hidrógeno Verde Puertollano		Puhdas	Puertollano, Espanja	<ul style="list-style-type: none"> Uusiutuva vety ammoniakkiin tuotantoon 100 MW aurinkovoimaa, 20MWh litium-ioninaku sähkön varastointiin ja 20 MW elektrolyysikapasiteettia vedyn tuotantoon 720 t per vuosi 	Iberdrola, Fertiberia	150 MEUR
ORANGE.BAT		Puhdas	Castellón, Spain	<ul style="list-style-type: none"> Elektrolyysikapasiteetti 100 MW perustuen uusiutuvaan sähkөөn. Vety hyödynnetään keramiikan valmistukseen 	ETRA, Smatenergy, Sunfire, Enel Green Power	

Esiselvitys
 Konseptisuunnittelu
 Investointipäätös
 Rakentaminen
 Kaupallinen toiminta

5.9 Italia

Italia on julkaissut vetystrategian, jossa tavoitteena on saavuttaa vuoteen 2050 mennessä vedylle 20 % osuus koko maan energian loppukäytöstä. Tätä varten Italia on asettanut tavoitteeksi saavuttaa 3 GW elektrolyysikapasiteetin vuoteen 2030 mennessä. Projektin arvioidaan vaativan 10 mrd. euroa investointeja. (Valtioneuvosto 2022 b.)

Italiassa vedyn nähdään olevan raskaan teollisuuden raaka-aine, liikenteessä pitkän matkan rekaliikenteen ja junien polttoaine ja energiantuotannossa maakaasun korvaaja. Italia voi mahdollisesti toimia Euroopan ja Pohjois-Afrikan välisenä vetyhubina. Toistaiseksi ainoa Italiassa käynnissä oleva suurehko vetyhanke on Puglian alueelle kehiteltävä vetylaaksohanke. (Valtioneuvosto 2022 b.)

Taulukossa 8 on esitetty Italian vetyprojekteja.

TAULUKKO 8 Italian vetyprojekteja (Valtioneuvosto 2022 b)

Projekti	Valhe	Vedyn tyyppi	Sijainti	Tavoitteet	Kumppanit
Sarasin jalostamo		Puhdas	Saras, Sardinia	• 20 MW elektrolyyseripilotti uusituvaa sähkön perustuen Sarasin öljynjalostamolla	Enel Green Power, Saras
Enin jalostamot		Puhdas	Ei julkaistu	• 20 MW elektrolyyserikapasiteettia pilottina Enin öljynjalostamoilla Italiassa alkaen 2022–2023	Enel, Eni
5 suurta kehitysprojektiä		Puhdas	Ei julkaistu	• Kumppanuussopimus viiden vetyprojektin kehittämiseksi Italiassa ja Välimeren alueella	Enel, Eni

Eiselytys
 Konseptisuunnittelu
 Investointipäätös
 Rakentaminen
 Kaupallinen toiminta

5.10 Ruotsi

Ruotsin kansallinen -vety ja sähköpolttainestrategia valmistui marraskuussa 2021. Vetystrategiassa arvioidaan vedyn, ammoniakkin ja sähköpolttainesten -tuotanto, -varastointi ja loppukäyttöpotentiaali lyhyellä, keskipitkällä sekä pitkällä aikavälillä. Strategiassa huomioidaan tekniset ja taloudelliset mahdollisuudet sekä lähtökohdat hyödyntää vetyä energiavarastona, mikä lisäisi energijärjestelmän joustavuutta. Lisäksi strategiassa tunnistetaan vedyn hyödyntämisen esteet sekä arvioidaan alustavasti, kuinka toteuttamiskelpoisia ehdotuksia voidaan edistää. Strategiassa myös tunnistetaan mahdollisuuksia kansainväliseen yhteistyöhön muiden eurooppalaisten toimijoiden kanssa. (Valtioneuvosto 2022 b.)

Vetystrategiassa on päätetty tavoitella 3 – 6 % päästövähennystä luomalla edellytykset vähintään 5 GW elektrolyyserikapasiteetille vuoteen 2030 mennessä. Kapasiteettia lisättäisiin vielä 10 GW:lla vuoteen 2045 mennessä. Olettaen, että vety tuotetaan kilpailukykyisillä sähköhinnoilla, tavoitteiden saavuttaminen vuoteen 2030 mennessä johtaisi arviolta 60 TWh sähkön lisätarpeeseen. Samalla oletuksella vuoden 2045 tavoitteesta aiheutuisi 126 TWh vuosittainen sähkön lisätarve. (Valtioneuvosto 2022 b.)

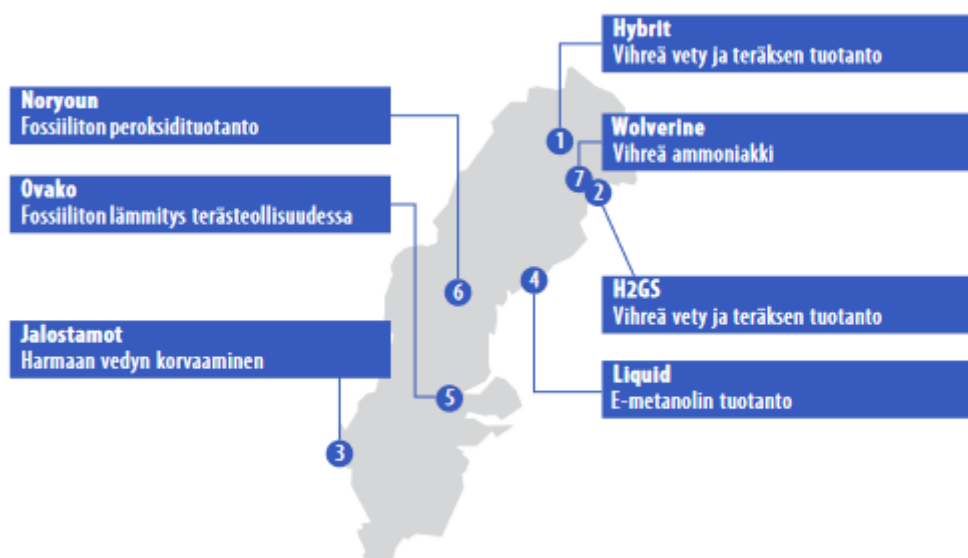
Ruotsissa suositaan vihreää vetyä, jota käytettäisiin siellä, missä se tuottaa eniten hyötyä. Tällä tarkoitetaan kohteita, missä muut energiaratkaisut eivät toimi taloudellisista, teknisistä tai kestävyyspohjautuvista syistä. Vihreää vetyä käytettäisiin pääosin energiasektorilla teollisuudessa ja raskaassa liikenteessä. Tällä hetkellä suurin osa Ruotsissa käytetystä vedystä (noin 6 TWh/a) käytetään teollisuudessa, pääasiassa öljynjalostuksessa. Strategiassa todetaan, että öljynjalostus-

sessä ja muussa teollisuudessa sähkön siirtorajoitteet voivat vetytalouden siirtymävaiheessa rajoittaa vihreän vedyn käyttömahdollisuuksia, jolloin osa teollisuudesta joutuu tukeutumaan hiilidioksidin talteenotto- ja varastointiteknologioihin eli siniseen vetyyn. (Valtioneuvosto 2022 b.)

Ruotsin vetystrategiassa ei ole suunnitelmaa hyödyntää maan maakaasun siirtoverkkoa, joka rajoittuu länsirannikolle. Strategiassa korostetaan, että vedyn, sähköpolttoaineiden ja ammoniakkin vientimahdollisuuksia tulisi kokoaikaisesti arvioida. Strategiassa myös korostetaan, että vedyn kysynnän kehitystä Ruotsin ja sen naapurimaiden teollisuusklustereissa pitää tarkkailla. (Valtioneuvosto 2022 b.)

Taulukossa 9 on esitetty Ruotsin vetyprojekteja.

Taulukko 9 Ruotsin vetyprojekteja (Valtioneuvosto 2022 b)



5.11 Norja

Norjan vuonna 2020 julkaisemassa kansallisessa vetystrategiassa kuvataan vedyn mahdollisuuksia sekä määritellään jatkossa panostettavat sektorit. Kesäkuussa 2021 julkaistiin tämän lisäksi vetytiekartta. Strategiassa ja tiekartassa vetyä ja vetyteknologioita tarkastellaan teknologianeutraalisti eikä esitetä varsinaisia tavoitteita elektrolyyssikapasiteetille. (Valtioneuvosto 2022 b.)

Koska Norjan 40,5 GW:n sähköntuotantokapasiteetista 84 % on vesivoimaa ja 10 % on maatuuli-voimaa, on maalla hyvät mahdollisuudet tuottaa puhdasta vetyä. Norjan maantieteellinen sijainti ja kaasuresurssit antavat edellytykset hiilidioksidin varastoinnille ja sinisen vedyn tuotannolle. (Valtioneuvosto 2022 b.)

Maan pääasiallinen käyttökohde vihreälle vedylle olisi liikenne, jossa keskeisenä tavoitteena on kehittää meriliikennehubeja. Lisäksi vetyajoneuvoja tuetaan kysynnän kasvattamiseksi. Sininen vety valjastettaisiin pääasiassa teollisuuteen, jossa sen käytöllä pyritään vähentämään päästöjä. Strategiassa nostettu esille sinisen vedyn kilpailukyvyyn lisäämistä esimerkiksi tiukempien kiintiöiden ja päästöverotuksen avulla. (Valtioneuvosto 2022 b.)

Taulukossa 10 on esitetty Norjan vetyprojekteja.

Taulukko 10 Norjan vetyprojekteja (Valtioneuvosto 2022 b)



5.12 Tanska

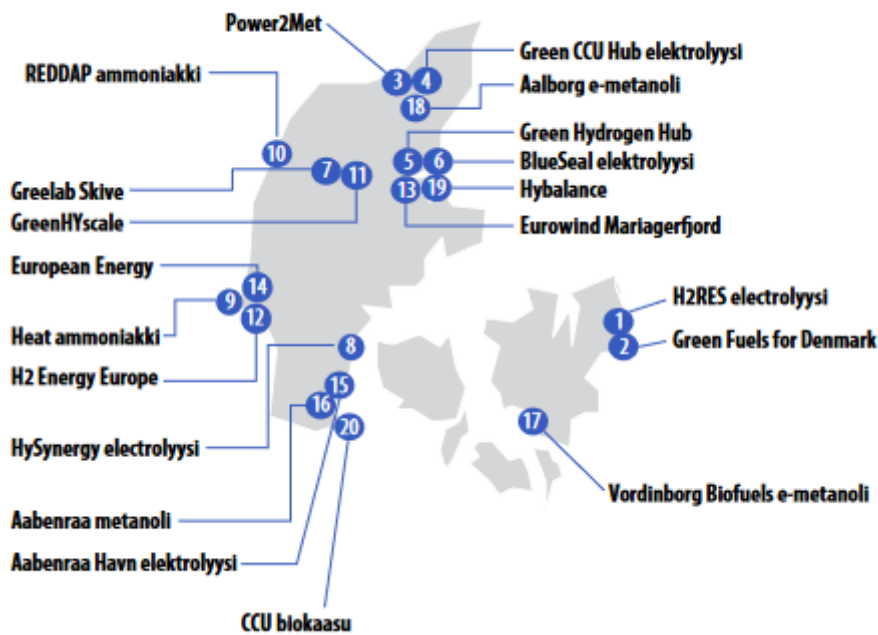
Tanskan vety-yhdistys julkaisi vetystrategian vuonna 2020 ja vetytiekartan vuonna 2021. Tanskan kansallinen vetystrategia valmistui joulukuussa 2021. Kansallisessa vetystrategiassa korostetaan vihreän vedyn tuotantomahdollisuuksia. Tanskalla on edellytykset lisätä tuulivoiman tuotantoa ja siten valmistaa vihreää vetyä suuressakin mittakaavassa esimerkiksi Saksan markkinoille. (Valtioneuvosto 2022 b.)

Vetystrategiassa on asetettu tavoitteeksi saavuttaa 4–6 GW:n elektrolyysikapasiteetti vuoteen 2030 mennessä. Kapasiteetin kasvun pitäisi tukea Tanskan vienti- ja liiketoimintapotentiaalin toteutumista PtX-sektorilla ja tapahtua markkinaehtoisesti. Strategian mukaan tavoitteena on edistää kansallisten ja kansainvälisten ilmastotavoitteiden saavuttamista ja samalla pienentää Tanskan globaalia hiilijalanjälkeä. Tämän saavuttamiseksi strategiassa vedyn käyttö suunnataan sektoreille, joilla hiilineutraalisuutta olisi vaikeaa saavuttaa muilla keinoilla. (Valtioneuvosto 2022 b.)

Strategiassa mainitaan vedyn hyödyntäminen meriliikenteessä sekä raskaassa liikennekäytössä. Tanskassa ei lannoitetuotannon lisäksi ole juurikaan raskasta teollisuutta, jossa vihreää vetyä voisi käyttää tai jossa voitaisiin korvata harmaata vetyä. (Valtioneuvosto 2022 b.)

Taulukossa 11 on esitetty Tanskan vetyprojekteja.

Taulukko 11 Tanskan vetyprojekteja (Valtioneuvosto 2022 b)



5.13 Baltian maat

Latvialla ei toistaiseksi ole vetystrategiaa, mutta Latvian NECP:n (National Energy and Climate Plans) mukaan vety voi olla vaihtoehtoinen fossiilisia polttoaineita korvaava polttoaine tulevaisuudessa. NECP:ssa ei ole esitetty lyhyen tähtäimen tavoitteita vedyn tuotannolle tai käytölle, eikä siinä esitetä vetyyn liittyviä politiikkatoimia. (Valtioneuvosto 2022 b.)

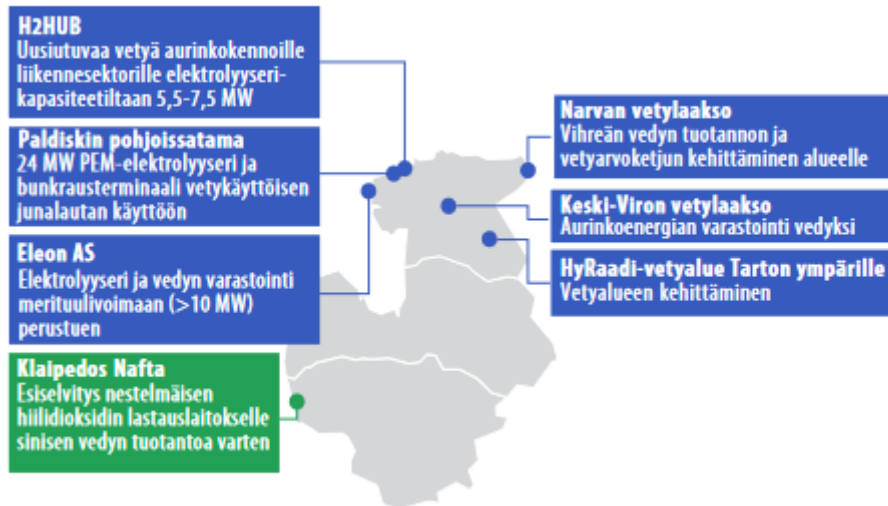
Liettuan vetystrategia on valmisteluvaiheessa. Maan tavoitteena on, että 5 % liikenteen energian kulutuksesta tulisi uusiutuvasta vedystä ja biokaasusta vuonna 2030. Tätä kehitystä voidaan edistää julkisilla hankintasäännöillä ja julkisen liikenteen velvoittaminen käyttää vaihtoehtoisia polttoaineita. Vety nähdään kehitysalueena, jolla on mahdollista edistää päästöjen vähentämistä usealla eri sektorilla. Liettua on myös tunnistanut vedyn vientiin liittyvät mahdollisuudet, minkä vuoksi vedyn siirtomahdollisuuksia halutaan kartoittaa. (Valtioneuvosto 2022 b.)

Viron vetystrategian valmistelu on parhaillaan käynnissä. Strategian pohjana käytetään toukuussa 2021 valmistunutta vetytiemää ja selvitystä vedyn mahdollisuuksista. Virossa on suuri tuulivoimapotentiali, joka voisi mahdollistaa vedyn tuotannon ja vihreän vedyn viennin esimerkiksi

Hollantiin, Saksaan, Suomeen ja Liettuaan. Kotimaan kysyntä on pientä vetyä hyödyntävän teollisuuden niukkuuden vuoksi. (Valtioneuvosto 2022 b.)

Taulukossa 12 on esitetty Baltian maiden vetyprojekteja.

Taulukko 12 Baltian maiden vetyprojekteja (Valtioneuvosto 2022 b)



5.14 Afrikka

Marokko on asettanut tavoitteeksi nostaa nykyisen 37 % uusiutuvan energian osuus 52 % osuuteen tuotantokapasiteetistaan vuoteen 2030 mennessä. Vuonna 2020 Marokko solmi yhteistyösopimukset Portugalin ja Saksan kanssa vetyyn liittyen ja maassa on perustettu GreenH2-vetyklusteri puhtaan vedyn tuotannon kaupallistamiseksi. Ensimmäisen teollisen mittakaavan projektin odotetaan aloittavan toimintansa 2025, jonka tuotantomäärä olisi noin 10 kt vetyä vuodessa. (Valtioneuvosto 2022 b.)

Namibia on nimennyt vihreän vedyn ja ammoniakkin tutkimuksen yhdeksi 16 keinosta, jonka avulla pyritään edistämään valtiontalouden suosiollista kehitystä vuosina 2021–2025. Vihreän vetytalouden edistämiseksi on perustettu ministerikomitea kesällä 2021, joka on nimittänyt tiimin teknisiä asiantuntijoita tukemaan alan kehitystä. Namibian ensimmäinen suuren mittakaavan vetyprojekti julkaistiin marraskuussa 2021, jonka tavoitteena on 0,3 miljoonan tonnin vuosittainen vedyntuotanto Tsau/Khaeb-kansallispuiston alueella. Projektin tarkoituksena on rakentaa alueelle yhteensä

3 GW elektrolyysikapasiteettia ja 5 GW uusiutuvaa sähköntuotantokapasiteettia kuluvan vuosikymmenen aikana. (Valtioneuvosto 2022 b.)

Joulukuussa 2020 Saksa kirjoitti Tunisian kanssa yhteisymmärryssopimuksen, jonka mukaan Saksa lahjoittaa 30 miljoonaa euroa vihreän vedyn markkinoiden kehittämiseen Tunisiassa. Tunisiassa ei ole toistaiseksi julkaistu teollisen mittakaavan vetyhankkeita. (Valtioneuvosto 2022 b.)

5.15 Aasia

Kiinassa tuetaan vetyteknologioiden kehittämistä voimakkaasti. Kiinan viimeisimmässä viisivuotissuunnitelmassa vaaditaan, että puolet maan ajoneuvoista olisi sähkökäyttöisiä vuoteen 2035 mennessä. Sähköajoneuvoiksi hyväksytään vedyllä käyvät polttokennoajoneuvot. Teollisen mittakaavan projekteja on ilmoitettu jo yli 50, ja julkista tukea hankkeille on tarjolla yli 20 mrd. USD. (Valtioneuvosto 2022 b.)

Tammikuussa 2019 Etelä-Korea julkaisi vetyekonomisen etenemissuunnitelmansa, jossa on tavoitteena ottaa käyttöön vähintään 1200 tankkausasemaa, tuottaa 6,2 miljoonaa polttokennoista sähköautoa ja toimittaa 15 GW polttokennoja sähköntuotantoon vuoteen 2040 mennessä. Etelä-Korea on ilmoittanut tukevansa erityisesti vedyn tankkausasemien luvitusta ja rahoitusta, tukien siten vedyn infrastruktuurin kehitystä. Vedyn rahoitus Etelä-Koreassa on kasvanut vuonna 2021 40 % vuoden 2020 tasoon verrattuna. (Valtioneuvosto 2022 b.)

Japani otti käyttöön perusvetystrategian vuonna 2017 ja on sen jälkeen tarkentanut suunnitelmaansa tulla vety - yhteiskunnaksi. Japani on asettanut tavoitteekseen 5,3 milj. maakaasu- tai propanikäyttöistä polttokennoa kotikäytössä, 900 vetytankkausasemaa 800 000 vetyajoneuvoa, ja 1 200 polttokennobussia vuoteen 2030 mennessä. Koska Japanin vetytalous tulee pohjautumaan vahvasti tuontiin, Japanissa on myös käynnissä useita kansainväliseen vedyn maahantuontiin tärkeitä hankkeita. (Valtioneuvosto 2022 b.)

5.16 Australia ja Kanada

Australian kansallinen vetystrategia hyväksyttiin marraskuussa 2019 ja maan tavoite on tehdä itsestään merkittävä globaali toimija vetyalalla vuoteen 2030 mennessä. Kansallisessa vetystrategiassa on asetettu ”H2 alle 2” -tavoite, joka asettaa vedyn tuotantokustannuksiksi alle 2 AUD / kg. Kesäkuuhun 2021 mennessä noin 590 hanketta on saanut tukea Australian uusiutuvan energian viraston (ARENA) kautta ja vetyyn liittyviin projekteihin on kesäkuuhun 2021 investoitu 1,7 mrd. AUD. (Valtioneuvosto 2022 b.)

Joulukuussa 2020 Kanada julkaisi vetystrategiansa osana sitoumustaan saavuttamaan nettonollapäästöt vuoteen 2050 mennessä. Vetystrategian mukaan vety tulee tuottamaan jopa 30 % Kanadan loppuenergiankäytöstä vuoteen 2050 mennessä. Strategiassa kaavaillaan vedynjakeluverkostoa alueille joissa on paljon uusiutuvia energianlähteitä tai joka voisi sisältää sekä suuria keskitettyjä laitoksia maan maakaasupitoisissa maakunnissa, että pienempää hajautettua elektrolyyttituotantoa lähellä kysyntäkeskuksia. Perustuen alueiden maakohtaisiin strategioihin, sijainteihin ja kysyntäpotentiaaleihin Kanadan vihreälle vedylle suotuisiksi vientimarkkinoiksi tunnistetaan Eurooppa, Yhdysvallat ja Aasia. (Valtioneuvosto 2022 b.)

5.17 Yhdysvallat ja Chile

Yhdysvalloilla ei ole asetettu konkreettisia kansallisia vetytavoitteita, mutta geneerinen vetyvisio on luotu jo vuonna 2002. Vuonna 2019 julkaistu Fuel Cell and Hydrogen Energy Associationin luoma vetytiekartta on tehty yhteistyössä teollisuustoimijoiden kanssa ja siinä on asetettu tavoitteeksi 100 % kotimainen vety vuoteen 2030 mennessä. Vaikka USA:lla ei ole yhtenäistä kansallista vetystrategiaa, se on kuitenkin luonut vakiintuneita kannustimia vähähiiliseen vetyyn veroetujen avulla. Tästä esimerkkinä on palkitseminen hiilidioksidin varastoimisesta geologisiin varastoihin 45Q-verohyvityksellä. (Valtioneuvosto 2022 b.)

Marraskuussa 2020 Chile julkaisi vetystrategian, jonka mukaan maa pyrkii maailman johtavaksi vihreän vedyn viejämaaksi ja edullisimmaksi vihreän vedyn tuottajamaaksi ja vuoteen 2030 mennessä. Maan vihreän vedyn strategiassa vedyn tuotantokustannuksiksi tavoitellaan alle 1,50 dollaria/kg ja asetetaan elektrolyysillä tuotetulle vedylle 25 gigawatin tuotantotavoite vuoteen 2030 mennessä. Chilen vihreän vedyntuotanto on vielä varhaisessa vaiheessa, ja rahoitusapu suuntautuu

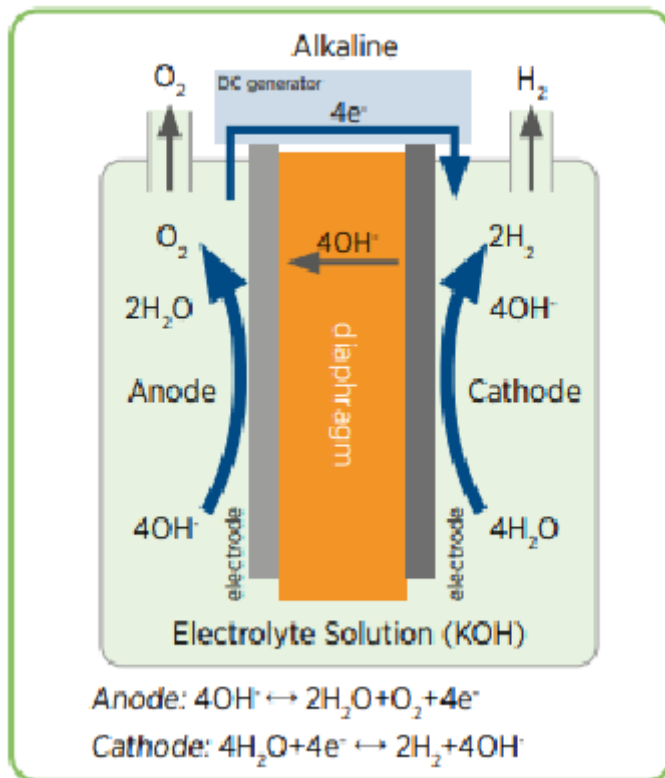
erityisesti skaalautuvuudeltaan potentiaaliin kohteisiin. Vetyhankkeita on kansallisen vetyohjelman tiedossa noin 40 ja strategian mukaan hankkeita tuetaan 50 miljoonalla USD:lla. (Valtioneuvosto 2022 b.)

6 VEDYN TUOTANTOTEKNOLOGIOITA

Vedyn tuotantoon on monenlaisia ratkaisuja, oista jotkut soveltuvat toisia paremmin eri tilanteisiin. Elektrolyysi, jossa vety erotetaan vedestä sähkön avulla on yleisin tapa, mutta muita tapoja ovat muun muassa pyrolyysi, kaasutus, fermentaatio ja fotolyysi. Vaikka elektrolyysillä tuotettava vihreä vety on ihanteellista polttoainetta, ei sitä aina voida tuottaa riittävästi ja onkin viisasta tarkastella muitakin vedyn tuotantotapoja.

6.1 Alkalinen elektrolyysi

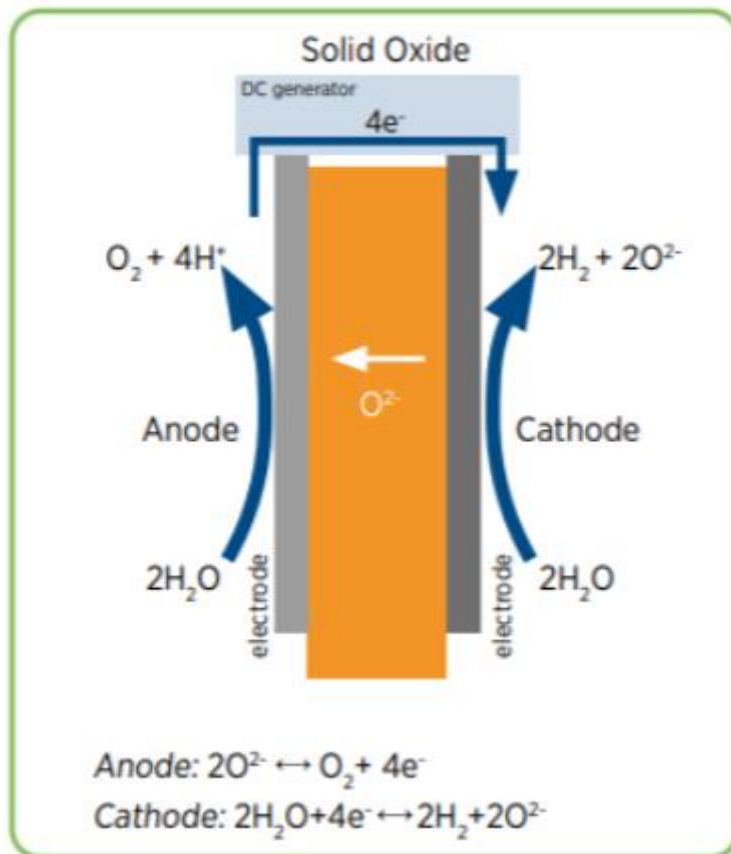
Alkalielektrolyysi on vedyn valmistusmenetelmä, jossa vesi hajotetaan vedyksi ja hapeksi upottamalla katodi ja anodi elektrolyyttiliuokseen. Elektrolyytinä käytetään vesipohjaisia natrium- ja kaliumhydroksidiliuoksia. Tähän johdetun tasajännitevirran vaikutuksesta vetyä muodostuu katodille ja happea anodille. Alkalielektrolyysissä vedyn ja hapen reagointi pyritään välttämään erottamalla elektrodit toisistaan huokoisilla kalvoilla. Prosessin käyttölämpötila on 60–80 °C ja alkalielektrolyysikennon hyötysuhde on tavallisesti 63–70 %. Alkalielektrolyysi on yleisin veden elektrolyysitekнологia ja pääosa sen kehitystyöstä painottuu häviöiden vähentämiseen. Kuvassa 3 esitetään alkalisen elektrolyysin kemiallinen toimintaperiaate. (Pelkonen 2022; IRENA 2020.)



Kuva 3 Alkalisen elektrolyytin prosessikaavio (IRENA 2020)

6.2 Kiinteä oksidikenno

Kiinteäoksidikennot (Solid Oxide Electrolyser Cell, SOEC) eli vesihöyryelektrolyysi on elektrolyysi jossa prosessissa käytetään veden sijasta höyryä. käyttölämpötila on 700–1000 °C ja hyötysuhde on 74–81 %. Korkea lämpötila tarkoittaa, että Kiinteäoksidikennoissa elektrolyytinä toimii happioneja johtava keraaminen materiaali, kuten stabiloitu zirkoniumoksidi. Anodin materiaali koostuu keraamisesta oksidista ja Katodin materiaali nikkeli-ZrO₂ -seoksesta. Vesihöyryelektrolyysi soveltuu ympäristöihin, joissa on saatavilla halpaa lämpöä, kuten esimerkiksi ydinvoimaloiden läheisyyteen. Vesihöyryelektrolyysi on alkali-elektrolyysiä tehokkaampi, koska vesihöyryn molekyylien rikkominen vaatii vähemmän energiaa kuin nestemäisessä muodossa olevan veden. Lisäksi hukkalämpöä voidaan hyödyntää uudelleen prosessissa. Vesihöyryelektrolyysin korkea hyötysuhde ja suoraviivainen toimintatapa tekevät siitä erittäin houkuttelevan teknologian, mutta toistaiseksi materiaalien kestävyys on huomattava ongelma ja nykyiset laitteet rikkoutuvat herkästi. Kuvassa 4 esitetään kiinteän oksidielektrolyysin kemiallinen toimintaperiaate. (Pelkonen 2022; Kiesilä 2021; IRENA 2020.)



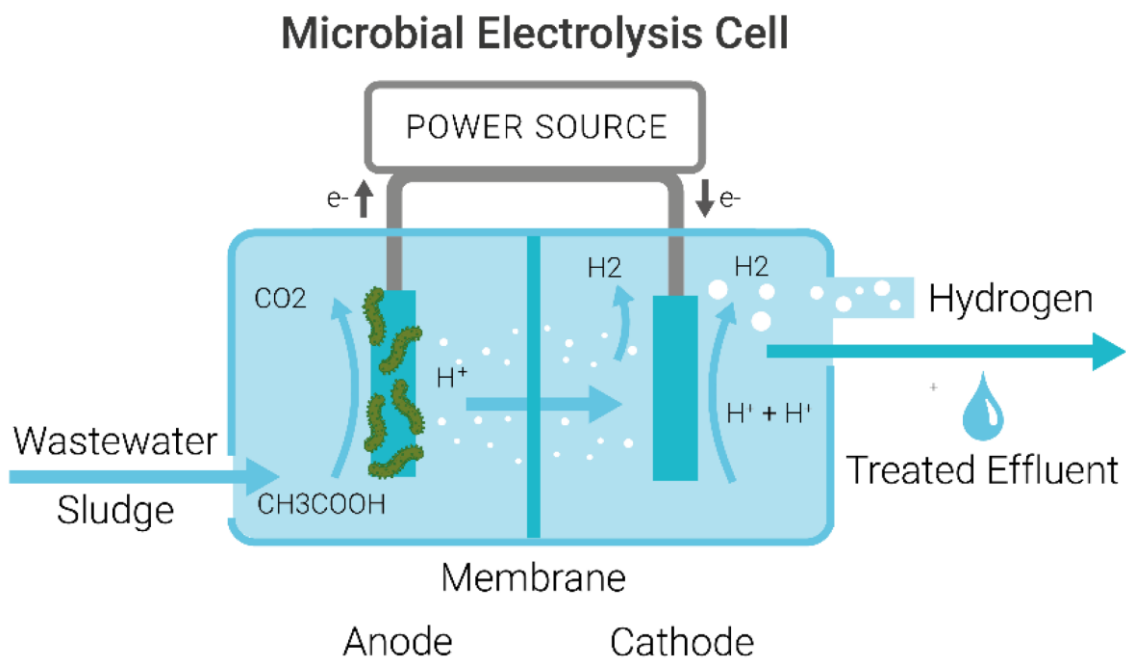
Kuva 4 Kiinteän oksidielektrolyysikennon prosessikaavio (IRENA 2020)

6.3 Mikrobielektrolyysi

Mikrobielektrolyysissä vetyä tuotetaan eloperäisistä aineista sähkövirran vaikutuksella. Anodilla olevan kasvualustan mikrobit hapettavat eloperäisen materiaalin ja tuottavat vetyioneja, elektroneja ja hiilidioksidia. Mikrobit pystyvät muuttamaan eloperäisen aineksen kemiallisen energian sähköksi. Mikrobit vaihtavat anodin kanssa elektroneja solutoimintojen ja kasvun ylläpitämiseksi. Vetyionit siirtyvät elektrolyyttiä pitkin kalvon läpi katodin puolelle. Elektronit kulkevat ulkoisen piirin kautta katodille pelkistäen vetyionit. Jätevedet ja biomassa ovat tavallisia raaka-aineita mikrobeille. Raaka-aineen orgaanisen määrän kasvaessa energiamäärä on suurempi, mutta vedyn tuotantoaika pitenee tunneista vuorokausiin. Elektrolyysilaitteiston koko on suhteutettava orgaanisen aineksen tyyppiin, määrään ja pitoisuuteen laitteiston tehokkuuden optimoimiseksi. (Matikainen 2021; mdpi 2021.)

Mikrobikannan monipuolisuudella, alkuperällä ja prosessiin tuomisen ajankohdalla vaikutetaan vedyn tuotannon tehokkuuteen. Monipuolinen mikrobikanta lisää kaasujen tuotantoa, sillä se pystyy

hyödyntämään useampaa raaka-ainetta. Hyvissä ajoin kasvualustaan tuodut mikrobit ehtivät sopeutua ympäristöön lyhentäen reaktion käynnistymistä. Mikrobin ottaminen käytettävästä raaka-aineesta tekee prosessista vakaamman ja varmistaa prosessiin aktiivisen kannan. Mikrobielektrolyysistä ei ole suuren kokoluokan laitoksia, mutta alustavat tulokset ovat osoittaneet tuotannonheikentyvän laitteiston skaalautuessa suuremmaksi. Mikrobin raaka-aineen käsittelynopeus rajoittaa vedyn tuotantoa ja tuotettu vety tarvitsee puhdistusta. Etuna on kuitenkin raaka-aineensaataavuus ja potentiaali integroitua osaksi jätteiden käsittelyä. Kuvassa 5 esitetään mikrobielektrolyysin toimintaperiaate. (Matikainen 2021; mdpi 2021.)



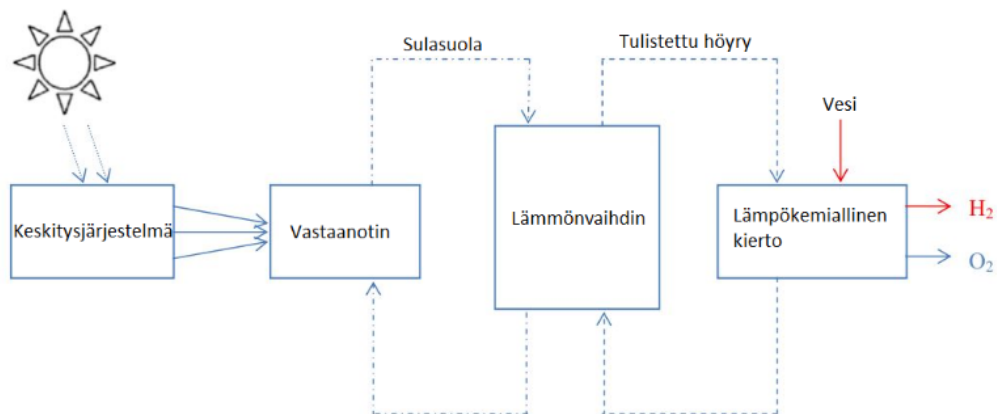
Kuva 5 Mikrobielektrolyysi (mdpi 2021)

6.4 Termolyysi

Termolyysissä vetyä valmistetaan hajottamalla vettä hapeksi ja vedyksi lämpöenergian avulla. Lämpötilan on ylitettävä $2\,500\text{ °C}$ vedyn erottamiseksi vedestä, mutta vaadittavaa lämpötilaa saadaan laskettua lämpökemiallisesti. Lämpöenergia käynnistää sarjan kemiallisia reaktioita, joiden lopputuloksena syntyy vetyä huomattavasti alemmissa lämpötiloissa. Kierrossa olevat kemikaalit muodostavat suljetun kierron eli ne voidaan käyttää monivaiheisella lämpökemiallisella kierrolla, jolla saadaan tuotettua vetyä termolyysillä 550 °C :n lämpötilassa. Esimerkiksi kupari-kloridin (CuCl)

Tinaoksidikiertoa käytettäessä reaktiovaiheita on vähemmän, mutta lämpöenergian tarve on korkeampi lämpökemiallisten reaktioiden pienemmän määrän vuoksi. (Matikainen 2021; Nikolaidis & Poullikkas 2016.)

Termolyysiin vaadittava lämpöenergia voidaan hankkia järjestelmällä, jossa auringonvalo keskitetään vastaanottiin, josta lämpöenergia kulkee lämmönvaihtimen kautta tulistamaan höyryä, mikä käynnistää termolyysin tai ydinvoiman hukkalämmöstä. Termolyysin hyötysuhde on 20–45 %. Järjestelmässä haasteena on käytettävien materiaalien lämmön ja kemikaalien kestävyys sekä tästä aiheutuvat korkeat kustannukset. Termolyysin etuna on päästötön ja kestävä vedyn tuotannon potentiaali. Kuvassa 6 on vedyn valmistamisen vaiheet/kierto termolyysissä. (Matikainen 2021; Nikolaidis & Poullikkas 2016.)



Kuva 6 Vedyn valmistus termolyysillä (Matikainen 2021)

6.5 Pyrolyysi

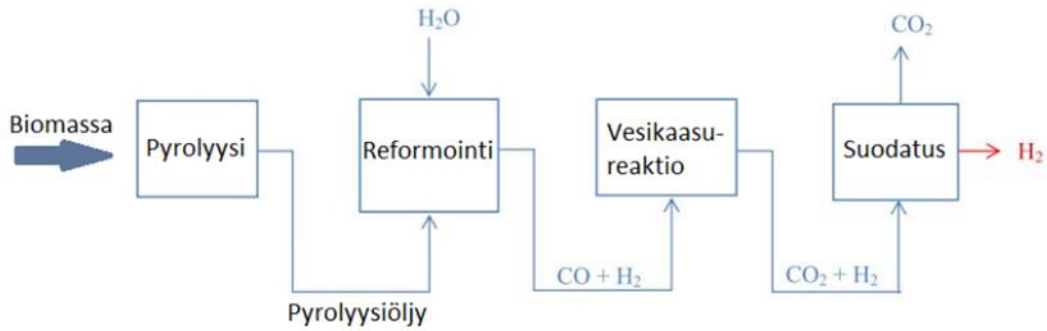
Pyrolyysissä hiilivetyjen sidoksia rikotaan kuumentamalla hiilivetyjä hapettomissa olosuhteissa. Aine hajoaa lämpöenergian vaikutuksesta palaviksi kaasuiksi, joista osa voidaan tiivistää hiileksi ja nesteeksi. Pyrolyysillä voidaan valmistaa vetyä uusiutuvista ja uusiutumattomista energianlähteistä, esimerkiksi biomassasta tai metaanista. (Matikainen 2021; Nikolaidis & Poullikkas 2016.)

Pyrolyysi jakautuu nopeaan ja hitaaseen menetelmään. . Nopeassa pyrolyysissä lämpötila puolestaan kohoaa pikaisesti (200–104 °C/s) 650 °C:seen saakka. Raaka-aineen hiukkaskoko on pientä, alle 2 mm, ja reaktorissa viipymisaika on alle 10 sekuntia. Nopean pyrolyysin tuotteena syntyy

kaasuja ja hiiltä. Hitaassa pyrolyysissä lämpötila kohoaa vähittäin (0,1–1 °C/s) ja raaka-aine viipyy reaktorissa tunneista päiviin. Syötettävä raaka-aine voi olla hiukkaskooltaan vaihtelevampaa hitaamman prosessin vuoksi. Reaktiotuotteet ovat suurilta osin hiiltä, koska maltillinen lämmitys mahdollistaa sidosten uudelleen muodostumisen. (Matikainen 2021; Nikolaidis & Poullikkas 2016.)

Pyrolyysin aikana kaasuuntuvat yhdisteet eroavat hiileen jäävistä epäpuhtauksista tuottaen puhtaampaa raaka-ainetta reformointiin. Pyrolyysiin käytettävä raaka-aineet ovat monipuolisia vaihdellen jätteistä metsäteollisuuden ja maatalouden ylijäämään. Esikäsittely on tärkeä osa pyrolyysiä vaihtelevan raaka-aineen laadun vuoksi. Esikäsittelyä ovat esimerkiksi kemialliset ja biologiset käsittelyt, kuivaus ja jauhatus. Näillä raaka-aineeseen vaikuttavilla menetelmillä vaikutetaan pyrolyysin tehokkuuteen yhtenäistämällä hiukkaskokoa sekä poistamalla vettä ja epäpuhtauksia. Lopputuotteiden saanto kasvaa ja niiden laatu on parempi esikäsittelyn seurauksena. Pyrolyysin hyötysuhde on 35-50% , kun vetyä tuotetaan biomassasta. (Matikainen 2021; Nikolaidis & Poullikkas 2016.)

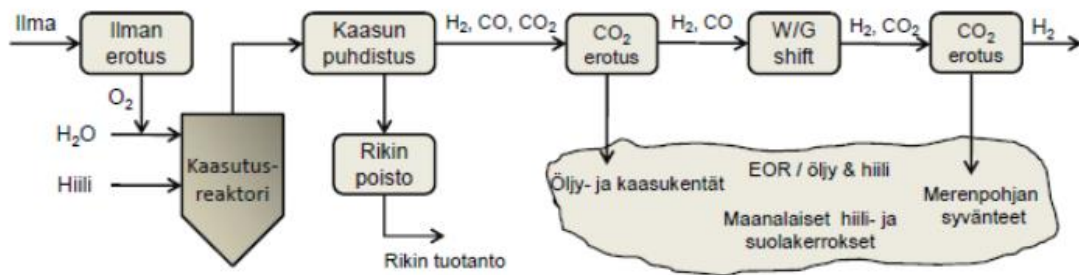
Pyrolyysin haasteina ovat hajautetun hankinta-tavan vuoksi sekä tuotetun vedyn puhtaus ja vaihteleva vedyn saanto raaka-aineiden laadun. Reformointimenetelmiä ja reaktoreita pitäisi kehittää, koska pyrolyysiöljyn reformointi vaikuttaa haitallisesti vedyn saantiin. Lisäksi reformointi likaa katalyyttejä ja heikentää niiden toimivuutta. Tuotetun pyrolyysiöljyn siirtäminen onnistuu putkistoa pitkin, mutta öljy tarvitsee kuitenkin lämmitystä pidemmällä matkoilla korkean viskositeetin takia. Pyrolyysiöljyn pH-arvo on 2–3, joten se vaatii käytettäviltä materiaaleilta haponkestävyyttä. Öljy ikääntyy varastoinnissa kemiallisten reaktioiden ja kuivumisen vuoksi. Ikäänntyminen nopeutuu erityisesti lämpötilan noustessa. Pyrolyysiöljyn koostumuksen muuttuessa faasit erottautuvat ja viskositeetti kasvaa, mikä vähentää vedyn saantia. Pyrolyysin etuina ovat raaka-aineiden edullisuus ja monipuolisuus, sekä mahdollisuus hiilidioksidineutraaliin toimintaan. Vedyn tuotannon ohella saadaan hiiltä ja synteetikaasua, jota voidaan käyttää pyrolyysin vaatiman lämpöenergian tuottamiseen. Kuvassa 7 on vedyn tuottamisen vaiheet pyrolyysillä. (Matikainen 2021; Nikolaidis & Poullikkas 2016.)



Kuva 7 Vedyn tuottaminen pyrolyysillä (Matikainen 2021)

6.6 Vedyn tuottaminen hiilestä

Vetyä tuotetaan hiilestä muuttamalla se synteettiseksi kaasuksi eli kaasuttamalla. Kaasutus on prosessi, jossa hiilipohjainen materiaali muutetaan synteettiseksi kaasuksi. Kaasutuksen materiaalina voidaan käyttää eri raaka-aineita kuten biomassaa, muovijätettä tai hiiltä. Kaasutusprosessissa raaka-aine, vesihöyry ja happi reagoivat korkeassa lämpötilassa. Vety erotellaan kaasutusprosessissa syntyvästä synteettisestä kaasusta vesikaasuprosessin avulla. Kuvassa 8 on vedyn tuotannon vaiheet hiilen kaasutuksella. (Pelkonen 2022; Jumppanen 2009.)



Kuva 8 Vedyn tuotanto hiilen kaasutuksella (Jumppanen 2009)

6.7 Vedyn valmistus selluteollisuudessa

Vedyn valmistamiselle on monipuoliset mahdollisuudet selluteollisuudessa. Sellutehtaat ovat toiminnassaan reilusti sähköomavaraisia, mikä tarjoaa tilaisuuden käyttää ylimääräinen sähkö vedynvalmistukseen elektrolyysillä. Tehtaille säännöllisesti kuljetettava biomassa ja tehtailta lähtevät

jätevedet sisältävät orgaanisia aineita, mikä luo edellytykset tuottaa vetyä biomassaa raaka-aineenaan käyttävillä menetelmillä, kuten mikrobeilla, kaasuunnuttamisella ja pyrolyysillä. (Matikainen 2021.)

Selluloosapohjaiset raaka-aineet tarvitsevat esikäsittelyä vedyn tuotantoa varten. Raaka-aineen mekaanisella, kemiallisella ja biologisella käsittelyllä vaikutetaan kosteuteen ja hiukkaskokoon sekä rikotaan pitkäketjuisista yhdisteistä yksinkertaisempia yhdisteitä. Esikäsittelyn seurauksena raaka-aineet ovat mikrobeille tehokkaammin käytettävissä ja tasalaatuinen raaka-aine on helpommin ohjattavissa kaasuunnuttamisessa ja pyrolyysissä. (Matikainen 2021; Balachandar 2013; Bizkarra 2017; Hallenbeck 2013.)

Vetypohjaisiin polttoaineisiin, kuten bensaan ja dieseliin voidaan saada vety elektrolyysillä ja hiilidioksidi sellutehtaan päästöistä kuvan 9 mukaisesti. (yle 2019.)

Synteettisten polttoaineiden valmistus

Lähde: LUT-yliopisto



Kuva 9 Sellutehtaan hiilidioksidin hyödyntäminen (yle 2019)

7 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä tehtiin kirjallinen selvitys vedyn asemasta energianlähteenä ja sen kehityssuunnasta eli miten yritykset ja eri valtiot ja ryhmät siihen suhtautuvat. Vedyn asemaa ei tutkittu niinkään tekniseltä kannalta, vaikka siihen viitataan muun muassa sen etujen ja ongelmien käsittelyn yhteydessä.

Työn tuloksena on, että yleisellä tasolla vety energianlähteenä on vielä osittain tutkimuksen alla. Sen ominaisuudet ja potentiaali aineena tunnetaan, mutta käytännön ratkaisujen yksityiskohdat ovat vielä kesken sekä yritysten toimintamalleissa, kuten useiden maiden suunnittelussa, mikä johtaa niiden vetystrategioiden puutteeseen tai keskeneräisyyteen. Useat kehittyneet maat, kuten Saksa ovat jo asettaneet selvät vetyä koskevat tavoitteet. Tavoitteet ja suunnitelmat voivat kansainvälisten tilanteiden mukana vielä muuttua, mikä vaikuttaa yritysten päätös- ja sitoutumiskykyyn vetyyn liittyen.

Suomella on potentiaalia edistää vetytaloutta oman maansa sisällä. Esimerkiksi Suomen on mahdollista tuottaa sinistä vetyä ottamalla talteen tehtaiden hiilidioksidia ja kierrättää sitä vetyä sisältävän bensa- ja dieselin valmistukseen ja näin lisätä vedyn kysyntää. Suorempia vetyyn liittyviä toimenpiteitä olisivat valtion taloudelliset tuet yhtiöille, jotka pyrkivät vaihtamaan toimintansa energiankulutuksen vetyyn turvautuvaksi. Valtion tuet voisivat olla esim. verovähennykset ja vetyinfrastruktuurin rakentaminen. Esimerkiksi lähelle tehdasalueita voitaisiin rakennuttaa vedyn tuotantolaitoksia, joista vetyä johdettaisiin putkien kautta suoraan tehtaisiin polttoaineeksi ja/tai vedyn varastoinen talveksi. Aihetta tutkittaessa on tultu johtopäätökseen, että Suomessa on osaamista vetytalouteen siirtymistä varten. Tästä on todisteena esimerkiksi paljon puhuttu Raahen terästehtaan siirtyminen vedyn käyttöön, muiden yhtiöiden, kuten Nesteen ohella.

Itse vedyn teknisiin haasteisiin vastataan sen soveltamiseen liittyvällä tutkimus- ja kehitystyöllä, jolla siihen liittyvät käytännön ongelmat, kuten sujuva siirto voidaan ratkaista. Nyt ollaan vedyn osalta vielä epävarmassa siirtymävaiheessa. Projekteja teknologian kehittämiseksi ja vetyinfrastruktuuria rakentamiseksi on käynnissä useita. Vedyn kysyntä verrattuna esimerkiksi aurinkovoimaan on kysymys, johon ei vielä täysin varmaa vastausta pystytä antamaan. Lisäksi on huomioitava, että eri maissa on eri resurssit ja kysyntään vaikuttavat tilanteet. Vetytalouden aseman epävarmuudelle ei voi tällä hetkellä tehdä mitään muuta, kuin tuottaa uudistettu ja yksityiskohtaisempi

selonteko, kun globaali yleistilanne on helpommin ennustettavissa ja keskeiset ryhmät, kuten valtiot ja yritysryhmät ovat saaneet lopulliset vetystrategiat valmiiksi. Ongelma, joka tässä työssä tuli esille on juuri tilanteen tämänhetkinen muuttumisvaihe, minkä vuoksi suurin osa esitetystä tiedosta voi vanheta hyvinkin nopeasti.

LÄHTEET

Afry 2022. vetyesitys. Hakupäivä 28.9.2022. https://afry.com/sites/default/files/2022-04/4_vetyesitys_jsii_11.3.2022.pdf.

Airliquide 2022 a. Tietoa meistä. Hakupäivä 13.10.2022. <https://fi.airliquide.com/tietoa-meista>.

Airliquide 2022 b. Vety. Vetykaasu h2 Hakupäivä 13.10.2022. <https://fi.airliquide.com/kaasut/vety-vetykaasu-h2>.

Balachandar, G., Khanna, N. & Das, D. 2013. Biohydrogen Production from Organic Wastes by Dark Fermentation. Julkaisussa Biohydrogen. Toim. A. Padney, J. S. Chang, P. Hallenbeck & C. Larroche. Hakupäivä. 17.11.2022. <https://janet.finna.fi/>.

Bizkarra, K., Barrio, V. L., Arias, P. L. & Cambra, J. F. 2017. Biomass Fast Pyrolysis for Hydrogen Production from Bio-Oil. Julkaisussa Hydrogen Production Technologies. Toim. M. Sankir & N. D. Sankir. 307–362. Beverly & Hoboken: Scrivener Publishing & Wiley. Hakupäivä 17.11.2022. <https://janet.finna.fi/>.

Fortum 2020. Vetytalous tulee - ennemmin tai myöhemmin. Hakupäivä 27.9.2022. <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/blogi/forthedoers-blogi/vetytalous-tulee-ennemmin-tai-myohemmin>.

Globalenergyinfrastructure 2021. Hydrogen- data telling a story. Hakupäivä 26.9.2022. <https://globalenergyinfrastructure.com/articles/2021/03-march/hydrogen-data-telling-a-story/>.

Hallenbeck, P. 2013. Photofermentative Biohydrogen Production. Julkaisussa Biohydrogen. Toim. A. Padney, J. S. Chang, P. Hallenbeck & C. Larroche. Hakupäivä 17.11.2022. <https://janet.finna.fi/>.

ik-ptz 2022. Maakaasun lämpöarvo kcal m³. Kaasumaisen polttoaineen ja palavien kaasujen ominaispalolämpö. Hakupäivä 9.11.2022. <https://ik-ptz.ru/fi/literature/teplota-sgoraniya-prirodnogo-gaza-kkal-m3-udelnaya-teplota-sgoraniya.html>

IRENA 2020. Green hydrogen cost. Hakupäivä 17.11.2022. file:///C:/Users/Henrik/Downloads/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf.

Jumppanen, Pauli 2009. Vety energiantuotannossa. Rakenteiden mekaniikka. rmseura.tkk Hakupäivä 17.11.2022. http://rmseura.tkk.fi/rmlehti/2009/nro4/RakMek_42_4_2009_4.pdf.

Kemiamedia 2022. Ammoniakki avittaa vihreää siirtymää. Hakupäivä 27.9.2022. <https://www.kemiamedia.fi/ammoniakki-avittaa-vihreaa-siirtymaa/>.

Kiesilä, Pyry 2021. Vetytalous ja vedyn tuotanto eri teknologioilla. Ympäristö- ja energiatekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö. Tampere: Tampereen yliopisto. Hakupäivä 26.9.2022. <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/133884/Kiesil%C3%A4Pyry.pdf?sequence=4&isAllowed=y>.

KU 2021. Vedyn suurimmat käyttökohteet polttoaineena löytyvät teollisuudesta – liikenteessä rekat ja lentokoneet hyötyvät eniten vedystä. Hakupäivä 13.9.2022. <https://www.ku.fi/artikkeli/4456090-vedyn-suurimmat-kaytkohteet-polttoaineena-loytyvat-teollisuudesta-liikenteessa-rekat-ja-lentokoneet-hyotyvat-eniten-vedysta>.

Linde–gas 2022. Products. Linde hydrogen. Hakupäivä 13.10.2022. https://www.linde-gas.fi/fi/products_ren/hydrogen_energy_h2/index.html.

MasterChem 2022. Metanoli. Tuotteet. Hakupäivä 27.9.2022. <https://masterchem.fi/tuote/metanoli-cas-67-56-1/>.

Matikainen, Simo 2021. Vedyn käyttö energijärjestelmissä. Jyväskylän Ammattikorkeakoulu. energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma. opinnäytetyö. Hakupäivä 9.11.2022. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/511790/Opinnaytetyo_Matikainen_Simo.pdf?sequence=2.

mdpi 2021. Microbial Electrolysis Cells for Decentralised Wastewater Treatment: The Next Steps. Hakupäivä 17.11.2022. <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/4/445/htm>.

Minkinen, Eevi 2021. Vedyn tuotannon optimointi laboratoriomittakaavan fermentoreilla biopohjaisilla aineksilla. Ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö. Savo: Savonia-ammattikorkeakoulu. Hakupäivä 27.9.2022. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/497078/Minkinen_Eevi.pdf?sequence=2&isAllowed=y.

Motiva 2020. Vety. Hakupäivä 28.9.2022. https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liik-kuminen/valitse_auto_viisaasti/energialahteet/vety.

Nikolaidis, P. & Poullikkas A. 2016. A comparative overview of hydrogen production processes. Hakupäivä 17.11.2022. https://www.researchgate.net/publication/308309135_A_comparative_overview_of_hydrogen_production_processes.

Pelkonen, Lauri 2022. Vedyn tuotantoteknologiat. Oulun ammattikorkeakoulu. Energiatekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. Hakupäivä 9.11.2022. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/752919/Lauri%20Pelkonen.pdf?sequence=2>.

Renovablesverdes 2022. Vihreä vety. Hakupäivä 26.9.2022. <https://www.renovablesverdes.com/fi/hidrogeno-verde/>.

Researchgate 2016. Liquefied Natural Gas in Mobile Machines. Hakupäivä 13.10.2022. https://www.researchgate.net/publication/309568436_Liquefied_Natural_Gas_in_Mobile_Machines.

Tilanterä, Artturi 2016. Sähköenergian varastointi vetynä ja metaanina. Maanystävät. Hakupäivä 28.9.2022. <https://maanystavat.fi/blogit/sahkoenergian-varastointi-vetyna-ja-metaanina>.

Valtioneuvosto 2022 a. Suomi vauhdittaa vetytaloutta: Gasgrid perustaa vedyn siirtoyhtiön. Julkaisu. Hakupäivä. 3.10.2022. <https://valtioneuvosto.fi/-/10616/suomi-vauhdittaa-vetytaloutta-gas-grid-perustaa-vedyn-siirtoyhtion>.

Valtioneuvosto 2022 b. Vetytalous – mahdollisuudet ja rajoitteet. Hakupäivä. 3.10.2022. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/163901/VNTEAS_2022_21.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

yle uutiset. Mullistava teknologia saattaa tehdä pian läpimurron: Sellutehtaiden savukaasuista voisi valmistaa polttoainetta koko Suomen autoille. Hakupäivä. 17.11.2022. <https://yle.fi/uutiset/3-10818795>.