

Vetytalous – mahdollisuudet ja rajoitteet

Leena Sivill, Marika Bröckl, Nikita Semkin, Antti Ruismäki, Henriikka Pilpola, Olli Laukkanen, Hannele Lehtinen, Saana Takamäki, Petri Vasara, Jenni Patronen

VALTIONEUVOSTON SELVITYS- JA
TUTKIMUSTOIMINNAN JULKAISUSARJA 2022:21

tietokayttoon.fi

Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2022:21

Vetytalous – mahdollisuudet ja rajoitteet

Leena Sivill, Marika Bröckl, Nikita Semkin, Antti Ruismäki,
Henriikka Pilpola, Olli Laukkanen, Hannele Lehtinen, Saana Takamäki,
Petri Vasara, Jenni Patronen

Valtioneuvoston kanslia Helsinki 2022

Julkaisujen jakelu

Distribution av publikationer

**Valtioneuvoston
julkaisuarkisto Valto**

Publikations-
arkivet Valto

julkaisut.valtioneuvosto.fi

Julkaisumyynti

Beställningar av publikationer

**Valtioneuvoston
verkkokirjakauppa**

Statsrådets
nätbokhandel

vnjulkaisumyynti.fi

Valtioneuvoston kanslia

This publication is copyrighted. You may download, display and print it for Your own personal use.
Commercial use is prohibited.

ISBN pdf: 978-952-383-413-2

ISSN pdf: 2342-6799

Taitto: Valtioneuvoston hallintoyksikkö, Julkaisutuotanto

Helsinki 2022

Vetytalous – mahdollisuudet ja rajoitteet

Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2022:21

Julkaisija Valtioneuvoston kanslia

Tekijä/t Leena Sivill, Marika Bröckl, Nikita Semkin, Antti Ruismäki, Henriikka Pilpola, Olli Laukkanen, Hannele Lehtinen, Saana Takamäki, Petri Vasara, Jenni Patronen

Yhteisötekijä AFRY Management Consulting Oy

Kieli suomi

Sivumäärä 232

Tiivistelmä

Vetytaloudella tavoitellaan hiilidioksidipäästöjen vähentämistä aloilla, joilla muiden keinojen käyttö on erityisen haasteellista. Tällaisia kohteita löytyy mm. teollisuudesta, lento- ja meriliikenteestä sekä raskaasta tieliikenteestä.

EU valmistelee yhteisiä vetyratkaisujen yleistymistä mahdollistavia lainsäädäntömuutoksia. Samaan aikaan eri maat Euroopassa ja sen ulkopuolella ovat laatineet kansallisia vetystrategioitaan. Vedyn tuotantoon ja loppukäyttöön suunnattuja projekteja on pelkästään Euroopassa kehitteillä tuhansittain.

Suomelle vetytalous näyttyy mahdollisuutena, koska Suomessa on melko vähähiilinen sähköntuotantokapasiteetti ja vahva sähkön kantaverkko. Tämän lisäksi Suomessa on valtava tuulivoiman lisärakennuspotentiaali, jota voitaisiin hyödyntää vedyn ja sähköpolttoaineiden tuotantoon sekä kotimaan kysyntää että vientiä varten. Toisaalta kansainvälisen markkinan tulevaisuuden tarjontaan ja kysyntään liittyy suuria epävarmuuksia. Odotettavissa on tiukka kansainvälinen kilpailu eri teknologioiden ja tuotantopaikkavaihtoehtojen välillä.

Suomessa on varmistettava edellytykset teollisuuden vetytalouteen suuntautuville investoinneille ja luotava selkeät tavoitteet ja toimenpidesuunnitelma vetyratkaisujen käyttöönotolle eri sektoreilla. Vetytalouden kehittymistä voidaan edistää mm. tuulivoiman lisärakentamisen luvitusta helpottamalla, vetyosaamista lisäämällä ja TKI-toimintaa tukemalla niin teknologioiden, palvelujen kuin yhteistyön osalta. Sähkönsiirto- ja vedynsiirtoinfrastruktuureja tulisi kehittää kokonaisuutena tulevaisuuden tarpeisiin varautuen, mutta halliten kustannuksia ja riskejä. Vetyratkaisujen edistämistoimissa tulee ottaa huomioon vaihtoehtoiset teknologiat ja ratkaisut. Samoin on huolehdittava tasapuolisten kilpailuedellytysten toteutumisesta niin kotimaassa kuin kansainvälisesti.

Klausuuli Tämä julkaisu on toteutettu osana valtioneuvoston selvitys- ja tutkimussuunnitelman toimeenpanoa. (tietokayttoon.fi) Julkaisun sisällöstä vastaavat tiedon tuottajat, eikä tekstisisältö välttämättä edusta valtioneuvoston näkemystä.

Asiasanat tutkimus, tutkimustoiminta, puhdas vety, vety, vetytalous, vetyskenaariot

ISBN PDF 978-952-383-413-2

ISSN PDF 2342-6799

Julkaisun osoite <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-413-2>

Vätgasekonomin i Finland – möjligheter och begränsningar

Publikationsserie för statsrådets utrednings- och forskningsverksamhet 2022:21

Utgivare Statsrådets kansli

Författare Leena Sivill, Marika Bröckl, Nikita Semkin, Antti Ruismäki, Henriikka Pilpola, Olli Laukkanen, Hannele Lehtinen, Saana Takamäki, Petri Vasara, Jenni Patronen

Utarbetad av AFRY Management Consulting Oy

Språk finska

Sidantal

232

Referat

Vätgasekonomin syftar till att minska koldioxidutsläppen inom sektorer där andra metoder är särskilt utmanande. Dessa omfattar industri, luftfart, sjöfart och tunga vägtransporter.

EU förbereder gemensamma lagändringar för att möjliggöra användningen av vätgaslösningar. Samtidigt har länder i och utanför Europa utvecklat nationella väte-strategier. Tusentals projekt för produktion och slutanvändning av vätgas är under utveckling enbart i Europa.

För Finland är vätgasekonomin en möjlighet, eftersom Finland har en elproduktionskapacitet med relativt låga koldioxidutsläpp och ett starkt elnät. Dessutom har Finland en enorm potential för ytterligare vindkraftskapacitet, som skulle kunna användas för att producera vätgas och elbränslen för både inhemsk efterfrågan och export. Å andra sidan finns det stora osäkerheter om den framtida tillgången och efterfrågan på den internationella marknaden. Man förväntar sig en hård internationell konkurrens mellan olika teknologier och produktionsanläggningar.

Finland måste skapa förutsättningar för industriella investeringar i vätgasekonomin och fastställa tydliga mål och en färdplan för införandet av vätgaslösningar inom olika sektorer. Utvecklingen av vätgasekonomin kan främjas t.ex. genom att underlätta tillståndsgivningen för ytterligare vindkraftsbyggnation, öka kunskap om vätgaslösningar och stödja FoU-verksamhet inom teknik, tjänster och samarbete. Infrastrukturen för överföring av el och vätgas bör utvecklas som en helhet, där man förutser framtida behov samtidigt som man hanterar kostnader och risker. Åtgärder för att främja vätgaslösningar bör ta hänsyn till alternativa tekniker och lösningar. Samtidigt måste man se till att det råder rättvisa konkurrensvillkor både nationellt och internationellt.

Klausul Den här publikation är en del i genomförandet av statsrådets utrednings- och forskningsplan. (tietokayttoon.fi) De som producerar informationen ansvarar för innehållet i publikationen. Textinnehållet återspeglar inte nödvändigtvis statsrådets ståndpunkt

Nyckelord forskning, forskningsverksamhet, fossifritt väte, väte, vätgasekonomin, vätgasscenarier

ISBN PDF 978-952-383-413-2

ISSN PDF

2342-6799

URN-adress <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-413-2>

Hydrogen economy – Opportunities and limitations

Publications of the Government's analysis, assessment and research activities 2022:21

Publisher	Prime Minister's Office		
Author(s)	Leena Sivill, Marika Bröckl, Nikita Semkin, Antti Ruismäki, Henriikka Pilpola, Olli Laukkanen, Hannele Lehtinen, Saana Takamäki, Petri Vasara, Jenni Patronen		
Group author	AFRY Management Consulting Oy		
Language	Finnish	Pages	232

Abstract

Hydrogen economy aims to reduce CO₂ emissions in sectors and processes where utilising other solutions is particularly challenging. Such processes can be found in industries, aviation, maritime transport, and heavy-duty road transport.

The EU is currently preparing legislative changes to enable an increased implementation of hydrogen-based solutions. At the same time, countries in and outside Europe have been developing their national hydrogen strategies. Thousands of projects are being established for the production and end-use of clean hydrogen in Europe alone.

Hydrogen economy provides an opportunity for Finland, as Finnish power generation has a relatively low carbon intensity and there is a stable national transmission grid for electricity available. Furthermore, Finland has vast potential for additional wind power, which could be utilised to produce hydrogen and electrofuels to meet domestic demand as well as for exports. On the other hand, the future supply and demand still remain highly uncertain in the international market. Strong competition is anticipated between different technologies and alternative locations for production.

Finland must ensure preconditions for industrial investments in the hydrogen economy, and create clear targets and an action plan for the hydrogen transition in different sectors. The development of the hydrogen economy can be supported, e.g., by easing the licensing of additional wind power construction, increasing hydrogen expertise, and supporting R&D activities in technologies, services, and collaboration. Electricity and hydrogen transmission infrastructures should be developed as a whole in preparation for the future needs while managing the related risks and costs. Alternative technologies and solutions must be considered along with the hydrogen-based solutions. In addition, conditions for fair competition must be ensured both domestically and internationally.

Provision This publication is part of the implementation of the Government Plan for Analysis, Assessment and Research. (tietokayttoon.fi) The content is the responsibility of the producers of the information and does not necessarily represent the view of the Government.

Keywords research, research activities, clean hydrogen, hydrogen, hydrogen economy, hydrogen scenarios

ISBN PDF 978-952-383-413-2 **ISSN PDF** 2342-6799

URN address <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-413-2>

Sisältö

Lyhenteet	9
Määritelmät	14
Lukijalle	16
1 Johdanto	17
2 Vedyn rooli ilmasto- ja energiaskenaarioissa	18
2.1 Miksi vety kiinnostaa juuri nyt?	19
2.2 Vety raaka-aineena ja energiankantajana	20
2.3 Vety kansainvälisissä ilmasto- ja energiaskenaarioissa	22
2.3.1 IPCC:n globaalit ilmasto- ja energiaskenaariot	22
2.3.2 IEA:n globaalit energiaskenaariot	25
2.3.3 Muita globaaleja energiaskenaarioita	28
2.3.4 Johtopäätökset maailmanlaajuisista energiaskenaarioista	31
2.3.5 Euroopan energiaskenaariot	31
2.4 Johtopäätökset vedyn roolista kansainvälisissä ilmasto- ja energiaskenaarioissa ..	38
3 Vety EU:n ilmasto- ja energiapoliittisissa tavoitteissa	40
3.1 EU:n vihreän kehityksen ohjelma	41
3.1.1 EU:n Fit-for-55-paketti	41
3.1.1.1 EU:n päästökauppa	42
3.1.1.2 Liikenteen jakeluvelvoitteet ja jakeluinfrastruktuuri	42
3.1.1.3 Uusiutuvan energian direktiivin päivitys	43
3.1.1.4 Uusiutuvan energian direktiiviä täydentävät delegoidut asetukset	44
3.1.1.5 Energiaverodirektiivin päivitys	44
3.1.2 Sektori-integraatiostrategia ja vetystrategia	45
3.1.2.1 Sektori-integraatiostrategia	45
3.1.2.2 Vetystrategia	47
3.1.2.3 Eurooppa-neuvoston päätelmät vetymarkkinan edistämisestä Euroopassa	49
3.1.3 Kaasujen dekarbonisaatiopaketti	51
3.1.4 Alkuperätakuujärjestelmä vedylle	51
3.1.5 EU:n taksonomia-asetus ja siihen liittyvä delegoitu säädös	52
3.1.5.1 Delegoitu säädös kestävän vedyn teknisistä kriteereistä	53
3.2 EU:n rahoitusinstrumentit ja projektiyhteistyö Euroopassa	54
3.2.1 Clean Hydrogen Alliance Euroopan vetyprojektien edistämiseen	56
3.2.2 Clean Hydrogen Joint Undertaking – julkisen ja yksityisen sektorin tutkimusyhteistyö	59
3.2.3 Clean Hydrogen Mission – maailmanlaajuinen aloite vetytalouden edistämiseksi	60
3.2.4 Clean Energy Ministerialin vetyaloite	61
3.2.5 Muita eurooppalaisia vetyyn keskittyviä yhteistyöjärjestöjä ja -aloitteita	61
3.3 Johtopäätökset EU:n ilmasto- ja energiapoliittisista tavoitteista ja toteutusvaiheesta	64

4	Vetystrategiat, -tiekartat ja vetyprojektit eri maissa	66
4.1	Kansalliset vetystrategiat ja -tiekartat Euroopassa.....	67
4.1.1	Saksa, Hollanti ja Iso-Britannia	70
4.1.2	Ranska, Portugali, Espanja ja Italia	77
4.1.3	Ruotsi, Norja ja Tanska.....	83
4.1.4	Baltian maat	90
4.2	Kansalliset vetystrategiat ja -tiekartat Euroopan ulkopuolella.....	92
4.3	Johtopäätökset kansallisista vetysuunnitelmista.....	104
5	Suomen lähtökohdat vetytalouteen	110
5.1	Vedyn tuotannon ja loppukäytön nykytila Suomessa	111
5.1.1	Vetyprojektit Suomessa	114
5.2	Sidosryhmien näkemyksiä vetytalouden lähtökohdista.....	116
5.2.1	Sidosryhmähaastattelujen tulokset.....	116
5.3	Suomen vetytalouteen valmistautumisen taustaa	121
6	Vetytalouden arvoketjut	125
6.1	Lähestymistapa vetytalouden arvoketjujen kuvaamiseen	127
6.2	Vetyarvoketjun osat	129
6.2.1	Energian tuotanto ja siirto	129
6.2.2	Vedyn tuotantoteknologiat	131
6.2.3	Vedyn käsittely, varastointi, logistiikka ja jakelu	142
6.2.4	Vedyn johdannaistuotteet	149
6.2.5	Vedyn erilaiset käyttökohteet	153
6.2.6	Arvoketjun poikkileikkaavat kokonaisuudet.....	156
7	Vetytalousskenaariot Suomeen	158
7.1	Skenaarioiden oletukset ja tulokset.....	159
7.1.1	Maksimi A ja Maksimi B	167
7.1.2	Maltillinen kasvu	171
7.1.3	Vain välttämätön A ja B	174
7.2	Johtopäätökset vetytalousskenaarioista.....	179
7.2.1	Skenaarioiden rajaukset.....	179
8	Suomen vetyskenaarioiden taustatekijöitä	181
8.1	Mitä kilpailukyvyllä tarkoitetaan vetytaloudessa?	182
8.2	Miten siirtymä vetytalouteen todennäköisesti tapahtuu?.....	183
8.2.1	Liikenteen vetysiirtymä	183
8.2.2	Teollisuuden vetysiirtymä.....	185
8.3	Sähkön rooli vetytaloudessa Suomen kannalta.....	186
8.3.1	Vedyn tuotannon ja kulutuksen jouston tarve, mahdollisuudet ja rajoitteet	191
8.4	Vedyn kustannustekijät	194
8.5	Vedyn ja sähköpolttoaineiden kansainvälisen markkinan kehittyminen.....	200
8.6	Biogeenisen hiilidioksidin saatavuus Suomessa.....	203
8.7	Suomen vetysiirtymän työllisyysvaikutukset	205
8.8	Sidosryhmien näkemyksiä poliittisista ohjauskeinoista	206

9 Johtopäätökset	207
9.1 Hiilineutraali yhteiskunta tarvitsee vetytaloutta.....	207
9.2 Vetytalous nopeaan kasvuun EU-lainsäädännön valmistuttua.....	207
9.3 Suomen mahdollisuutena suuri puhtaan sähkön tuotantopotentiaali ja vientiteollisuus.....	209
9.4 Vetytalouden kehittymisen haasteita ja rajoitteita	211
9.5 Suomen tarvitsemat poliittiset ohjaustoimenpiteet	213
9.5.1 TKI ohjattava kilpailukyyn kannalta merkittäviin teknologioihin ja innovaatioihin.....	215
9.5.2 Suositukset jatkoselvityksistä ja tutkimuksesta.....	216
 Liitteet	217
Liite 1. Sidosryhmien osallistaminen	217
Liite 2. Sidosryhmätalaisuudessa esitettyjen kysymysten tuloksia.....	218
Liite 3. Skenaariotyöpajojen sidosryhmäasiantuntijat	222
Liite 4. Skenaarioiden taustaoletukset	223
 Lähteet	228

Lyhenteet

AEM	Anion Exchange Membrane, anioninvaihtomembraani
AFI	Alternative Fuels Directive, vaihtoehtoisten polttoaineiden direktiivi
ALK	Alkaline electrolysis, alkalinen elektrolyysi
ARENA	Australian Renewable Energy Agency, Australian uusiutuvan energian järjestö
ASU	Air Separation Unit, ilmanerotusyksikkö
ATR	Autothermal Reforming, synteettisten kaasujen tuotantoprosessi vedystä ja hiilimonoksidista osittaishapetuksen ja höyryreformoinnin avulla
BECCU	Bioenergy Carbon Capture and Utilisation, hiilidioksidin talteenotto ja hyödyntäminen bioenergiasta
BTU	British Thermal Unit, Brittiläinen terminen yksikkö
CAPEX	Capital expenditure, käyttöomaisuusinvestointi
CCGT	Combined Cycle Gas Turbine, kaasukombivoimaturbiini
CCS	Carbon Capture and Sequestration, hiilidioksidin talteenotto ja varastointi
CCU	Carbon Capture and Utilisation, hiilidioksidin talteenotto ja käyttö
CCUS	Carbon Capture, Utilisation and Sequestration, hiilidioksidin talteenotto, käyttö ja varastointi
CEC	California Energy Commission, Kalifornian energiakomissio
CEM	Clean Energy Ministerial, puhtaan energian ministerikokous
CfD	Contract-for-Difference, hintaerosopimus
CH ₄	Methane, metaani
CH JU	Clean Hydrogen Joint Undertaking, puhtaan vedyn yhteisyrittäjä
CO	Carbon Monoxide, hiilimonoksidi
CO ₂ /CO _{2e}	Carbon dioxide/Carbon Dioxide equivalent, hiilidioksidi/hiilidioksidiekvivalentti
COP	Coefficient Of Performance, tehokerroin

CORSIA	Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation, kansainvälinen lentoliikenteen hiilidioksidipäästöjen kasvun hyvittämiseen velvoittava järjestelmä
CSIS	Center for Strategic and International Studies, Strategisten ja kansainvälisten tutkimusten keskus
DAC	Direct Air Capture, hiilidioksidin talteenotto suoraan ilmasta
DVB	Divinylbenzene, divinyylibentseeni
EC	European Commission, Euroopan komissio
ECF	European Climate Foundation, Euroopan ilmastosäätiö
eFT	e-Fuels Technology, sähköpolttoaineteknologia
ENNOH	European Network of Network Operators for Hydrogen, Euroopan vetyverkko-operaattoreiden verkosto
EPDM	Ethylene Propylene Diene Monomer, etyleenipropylenidieenikumi
ET	Energiateollisuus
ETA	Euroopan talousalue (EU27, Iso-Britannia, Norja, Islanti ja Liechtenstein)
ETS	European Emissions Trading System, EU:n hiilidioksidipäästökauppajärjestelmä
EU	European Union, Euroopan Unioni
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle, polttokennosähköajoneuvo
FHC JU	Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, yhteisyritys polttokenno- ja vetyteknologian alalla
GDP	Gross Domestic Product, bruttokansantuote
GECO	Global Energy and Climate Outlook, globaali energia- ja ilmastoraportti
GoO	Guarantee of Origin, alkuperätakuu
HER	Hydrogen Europe Research, Eurooppalainen vedyn tutkimusyhdistys
ICAO	International Civil Aviation Organization, kansainvälinen siviili-ilmailujärjestö
IEA	International Energy Agency, kansainvälinen energiajärjestö
IMO	International Maritime Organization, kansainvälinen merenkulkujärjestö
IPCEI	Important Project of Common European Interest, Euroopan yhteistä etua koskeva tärkeä hanke
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change, hallitustenvälinen ilmastomuutospaneeli

IPHE	International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy, kansainvälinen yhteistyöaloite vedyn ja polttokennojen kehittämiseksi ja käyttöönottamiseksi
IRENA	International Renewable Energy Agency, kansainvälinen uusiutuvan energian järjestö
JRC	Joint Research Centre, Euroopan komission yhteinen tutkimuskeskus
KOH	Potassium hydroxide, kaliumhydroksidi
LCA	Life Cycle Assessment, elinkaariarviointi
LCOE	Levelized Cost Of Electricity, tasoitettu sähkökustannus
LHV	Lower Heating Value, alempi lämpöarvo
LNG	Liquefied Natural Gas, nesteytetty maakaasu
LOHC	Liquid Organic Hydrogen Carrier, nestemäinen orgaaninen vedynkantaja
LPG	Liquefied Petroleum Gas, nestekaasu
LSCF	Lanthanum Strontium Cobalt Ferrite, lantaani strontium kobolttiferriitti
LSM	Lanthanum Strontium Manganite, lantaani-strontiummanganiitti
LUT	Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto
LVM	Liikenne- ja viestintäministeriö
MeOH	Methanol, metanoli
METI	Ministry of Economy, Trade and Industry, talous-, kaupp- ja teollisuusministeriö
MJ	Megajoule
MOF	Metal-organic frameworks, metalli-orgaaniset runkorakenteet
MW/GW	Megawatt/Gigawatt, megawatti/gigawatti
N ₂	Nitrogen, typpi
NaHCO ₃	Sodium bicarbonate, natriumvetykarbonaatti
NECP	National Energy and Climate Plan, kansallinen energia- ja ilmastosuunnitelma
NEDO	New Energy and Industrial Technology Development Organisation, energia- ja teollisuusteknologian kehitysjärjestö
NEIS	National Energy Independence Plan, kansallinen energiaomavaraisuussuunnitelma
NER	Nordic Energy Research, pohjoismainen energiatutkimus
NH ₃	Ammonia, ammoniakki

Ni	Nickel, nikkeli
NRCAN	Natural Resources Canada, Kanadan luonnonvaraviranomainen
NZHF	Net Zero Hydrogen Fund, nettonollapäästöisen vedyn rahasto
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development, kansainvälinen valtioiden välinen taloudellisen yhteistyön ja kehityksen järjestö
OIES	Oxford Institute for Energy Studies, Oxfordin yliopiston energian tutkimuslaitos
OPEX	Operating Expense, toimintakulu
PEF	Product Environmental Footprint, tuotteen ympäristöjalanjälki
PEM	Proton Exchange Membrane, polymeerielektrolyysi
PFSA	Perfluorosulfonic Acid, perfluorisulfonihappo
POX	Partial Oxidation, osittaishapettuminen
PPA	Power Purchase Agreement, pitkäaikainen sähkönostosopimus (esim. 10–20 vuotta), jossa sähkökäyttäjä(t) sopii ostavansa sähköntuottajalta tietyn määrän sähköä sopimuksen mukaiseen hintaan
PPS	Polypropylene Seal, polypropeenitiiviste
PSU	Polysulfone, polysulfoni
PTFE	Polytetrafluoroethylene, polytetrafluorieteeni
PtX/P2X	Power-to-X, synteettisten polttoaineiden tuottaminen sähkön avulla
RED	Renewable Energy Directive, EU:n uusiutuvan energian direktiivi
RFNBO	Renewable Fuels of Non-Biological Origin, ei-biologista alkuperää olevat polttoaineet
SAF	Sustainable Aviation Fuel, kestävä lentoliikenteen polttoaine
SDS	Sustainable Development Scenario, kestävä kehityksen skenaario
SMR	Steam Methane Reformation, vedyn tuotanto metaanin höyryreformoinnin avulla
SNG	Synthetic Natural Gas, synteettinen maakaasu
SOEC	Solid Oxide Electrolyser Cell, kiinteäoksidielektrolyysikemno
STTK	Suomen Teknisten Toimihenkilöiden Keskusliitto
STUK	Säteilyturvakeskus
T&D	Transmission and Distribution
TEM	Työ- ja elinkeinoministeriö

TEN-E	Trans-European Energy Networks regulation, Euroopan laajuisia energiaverkkoja koskeva asetus
TEN-T	Trans-European Transport Network regulation, Euroopan laajuisia liikenneverkkoja koskeva asetus
TKI	Tutkimus, kehitys ja innovaatio
TUKES	Turvallisuus- ja kemikaalivirasto
TWh	Terawatt-hour, terawattitunti (oletuksena alemmassa lämpöarvossa)
TYNDP	10-Year Network Development Plan, kymmenvuotinen verkonkehittämissuunnitelma
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe, yhdistyneiden kansakuntien Euroopan talouskomissio
USDE	United States Department of Energy, Yhdysvaltain energiaministeriö
VN	Valtioneuvosto
VTT	Teknologian tutkimuskeskus
WAM	With Additional Measures, lisätoimenpiteiden kanssa
WEC	World Energy Council, kansainvälinen energia-alan yhteistyöjärjestö
YK	Yhdistyneet kansakunnat
YSZ	Yttria-stabilized Zirconia, yttria-stabiloitu zirkoniumoksidi
ZrO2	Zirconium dioxide, zirkoniumdioksidi

Määritelmät

- Captive fleet** Vakioreiteillä kulkevien ajoneuvojen joukko
- Carbon-Contract-for-Difference** Hintaerosopimus, jossa valtio sitoutuu maksamaan hankkeen toteuttajan tarjouksen sisältämän vältetyn hiilidioksiditonin ja päästöoikeuden markkinahinnan välisen erotuksen hankkeen toteuttajalle sopimuksen ajan
- Drop-in polttoaine** Liikenteen biopohjainen tai synteettinen polttoaine, joka soveltuu suoraan korvaamaan fossiilisia vastineitaan samoilla jakelu- ja polttoteknologioilla
- Fit-for-55** EU-komission ehdotus lainsäädäntömuutoksista, joilla pyritään saavuttamaan 55 % päästövähennystavoite vuoden 1990 tasosta vuoteen 2030 mennessä
- Fossiilinen kaasu** Maakaasu tai muista fossiilisista energianlähteistä valmistettu kaasu, jonka valmistusprosessissa syntynyttä hiilidioksidia ei oteta talteen ja varastoida
- Fossiilinen vety** Fossiilisista polttoaineista valmistettu vety
- Green Deal** Vihreän kehityksen ohjelma
- Harmaa vety** Fossiilisista polttoaineista valmistettu vety, jonka valmistamisessa syntynyttä hiilidioksidia ei oteta talteen ja varastoida
- Power-to-Gas-to-Power** Kaasun tuottaminen sähköllä, kaasun varastointi ja kaasun muuntaminen takaisin sähköksi
- Power-to-X** Vedyn tai kaasumaisten tai nestemäisten synteettisten raaka-aineiden tai polttoaineiden (esim. vety, metaani, muut hiilivedyt, metanoli) tuottaminen sähköllä
- Puhdas vety** Uusiutuvista tai muista päästöttömistä (ydinvoima) energianlähteistä valmistettu vety
- Uusiutuva vety** Uusiutuvista energianlähteistä valmistettu vety
- Vetytalous** Talousjärjestelmä, jossa fossiilisista energianlähteistä tai raaka-aineista siirrytään puhtailla tai vähähiilillä energianlähteillä tuotettuun vetyyn energiankantajana tai raaka-aineena
- Vihreä vety** Uusiutuvista energianlähteistä valmistettu vety

Vähähiilinen vety Fossiilisista energianlähteistä siten valmistettu vety, että syntynyt hiilidioksidi otetaan talteen ja varastoidaan, tai elektrolyysillä valmistettu vety, jossa vedyn valmistamiseen käytetään vähähiilistä sähköä

LUKIJALLE

Vetytalouden uuteen tulemiseen liittyvät odotukset ovat korkeammalla ja konkreettisempia kuin koskaan aikaisemmin. Kun vedyn tuotannon ja kysynnän edellyttämä EU-tasoinen lainsäädäntö valmistuu, Euroopassa ja Euroopan lähialueilla lähtee toteutukseen satoja julkisin varoin tuettuja teollisen mittakaavan ja demonstraatiokokoluokan vetyprojekteja teollisuuden, liikenteen ja energiantuotannon erilaisiin käyttökohteisiin.

Vetytalouden tässä kehitysvaiheessa on muodostettava selkeä kokonaiskuva, mitä mahdollisuuksia, rajoitteita ja haasteita vetytalouden kehittämiseen Suomen kannalta liittyy. Tämä selvitys käynnistettiin keväällä 2021 osaltaan palvelemaan edellä mainittua tietotarvetta.

Selvityksen aikana Euroopan komissio on julkaissut Fit-for-55- ja kaasujen dekarbonisointilakiehdotuspaketin, joissa määritellään vedyn tarvitsema lainsäädäntö osana kestävä kehityksen ohjelmaa. Vuoden 2021 loppuun mennessä EU-komissiolle on esitelty yli 1 500 Euroopassa kehitteillä olevaa vetyprojektia. Samaan aikaan Suomessa on valmisteltu ilmasto- ja energiastrategian päivitystä, perustettu kotimainen Vetyklusteri, jatkettu tutkimusta, perustettu uusia projekteja ja avattu julkisia rahoitushakua vetyyn liittyville investoinneille. Näiden muuttuvien tekijöiden vallitessa tämä selvitys on edellyttänyt jatkuvaa päivittämistä ja tiivistä dialogia projektiryhmän, ohjausryhmän ja sidosryhmien välillä.

Haluamme projektiryhmän puolesta lämpimästi kiittää kaikkia haastatteluihin, kyselyihin, työpajoihin ja seminaareihin osallistuneita asiantuntijoita ja organisaatioita. Lisäksi haluamme kiittää ohjausryhmää ohjauksesta, tuesta ja palautteesta selvityksen aikana. Konkreettinen työ vetytalouden edistämiseksi jatkuu kaikilla tasoilla – tässä selvityksessä käsitellyt sisällöt tarjoavat tälle työlle yhteiskunnallisen viitekehyksen ja yleisiä suuntaviivoja.

Leena Sivill, projektipäällikkö

Helmikuussa 2022

1 Johdanto

| ”Menneisyys on tulevaisuuden alku.”

H.G. Wells

Vety on noussut 2020-luvulle tultaessa keskeiseksi osaksi tulevaisuuden energia- ja ilmastokeskusteluja. Hiilineutraalisti tuotetulle vedylle nähdään kansainvälisesti suuri potentiaali etenkin teollisuudessa ja liikenteessä. Monissa maissa on määritelty kansallinen vetystrategia tai -tiekartta tai valmistelua tehdään parhaillaan. Euroopan komissio määritteli oman vetystrategiansa heinäkuussa 2020 ja vie tähän liittyviä lakiehdotuksia eteenpäin.

Suomessa vety huomioidaan kansallisen ilmasto- ja energiastrategian valmistelussa. Tämä selvitys ’Vetytalous – mahdollisuudet ja rajoitteet’ palvelee osaltaan kansallisen ilmasto- ja energiastrategian valmistelua sekä yleisellä tasolla energiapolitiikkaa ja energiateknologiapolitiikkaa.

Tässä selvityshankkeessa käsitellyt tutkimuskysymykset ovat:

- Mikä on vetyteknologian ja vetytalouden tilanne EU:n jäsenmaissa ja globaalisti nyt, vuonna 2025, 2030 ja sen jälkeen?
- Mitä skenaarioita vetytaloudelle Suomessa (–2050) voidaan esittää?
- Millaisia kustannusennusteita ja -arvioita vetyteknologiasta esitetään ja kuinka realistisia ne ovat?
- Mikä on vetytalouteen liittyvän liiketoiminnan ja saavutettavien päästövähennemien mahdollinen määrä Suomessa ja Euroopassa 2030 ja sen jälkeen?
- Mitä politiikkatoimia vetytalouteen on esitetty Euroopassa tai maailmalla?
- Mitkä ovat suomalaisen tutkimuksen ja teollisuuden vahvuudet, ja mihin niiden tulisi keskittyä vetyteknologiassa?
- Mitkä ovat vedyn ja vetytalouden rajoitteet ja ongelmat?

Raportin alussa avataan vedyn roolia kansainvälisten ilmasto- ja energiaskenaarioiden näkökulmasta (luku 2). Tämän jälkeen keskitytään Euroopan komission vetyä koskeviin tavoitteisiin ja EU-lainsäädännön ja EU:n rahoittamien tukiohjelmien tilanteeseen (luku 3). Luvussa 4 syvennytään yksittäisten maiden vetystrategioihin ja projekteihin, vaikka luvussa esitetyt tiedot vanhenevatkin tänä päivänä nopeasti. Kansainvälisen kokonaiskuvan muodostamisen jälkeen luodaan katsaus Suomen lähtökohdista vetytalouteen luvussa 5. Luvussa 6 käydään läpi vetytalouteen liittyvät arvoketjut ja teknologiat johtopäätöksin Suomen kannalta. Luvussa 7 esitellään selvityksessä sidosryhmäyhteyksissä valmistellut viisi skenaariota vedyn tuotanto-, loppukäyttö- ja vientipotentiaaleista Suomessa. Valikoiduista taustatekijöistä käydään vielä lähemmin keskustelua luvussa 8. Luvussa 9 esitetään lopuksi selvityshankkeen johtopäätökset.

2 Vedyn rooli ilmasto- ja energiaskenaarioissa

Yhteenveto

IPCC:n maailmanlaajuisissa ilmastoskenaarioissa nostetaan puhdas ja vähähiilinen vety esille yhtenä välttämättömistä keinoista päästä Pariisin ilmastopimuksen tavoitteisiin. IPCC korostaa vedyn käyttökohteina **teollisuuden prosesseja ja raskasta tieliikennettä, meriliikennettä ja lentoliikennettä, joissa suora sähköistäminen tai korvaaminen muilla hiilineutraaleilla tai vähähiilillä ratkaisuilla olisi vaikeaa.**

IEA:n maailmanlaajuisissa Pariisin ilmastopimuksen tavoitteet täyttävissä energiaskenaarioissa¹ vedyn loppukäyttö kasvaisi kolmin- tai nelinkertaiseksi nykyisestä vuoteen 2050 mennessä. Vetyä voitaisiin käyttää pitkällä aikavälillä IPCC:n korostamien loppukäyttökohteiden lisäksi pienempiä määriä **sähköverkkojen tasapainottamiseen ja rakennusten lämmitykseen.**

Euroopan komission vuonna 2018 julkaisemissa EU28-jäsenvaltiot kattavissa energiaskenaarioissa, joissa tavoitellaan kustannustehokkaimmin toteutettavaa hiilineutraalisuutta vuoteen 2050 mennessä, energian loppukäyttöä tulisi vähentää noin kolmanneksella nykyisestä: tasolta 13 000 TWh_{LHV} vuonna 2019 tasolle 8 200–9 700 TWh_{LHV} vuoteen 2050 mennessä. Myöhemmissä EU27-jäsenvaltiot kattavissa vuoden 2020 skenaariossa energian loppukäyttö laskee vastaavasti tasolle 7 100 TWh_{LHV} vuoteen 2050 mennessä. **Energian loppukäytön tehostamisella on siten tärkein merkitys hiilidioksidipäästöjen vähentämisessä.**

1 Energiaskenaarioilla kuvataan ja mallinnetaan energiantuotantoon, -käyttöön ja järjestelmiin liittyviä vaihtoehtoisia tulevaisuuden kehityspolkuja. Skenaarioita käytetään arvioitaessa vaihtoehtoisiin tulevaisuuden kehityspolkuihin liittyviä edellytyksiä, rajoitteita, riskejä ja mahdollisuuksia.

Euroopan komission esittämissä energiaskenaarioissa puhdas ja vähähiilinen vety ja tästä johdetut synteettiset polttoaineet muodostaisivat Euroopassa noin 18 % osuuden energian loppukäytöstä vuonna 2050. Tämä **vaatisi Euroopassa valtavan, tarkasti kohdennettavan siirtymän vetytalouden arvoketjuihin etenkin teollisuudessa ja meri- ja lentoliikenteessä sekä osittain rakennusten lämmityksessä ja sähköntuotannossa.**

Intressiryhmien julkaisemissa skenaarioissa painottuvat intressiryhmien ajamat tavoitteet.

2.1 Miksi vety kiinnostaa juuri nyt?

Vetyä voidaan käyttää monipuolisesti raaka-aineena, polttoaineena, energiankantajana ja väliaineena energian varastointiin. Vedyllä voidaan korvata fossiilisten raaka-aineiden ja energianlähteiden käyttöä useissa sovelluksissa, jos vety on tuotettu puhtaasti tai vähähiilisesti. Puhtaan vedyn tuotanto edellyttää vedyntuotantoa elektrolyysillä puhtaan sähkön avulla tai muilla prosesseilla biopohjaisista raaka-aineista. Vähähiilisellä vedyllä tarkoitetaan vedyn valmistamista prosessilla, joka alittaa tietyt hiilidioksidipäästöjen raja-arvot. Tästä esimerkkinä on vedyntuotanto fossiilisista energianlähteistä siten, että syntyvä hiilidioksidi otetaan talteen ja varastoidaan.

Vety kiinnostaa kansainvälisissä ilmasto- ja energiapoliittisissa keskusteluissa juuri nyt, koska ilmastonmuutoksen hillintä edellyttää entistä voimakkaampia toimenpiteitä ja suuret systeemiset muutokset edellyttävät valmistelulta pitkää aikajännettä. Tänä päivänä puhdas ja vähähiilinen vety eivät ole taloudellisesti kilpailukykyisiä, mutta jo 2030-luvulle tultaessa vety nähdään oleellisena keinona vähentää hiilidioksidipäästöjä ja saavuttaa nettonollatavoite tämän jälkeen. Vedyn lisääminen ilmastonmuutoksen hillinnän keinovalikoimaan edellyttää siksi pitkäjänteistä ja määrätietoista poliittista ohjausta.

Vetytalouden kansainvälisinä ajureina toimivat Pariisin ilmastopöytäkirja vuodelta 2015 ja Euroopan Unionin vuonna 2019 käynnistämä Green Deal, vihreän kehityksen ohjelma, jossa on asetettu hiilineutraalisuustavoite vuoteen 2050 mennessä (YK, 2016; EC, 2019a). Tämän lisäksi useat maat ovat asettaneet kansallisia hiilineutraalisuustavoitteitaan 2020-luvulle tultaessa. Vedyn on todettu hallitustenvälisen ilmastopaneelin IPCC:n ilmastoskenaarioissa olevan välttämätön osa ilmastonmuutoksen hillinnässä tarvittavaa keinovalikoimaa, jotta Pariisin ilmastopöytäkirjan tavoitteisiin voitaisiin päästä (IPCC, 2018). Pariisin ilmastopöytäkirjan tavoitteena on pitää maapallon keskilämpötilan nousu selvästi alle kahdessa asteessa suhteessa esiteolliseen aikaan ja pyrkiä toimiin, joilla lämpeneminen saataisiin rajattua alle 1,5 asteen.

Seuraavassa esitellään tarkemmin perusteita, miksi vedyn mahdollisuudet polttoaineena ja energiankantajana kannattaa huomioida osana ilmastokysymysten ratkaisua, sekä tarkastellaan vedyn roolia julkaistuissa maailmanlaajuisissa ja Euroopan laajuisissa ilmasto- ja energiaskenaarioissa.

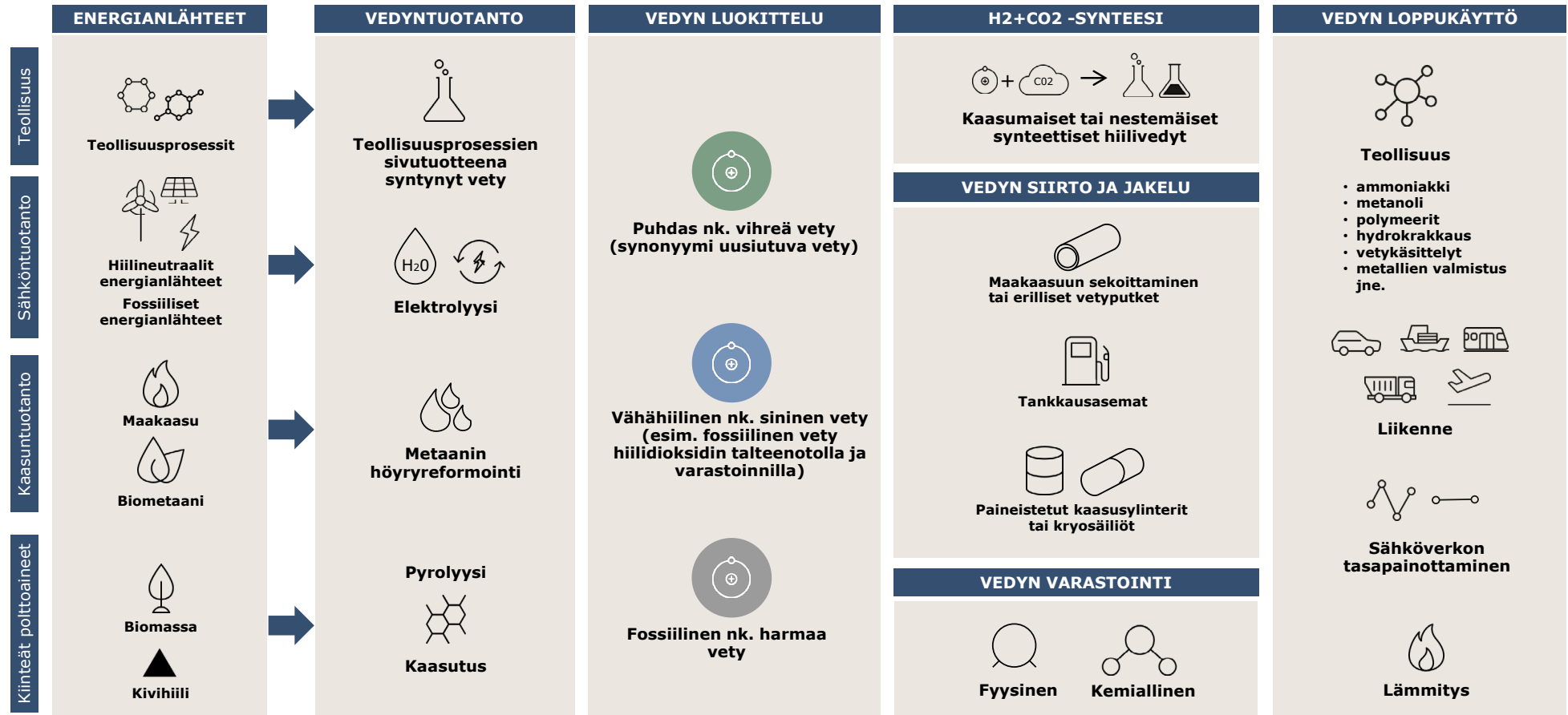
2.2 Vety raaka-aineena ja energiankantajana

Vetyä voidaan tuottaa elektrolyysiprosessilla, jossa vesi muutetaan vedyksi ja hapeksi sähköenergian avulla. Jotta vety olisi puhdasta, elektrolyysiin käytettävän sähköön on oltava hiilineutraalisti tuotettua. Pieniä määriä uusiutuvaa vetyä voidaan tuottaa myös suoraan uusiutuvista raaka-aineista, kuten biometaanista höyryreformoinnin avulla ja biomassoista pyrolyysiprosessin avulla. Tämän lisäksi vetyä voidaan tuottaa vähähiilisesti, jos tuotannon hiilidioksidipäästöt pysyvät alle kulloinkin voimassa olevien raja-arvojen. Vety voidaan esimerkiksi tuottaa fossiilisia energianlähteitä tai raaka-aineita hyödyntäen siten, että prosessissa syntyvä hiilidioksidi otetaan talteen ja varastoidaan (carbon capture and sequestration, CCS) (ks. kuva 1 seuraavalla sivulla).

Vetyä valmistetaan ja käytetään nykyisin pääasiassa öljynjalostuksessa ja ammoniakkin valmistukseen. Vedyn tuottaminen ja käsittely teollisuudessa on siten hyvin tunnettua ja hallittua. Tänä päivänä lähes kaikki vety tuotetaan fossiililla energianlähteillä.

Nykyisten vetyä käyttävien prosessien lisäksi teollisuudessa ja liikenteessä on kehitteillä uusia prosesseja ja teknologioita, joilla on mahdollista korvata fossiilisten raaka-aineiden ja polttoaineiden käyttö vetyyn perustuvalla prosessilla tai teknologialla. Esimerkiksi terästeollisuudessa on kehitteillä raudan suorapelkistys vedyllä, joka korvaisi fossiilisen hiilen käytön ko. prosessissa. Vedystä voidaan valmistaa myös synteettisiä raaka-aineita ja polttoaineita kuten metaania, metanolia, bensiiniä, kerosiinia tai dieseliä. Tästä käytetään nimitystä Power-to-X. Synteettisten hiilivetyjen valmistukseen tarvitaan vedyn lisäksi hiilidioksidia, johon sovelletaan hiilidioksidin talteenottoa ja käyttöä (carbon capture and utilization, CCU). CCU ei muuta hiilitasetta ilmaston kannalta, koska talteen otettu hiilidioksidi vapautuu lyhyellä aikavälillä takaisin ilmakehään.

Kuva 1. Yleiskuva vedyn vaihtoehtoisista arvoketjuista



Sähkön avulla valmistettavat synteettiset raaka-aineet ja polttoaineet (nk. sähköpolttoaineet) mahdollistaisivat nykyisen raaka- ja polttoaineinfrastruktuurin hyödyntämisen. Toisaalta kaikissa ylimääräisissä konversioissa energiamuodosta toiseen menetetään osa prosessin kokonaishyötysuhteesta lämpönä ympäristöön. Tästä syystä sähköllä valmistettu vety ja sähköpolttoaineet eivät ole kilpailukykyisiä esimerkiksi suoraan sähköistämiseen verrattuna. Häviöissä syntyvän hukkalämmön hyödyntäminen parantaa vedyn ja sen jatkojalosteiden tuotannon kokonaishyötysuhdetta. Samoin vedyntuotannon sivutuotteena syntyvä happi kannattaa hyödyntää. Sivutuotepelillä voidaan korvata teräs- ja kemianteollisuuden nykyisin käyttämää tislamalla valmistettavaa happea. Happea voidaan hyödyntää myös energiantuotannossa polttoprosessien hyötysuhteen nostamiseen, lääkkeellisenä happea ja hitsaamiseen.

Vedyn tarvitsema sähköntuotanto, vedyntuotanto ja vedyn loppukäyttö voivat sijaita fyysisesti eri paikoissa. Sähköntuotannon, vedyntuotannon ja vedynkäytön välillä voi lisäksi olla ajallista viivettä. Näistä syistä vetytalouteen siirtyminen edellyttää myös ratkaisuja siirto-, jakelu- ja varastointi-infrastruktuureista sähkölle, vedylle ja vedystä valmistetuille jalosteille. Systeemiä kysymyksiä ovat yhtä aikaa energiantuotannon, sähköverkkojen, maakaasuverkkojen, teollisuuden, lämmityksen ja liikenteen infrastruktuurien kehittäminen kokonaisuuden kannalta tehokkaimmalla tavalla. Samaan aikaan vetyarvoketjuihin liittyvät teknologiat kehittyvät nopeasti. Vetyarvoketjujen rakentaminen vaatii siten kokonaisvaltaista ja kauas katsovaa energiajärjestelmien suunnittelua.

2.3 Vety kansainvälisissä ilmasto- ja energiaskenaarioissa

Ilmasto- ja energiaskenaarioita käytetään arvioitaessa, millä oletuksilla ja kustannuksilla tietyt ilmasto- ja energiapolitiittiset tavoitteet voitaisiin saavuttaa. Maailmanlaajuisia ilmasto- ja energiaskenaarioita, joihin sisältyy vety, ovat julkaisseet mm. hallitustenvälinen ilmastonmuutospaneeli IPCC ja OECD-maiden välinen energiajärjestö International Energy Agency (IEA, 2021a). Tämän lisäksi Euroopassa on julkaistu lukuisia energiaskenaarioita EU:n ja kansallisten tutkimusorganisaatioiden, edunvalvontajärjestöjen ja yritysten toimesta. Seuraavassa esitellään lyhyesti, miten vetyä on lähestytty energia- ja ilmastopoliitikassa yleisesti viitatuissa skenaarioissa.

2.3.1 IPCC:n globaalit ilmasto- ja energiaskenaariot

Pariisin ilmastopöytäkirjan tavoitteita vuodelta 2015 käytetään usein viitekehystenä kansainvälisille ja kansallisille ilmasto- ja energiaskenaarioille. Pariisin ilmastopöytäkirjan tavoitteena on pitää maapallon keskilämpötilan nousu selvästi alle kahdessa asteessa suhteessa esiteolliseen aikaan ja pyrkiä toimiin, joilla lämpeneminen saataisiin rajattua alle

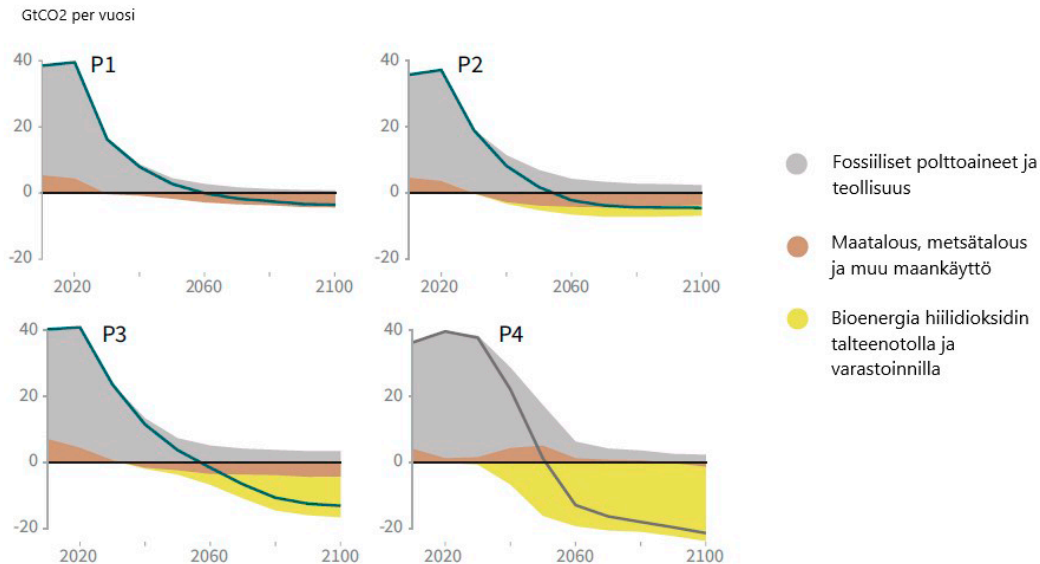
1,5 asteeseen (YK, 2015). Syksyllä 2021 julkaistussa IPCC:n raportissa arvioidaan, että 1,5°C lämpötilanousu saavutetaan jo seuraavien 20 vuoden aikana, ellei ilmastotoimia kiihdytetä (IPCC, 2021).

IPCC:n globaaleissa ilmastoskenaarioissa on esitetty kymmeniä skenaarioita ilmaston lämpenemisestä vuoteen 2100 mennessä ja sen jälkeen (IPCC, 2018). IPCC:n ilmastoskenaarioissa otetaan huomioon ilmastomuutokseen vaikuttavia tekijöitä huomattavasti laajemmin kuin pelkissä energiaskenaarioissa.

Pariisin ilmastosopimuksen solmimisen jälkeen IPCC on tarkastellut tarkemmin keinoja, joilla voitaisiin päästä 1,5°C tavoitteeseen seuraavien skenaarioiden avulla (ks. kuva 2) (IPCC, 2018):

- **P1.** Skenaario, jossa sosiaaliset, liiketoiminnan ja tekniset innovaatiot laskevat energian kysyntää vuoteen 2050 saakka samaan aikaan, kun elintaso nousee etenkin eteläisellä pallonpuoliskolla. Rakenteeltaan kevyempi energijärjestelmä mahdollistaa energiantuotannon hiilineutraalisuuden nopealla aikataululla. Metsittämistä käytetään hiilidioksidinieluna. Hiilidioksidin talteenottoa ei sovelleta.
- **P2.** Skenaario, joka perustuu kestävään kehitykseen mukaan lukien energiaintensiteetti, sosioekonominen kehittäminen, taloudellinen ohjaus ja kansainvälinen yhteistyö sekä siirtymä kestäviin ja ympäristöystävällisiin kulutustottumuksiin, vähähiilisiin teknologiainnovaatioihin ja hyvin hoidettuihin maankäyttöjärjestelmiin. Bioenergian hiilidioksidintalteenottoa ja varastointia hyödynnetään pienessä mittakaavassa.
- **P3.** Keskitien skenaario, jossa yhteiskunnallinen ja tekninen kehitys noudattavat historiallista kehitystä. Päästövähennykset saavutetaan pääasiassa muuttamalla energian ja tuotteiden tuotantotapoja ja vähemmän kysyntää leikkaamalla.
- **P4.** Resurssi- ja energiaintensiivinen skenaario, jossa talouskasvu ja globalisaatio johtavat kasvihuonekaasuintensiivisen elintavan omaksumiseen laajasti. Tähän sisältyy liikennepolttoaineiden ja lihakarjatuotteiden korkea kysyntä. Päästövähennykset saavutetaan pääasiassa teknologian keinoin mm. hiilidioksidin talteenottoa ja varastointia hyödyntämällä.

Kuva 2. Globaalit hiilidioksidipäästöt IPCC:n 1,5°C-tavoitteen täyttävissä skenaarioissa P1–P4 (IPCC, 2018)



IPCC:n raportin johtopäätökset vedyn osalta ovat seuraavat:

- Teollisuuden osalta 1,5°C tavoitteen saavuttaminen edellyttää uusien ja nykyisten teknologioiden ja menetelmien yhdistämistä. Keinoja ovat sähköistäminen, **vety**, kestävästi tuotetut biopohjaiset raaka-aineet, tuotteiden välinen substituutio ja hiilidioksidin talteenotto, käyttö ja varastointi.
- Teollisuudessa yksin energiankäytön tehostamisella ei päästä tarvittavaan päästövähennykseen. **Teollisuudessa vedyllä on rooli fossiilisten raaka-aineiden ja polttoaineiden korvaamisessa siellä, missä sähköä ei voi käyttää suoraan.**
- Lyhyellä ja keskipitkällä aikavälillä fossiilisia korvaavina polttoaineina lento- ja meriliikenteessä ovat kehittyneet biopolttoaineet, mutta **pitkällä aikavälillä korvaajana voisi olla suoraan vety meriliikenteessä tai vety välituotteena synteettisille polttoaineille sekä lento- että laivaliikenteessä.**
- Liikennesektorin kansainvälinen tieteellinen tutkimus havaittiin puutteelliseksi sähköistämisen mahdollisuuksien osalta. Esimerkiksi **sellaista vaihtoehtoa oli tutkittu vain vähän, jossa liikenne ensisijaisesti sähköistyy ja jäljelle jäävä polttoaineiden tarve korvataan vetyyn perustuvilla polttoaineilla (vety tai PtX). Samoin tietämys sähköistämisen, vedyn ja CCUS:n elinkaari-vaikutuksista on vähäistä, eikä tarvittavan teollisen siirtymän vaikutuksia vielä ymmärretä riittävästi.**

IPCC:n raportin jälkeen tutkimus, kehitys ja maidenvälinen yhteistyö ovat jatkuneet edellä mainituilla alueilla. Maailmanlaajuisesti useat maat toimivat yhteistyössä vetyprojektien ja -teknologioiden kehityksessä. Useat valtiot ovat myös luoneet tai ovat parhaillaan luomassa kansallisia vetystrategioitaan ja -tiekarttojaan, kuten esitellään tämän raportin myöhemmissä osissa.

2.3.2 IEA:n globaalit energiaskenaariot

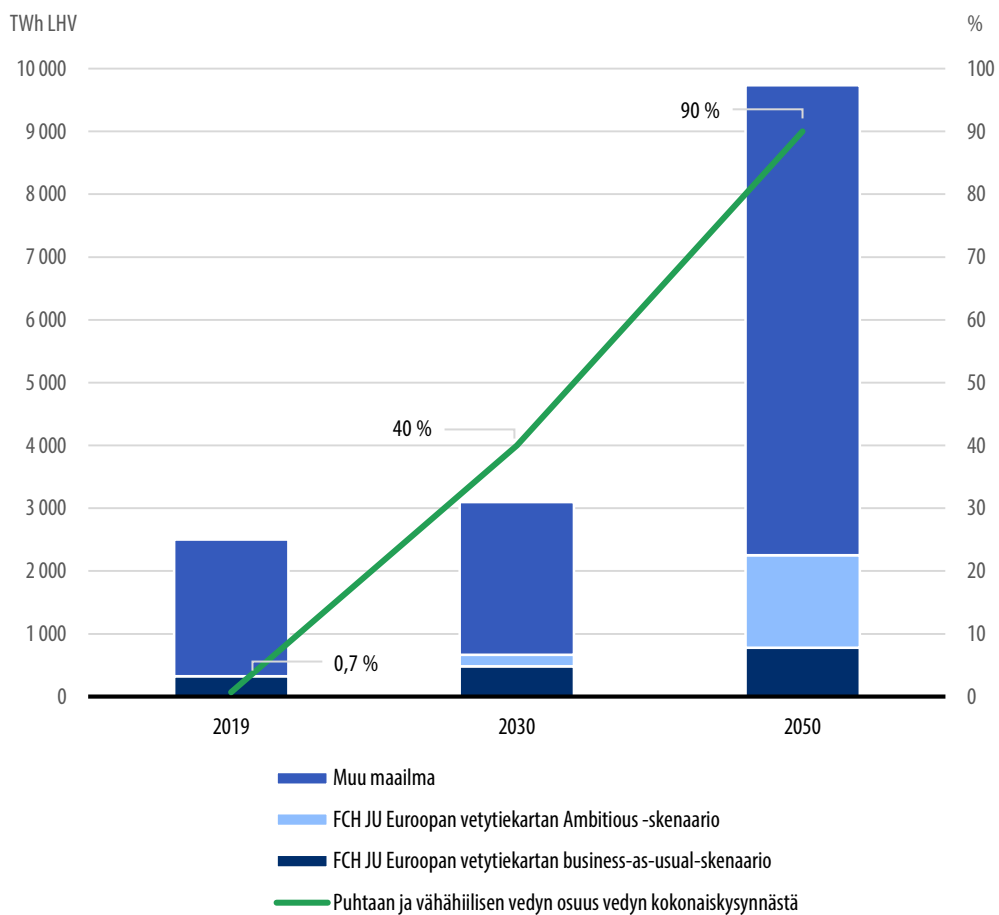
Energiaskenaarioissa käsitellään tyypillisesti vain energiantuotannosta ja loppukäytöstä syntyviä suoria kasvihuonekaasupäästöjä. Maailmanlaajuisista energiaskenaarioista tärkeimpinä pidetään yleisesti IEA:n säännöllisesti julkaisemia skenaarioita, joihin IEA käyttää omien malliensa ja asiantuntijoidensa lisäksi asiantuntijoita eri jäsenmaistaan. IEA julkaisee seuraavan World Energy Outlookin yhteydessä syyskuussa 2021 päivitettyt näkemyksensä myös vedyn osalta. Alla on esitelty kaksi viimeaikaista korkean tavoitetason energiaskenaariota, joissa vety on mukana.

IEA:n Sustainable Development -skenaario vuodelta 2020

IEA:n julkaisemista skenaarioista vedyn kannalta kiinnostavin on Sustainable Development -skenaario, jonka tavoitteena on havainnollistaa, miten Pariisin ilmastopimuksessa asetetut tavoitteet sekä energian saatavuus ja puhtaan ilman tavoitteet voitaisiin saavuttaa yhtä aikaa (IEA, 2020). Skenaarion oletukset kansanterveydestä ja talouden kehityksestä ovat samat kuin IEA:n Stated Policies skenaariossa, jossa oletetaan eteneminen kansallisesti julkaistujen politiikkatoimien ja tavoitteiden mukaisesti.

IEA:n Sustainable Development skenaariossa maailmanlaajuinen vedynkäyttö nelinkertais-
tuisi nykyisestä vuoteen 2050 mennessä (ks. kuva 3 alla).

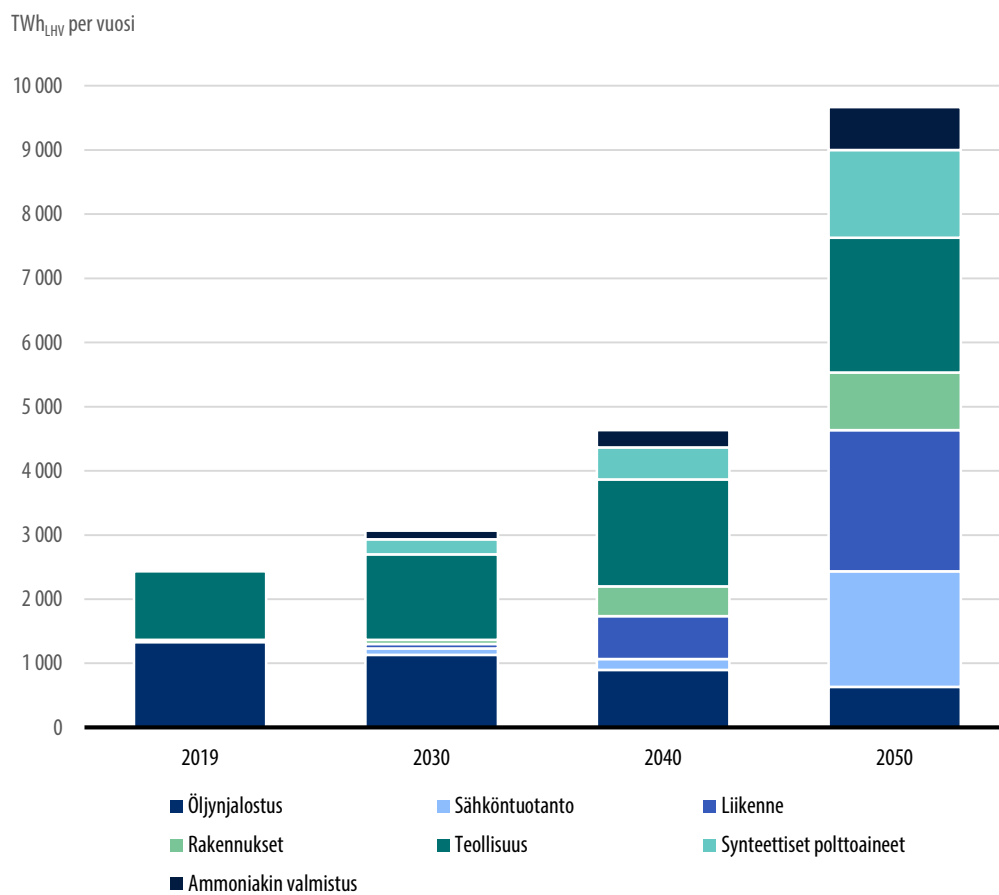
Kuva 3. IEA:n Sustainable Development -skenaario koko maailman vedynkäytölle ja Euroopan komission
alla toimivan FCH JU:n vetytiekartan mukaiset luvut EU-alueelle (IEA, 2020; FCH JU, 2019)



IEA:n Sustainable Development skenaario edellyttää merkittäviä uusia politiikkatoimia ja investointeja puhtaaseen energiaan. Tässä skenaariossa muutosten nykyisessä fossiilisiin perustuvassa infrastruktuurissa olisi oltava nopeita. Nykyisen hiilivoimakapasiteetin tulisi olla konvergoitu muille polttoaineille tai poistettu käytöstä jo vuoteen 2030 mennessä. Investoinnit etenkin aurinkovoimaan ja ydinvoimaan olisivat Sustainable Development skenaariossa suuremmat kuin muissa. Investointeja tarvittaisiin laajasti myös sähköverkkojen vahvistamiseen sekä sähköjärjestelmien joustavuuteen.

IEA:n Sustainable Development skenaariossa CCS olisi välttämätön osa energiajärjestelmää. Puolet vedystä perustuisi maakaasuun, jossa hiilidioksidi otetaan talteen, ja loput hiilineutraaliin vetyyn ja pieni osuus sivutuotevetyyn. Vedynkäyttö öljynjalostuksessa vähenisi ja muussa teollisuudessa kasvaisi. Vetyä alettaisiin käyttää pitkällä aikavälillä liikenteessä sekä suoraan että synteettisinä polttoaineina. Vuoteen 2050 mennessä vedyllä olisi rooli myös rakennusten lämmityksessä ja sähköntuotannossa (ks. kuva 4 alla).

Kuva 4. Vedyn käyttö sektoreittain IEA:n Sustainable Development -skenaariossa (IEA; 2021a)



IEA:n Net Zero by 2050 -skenaario vuodelta 2021

IEA:n Net Zero by 2050 -skenaariossa lähtökohtana on saavuttaa hiilidioksidineutraalisuus vuoteen 2050 mennessä ja Pariisin ilmastopimuksen tavoitteet (IEA, 2021b). Net Zero by 2050 -skenaariossa korostuu uusiutuvan energian tuotantokapasiteetin rakentamisen kiireellisyys. Suora sähkönkulutus kasvaisi merkittävästi kaikilla loppukäyttösektoreilla, vaikka energian kokonaiskulutus vähenisi väestönkasvusta ja talouskasvusta huolimatta.

Vedyllä nähdään olevan tärkeä rooli fossiilisten polttoaineiden hiilidioksidin talteenoton rinnalla hiilineutraalisuuden saavuttamiseksi teollisuudessa. Maantieliikenteen nähdään pääasiassa sähköistyvän ja osin siirtyvän polttokennoihin tai sähköpolttoaineisiin pitkän kuljetusmatkan rekoissa. Polttomoottorit kielletäisiin uusissa henkilöautoissa vuoteen 2035 mennessä. Matalapäästöisiä polttoaineita tarvittaisiin edelleen kuitenkin niissä liikenteen sovelluksissa, joita ei voi tai kannata sähköistää. Lämmityksessä fossiilisiin polttoaineisiin perustuvat kattilat kielletäisiin vuoteen 2025 mennessä. Rakennusten lämmitys perustuisi pääasiassa suoraan sähkölämmitykseen tai kiinteistökohtaiseen lämpöpumpun, aurinkoenergian tai bioenergian käyttöön. Vähähiilisen kaukolämmön ja vedyn yhteenlaskettu osuus jäisi alle 7 %:iin lämmityksestä.

IEA:n Net Zero by 2050 -skenaariossa vetyyn liittyvien teknologioiden pilotti- ja demonstraatiovaiheesta tulisi päästä kaupallisen mittakaavan soveltamiseen lähivuosien aikana. Tämän lisäksi nähdään tarve vedyn siirto- ja jakeluinfrastruktuurien kehittämiseksi. Kansainvälisesti vedyn siirto- ja jakeluinfrastruktuurien investointitarpeeksi arvioidaan 34 mrd. EUR jo vuoteen 2030 mennessä.

IEA korostaa Net Zero by 2050 -skenaariion yhteydessä, että hiilineutraalisuustavoitteesta jäätäisiin jälkeen, vaikka eri valtioiden tähän mennessä asettamat kansalliset hiilineutraalisuustavoitteet toteutuisivat. Net Zero by 2050 edellyttäisi siten merkittävien uusien lisätavoitteiden asettamista. IEA myös huomauttaa, että nykyiset kansalliset hiilineutraalisuustavoitteet edellyttäisivät valtioilta huomattavasti tiukempia poliittisia ohjaustoimenpiteitä kuin on toimeenpantu tähän mennessä.

2.3.3 Muita globaaleja energiaskenaarioita

International Renewable Energy Agency (IRENA) on maailmanlaajuinen hallitustenvälinen järjestö, joka keskittyy kansainvälisen yhteistyön kautta uusiutuvan energian edistämiseen. IRENA on päivittänyt alun perin IEA:n kanssa yhteistyössä vuonna 2017 julkaistuja globaaleja energiaskenaarioitaan viimeksi vuonna 2019 (IRENA, 2019). Raportissa esitellään kaksi skenaariota, joista ensimmäinen perustuu nykyisiin ja suunniteltuihin politiikka-toimiin ja toinen vähähiilisten teknologioiden käyttöönottoon ja Pariisin ilmastopimuksen tavoitteisiin (REmap Case). Jälkimmäisessä sähkön katsotaan muodostuvan keskeiseksi

energiantantajaksi vastaten 50 % loppuenergiankäytöstä vuonna 2050. Tämä tarkoittaisi, että sähkönkulutus yli kaksinkertaistuisi nykyisestä. Bioenergian roolia korostetaan meri- ja lentoliikenteessä ja teollisuudessa niillä alueilla, joita on vaikea sähköistää suoraan. Uusiutuvaan sähköön perustuva vety mainitaan ratkaisuna vähentää teollisuuden hiilidioksidipäästöjä bioenergian ja jätteiden hyötykäytön lisäksi. Liikenteessä vetyä käytettäisiin polttokennokäyttöisissä raskaan liikenteen ajoneuvoissa. Rakennuksissa vetyä käytettäisiin sekoitettuna maakaasuun. Sähkönkulutuksen lisäyksestä 8 % johtuisi vedyntuotannosta.

Joint Research Centre (JRC) on Euroopan komission alla toimiva tutkimusorganisaatio, jonka tilauksesta julkaistaan tieteellisen asiantuntijaryhmän laatima ja vuosittain päivitetävä Global Energy and Climate Outlook (GECO) (Keramidas *et al.*, 2021). Vuoden 2021 julkaisu sisältää New Normal skenaarion, jossa huomioidaan Covid-19-vaikutukset nykypoliittikkaa toteuttavaan Baseline-skenaarion pohjalta. Tämän lisäksi vuoden 2021 GECO:ssa on päivitetty kahta Pariisin ilmastopimuksen tavoitteisiin 2°C ja 1,5°C tähtäävää skenaariota. Näissä skenaarioissa on muodostettu hiilelle globaali asteittain kiristyvä hinta vuodesta 2021 alkaen, joka toimii energiamurroksen suurimpana ajurina. Kiinnostavinta GECO:ssa ovat liikenteen käyttövoimille ja polttoaineille esitetyt skenaariotulokset, koska niissä on huomioitu sähköpolttoaineiden osuudet lento- ja meriliikenteessä. Vuonna 2030 vetyä ja sähköpolttoaineita ei liikennesektorilla vielä näy, mutta vuonna 2050 31 % maantiliikenteessä jäljellä olevista nestemäisistä polttoaineista olisi sähköpolttoaineita 1,5°C-skenaariossa. Toisaalta polttomoottoriteknologian osuuden oletetaan vähenevän merkittävästi sekä kevyessä että raskaassa maaliikenteessä, joissa käyttövoimana olisi suurelta osin sähkö. Polttokennojen (maakaasu tai vety polttoaineena) osuudet olisivat 4 % kevyessä liikenteessä ja 11 % raskaassa liikenteessä. Synteettiset polttoaineet ilmestyisivät voimakkaimmin lentoliikenteeseen. Meriliikenteessä synteettisten polttoaineiden osuus pysyisi lentoliikennettä vähäisempänä, koska meriliikenteessä pystyttäisiin hyödyntämään vetyä myös suoraan.

Hydrogen Council on maailmanlaajuinen vetyalan yritysten perustama edunvalvontajärjestö, jonka tavoitteena on edistää investointeja vetyratkaisuihin. Hydrogen Councilin vuonna 2021 esittämässä yhdistelmäskenaariossa vedyntuotanto perustuisi kokonaan vihreään ja siniseen vetyyn vuoteen 2040 mennessä (Hydrogen Council, 2021a). Vedyn globaali kokonaistuotanto olisi 3 330 TWh_{LHV} vuonna 2030 ja 18 330 TWh_{LHV} vuonna 2050. Vuoden 2030 vedyntuotanto on linjassa IEA:n Sustainable Development -skenaarion kanssa, mutta vuoden 2050 tuotanto on jo IEA:n vastaavaan lukuun nähden 1,9-kertainen. Hydrogen Councilin yhdistelmäskenaarion toteutumista ei tästä syystä voi pitää kovin todennäköisenä.

British Petroleum (BP) on tarkastellut kolmea globaalia vuoteen 2050 ulottuvaa energiaskenaariota Energy Outlookissaan vuonna 2020. BP:n Rapid- ja Net Zero-skenaarioissa vedyllä korvataan fossiilisia polttoaineita ja raaka-aineita käyttötarkoituksissa,

joissa energiankäyttöä olisi vaikea sähköistää. Vedyntuotanto perustuu pääosin vihreään ja siniseen vetyyn. Rapid-skenaariossa vedyn osuus on 7 % ja Net Zero-skenaariossa 16 % energian loppukulutuksesta, jos energian loppukulutuksesta jätetään ulkopuolelle polttoon perustumaton vedyn loppukäyttö. Vety nähdään potentiaalisesti energianlähteeksi varsinkin teollisuudessa. Maaliikenteessä vetyä käytettäisiin erityisesti pitkänmatkan rekoissa, jossa Rapid-skenaariossa vedyn osuus on 7 % ja Net Zerossa 10 % vuoteen 2050 mennessä.

Shell esittää maailmanlaajuisia omilla malleillaan laadittuja energiaskenaarioita säännöllisesti. Sky-skenaariossa vuodelta 2018 vety nähdään energiankantajaksi teollisuudessa ja liikenteessä vuodesta 2040 alkaen. Tämän jälkeen vetytalouden kasvu oletetaan merkittäväksi kattaen 10 % globaalista energiankäytöstä vuoteen 2070 mennessä.

Exxon Mobil on julkaissut omassa Energy Outlookissaan vuonna 2019 omat skenaariot liikennesektorin energiankäytöstä vuoteen 2040 mennessä. Maaliikenteessä kuorma-auto- ja pakettiautokoluokassa vedyllä nähdään pieni rooli vuoteen 2040 mennessä. Raskaassa liikenteessä vedyn rooli olisi suurempi. Tämän lisäksi raportissa viitataan vedyn merkitykseen teollisuuden fossiilisten polttoaineiden ja raaka-aineiden käytön korvaamisessa.

World Energy Council (WEC) on riippumaton kansainvälinen energia-alan asiantuntijoiden ja ajatushautomoiden yhteistyöjärjestö, jonka tavoitteena on edistää energia-alan murroksia. WEC:n kolmessa kvalitatiivisessa energiaskenaariossa vuodelta 2019 esitetään arvioita vetytalouden kehittymisestä osana maailmanlaajuisia päästövähennysskenaarioita. Vety nähdään ensisijaisesti raskaan liikenteen, lämmityksen ja sähköntuotannon polttoaineena. Vedyntuotannon voimakas painotus lämmitykseen ja sähköntuotantoon voidaan nähdä hyvin poikkeavana valintana verrattuna muihin julkisuudessa esitettyihin skenaarioihin. Erikoisuutena on, ettei teollisuuden vedyn raaka-ainekäyttöä ole huomioitu.

Teske (toim.) on julkaissut maailmanlaajuisia energiaskenaarioita vuonna 2019, jotka vastaavat Pariisin ilmastopöytäkirjan mukaisiin 1,5°C ja 2°C tavoitteisiin. Vetyä käytettäisiin liikenteessä sekä suoraan polttokennoissa että välillisesti synteettisinä polttoaineina. Maakaasu korvattaisiin vedyllä lämmityksessä kaikilla loppukäyttösektoreilla. Sähköllä tuotetusta vedystä käytettäisiin pieni osuus myös sähköntuotantoon. Skenaarioissa ei nähdä järkeväksi rakentaa erillistä vetyinfrastruktuuria, koska vedyllä korvattaisiin täysin olemassa oleva maakaasun lämmityskäyttö. Raportissa on käsitelty maakaasusektorin tulevaisuutta toteamalla, että maakaasu korvautuu vedyllä ja biometaanilla. Raportista ei löydy suoraa selitystä siihen, miten teollisuuden maakaasun raaka-ainekäyttö korvattaisiin vedyllä, mikä herättää kysymyksiä siitä, onko raportissa pohdittu teollisuuden kaasun loppukäyttötarpeita riittävän laajasti.

2.3.4 Johtopäätökset maailmanlaajuisista energiaskenaarioista

Maailmanlaajuisissa ilmasto- ja energiaskenaarioissa vedyllä on ilmastomuutoksen hillinnässä kokonaisuuden kannalta pieni rooli. Tärkeimmät ohjauskeinot ovat energiankäytön tehostaminen, hiilineutraali energiantuotanto, energian loppukäytön sähköistäminen, hiilidioksidin talteenotto ja hiilinielujen hyödyntäminen. Tästä johtuen puhdas ja vähähiilinen vety näkyvät maailmanlaajuisissa energiaskenaarioissa vasta pitkällä aikavälillä.

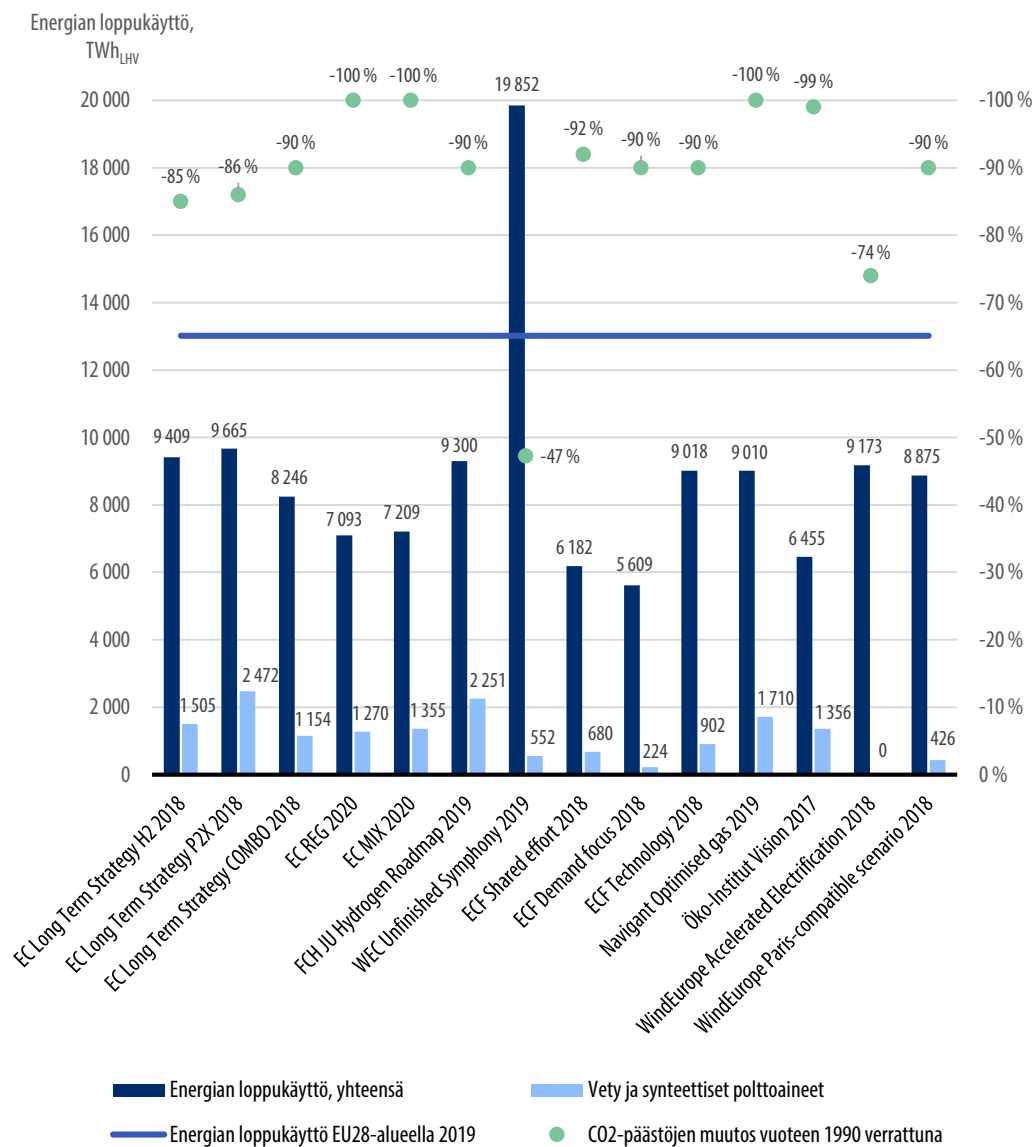
Yhteenvedona edellä esitellyistä maailmanlaajuisista energiaskenaarioista voidaan todeta, että IEA:n, JRC:n ja IRENAn skenaariot on laadittu noudattaen IPCC-raportin linjauksia. Hydrogen Council esittää vedyn suhteen korkeimmat tavoitteet, kun taas öljy-yhtiöiden skenaariot ovat vedyn suhteen varovaisempia kuin muut skenaariot. WEC:n ja Tesken (toim.) skenaarioissa puhtaan vedyn käyttöä teollisuudessa fossiilisten polttoaineiden korvaajana ei ole todennäköisesti pohdittu kovin laajasti.

2.3.5 Euroopan energiaskenaariot

Euroopan energiaskenaariot on usein esitetty suhteessa Pariisin ilmastopimuksen tavoitteisiin alle 2°C tai 1,5°C. Ensimmäinen vaatii kasvihuonekaasupäästöjen alentamista 90 %:lla vuoden 1990 tasosta ja jälkimmäinen päästöjen nettonollatavoitetta vuoteen 2050 mennessä.

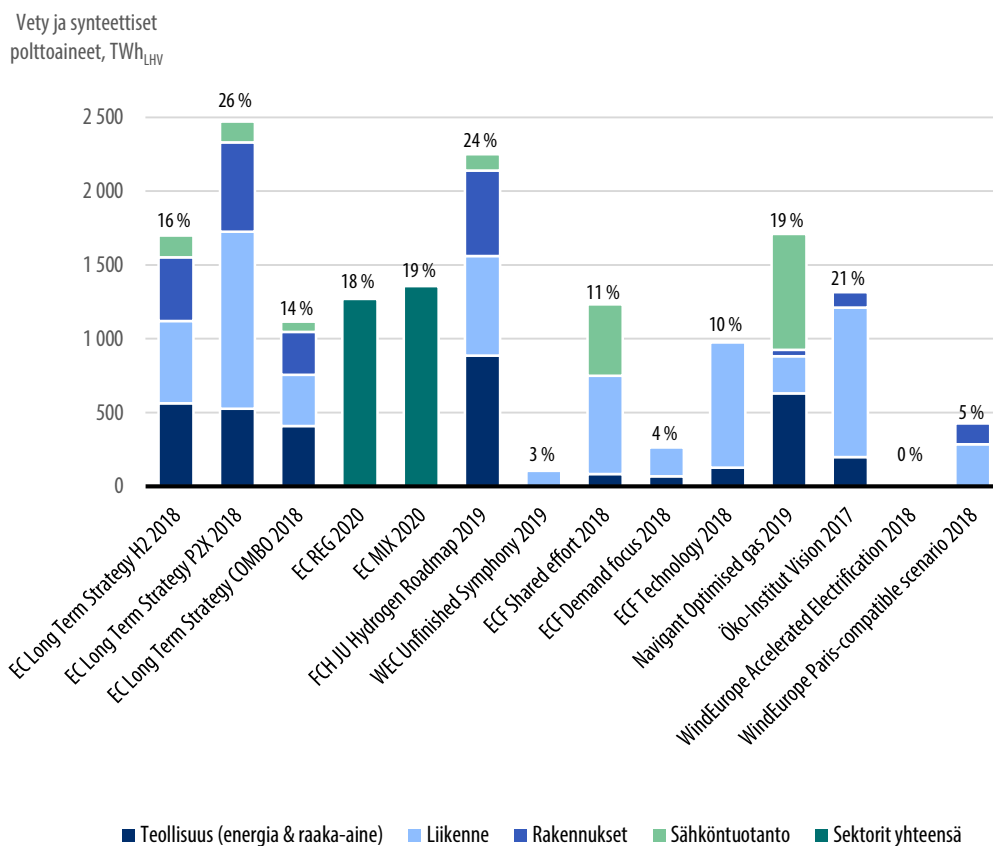
Energian loppukäytön on useimmissa skenaarioissa ajateltu vähenevän noin neljänneksellä nykyisestä 13 000 TWh_{LHV} tasolle 9 000 TWh_{LHV} vuoteen 2050 mennessä (Eurostat, 2019). EU-komission tuoreimmat skenaariot (REG ja MIX) pudottavat energian loppukäytön tasolle 7 000 TWh_{LHV} koska Iso-Britannia ei ole enää mukana skenaarioissa. Ainoastaan WEC:n skenaariossa energian loppukäyttö kasvaisi (ks. kuva 5). Alla viitatut skenaariot esitellään tarkemmin yhteenvedon jälkeen.

Kuva 5. Energian loppukäyttö, vedyn ja synteettisten polttoaineiden osuudet loppukäytöstä ja saavutettavat kasvihuonekaasupäästöjen vähenemät Euroopan energiaskenaarioissa vuoteen 2050 mennessä. Vedyn raaka-ainekäyttö sisältyy energian loppukäyttöön useimmissa skenaarioissa. WEC:n skenaariossa ovat mukana EU28, Norja, Liechtenstein ja Islanti. REG- ja MIX-skenaarioissa alueena on EU27 ja muissa skenaarioissa EU28.



Vedyn ja synteettisten polttoaineiden määrät vaihtelevat skenaarioissa nolasta enintään 26 %:iin energian loppukäytöstä. Samoin vedyn loppukäyttö eri sektorien kesken vaihtelee suuresti (ks. kuva 6 alla).

Kuva 6. Vedyn ja synteettisten polttoaineiden loppukäyttö sektoreittain Euroopan energiaskenaarioissa vuoteen 2050 mennessä



Vedyn ja synteettisten polttoaineiden osuudet eri sektoreilla vaihtelevat skenaarioissa pääasiassa seuraavista oletuksista johtuen:

- Teollisuuden nykyisen fossiilisiin energianlähteisiin perustuvan vedynkäytön korvaamisesta puhtaalla tai vähähiilisellä vedyllä ei huomioida kaikissa skenaarioissa.
- Tietyissä skenaarioissa vetyä käytettäisiin huomattavia määriä rakennusten lämmitykseen. Tätä perustellaan vedyn syöttämisellä maakaasun sekaan maakaasuverkkoihin liittyneille lämmityskäyttäjille ja siirtymisellä 100 %

vetyverkkoihin myöhemmin. Osassa skenaarioista oletuksena on siirtyminen maakaasusta suoraan muihin vaihtoehtoisiiin energioihin.

- Painotus vedyn käytölle sähkön varastointiin ja sähköjärjestelmän tasapainottamiseen vaihtelee. Korkean sähköntuotannon skenaarioissa oletetaan, että vety voisi toimia jopa vuodenaikavarastona, vaikka prosessin kokonaishyöty-suhde on matala (luokkaa 40 %).
- Liikenteen osalta kaikissa skenaarioissa oletetaan, että henkilöautot sähköistyvät. Vetyä saatetaan käyttää pieniä määriä polttokennoautoissa tämän rinnalla. Vetyä käytettäisiin lähinnä raskaassa pitkän matkan maantiiliikenteessä ja meriliikenteessä. Meri- ja lentoliikenteessä hyödynnettäisiin lisäksi vedystä valmistettuja synteettisiä polttoaineita.

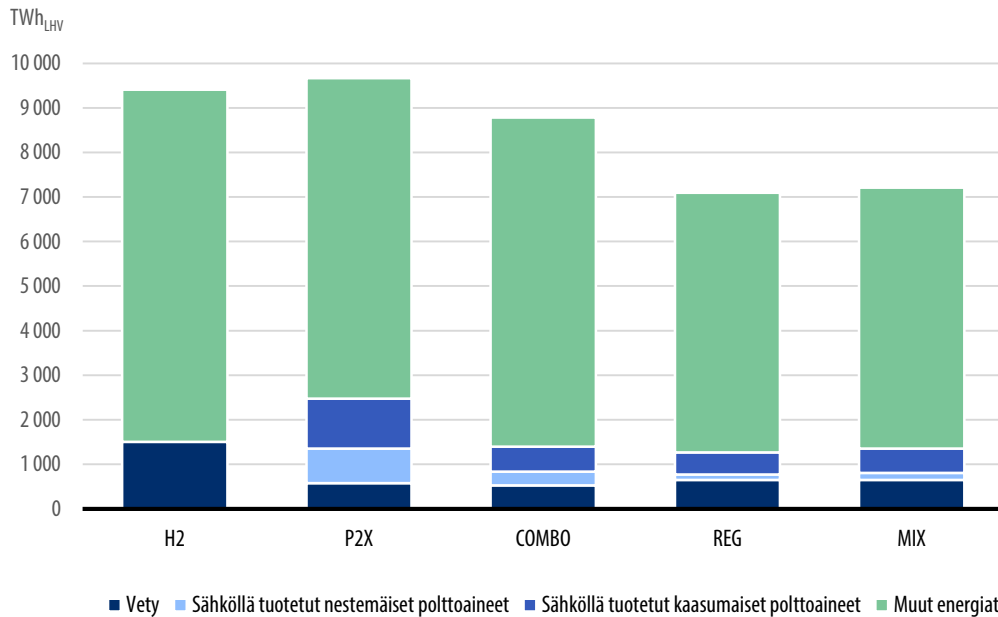
Alla esitellään tarkemmin edellä esitetystä yhteenvedossa viitatu skenaariot.

Euroopan komissio on esittänyt vähähiilisyys- ja energiamurrostiekarttoja EU-alueelle loppukäyttösektoreittain taustaraporteissa vuosilta 2018 ja 2020, jotka tukevat komission Euroopan parlamentille antamaa tiedonantoa "A Clean Planet for all" (EC, 2018a, EC, 2020a). Näistä vanhemmassa raportissa esitetään EU28-alueelle neljä erilaista alle 2°C tavoiteskenaariota, joissa varioidaan, millä energiankantajilla ja/tai menetelmillä fossiiliset polttoaineet ja raaka-aineet korvattaisiin: sähkö, vety, sähköpolttoaineet, energiatehokkuus ja/vai kiertotalous (ks. kuva 7 alla). Näistä kahdessa painotetaan erityisesti vetyä (H2- ja P2X-skenaariot). Lisäksi esitetään yksi yhdistelmä edellä esitetystä kolmesta skenaariosta (COMBO). Toisessa kategoriassa esitetään erilaisia 1,5°C tavoiteskenaarioita, joissa otetaan mukaan hiilinielut jäljellä olevien päästöjen netottamiseksi. Jälkimmäistä kategoriasta edustavia politiikkaskenaarioita julkaistiin lisää EU27-alueelle myöhemmässä raportissa syksyllä 2020, kun EU-komissio arvioi kustannustehokkaimpia politiikkatoimia saavuttaa aiempaa kunnianhimoisempi EU:n päästövähennystavoite 55 % vuoden 1990 tasosta vuoteen 2030 mennessä (EC, 2020a). Tässä yhteydessä tarkastelluista skenaarioista kaksi keskeisintä ovat:

- REG, joka nojaa energia- ja liikennesektorien erittäin tiukkoihin kohdennettuihin ohjaustoimiin ilman, että EU:n päästökauppaa laajennetaan uusille sektoreille.
- MIX, jossa hiilen hintasignaalia laajennetaan tieliikenteeseen ja rakennuksiin. Tämän lisäksi tiukennetaan energia- ja liikennesektorien ohjaustoimia.

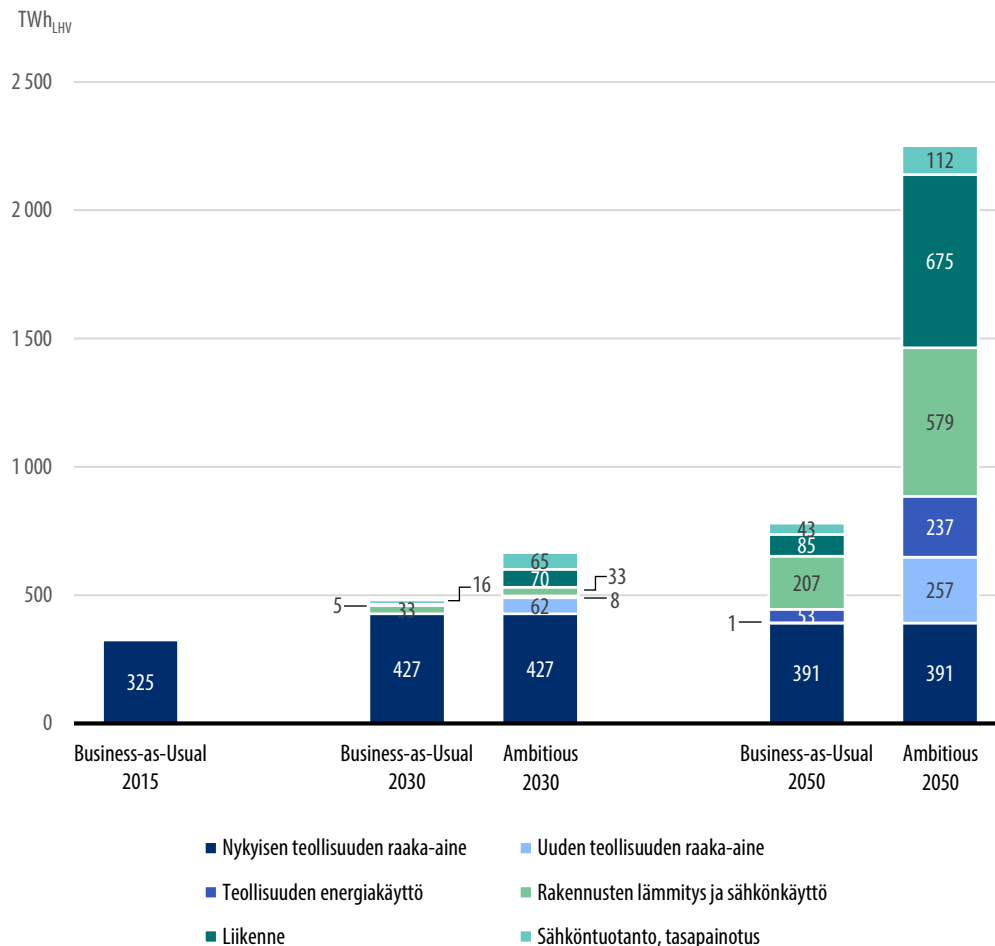
Molemmat edellä mainitut skenaariot sisältävät EU:n päästökaupan laajentamisen EU:n sisäiseen meriliikenteeseen. MIX-skenaario sisältää myös 2030 jälkeen laajentamisen koskemaan puolta EU:sta lähtevää tai EU:hun muualta palaavaa meriliikennettä.

Kuva 7. Energiantantajien osuudet energian loppukäytöstä vuoteen 2050 mennessä valikoiduissa kolmessa Euroopan komission energiaskenaariossa vuosilta 2018 ja 2020. H2, P2X ja COMBO on tehty EU28-alueelle ja REG ja MIX EU27-alueelle.



Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) oli EU:n alla toimiva määräaikainen yhteistyöjärjestö, jonka tehtävänä oli edistää polttonkennoihin ja vetyyn liittyvää tutkimusta, teknologioiden kehittämistä ja demonstraatioprojekteja². FCH JU:n jäseninä toimivat Euroopan komissio, Hydrogen Europe ja Hydrogen Europe Research. FCH JU julkaisi Euroopan laajuisen vetytiekartan vuonna 2018. Tiekartta perustuu Hydrogen Councilin, Hydrogen European sekä 17 muun vetyteknologian alueella aktiivisen yrityksen näkemyksiin. Vetytiekartta edustaa siten lähinnä vetyalan toimijoiden visiota. Kunnianhimoisessa skenaariossa huomio kiinnittyy suuriin vedynkulutuksen osuuksiin sektoreilla, joissa suora sähköistäminen olisi teknisesti mahdollista (ks. kuva 8 alla).

² FCH JU:n toimintakausi päättyi vuoden 2021 lopulla ja komissio on perustanut Clean Hydrogen Joint Undertakingin (lyhyemmin Clean Hydrogen Partnership) jatkamaan sen työtä.

Kuva 8. Vedyn käyttö eri loppukäyttösektoreilla FCH JU:n Euroopan vetytiekartan skenaarioissa


World Energy Council on esittänyt erikseen globaaleista energiaskenaarioistaan johdetut kvantitatiiviset Euroopan energiaskenaarioita vuonna 2019. Näistä Modern Jazz kuvaa markkinaehtoista, innovatiivista ja digitalisaation muokkaamaa maailmaa, joka etenee nopeasti, mutta taloudellisen kehityksen osalta epätasaisesti. Unfinished Symphony kuvaa poliittikkatoimin vahvasti ohjattua maailmaa, joka perustuu pitkäjänteiseen suunnitteluun ja yhtenäiseen maailmanlaajuiseen toimintaan, jonka tavoitteena on toisiinsa kytkeytyneiden haasteiden ratkaiseminen vähähiilisen tulevaisuuden mahdollistamiseksi. Hard Rock kuvaa pirstaloitunutta maailmaa, joka perustuu sisäänpäin katsoviin poliittisiin toimenpiteisiin, matalaan kasvuun ja edellä esitettyjä skenaarioita vähäisempään kansainväliseen yhteistyöhön.

European Climate Foundation on kansainvälinen järjestö, joka pyrkii edistämään kasvihuonekaasupäästöjen nettonollatavoitetta. Järjestö on julkaissut vuonna 2018 yhteenvetoraportin kasvihuonekaasupäästöskenaarioistaan, jotka on mallinnettu ClimateWorks Foundationin ja European Climate Foundationin yhteistyönä kehittämällä mallilla. Tuloksissa todetaan, että energian loppukäyttösektoreilla tehtävät valinnat ratkaisevat hyvin pitkälle, kuinka päästötavoitteet toteutuvat. Raportissa alleviivataan maakohtaisten dekarbonisaatiosuunnitelmien tarvetta, koska tavoitteiden toteuttamiseksi on maasta riippuen erilaisia vaihtoehtoisia kehityspolkuja. Ilmastotavoitteista arvioidaan olevan saavutettavissa noin 75 % nykyisiä teknologioita hyödyntämällä ja toimintaa tehostamalla. Lopuille 25 %:lle tarvitaan uusien lähestymistapojen tai teknologioiden kaupallistamista ja skaalaimista teolliseen mittakaavaan.

Konsortio kaasusektorin yrityksiä julkaisi vuonna 2020 näkemyksensä Euroopan kaasualan vähähiilisyystiekartoista vuosille 2020–2050 (Guidehouse, 2020). Raportti pohjaa pääosin saman konsortion aiemmin julkaisemaan raporttiin (Navigant, 2019), jossa korostetaan kaasujen merkitystä Euroopan energijärjestelmien dekarbonisaatiossa. Esitettyssä Optimised Gas -skenaarioissa huomiota herättää laajamittainen vedyn ($786 \text{ TWh}_{\text{LHV}}$) ja biometaanin ($320 \text{ TWh}_{\text{LHV}}$) käyttö sähköntuotantoon vuonna 2050. Vastaavia määriä ei löydy muista skenaarioista. Esimerkiksi Euroopan vetytiekartan kunnianhimoisessa skenaariossa vedyn käyttö sähköntuotantoon olisi tästä vain murto-osan, $112 \text{ TWh}_{\text{LHV}}$. Navigantin raportin mukaan uusiutuviin energianlähteisiin perustuvan vedyn ja biometaanin käyttö sähköntuotantoon säästäisi merkittävästi kustannuksissa, koska näin vältettäisiin kalliit investoinnit kiinteillä biomassoilla tuotettavaan sähköön ja sähköakkuihin vuodenaikavarastoinnissa. Raportissa ei kerrota yksityiskohtaisista oletuksista tämän näkemyksen takana.

Öko-Institut on julkaissut Reference- ja Vision-skenaariot EU28-maille vuonna 2018 Euroopan parlamentin Greens/EFA-ryhmän rahoittamana. Reference-skenaario perustuu Euroopan komission perusskenaarioon vuodelta 2016 ja Vision-skenaario pitkän aikavälin 2°C tavoitteeseen. Päästövähennemät ovat Vision-skenaariossa 54 % vuoteen 2030 ja 93 % vuoteen 2050 mennessä. Uusiutuvan energian osuus on vastaavasti 35 % vuonna 2030 ja 97 % vuonna 2050. Ydinvoima olisi ajettu alas vuoteen 2045 mennessä. Biomassojen käyttö olisi rajattu tiukoin kestävyyskriteerein, ja CCS olisi käytettävissä ainoastaan teollisuuden hiilidioksidipäästöille. Vision-skenaarioissa ei oleteta muutoksia elintavoissa tai talouden rakenteissa. Vetyä käytettäisiin kaikilla sektoreilla. Sähköverkon tasapainottamiseen käytettävän vedyn määrälle ei ole esitetty arviota. Kaikki Euroopassa käytettävä vety tuotettaisiin Euroopan alueella.

WindEurope on tuulivoimantuottajien ja tuulivoimaan liittyvien teknologiayritysten edunvalvontajärjestö, joka on julkaissut kaksi Euroopan laajuista energiaskenaariota vuonna 2018. Ensimmäinen perustuu voimakkaaseen sähköistämiseen ja toinen Pariisin ilmastopimuksen tavoitteeseen alle 2°C . Sähköllä tuotetun vedyn käyttöönotto

teollisuudessa todetaan välttämättömäksi ilmastotavoitteen saavuttamiseksi. Pariisin ilmastopöytäkirjan täyttävässä skenaariossa vedyn kysyntä voisi nousta tasolle 426 TWh_{LHV} vuodessa, joka vastaisi 4,8 % energian loppukäytöstä vuonna 2050. Tällöin vetyä käytettäisiin eniten lämmitykseen (teollisuuden energia, palvelut ja kotitaloudet) ja liikennepolttoaineena, vaikka vedyn raaka-ainekäyttö teollisuudessa sisältyy skenaarioon. Rakennusten lämmityksessä vedyn osuus jäisi alle 3 %:iin vuoteen 2050 mennessä. Raskas liikenne käyttäisi osittain polttokennorekkoja, ja vedyn osuus nousisi 16 %:iin raskaan liikenteen energiankäytöstä. Pitkän matkan meriliikenteessä ja lentoliikenteessä käytettäisiin nestemäisiä biopolttoaineita ja edelleen 11 % fossiilisia polttoaineita vuoteen 2050 mennessä. Sähkön vuodenaikavarastointia ja lyhyen aikavälin säätämistä voitaisiin tehdä osin vedyllä.

Eurelectric on Euroopan sähköntuottajien ja -myyjien sekä jakeluverkkoyhtiöiden edunvalvontajärjestö. Eurelectric on julkaissut raportin vuonna 2018, jossa tarkastellaan neljää energiaskenaariota EU28- ja ETA-alueelle vuoteen 2050 erityisesti sähkön näkökulmasta. Raportissa korostetaan hiilineutraalin sähköntuotannon merkitystä, sähköistämisen energiatehokkuushyötyjä sekä mahdollisuutta tuottaa sähkön avulla vetyä ja vedystä synteettisiä polttoaineita ja raaka-aineita. Raportissa priorisoidaan liikenteen, teollisuuden ja rakennusten energiankulutuksen suoraa sähköistämistä. Tämän lisäksi arvioidaan, että vety ja PtX vaatisivat noin 600–1200 TWh lisäystä sähköntuotantoon. Lukuja vedyn tuotannolle ja loppukäytölle ei ole ilmoitettu.

2.4 Johtopäätökset vedyn roolista kansainvälisissä ilmasto- ja energiaskenaarioissa

IPCC:n ilmastoskenaarioissa lähtökohtana on, että puhtaasti tai vähähiilisesti tuotettua vetyä tarvitaan sellaisiin käyttötarkoituksiin, joita on vaikeaa tai mahdotonta sähköistää tai korvata muilla hiilineutraaleilla energianlähteillä suoraan. Tästä on seurannut jatkokysymyksiä vedyn mahdollisesta hyödyntämisestä muillakin alueilla, joihin on haettu vastauksia energiaskenaarioiden avulla.

Maailmanlaajuisten energiaskenaarioiden tuloksena vetykeskustelu on levinnyt alkupe-
räisestä viitekehiksestään lämmitykseen, sähköntuotantoon sekä liikennesektorilla kaikkiin segmentteihin. Mitä suuremmaksi vedyn loppukäyttö mitoitetaan, sitä suuremmaksi riski kasvaa, että vedyllä korvattaisiin myös sellaista energian loppukäyttöä, johon löytyisi kustannus-höytynäkökulmasta parempiakin ratkaisuja. Esimerkiksi Euroopan komission P2X-skenaariosta todetaan, että se olisi kustannuksiltaan kallein ko. tiedonannon yhteydessä tutkituista skenaarioista (EC, 2018a). Vedyn käyttö tulisi toisin sanoen rajata vain niihin ratkaisuihin, joissa sen käyttö on yhteiskunnallisesta kustannus-höytynäkökulmasta perusteltua.

Tässä raportissa tarkastelluista Euroopan energiaskenaarioista voidaan todeta seuraavaa:

- Euroopan komission ja sen alla toimivan FCH JU:n skenaarioissa vedyn ja sähköpolttoaineiden käyttö jakautuu tasaisesti eri loppukäyttösektorien kesken, josta syystä rakennusten lämmityskäyttö korostuu näissä skenaarioissa enemmän kuin muissa. Euroopan komission skenaarioissa on toisaalta tarkoituksella testattu keskenään erilaisia lähestymistapoja ja niiden yhdistelmiä, joista valittiin tässä esiteltäväksi vain kaksi vetypainotteista ja yksi yhdistelmä.
- FCH JU:n skenaariota ovat olleet laatimassa Euroopan vetyalan yritykset. Vedynkäyttö on tässä skenaariossa odotetusti kaikkein korkeinta.
- ECF korostaa energiankäytön tehostamista kaikilla loppukäyttösektoreilla, eikä tue vedyn käyttöä rakennusten lämmitykseen. Vety ja synteettiset polttoaineet nähdään ennen kaikkea liikenteen ratkaisuna.
- Öko-Institut (rahoittajana Euroopan parlamentin Greens/EFA-ryhmä) näkee mahdollisuksialaajamittaiseen vedyn ja synteettisten polttoaineiden käyttöön meri- ja lentoliikenteessä. Muilla sektoreilla korostuvat muut toimenpiteet.
- Kaasusektorin toimijat, joissa on edustettuina monta maakaasusiirtoverkonhaltijaa, painottavat vedyn käyttämistä sähköntuotantoon ja teollisuuteen. Vedyn määrä nousee skenaariossa lähes Euroopan komission ja FCH JU:n vetypainotteisimpien skenaarioiden tasolle, mikä tukisi vetyinfrastruktuurin rakentamisen tavoitetta.
- WEC:n skenaario poikkeaa eniten muista skenaarioista: energiankäyttö kasvaa ja vedyllä olisi vain pieni rooli. Annetuilla luvuilla ei saavutettaisi Pariisin sopimuksen tavoitteita. Skenaariolla on siten vähän annettavaa ilmasto- ja energiapoliittiseen keskusteluun.
- WindEurope ja Eurelectric keskittyvät puhtaasti sähköntuotannon ja sähköistämisen edistämiseen. Vedyn rooli jää vähälle huomiolle.

Edellä esitetyistä syistä ilmasto- ja energiapoliittiset ohjauskeinot tulisi suunnitella kokonaisuutena toimien yhteisvaikutusta tarkasti arvioiden. Erilaisten intressiryhmien tuottamissa skenaarioissa painottuvat intressiryhmien ajamat omat tavoitteet.

3 Vety EU:n ilmasto- ja energiapoliittisissa tavoitteissa

Yhteenveto

EU:n vihreän kehityksen ohjelman tavoitteiden saavuttaminen edellyttää muiden toimenpiteiden lisäksi siirtymää puhtaan ja vähähiilisen vedyn tuotantoon ja käyttöön. EU-komission vuonna 2020 antamissa sektori-integraatiostrategiassa ja vetystrategiassa määritellään tälle siirtymälle tavoitteet ja tiekartta.

EU-komission Fitfor55 -paketti heinäkuussa 2021 sekä kaasujen dekarbonisaatiota koskeva paketti joulukuussa 2021 sisältävät runsaasti vetysiirtymää koskevia lainsäädäntöehdotuksia. Tämän lisäksi EU:ssa on hyväksytty keväällä 2021 kestäviä investointeja koskeva taksonomia ja siihen liittyvä delegoitu asetus, joka määrittelee kestävästä vedyntuotantosta koskevia teknisiä vaatimuksia.

Osana Fit-for-55-pakettia vedylle on tulossa alkuperätakuujärjestelmä, joka edistää puhtaalla ja vähähiilisellä vedyllä tapahtuvaa kaupankäyntiä. Tämän lisäksi delegoiduilla asetuksilla määritellään, miten mm. uusiutuvalla sähköllä tuotetun vedyn on oltava tuotettu. Kaasujen dekarbonisaatiopaketti luo edellytykset vetymarkkinan syntymiselle asettamalla viitekehysten markkinasääntelylle ja siirtoinfrastruktuurin kehittämiseksi. Dekarbonisaatiopakettissa määritellään lisäksi sitovat ehdot liikenteen jakeluvelvoitteille ja sähkö-, kaasu- ja vetyinfrastruktuurien rinnakkaista kehittämistä koskeville velvoitteille.

Komission vetystrategia kytkeytyy myös EU:n rahoitusinstrumentteihin ja EU:n sallimiin valtiontukimekanismeihin, joista kanavoidaan rahoitusta vetytalouden edistämiseen.

Jäsenvaltiot osallistuvat tällä hetkellä laajasti EU-tasoisien lainsäädännön valmisteluun ja määrittelevät kansallisia tavoitteitaan ja toimenpideohjelmiaan. Vetyprojekteja on kehitteillä tuhansittain. Investointipäätöksiä on tehty toistaiseksi vähän tarjolla olevan niukan suoran julkisen rahoituksen ja keskeneräisen lainsäädännön vuoksi.

3.1 EU:n vihreän kehityksen ohjelma

EU:n vihreän kehityksen ohjelmassa on asetettu tavoitteeksi ilmastoneutraalisuus vuoteen 2050 mennessä (EC, 2019a). Tämän tavoitteen saavuttamisessa vedyllä on tärkeä rooli. Vedyn käytön lisäämistä pidetään yhtenä keskeisistä keinoista, joiden avulla hiilidioksidipäästöjä voidaan jatkossa vähentää. Uusiutuvalla sähköllä on rajoituksensa ja erityisesti sähkön varastointi on haasteellista. Hiilidioksidipäästöjen vähentäminen raskaassa liikenteessä ja energiaintensiivisessä teollisuudessa voi olla vaikeaa toteuttaa muilla keinoin. Uusiutuva sähköntuotanto ja puhdas vety tarjoavat synergiaetuja, ja molempia tarvitaan integroidussa ja joustavassa vähähiilisessä energiajärjestelmässä (EC, 2020b).

Vetyyn liittyviä tavoitteita, suunnitelmia ja mahdollista sääntelyä kuvataan Euroopan komission Fit-for-55-lainsäädäntöehdotusten paketissa (EC, 2021a) sekä vetystrategiassa (EC, 2020b) ja sektori-integraatiostrategiassa (EC, 2020c).

3.1.1 EU:n Fit-for-55-paketti

Fit-for-55-paketti julkaistiin 14.7.2021. Paketin tarkoituksena on varmistaa, että EU saavuttaa asettamansa 55 % kasvihuonekaasupäästöjen vähennystavoitteen vuoden 1990 tasosta vuoteen 2030 mennessä. Fit-for-55 paketissa ehdotetuilla regulaatio- ja ohjausmekanismimuutoksilla olisi pitkän aikavälin vaikutuksia lähes kaikkiin sektoreihin. EU-komission esittämiä lainsäädäntöehdotuksia käsitellään parhaillaan Euroopan parlamentissa ja Eurooppa-neuvostossa. Käsittelyn odotetaan kestävän kahdesta kolmeen vuotta ennen kuin kaikki osat on käsitelty ja hyväksytyt sisällöt astuvat voimaan.

Fit-for-55-paketti laajentaa päästökauppaa uusille sektoreille ja tiukentaa EU:n nykyistä päästökauppajärjestelmää. Paketti sisältää lisäksi kunnianhimoisemmat tavoitteet uusiutuvalla energialla ja energiatehokkuudelle etenkin julkisella sektorilla, nopean käyttöönoton vähäpäästöisille liikennemuodoille ja niitä tukevalle infrastruktuurille ja polttoaineille, veropolitiikan mukauttamisen Euroopan vihreän kehityksen tavoitteisiin sekä toimenpiteet hiilivuodon estämiseksi. Paketti sisältää myös toimenpiteitä hiilinielujen säilyttämiseksi ja kasvattamiseksi.

Vedyn osalta Fit-for-55-paketti sisältää laaja-alaisesti muutoksia, jotka vaikuttavat vedyn käytön tulevaisuuteen useilla eri sektoreilla. Seuraavaksi esitellään keskeisimpiä ehdotettuja muutoksia, joilla on suora tai välillinen vaikutus vedyn tuotantoon ja kysyntään.

3.1.1.1 EU:n päästökauppa

Nykyisen EU:n päästökauppajärjestelmän laajentaminen ja rinnakkaisen täydentävän järjestelmän perustaminen

Fit-for-55-paketissa ehdotetaan, että EU:n nykyinen päästökauppa laajenisi ja ilmaiset päästöoikeudet poistuisivat asteittain. Komissio on ehdottanut, että nykyistä EU:n päästökauppaa laajennettaisiin meri- ja tieliikenteeseen. Lentoliikenteen ilmaisista päästöoikeuksista luovuttaisiin, jolloin myös lentoliikenne asetettaisiin täysimääräisesti päästökaupan kustannusvaikutusten alaiseksi. Samanaikaisesti muiden teollisuudenalojen ilmaisista päästöoikeuksista luovuttaisiin asteittain ja hiilitullit otettaisiin käyttöön tietyille sektoreille (esim. lannoitetuotanto ja teräs). Hiilitullit estäisivät teollisen tuotannon siirtymistä Euroopasta maihin, joissa hiilidioksidipäästöjen kustannukset ovat alhaisemmat.

Päästökaupan laajentaminen auttaa vetysiirtymää, koska puhtaan ja vähähiilisen vedyn tuotantolaitokset voisivat päästökaupan sääntöjen mukaan saada ilmaisia päästöoikeuksia.

EU-komissio on nykyisen päästökauppajärjestelmän muutosten lisäksi ehdottanut uuden rinnakkaisen päästökauppajärjestelmän perustamista rakennuksille ja liikenteelle. Tämän piiriin otettaisiin rakennusten lämmityspolttoaineiden ja tieliikenteen polttoaineiden jakeelijat vuodesta 2026 alkaen, mikä osaltaan lisäisi kiinnostusta puhdasta ja vähähiilistä vetyä kohtaan.

3.1.1.2 Liikenteen jakeluvaihtoehdot ja jakeluinfrastruktuuri

Tieliikenne

Tieliikenteen osalta Fit-for-55-paketissa esitetään useita toimenpiteitä, joiden tavoitteena on rajoittaa tieliikenteen päästöjä ja täydentää päästökauppajärjestelmää. Uusien ajoneuvojen päästöjen tulisi olla 55 % alhaisemmat vuonna 2030 ja 100 % alhaisemmat vuonna 2035 verrattuna vuoden 2021 tasoon. Käytännössä rekisteröityjen ajoneuvojen tulee siis olla päästöttömiä vuoteen 2035 mennessä.

EU-komission ehdottama vaihtoehtoisten polttoaineiden infrastruktuurin käyttöönottoa koskeva asetus (Alternative Fuels Infrastructure Regulation, AFIR) edellyttää, että jäsenvaltiot rakentavat kattavan lataus- ja tankkausinfrastruktuurin tukemaan päästöttömälle autoilulle asetettuja tavoitteita (EC, 2021 d). Sähkölatauspisteitä tulisi olla 60 km välein ja vetytankkausasemia 150 km välein Euroopan laajuisen liikenneverkon TEN-T-suunnitelmissa määritellyillä pääväylillä. Lisäksi tankkausasemia tulisi olla keskeisissä liikennehubeissa.

Lento- ja meriliikenne

Lento- ja vesiliikenteen polttoaineet aiheuttavat merkittäviä päästöjä. Komission näkemyksen mukaan päästökauppajärjestelmä ei olisi yksin riittävä keino edistämään päästöjen vähenemistä näillä sektoreilla, mistä syystä EU-komissio on ehdottanut alla tarkemmin esitettyjä muutoksia.

ReFuelEU Aviation -aloitteessa (2021e) ehdotetaan kestävien polttoaineiden jakeluvaihtoehtoja (Sustainable Aviation Fuels, SAF) EU-jäsenmaiden lentokentillä. Velvoite sisältää nestemäisten biopolttoaineiden lisäksi myös synteettiset puhtaat ja vähähiiliset polttoaineet (mukaan lukien nk. sähköpolttoaineet). Sekoitevelvoite on 5 % vuonna 2030, josta 0,7 % tulisi olla ei-biologista alkuperää. Vuonna 2050 osuuden tulee olla 63%, josta 28 % tulisi olla ei-biologista alkuperää.

FuelEU Maritime -aloite (2021f) edistää kestävien polttoaineiden käyttöä meriliikenteessä sekä päästöttömän teknologian käyttöönottamista asettamalla maksimirajat EU:n satamissa vierailevien laivojen polttoaineiden CO₂-päästöille. Tämä tarkoittaa, että esimerkiksi biopolttoaineiden sekä puhtaan tai vähähiilisen vedyn käyttö tulisi lisääntymään EU:n laivaliikenteessä pidemmällä aikavälillä.

AFI-asetus (EC, 2021d) edellyttää, että satamissa ja lentoasemilla on oltava tarjolla vähäpäästöistä sähköä.

Uudet ei-biologisten uusiutuvien polttoaineiden jakeluvaihtoehdot lisäävät merkittävästi vedyn ja sähköpolttoaineiden kysyntää.

3.1.1.3 Uusiutuvan energian direktiivin päivitys

Fit-for-55 -paketin yhteydessä esiteltiin myös entistä kunnianhimoisempia tavoitteita sisältävä päivitetty uusiutuvan energian direktiivi (Renewable Energy Directive, RED) (EC, 2021g). Direktiivissä ehdotettiin uusiutuvan energian tavoitteen nostamista 40 %:iin vuoteen 2030 mennessä (nykyinen tavoite on 32 %). Esitys sisältää myös vaatimuksia ei-biologista alkuperää olevien uusiutuvien polttoaineiden käytölle (renewable fuels of non-biological origin eli RFNBO), joihin puhdas vety ja tästä johdetut sähköpolttoaineet sisältyvät. Ei-biologista alkuperää olevien polttoaineiden uusiutuvuusvaatimukset ulotetaan liikennesektorilta myös muille sektoreille.

Päivitetty uusiutuvan energian direktiivin ehdotus asettaa uusia tavoitteita vedyn käytölle teollisuudessa ja liikenteessä. Teollisuudelle ja liikenteelle asetetut konkreettiset tavoitteet edistävät sektoreiden dekarbonisaatiota. Uusiutuville ei-biologista alkuperää oleville liikenteen polttoaineille ehdotetaan asetettavan 2,6 % tavoite vuoteen 2030 mennessä polttoainetoimittajille asetettavien jakeluvaihtoehtojen kautta.

Teollisuuden uusiutuvan energian käytön osuudelle ehdotetaan indikatiivista 1,1 % vuosittaista kasvutavoitetta. Tämän lisäksi esitetään, että teollisuuden käyttämästä uusiutuvasta energiasta vähintään puolet tulee olla peräisin ei-biologisista lähteistä. Tämä vaatimus koskee sekä raaka-ainekäyttöä että energiakäyttöä.

Uusiutuvilla energianlähteillä tuotetuille teollisuustuotteille ehdotetaan myös merkintävelvoitetta. Tuotteiden valmistamiseen käytetyn uusiutuvan energian osuus on ilmoitettava ja laskettava EU:n metodologian mukaisesti.

Edellä esitetyt ehdotukset tarkoittavat, että jäsenvaltioiden tulisi lisätä merkittävästi puhtaan vedyn käyttöä teollisuudessa ja liikennesektorilla.

3.1.1.4 Uusiutuvan energian direktiiviä täydentävät delegoidut asetukset

EU-komission on annettava ainakin kaksi uusiutuvan energian direktiiviin liittyvä delegoitua asetusta. Komission tulee kehittää metodi ei-biologista alkuperää olevan uusiutuvan nestemäisen tai kaasumaisen polttoaineen (koskee myös vetyä) kasvihuonepäästöjen arvioimiseksi. Lisäksi EU-komission tulisi esittää menetelmä sekä säännöt sille, miten uusiutuvalla energialla tuotettu sähkö voitaisiin määrittää kokonaan uusiutuvaksi, kun sitä käytetään uusiutuvan ei-biologisen alkuperän omaavan nestemäisen tai kaasumaisen polttoaineen tuottamiseen riippumatta siitä, miten em. polttoaine loppukäytetään. Samoin on kuvattava, miten verkosta otettua sähköä voitaisiin käyttää vedyn valmistamiseen. Verkko-sähkön osalta keskustelua käydään mm. uusiutuvan sähkön lisäisyysvaatimuksista ja vaatimuksista tasapainottaa sähkönhankinta ja sähkönkulutus vedyntuotannossa. Edellä esitetystä delegoidusta asetuksesta on vuodettu julkisuuteen useita luonnosversioita vuoden 2021 aikana (nk. RFNBO-asetus), eikä asetuksen valmistumisajankohtaa ole ilmoitettu. Voimassa olevassa uusiutuvan energian direktiivissä aikarajaksi oli asetettu vuoden 2021 loppu.

3.1.1.5 Energiaverodirektiivin päivitys

Energiaverodirektiivin päivittämisellä pyritään varmistamaan, että energiaverotus vastaa ilmastotavoitteita (EC, 2021h). Keskeisiä ehdotuksia päivityksessä ovat siirtyminen määräperusteisesta verotuksesta energiasisältöön perustuvaan verotukseen, kannustimien poistaminen fossiilisten polttoaineiden käytöltä ja verokantojen asettaminen järjestykseen ympäristötehokkuuden mukaan.

Nykyistä verorakennetta yksinkertaistetaan ryhmittämällä energiatuotteet (moottori- tai lämmityspolttoaineina käytettävät) ja sähkö eri luokkiin ja asettamalla ne järjestykseen ympäristötehokkuuden mukaan. Ilmaisuihin 'ympäristötehokkuus' on määritelty suhteessa muihin Euroopan vihreän kehityksen ohjelman mukaisiin linjauksiin.

Tavanomaisia fossiilisia polttoaineita verotetaan korkeimmalla verokannalla. Seuraavaksi korkeinta verokantaa sovelletaan fossiilipohjaisiin polttoaineisiin, jotka ovat vähemmän haitallisia, ja joilla on yhä potentiaalia edistää hiilestä irtautumista lyhyellä ja keskipitkällä aikavälillä. Esimerkiksi maakaasuun, nestekaasuun ja fossiiliseen vetyyn sovellettava verokanta on kaksi kolmasosaa täydestä viiteverokannasta kymmenen vuoden siirtymäkauden ajan. Siirtymäkauden päättymisen jälkeen sovelletaan täyttä verokantaa. Seuraava luokka koskee kehittymättömiä kestäviä biopolttoaineita. Koska ne vaikuttavat hiilestä irtautumiseen, kehittymättömiin kestäviin biopolttoaineisiin sovellettava verokanta on puolet täydestä viiteverokannasta. Alhaisinta verokantaa sovelletaan sähkөөn riippumatta sen käytötarkoituksesta, kehittyneisiin biopolttoaineisiin, bionesteisiin, biokaasuihin ja uusiutuvaan vetyyn. Tässä luokassa sovellettava verokanta on huomattavasti viiteverokantaa alhaisempi, koska sähkö ja em. polttoaineet edistävät vihreän kehityksen ohjelman tavoitteiden saavuttamista.

Joillakin aloilla ja etenkin täyden verovapautuksen saavilla aloilla (esim. lentoliikenne ja heikossa asemassa olevien kotitalouksien lämmityspolttoaineet) sovelletaan siirtymäkausia verotuksen käyttöönotosta aiheutuvien taloudellisten ja sosiaalisten kustannusten lieventämiseksi.

3.1.2 Sektori-integraatiostrategia ja vetystrategia

Sektori-integraatio tarkoittaa eri energiajärjestelmien, -teknologioiden, ja -muotojen yhteistoimintaa. Euroopan komission työohjelmassa vuonna 2020 mainittiin aluksi ainoastaan älykkään sektori-integraation strategia, joka jaettiin myöhemmin kahteen osaan: sektori-integraatiostrategiaan ja vetystrategiaan. Erillisen vetystrategian tarvetta perusteltiin sillä, että vedyn keskeinen rooli vähähiilisen tulevaisuuden toteuttamisessa edellyttää erityistoimia sekä vedyn liittymisellä useaan eri sektoriin (TEM, 2020a). Seuraavissa luvuissa strategiat kuvataan tarkemmin.

3.1.2.1 Sektori-integraatiostrategia

EU-komission sektori-integraatiostrategia liittyy useaan eri energiapolitiikan osa-alueeseen: energiainfrastruktuuriin, lämmityssektoriin, vaihtoehtoisiin polttoaineisiin, päästökauppaan, uusiutuvaan energiaan ja energiatehokkuuteen (EC, 2020c). Strategian mukaan sektori-integraation avulla voidaan kustannustehokkaasti vähentää päästöjä useilla sektoreilla rinnakkain. Parhaimmillaan sektori-integraatio mahdollistaa uusiutuvien sähköntuotantomuotojen integroinnin energiajärjestelmään siten, että toimitus- ja huoltovarmuutta voidaan ylläpitää.

Euroopan komission sektori-integraatiostrategia koostuu kuudesta peruspilarista, jotka on kuvattu alla (ks. kuva 9 alla). Peruspilarien yhteyteen on listattu sektori-integraation edistämisen painopistealueita, joista vety liittyy sähköistämiseen, siirto- ja varastointi-infrastruktuurin kehittämiseen sekä uusiutuvien ja vähäpäästöisten polttoaineiden käytön edistämiseen.

Kuva 9. Euroopan komission sektori-integraatiostrategian kuusi peruspilaria (sovellettu lähteestä EC, 2020c)

Kiertotalousperiaatteiden noudattaminen – energiatehokkuus ytimessä

- hukkalämmön hyödyntäminen
- tuotteiden ympäristöjalanjäljen (PEF) tarkastelu investoinneissa
- rakennusten energiatehokkuuden parantaminen, korjausrakentamisohjelma
- biopolttoaineiden tuotanto ja käyttö

Sähköistäminen ja sähkön tuotanto uusiutuvalle energialla

- lämpöpumppujen käyttöönotto laajasti rakennusten lämmitykseen sekä teollisuudessa
- liikenteen sähköistäminen

Uusiutuvien ja vähäpäästöisten polttoaineiden käytön lisääminen

- vedyn ja biokaasun käytön edistäminen sektoreilla, joissa fossiilivapaa tuotanto tai kulutus on muuten haastavaa
- CCS/ hiilen talteenottoratkaisujen edistäminen

Energiamarkkinan kehittäminen mahdollistamaan dekarbonisaatio sekä hajautettujen resurssien hyödyntäminen

- maksujen ja verojen ohjaavuus EU:n vähähiilisyysstrategian mukaiseksi
- kuluttajat keskiöön, esim. kaksisuuntainen energiakauppa ja kysynnän joustot toimiviksi
- valtioneuvoston päätösten päivittäminen
- sähkö- ja kaasumarkkinan toimivuus (esim. markkinakytkentä ja päivänsisäinen kaupankäynti)

Kokonaisvaltaisempi ote infrastruktuurin kehittämiseen

- kaukolämpöverkostojen kehittäminen
- maakaasuverkkojen hyödyntäminen mm. vedyn siirtoon
- vety- ja CO₂-verkkojen kehittäminen ja rakentaminen
- TYNDP-suunnitelmat kokonaisvaltaisemmiksi

Digitalisaation edistäminen

- älykkäät ratkaisut
- järjestelmien ja tietoliikenteen yhteistoiminta
- tutkimus- ja kehityspanostukset
- tietoturva- ja yksityisyydensuojakysymykset

3.1.2.2 Vetystrategia

Euroopan komissio julkaisi 8.7.2020 vetystrategian 'Vetystrategia Ilmastoneutraalille Euroopalle' (EC, 2020b). Strategiassa tarkastellaan vedyn tarjoamia mahdollisuuksia, vaadittavia investointeja, vetytalouden kehittymistä tukevaa sääntelyä sekä markkinoiden kehittymisen edistämistä tutkimus- ja kehityspanostusten avulla. Vetystrategia on EU-komission laatima strategia, jota ei ole hyväksytetty Eurooppa-neuvostossa. Eurooppa-neuvosto on vuoden 2020 loppupuolella laatinut ohjeistuksia jatkotyöhön ja strategian soveltamiseen liittyen (ks. tarkemmin luku 3.1.2.3). EU-komission vetystrategia ei siten ole jäsenvaltioita sitova, vaan sitovuus syntyy valmisteilla olevien EU-lainsäädäntömuutosten kautta.




Euroopan komission vetystrategian tarkoituksena on vauhdittaa puhtaan ja vähähiilisen vedyn tuotantoa ja hyödyntämistä Euroopassa. Komission talouden elvytysuunnitelmassa "Next Generation EU" vety nähdään investointiprioriteettina talouskasvun ja kestävyyden lisäämiseksi, paikallisten työpaikkojen luomiseksi ja EU:n globaalin johtoaseman vahvistamiseksi.

Vetystrategian tavoitteena on luoda suotuisa ympäristö etenkin uusiutuvan vedyn tarjonnan ja kysynnän kasvattamiseksi. Tavoitteiden saavuttamiseksi strategiassa hahmotellaan joukko toimia ja esitetään kolme välivaihetta vuoteen 2050. Tärkeimpiä strategiassa mainittuja tavoitteita ovat:

- puhtaan vedyn tuotannon lisääminen luomalla kestävä teollinen arvoketju
- vedyn kysynnän edistäminen teollisuuden ja liikenteen sovelluksissa
- puhdasta vetyä tukevan toimintaympäristön luominen, hyvin toimivat markkinat, selkeät säännöt sekä toimiva vetyinfrastruktuuri sekä vedylle dedikoituja logistiikkaratkaisuja
- puhtaan vetyteknologian tutkimuksen ja teknologiainnovaatioiden edistäminen
- yhteistyömahdollisuuksien kehittäminen EU:n naapurimaiden ja -alueiden kanssa sekä maailmanlaajuisten vetymarkkinoiden edistäminen
- vetyyn liittyvän investointiputken kehittäminen European Clean Hydrogen Alliancen kautta

Vetystrategian eri vaiheiden keskeiset päämäärät on esitetty kuvassa 10 alla.

Kuva 10. Vetystrategian eri kehitysvaiheiden keskeisimmät päämäärät

 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 vähähiilillä 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 lisittävä merkittävästi – neljännes uusiutuvan vedyn tuotantoon 2050 hiilineutraaliin hiilidioksiidiin perustuva vety ja vedystä johdetut synteettiset polttoaineet voivat levitä laajemmin (ilmailu, meriliikenne) infrastruktuuri jo kehittynyt

Euroopan komissio tulee laatimaan vetystrategialle etenemissuunnitelman, jonka tavoitteena on lisätä uusiutuvan vedyn tuotantoa, edistää nykyisten vedyn tuotantolaitosten uudistamista ja ”uusiokäyttöä” (retrofit) sekä vedyn logistiikkaan tarvittavan infrastruktuurin asteittaista kehittämistä. Vedyn siirtoinfrastruktuurin rakentaminen alkaa paikallisista, alueellisista vetylaaksoista, joista vetyä voitaisiin tulevaisuudessa siirtää yleiseurooppalaiseen siirtoverkkoon ja suuriin vetyvarastoihin.

Euroopan komissio on teettänyt myös selvityksen, jossa tutkitaan, mitä Euroopan laajuisen vedyn siirtoinfrastruktuurin rakentaminen edellyttäisi sääntelyltä. Sääntelyllä halutaan mm. varmistaa kolmansien osapuolten verkkoon pääsy, vaikka vetyverkkoja rakennettaisiin alussa vain yksittäisten yritysten väliseen käyttöön. Selvityksessä on nostettu esille myös vetyverkkoliiketoiminnan sääntelyn haasteita. Jos esimerkiksi sallittaisiin siirtohinnoittelun perusteena maakaasu- ja vetyverkkojen välillä yhteinen verkkotoimintaan

sitoutunut oikaistu omaisuus ja pääoma, seurauksena olisi ristisubventio maakaasuverkkojen loppukäyttäjiltä vetyverkkojen loppukäyttäjille. Tämä nähdään haasteeksi, jos maakaasun loppukäyttäjät olisivat eri ryhmä kuin vedyn loppukäyttäjät.

Uusiutuvan vedyn tuotannon asteittaisen lisäämisen ohella kysyntää edistävällä politiikalla on tarkoitus kannustaa käyttökohteiden syntyymiseen laajasti teollisuudessa. Samalla on tarkoitus kannustaa vedyn liikennekäytön lisäämiseen vedyn käyttöön parhaiten soveltuvilla liikennesektoreilla. Vedyn kannalta kiinnostavia maaliikennesektoreita ovat lähitulevaisuudessa pitkän matkan rekkakuljetukset. Myös nk. captive fleet -tyyppiset vakioreitit kulkevat ajoneuvot kuten taksit, jäteautot ja linja-autot voisivat hyödyntää vetyä polttoaineena.

Vetyä voidaan lisäksi tulevaisuudessa käyttää lähialueiden meriliikenteessä ja sähköistämättömässä junaliikenteessä. Vedyllä voi pitkällä tähtäimellä olla rooli lentoliikenteen dekarbonisaatiossa – uusiutuvaa tai vähäpäästöistä vetyä voitaisiin hyödyntää lentoliikenteen synteettisten polttoaineiden valmistamisessa.

Strategiassa on mainittu vedyn käyttö myös asuinrakennusten sekä palvelusektorin kohteiden lämmityksessä. Suuri osa Keski-Euroopan kiinteistöistä käyttää nykyisin fossiilista maakaasua lämmitykseen. Vedyn käyttöä lämmityspolttoaineena ja kaasun korvaamista vedyllä ei kuitenkaan nähdä keskeisenä käyttökohteena Euroopassa. Vedyllä on mahdollista lähinnä täydentää muita vähäpäästöisiä lämmitysmuotoja, kuten lämpöpumppuja, joita otetaan yhä enenevässä määrin käyttöön Euroopassa.

3.1.2.3 Eurooppa-neuvoston päätelmät vetymarkkinan edistämisestä Euroopassa

Eurooppa-neuvosto määrittelee EU:n yleisen poliittisen suunnan ja prioriteetit. Sen jäseniä ovat EU:n 27 jäsenmaan valtion- tai hallitusten johtajat, Eurooppa-neuvoston puheenjohtaja ja Euroopan komission puheenjohtaja (Eurooppa-neuvosto, 2021). Eurooppa-neuvostolla ei ole lainsäädäntövaltaa, mutta Euroopan komission on noudatettava Eurooppa-neuvoston linjauksia.

Eurooppa-neuvosto julkaisi 11.12.2020 päätelmänsä toimista Euroopan vetymarkkinoiden luomiseksi ”Towards a hydrogen market for Europe”, joka sisältää ohjausta vetystrategian täytäntöönpanoon. Eurooppa-neuvosto pyytää komissiota laatimaan tarkemman tiekartan sekä toimintasuunnitelman, joka kuvaa, miten vetystrategian tavoitteisiin on tarkoitus päästä. Tiekartassa tulisi neuvoston mukaan hyödyntää yhteisiä kehitysohjelmiä ja sen toteutuksen tulee olla kustannustehokasta. Lisäksi energiatehokkuus ja uusiutuvista lähteistä tuotettu sähkö tulisi asettaa etusijalle. Samalla Eurooppa-neuvosto pyytää huomioimaan pidemmän aikavälin suunnittelun sekä tarpeen kehittää vetyklustereita

ja tarvittavaa siirtoinfrastruktuuria. Eurooppa-neuvosto nostaa esille erityisesti seuraavia toimenpiteitä:

- yhteistyöverkostojen vahvistaminen innovaatioiden ja teollisuuden kilpailukykyyn edistämiseksi
- EU:n vetystrategian jatkokehittäminen yhteisten ohjelmien avulla
- EU-jäsenvaltioiden välisen yhteistyön tukeminen ja fasilitointi erityisesti yhden tai useamman IPCEI³:n avulla
- luokittelu- ja sertifiointijärjestelmän kehittäminen kaasumaisille energiantantajille sisältäen vedyn ja vedystä johdetut muut tuotteet siten, että luokittelussa ja sertifiointissa huomioidaan kestävyys ja koko elinkaarenaikaiset hiilidioksidi- ja muut kasvihuonekaasupäästöt
- menetelmien kehittäminen liikennepolttoaineille, sisältäen uusiutuvan energian direktiivin (RED II) mukaiset lisäisyyskriteerit niiden uusiutuvien neste- ja kaasumaisten ei-biopohjaisten polttoaineiden osalta, jotka on tuotettu sähköllä
- menetelmien kehittäminen sille, miten uponneet kustannukset voitaisiin välttää ja varmistaa, että lukitusvaikutukset eivät estä siirtymää
- huoltovarmuuden edistäminen hyödyntämällä EU:n tuotantomahdollisuuksia, hajauttamalla tuontimahdollisuuksia ja vähentämällä tuontiriippuvuutta huolehtien samalla toimitusvarmuudesta nykyisten energiakumppanuuksien kautta
- vetyklusterien syntyminen edistäminen Euroopan laajuisesti erityisesti niillä sektoreilla, joilla vähähiilisyys on muilla keinoin vaikea saavuttaa tukemalla jäsenvaltioita vetyklusterien yhdistämisessä pitkällä aikavälillä, sekä edistämällä maakaasujärjestelmien vähittäistä muuttamista vetypohjaisiksi siellä, missä tarpeen ja mahdollista
- kaasumaisen vedyn sisällyttäminen kymmenvuotiseen verkon kehittämissuunnitelmaan (TYNDP) sekä vedyn, metaanipohjaisen kaasun ja sähköverkkojen integroidun suunnittelun edistäminen
- TEN-E -asetuksen sisällön muokkaaminen linjaan vihreän kehityksen ohjelman kanssa, vetyverkkojen kehittämisen tukeminen siellä, missä se on perusteltua toimitusvarmuuden ja kestävä kysynnän kannalta ja olemassa olevaa kaasuinfrastruktuuria hyödyntäen siellä, missä tämä olisi kustannustehokasta (ehdotus julkaistu 17.12.2021)
- vedyn sisällyttäminen omana tuotteenaan energiatilastoja koskevaan asetukseen

3 Important Project of Common European Interest eli Euroopan yhteistä etua koskevat tärkeät hankkeet, joihin sallitaan lievemmat valtioneuvoston sääntöjen ehdot

- tarkastelu, miten hiilen hinnoittelu voisi edistää vetymarkkinan kehittymistä
- kannustimien kehittäminen (verotus ja muut tuet) edistämään järjestelmän optimointia ja välttämään investointien väärää suuntaamista
- kilpailuedellytysten ja investointisignaalien varmistaminen kehittyvälle vety-markkinalle sisämarkkinan periaatteiden mukaisesti
- energiajärjestelmien eri osien vuorovaikutuksen huomioon ottaminen sisältäen mm. vaikutukset uusiutuvan sähkön tuotantokapasiteettiin ja huomiointi erilaisissa muissa suunnitelmissa

3.1.3 Kaasujen dekarbonisaatiopaketti

Euroopan komissio julkaisi 15.12.2021 nk. kaasujen dekarbonisaatiopaketinsä, jonka tavoitteena on luoda edellytykset siirtymälle uusiutuviin ja vähähiilisiin kaasuihin ja erityisesti biometaaniin ja vetyyn. Paketissa esitetään EU-komission lainsäädäntöehdotukset direktiiviksi ja asetukseksi uusiutuvien kaasujen, maakaasun ja vedyn sisämarkkinoille (EC, 2021b; EC, 2021c).

Sääntelyllä halutaan a) varmistaa kolmansien osapuolten pääsy vetyinfrastruktuuriin, b) eriyttää vedyn tuotannon ja siirron liiketoiminnat sekä c) säännellä infrastruktuurin käytöstä perittäviä tariffeja. Tämän lisäksi vetyinfrastruktuurin kehittämiseen ja rajat ylittävän kaupankäynnin edistämiseen perustetaan uusi järjestö European Network of Network Operators for Hydrogen (ENNOH). Jatkossa kansallisten verkonkehittämissuunnitelmien tulee perustua yhteisiin sähkön, kaasun ja vedyn kattaviin skenaarioihin.

Uusiutuvien ja vähähiilisten kaasujen verkkoonsyöttöä tuetaan poistamalla siirtotariffit yhteenliitäntäpisteistä ja alentamalla verkkoonsyötön tariffeja. Uusiutuvan energian direktiivissä esitettyä uusiutuvien kaasujen alkuperätakuujärjestelmää laajennetaan kattamaan myös vähähiilinen kaasu. Edellisten lisäksi EU-komissio esittää, että maakaasun pitkäaikaisia hankintasopimuksia saisi jatkaa vuoden 2049 jälkeen vain, jos kaasuun sovelletaan hiilidioksidipäästöjen kompensatiomekanismeja tai hiilidioksidin talteenottoa ja varastointia. Lisäksi paketissa määritellään vähähiilinen vety – määritelmän mukaan sen tulee olla tuotettu vähintään 70 % alemmilla hiilidioksidipäästöillä kuin fossiilinen vety. EU-komission on annettava tätä tarkemmin määrittävä delegoitu säädös vuoden 2024 loppuun mennessä.

3.1.4 Alkuperätakuujärjestelmä vedylle

Alkuperätakuu (Guarantee of Origin) takaa tuotteen alkuperän ja sisältää tietoa tuotteen alkuperästä. Euroopassa on käytössä alkuperätakuujärjestelmä uusiutuvalle sähkölle ja

joissakin maissa on alkuperätakuujärjestelmät myös sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksista saadulle uusiutuvalla lämmöllä ja sähköllä sekä biokaasulle ja biometaanille. Sähkönmyyjillä on jo nyt velvoite hankkia alkuperätakuu, kun asiakkaille kerrotaan, että sähkö on alkuperältään uusiutuvaa. Tätä velvoitetta on laajennettu biokaasuun ja vetyyn uusiutuvan energian direktiivin (REDII) mukaisesti 30.6.2021 alkaen, vaikkakin direktiivin kansallinen toimeenpano on lykkäätynyt kaikissa Euroopan maissa vuoden 2022 puolelle johdettujen alkuperätakuujärjestelmää koskevan täydentävän lainsäädännön ja ohjeistuksen, direktiivissä viitatus standardin CEN-EN 16325 ja kansainvälisten kaupankäyntialustojen rakentamisen viivästyttämisestä.

Vedyn alkuperätakuujärjestelmän peruserätykset ovat samankaltaiset kuin sähkön ja biokaasun alkuperätakuujärjestelmissä. Suomessa laki energian alkuperätakuista (1050/2021) tuli voimaan 3.12.2021.

3.1.5 EU:n taksonomia-asetus ja siihen liittyvä delegoitu säädös

EU:n taksonomia-asetuksen (EU/2020/852) tavoitteena on määrittellä kriteerit, joiden avulla voidaan helpottaa sijoittamista ympäristön kannalta kestäviin ratkaisuihin. Taksonomian avulla halutaan siis vauhdittaa ilmastotavoitteiden toimeenpanoa kytkemällä rahoitus ja investointien ilmasto- ja ympäristövaikutukset toisiinsa.

Taksonomiassa on kuusi ympäristötavoitetta:

1. Ilmastonmuutoksen hillintä (esim. uusiutuvan energian tuotanto, puhdas liikenne)
2. Ilmastonmuutokseen sopeutuminen (esim. tulvaesteet, erilaiset hälytysjärjestelmät)
3. Vesi- ja merivarojen suojeleminen (esim. veden puhtauden suojeleminen)
4. Kiertotalouden edistäminen (esim. materiaalien tehokkaampi uudiskäyttö, tuotteiden elinkaaren pidentäminen)
5. Ympäristön pilaantumisen ehkäiseminen
6. Ekosysteemien ja biodiversiteetin suojeleminen (esim. kestävä maatalous ja metsätalous)

Taksonomian mukainen toiminta voi suoraan tukea ympäristötavoitetta tai olla ns. mahdollistavaa toimintaa. Lisäksi ilmastonmuutoksen hillintätoimet sisältävät ns. siirtymäajan toimenpiteitä, jotka ovat osa taksonomiaa vain rajatun ajan. Yksikään taksonomian mukainen toimi ei saa aiheuttaa merkittävää haittaa yhdellekään ympäristötavoitteista. Lisäksi jokaisen taksonomian mukaisen toimen on täytettävä myös tiettyjä sosiaalisia kriteereitä. Nämä ehdot tarkoittavat sitä, että vaikka toiminta olisi ympäristötavoitetta tukevaa

toimintaa, mutta aiheuttaa merkittävää haittaa jollekin ympäristötavoitteelle tai rikkoo esimerkiksi ihmisoikeuksia, ei se voisi olla taksonomian mukainen (Kouri, 2020). Vedyn tuotannon osalta taksonomiassa määritetään mm. vähäpäästöisen vedyn tuotannon kriteerit ja luokittelu.

3.1.5.1 Delegoitu säädös kestävän vedyn teknisistä kriteereistä

EU-taksonomiaan liittyviä teknisiä kriteereitä koskeva delegoitu asetukset hyväksyttiin huhtikuussa 2021 (EC, 2021i). Se koskee kriteereitä, joilla määritellään, millainen taloudellinen toiminta edistää päästöjen vähenemistä.

Vedyn osalta keskeisiä keskeisimpiä kriteereitä on, että sen tulee vähentää kasvihuonekaasujen elinkaaripäästöjä vähintään 73,4 % (ts. elinkaarenaikaiset kasvihuonekaasupäästöt ovat alle 3 tCO₂e/tH₂⁴) vedyn osalta ja 70 % synteettisten vetypolttoaineiden osalta suhteessa fossiilisten polttoaineiden vertailukohtaan, joka on 94 gCO₂e/MJ. Kasvihuonekaasupäästöt on laskettava ISO 14067:2018 tai ISO 14064-1:2018 standardien mukaisesti, kuten RED artiklassa 28(5) edellytetään.

Edellä esitetyn lisäksi vedyn tuotannolta vaaditaan, että:

- Taloudellisen toiminnan on toteutettava fyysisiä ja ei-fyysisiä ratkaisuja, jotka vähentävät merkittävästi vedyn valmistukseen liittyviä tärkeimpiä ilmatoriskejä.
- Toiminnalle olennaiset fyysiset ilmatoriskit on tunnistettava suorittamalla ilmatoriskien ja haavoittuvuuksien arviointi.
- Ilmastoennusteiden ja vaikutusten arvioinnin on perustuttava parhaisiin käytäntöihin. Haavoittuvuuden ja riskianalyysin osalta arviot tulisi tehdä parhaimmilla menetelmillä (esim. IPCC:n suosittelemat menetelmät).
- Sopeutumiskeinot eivät saa vaikuttaa haitallisesti muiden ihmisten, luonnon, kulttuuriperinnön, omaisuuden ja muun taloudellisen toiminnan sopeutumistoimiin. Ratkaisujen on mahdollisuuksien mukaan perustuttava puhtaan tai vähähiilisen vedyn infrastruktuuriin ja niiden on oltava linjassa alueellisten tai alakohtaisten sopeutumissuunnitelmien kanssa. Lisäksi seuranta ja mittaus tulisi toteuttaa ennalta määritettyjen indikaattorien perusteella, ja korjaavia toimia on harkittava, jos indikaattoreille asetettuja tavoitteita ei saavuteta.

4 tCO₂e tarkoittaa yhtä hiilidioksidiekvivalenttitonnia. Lyhenne esitetään EU-taksonomiassa ilman määritelmää.

3.2 EU:n rahoitusinstrumentit ja projektiyhteistyö Euroopassa

Euroopan Unioni tukee vetyyn liittyviä investointeja ja TKI-hankkeita useiden rahoitusinstrumenttien kautta tällä vuosikymmenellä (ks. taulukko 1 alla).

Taulukko 1. EU:n rahoitusinstrumentit, joista voidaan rahoittaa vetyprojekteja (EC, 2022a)

Rahoitusohjelma, sen voimassaolo, määrä ja kohde

InvestEU (2021–2027)

26,2 mrd. EUR EU-takuita Euroopan investointipankille ja pk-yrityksiä rahoittaville pankeille jäsenmaissa ja kansainvälisille rahoituslaitoksille. Vähintään 30 % InvestEU:n takaamista investoinneista ohjattava EU:n ilmastotavoitteita edistäviin hankkeisiin. Investointien kohdealueet kestävä infrastruktuuri 9,9 mrd. EUR, TKI 6,6 mrd. EUR, pk-yritykset 6,9 mrd. EUR ja osaamisen kehittäminen 2,8 mrd. EUR.

Recovery and Resilience Facility (elvytysrahasto) (2021–2026)

672,5 mrd. EUR (lainaa 360 ja tukea 312,5 mrd. EUR). Jäsenmaiden uudistuksia ja investointeja varten koronaviruspandemian taloudellisten ja sosiaalisten vaikutuksien hillitsemiseksi. Jokainen maa on tehnyt kansalliset suunnitelmansa.

Regional Development Fund (rakennerahasto) ja Cohesion Fund (koheesiorahasto) (2021–2027)

234 mrd. EUR. Tarkoitettu EU-maille, joiden kansalaisten keskimääräiset tulot alittavat 90 % EU-keskiarvosta. Taloudellisen ja sosiaalisen eriarvoisuuden vähentäminen sekä kestävä kehityksen edistäminen ja EU-maiden välisten taloudellisten ja sosiaalisten eroavaisuuksien vähentäminen.

Just Transition Fund (siirtymärahasto) (2021–2027)

17,5 mrd. EUR, josta 7,5 mrd. EUR rahoitetaan EU-budjetista ja 10 mrd. EUR Euroopan elvytysinstrumentista vuosina 2021–2023. Jäsenmaa, jolle tukea myönnetään EU-budjetista, on velvoitettu tiettyyn omarahoitusosuuteen. Tukea Euroopan hiili-intensiivisille alueille vihreää siirtymää varten.

Innovation Fund (2020–2030)

Noin 20 mrd. EUR (riippuu päästöoikeuksien hinnasta), joka rahoitetaan EU ETS-tuloista ja NER300-hankkeista jäljelle jääneistä osuuksista. Jaetaan investointitukina. Vähähiilisten uusien teknologioiden demonstraatiohankkeet EU-maissa, Norjassa ja Islannissa.

Connecting Europe Facility (2021–2027)

33,71 mrd. EUR apurahoina, lainoina ja velkakirjoina. EU-maiden infrastruktuurihankkeet: liikenne 25,82 mrd. EUR (prioriteettina TEN-T), energia 5,84 mrd. EUR (EU-maiden väliset energiaverkot) ja digitalisaatio 2,06 mrd. EUR.

Horizon Europe (2021–2027)

Tutkimus- ja innovaatiopuiteohjelma, jonka EU-budjettirahoitus on 95,5 mrd. EUR. Fokusalueita mm. ilmastoneutraalit ja älykkäät kaupungit ja ilmastomuutokseen sopeutuminen.

Rahoitusohjelma, sen voimassaolo, määrä ja kohde

Modernisation Fund (2021–2030)

2 % EU ETS-tuloista vuosina 2021–2030. 10 EU:n matalatuloisimmalle maalle suunnattu rahoitusohjelma ilmasto- ja energiavoitteiden toteuttamiseen.

LIFE-ohjelma (2021–2027)

5,4 mrd. EUR. Puhtaan energian siirtymä, ilmastomuutoksen hillintä ja sopeutuminen, kiertotalous ja elämänlaatu ja luonto ja biodiversitettti.

Edellä esitetyt rahoitusinstrumentit perustuvat joko EU-budjettiin tai päästökauppajärjestelmästä saataviin tuloihin. Rahoitusinstrumenteista haettavat suorat tuet edellyttävät rahoituksensaajilta omia rahoitusosuuksia tai rahoitus perustuu lainoihin, velkakirjoihin tai takauksiin.

Innovaatorahaston (Innovation Fund) ensimmäisellä kierroksella suurten hankkeiden haussa sai myönteisen rahoituspäätöksen kaikkiaan 7 hanketta, joista kaksi oli vetyyn liittyviä (EC, 2021I). Toinen näistä on Nesteen Porvoon öljynjalostamo, jossa tavoitteena on tuottaa osa tarvittavasta vedystä elektrolyysillä (kapasiteetti 50 MW) ja soveltaa hiilidioksidin talteenottoa ja varastointia osalle vedystä. Toinen hanke on Pohjois-Ruotsissa sijaitseva HYBRIT-hanke (Hybrit Development AB, SSAB, Vattenfall AB), jossa korvataan teräksen valmistuksessa koksien käyttöön perustuvat masuunit raudan suorapelkistykseen vedyllä perustuvalla teknologialla. Jällivaaraan on tarkoitus rakentaa vedyn tuotantoa varten 500 MW elektrolyyserikapasiteettia ja Oxelösundiin tulee kaksi valokaariuunia, joilla sulatetaan vedyn avulla tuotettu rautasieni jatkojalostettaviksi terästuotteiksi.

Vety-IPCEI. EU:n valtiontukilainsäädännön ehdoista on myös mahdollista poiketa kansallisten tukien tarjoamiseksi vetyprojekteille määrittelemällä nk. Important Project of Common Interest (IPCEI) -hankkeita. Tarkoituksena on edistää tutkimukseen ja kehitykseen pohjautuvia, ensimmäiseen investointivaiheeseen edenneitä projekteja. Ensimmäinen vetyä koskeva IPCEI käynnistettiin syksyllä 2020. Vety-IPCEI:n on allekirjoittanut 22 EU-maata Suomi mukaan lukien sekä ETA-maista Norja. Hankkeiden notifiointi Euroopan komissiolle on tehtävä vuoden 2021 aikana, jolloin ensimmäisten kansallisesti rahoitettavien investointiprojektien rakentamiseen päästäisiin vuoden 2022 aikana. Tällä hetkellä osa vety-IPCEI:ssä mukana olevista maista on jo ehtinyt tehdä ensimmäiset notifiointinsa komissiolle (mm. Saksa).

Suomessa voi hakea vetyprojekteille tukea osana hallituksen kestävä kehityksen ohjelmaa (VN, 2022). Energiainvestointitukea myönnettiin vuonna 2021 kolmelle vedyntuotantoa koskevalle hankkeelle (VN, 2021a). Vähähiilisen vedyn sekä hiilidioksidin talteenoton ja hyödyntämisen teemassa ensimmäinen vety-IPCEI-haku päättyi heinäkuussa ja toinen

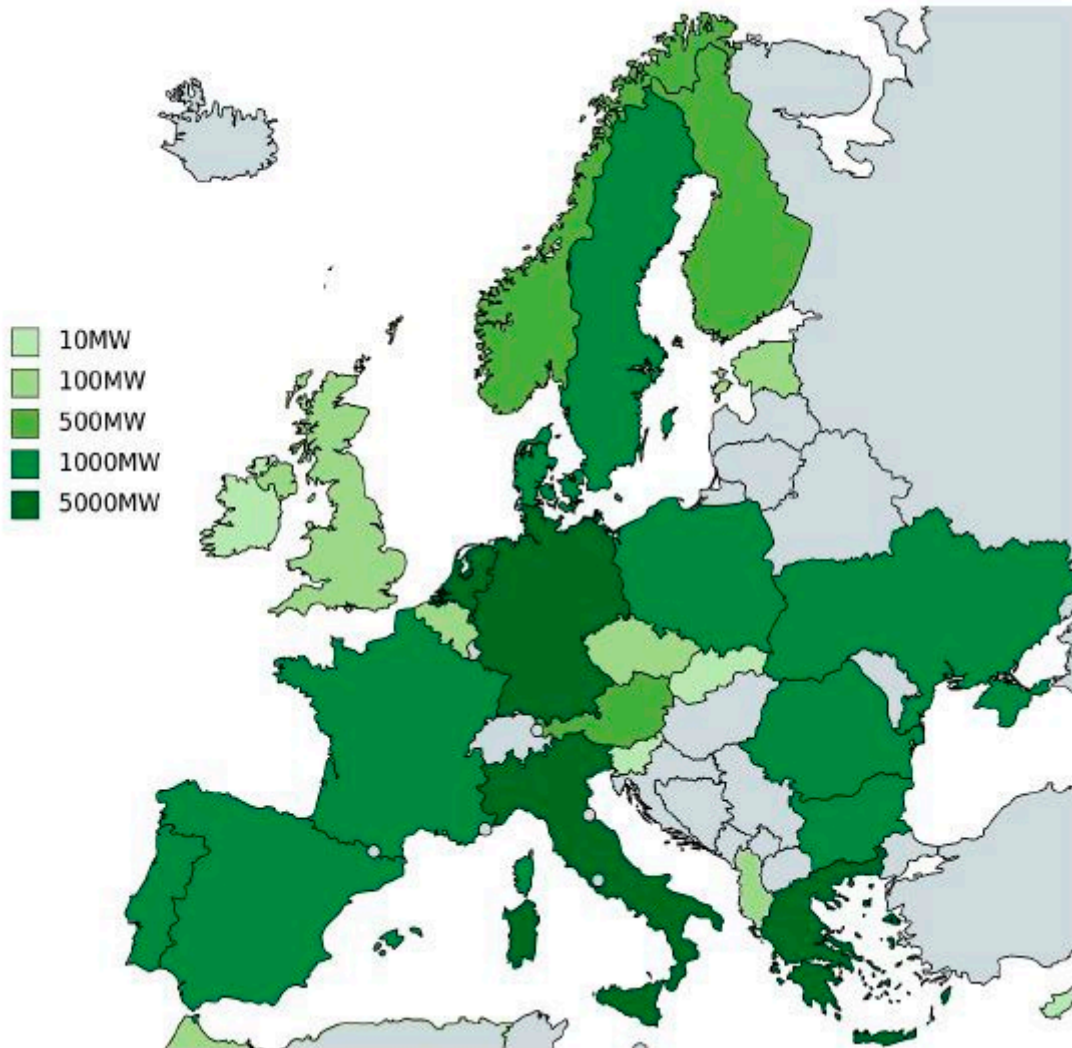
marraskuussa 2021. Ensimmäisen vety-IPCEI -kierroksen rahoituspäätöksiä on odotettavissa alkuvuonna 2022. Marraskuussa 2021 sulkeutui myös vedyn kuljetukseen ja varastointiin suunnattu Eureka-haku. Maaliskuuhun 2022 avoinna olevassa energiainfrastruktuuriteemassa voi hakea rahoitusta mm. vähähiilisten kaasujen tuotantoinvestoinneille ja vedyn siirron investoinneille. Samaan aikaan järjestetään energiainvestointitukien ensimmäinen vuoden 2022 haku. Keväällä 2022 on tulossa lisäksi uusiutuvan vedyn julkisen jakelu- ja tankkausinfrastruktuurin tarjouskilpailu.

3.2.1 Clean Hydrogen Alliance Euroopan vetyprojektien edistämiseen

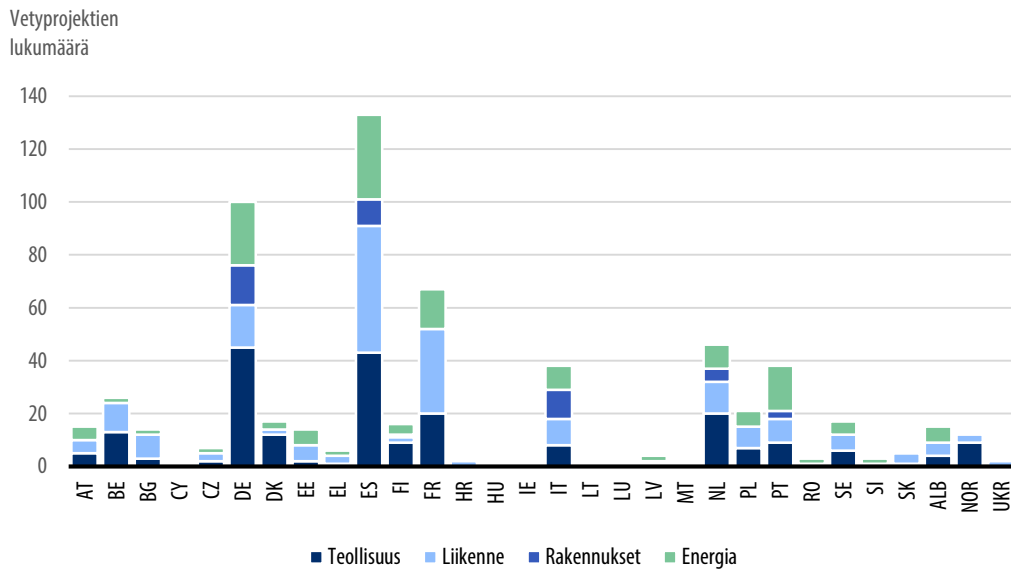
European Clean Hydrogen Alliance perustettiin maaliskuussa 2020 Euroopan laajuisesti yhteistyöalustaksi, jonka päätavoitteena on edistää uusiutuvan ja vähähiilisen vedyn tuotannon ja käytön investointeja sekä niihin liittyvien arvoketjujen kehittymistä ja energiajärjestelmien välistä integraatiota Euroopassa. Allianssi on avoin julkisille ja yksityisille toimijoille, jotka harjoittavat uusiutuvaan tai vähähiilisen vetyyn liittyvää toimintaa (EC, 2022b). Allianssin operatiivinen toiminta keskittyy kuuteen round table ryhmään, joita ovat tuotanto, siirto ja jakelu, teolliset sovellukset, liikenne, energiasectori ja rakennukset/asuminen. Suomesta allianssin toimintaan osallistuvat mm. työ- ja elinkeinoministeriö, Business Finland, VTT, yliopistoja (LUT, Oulu), edunvalvontajärjestöjä ja lukuisia yrityksiä.

Allianssi esitti keväällä 2021 Euroopan komissiolle 997 investointiprojektin listan, joita komissio arvioi tarkemmin kesän aikana (EC, 2021j). Kaksi kolmasosaa projekteista tähtää kaupallisen toiminnan aloittamiseen 3,5 vuoden kuluessa. Yli 80 % projekteista perustuisi puhtaaseen vetyyn. Tuotanto- ja loppukäyttöprojektien välillä on maantieteellistä välimatkaa, josta Euroopan komissio on todennut, että infrastruktuurihankkeille on todennäköisesti tarvetta. Projektien maantieteellisestä sijainnista ja kohdentumisesta on esitetty tarkempia tietoja alla (ks. kuvat 11, 12, 13 ja 14).

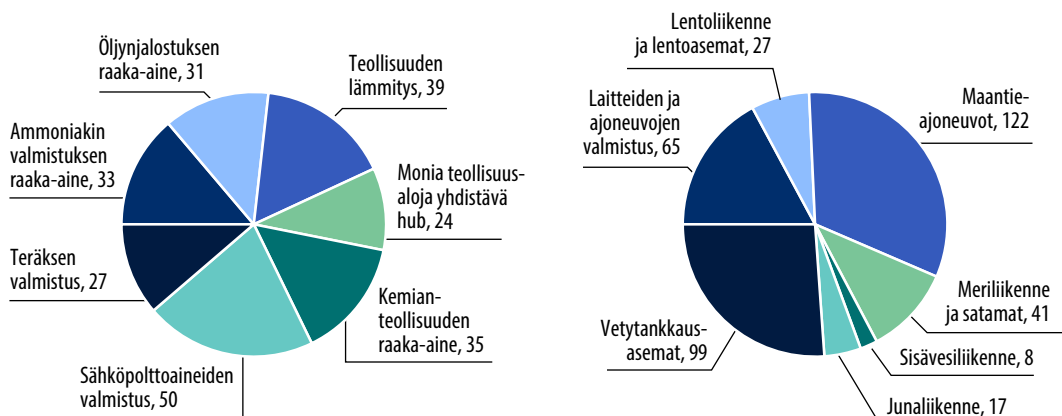
Kuva 11. Suunnitellut elektrolyserikapasiteetit maittain Clean Hydrogen Alliancen projektistalla kesäkuussa 2021 (EC, 2021j)



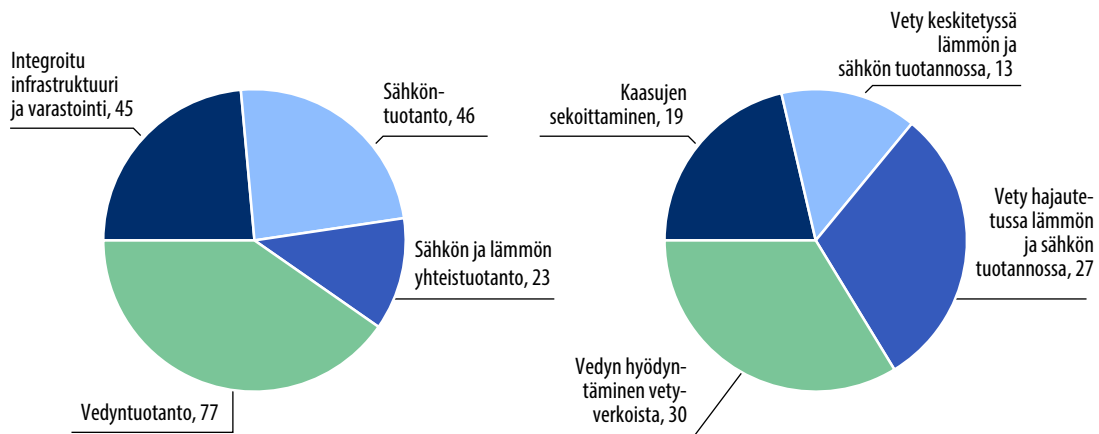
Kuva 12. Vetyprojektien lukumäärä maittain ja loppukäyttösektoreittain Clean Hydrogen Alliancen projektistalla kesäkuussa 2021. Sama projekti on merkitty useampaan kertaan, jos se liittyy samanaikaisesti useaan loppukäyttösektoriin. (EC, 2021j)



Kuva 13. Teollisuuden 239 (vasemmalla) ja liikenteen 379 (oikealla) vetyprojektiä kohteittain Clean Hydrogen Alliancen projektistalla kesäkuussa 2021 (EC, 2021j)



Kuva 14. Energiasektorin 191 (vasemmalla) ja rakennusten 89 (oikealla) vetyprojektia kohteittain Clean Hydrogen Alliancen projektistalla kesäkuussa 2021 (EC, 2021j)



Julkinen rahoitus hankkeisiin on jatkossakin haettava EU:n yhteisten tai kansallisten rahoitusinstrumenttien kautta. Clean Hydrogen Alliance palvelee siis lähinnä projektien jatkajalostamista ja yhteistyötä siten, että hankekehitys etenee tiiviissä yhteistyössä komission suuntaan. Marraskuussa 2021 järjestetyssä kolmannessa Forum-tilaisuudessa keskusteltiin vetyprojekteja tukevan lainsäädännön ja rahoituksen tarpeista ja nykyisistä esteistä. Samalla julkaistiin julkinen tietokanta noin 750 Euroopan vetyprojektista (EC, 2022c).

3.2.2 Clean Hydrogen Joint Undertaking – julkisen ja yksityisen sektorin tutkimusyhteistyö

Euroopan komission alla toimiva julkisen ja yksityisen sektorin välinen tutkimusyhteistyöalusta Clean Hydrogen Joint Undertaking (CH JU) jatkaa FCH JU:n työtä vuosina 2021–2027. CH JU:n julkinen rahoitus on noin 1 mrd. EUR ja saman verran arvioidaan kanavoituvan toimintaan yksityissektorin kautta. CH JU keskittyy tutkimukseen ja kehitykseen vedyn tuotannossa, jakelussa ja loppukäytössä liikenteessä, teollisuudessa ja rakennuksissa. T&K:n lisäksi CH JU osallistuu suuren mittakaavan demonstraatioprojekteihin ja alkuvaiheen lippulaivaprojekteihin. FCH JU:n toukokuussa 2021 julkaisemassa tilannekatsauksessa on kuvattu kansainvälisesti yhteistyötä tekevien vetylaaksojen joukko (ks. kuva 15).

Kuva 15. Yhteistyössä kehitteillä olevat vetylaaksot ympäri maailmaa FCH JU listauksen perustella toukokuussa 2021 (Weißenhain et al., 2021)



3.2.3 Clean Hydrogen Mission – maailmanlaajuinen aloite vetytalouden edistämiseksi

Clean Hydrogen Mission on kesäkuussa 2021 solmittu kansainvälinen yhteistyöaloite, jonka tavoitteena on saavuttaa vedyntuotannolle alle 2 USD/kgH₂ kustannustaso ja perustaa yli 100 vetylaaksoa ympäri maailmaa vuoteen 2030 mennessä (EC, 2021k). Aloitteen ovat allekirjoittaneet Euroopan komissio, Australia, Itävalta, Kanada, Chile, Kiina, Saksa, Intia, Italia, Marokko, Norja, Saudi-Arabia, Etelä-Korea, Iso-Britannia ja Yhdysvallat.

Clean Hydrogen Mission on osa Mission Innovation -aloitteen toista vaihetta. Mission Innovationin toiminta käynnistettiin vuonna 2015 Pariisin ilmastokokouksessa. Tavoitteena on edistää päästöjä vähentäviä innovaatioita. Suomi on aloitteen jäsen.

3.2.4 Clean Energy Ministerialin vetyaloite

Clean Energy Ministerial (CEM) on hallitusten ja muiden sidosryhmien välinen kansainvälinen yhteistyöfoorumi, jonka tavoitteena on edistää puhtaisiin energiateknologioihin liittyviä poliittisia toimenpiteitä ja ohjelmia, jakaa kokemuksia ja parhaita käytäntöjä ja kannustaa kansainvälistä siirtymää puhtaaseen energiatalouteen (CEM, 2022a).

CEM on käynnistänyt vetyyn liittyvän aloitteen toukokuussa 2019, jossa on mukana 19 maata ja Euroopan komissio. Työn operatiivisesta organisoinnista vastaa IEA, ja partnereina toimivat myös IRENA ja Mission Innovation. CEMin vetyaloite keskittyy tässä vaiheessa seuraaviin kolmeen kehitysalueeseen (CEM, 2022b):

1. Vedyn käyttöönoton edistäminen nykyisissä teollisissa sovelluksissa
2. Vedyn käyttöönoton edistäminen liikenteessä (ml. rahtiliikenne, joukkoliikenne, kevyt raideliikenne, meriliikenne)
3. Vedyn roolin tutkiminen yhdyskuntien energiankäytössä

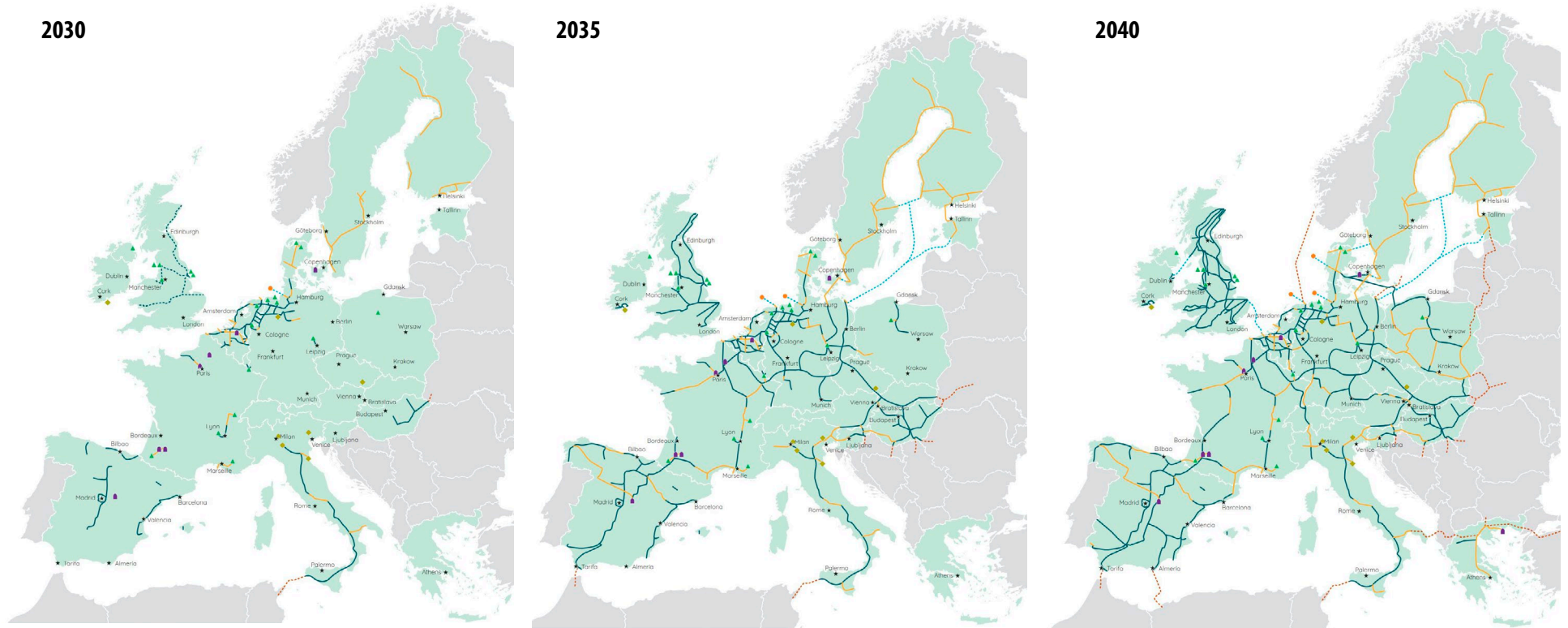
Työohjelmassa vuosille 2021–2022 kuvataan, miten toiminta on organisoitu ja mitä toimenpiteitä ja tuotoksia toiminnalta odotetaan (CEM, 2022c). IEA mm. tuottaa tarkemman kansainvälisen tilannekatsauksen maakohtaisista suunnitelmista, projekteista ja poliittisista ohjaustoimenpiteistä. Lisäksi suunnitteilla on kehittää kansainvälinen vedyn sertifiointi ja standardointi.

3.2.5 Muita eurooppalaisia vetyyn keskittyviä yhteistyöjärjestöjä ja -aloitteita

Hydrogen Europe on edustanut huhtikuusta 2021 lähtien Euroopan vety- ja polttokennosektoria (HE, 2022). Siihen kuuluu 315 yritys- ja järjestöjäsentä. Järjestön tavoitteena on edistää vetyteknologioiden kehittymistä ja käyttöönottoa Euroopassa. **Hydrogen Europe Research** (HER) on tutkimukseen keskittyvä Hydrogen European sisarjärjestö, joka muodostuu 91 yliopisto- ja tutkimusorganisaatiosta 26 maassa. Jäsenet toimivat aktiivisesti vety- ja polttokennosektoreilla. Hydrogen Europe Research on osallistunut FCH JU:n toimintaan ja osallistuu jatkossa Clean Hydrogen Joint Undertakingin (CH JU) toimintaan.

European Hydrogen Backbone on 23 eurooppalaisen kaasinsiirtoverkonhaltijan (ml. Gasgrid Finland) visio tulevaisuuden vedynsiirtoinfrastruktuurista (Creos, 2022; Wang *et al.*, 2021). Sen mukaan kehitys alkaisi teollisuuskeskittymistä lopettamalla maakaasun siirto tietyissä osissa nykyistä maakaasinsiirtoverkkoa ja muuntamalla nämä verkot vedynsiirtoverkoiksi. Verkoston osien välille voitaisiin tarvittaessa rakentaa uusia yhteyksiä. Tanskassa, Ruotsissa ja Suomessa olisi tarkoitus jatkossakin säilyttää nykyiset kaasinsiirtoverkot maakaasun ja jalostetun biokaasun käytössä. Vedylle rakennettaisiin tarvittaessa omat verkkonsa. Raportissa päädytään kysyntäarvioon 2 300 TWh vetyä vuodessa vuonna 2050, mikä ylittää FCH JU:n laatiman Euroopan vetytiekartan kunnianhimoisen vetyskenaarion luvut noin 50 TWh:lla. Todellinen tarve rakentaa vedynsiirtoverkkoja riippuu tuotannon ja kysynnän alueellisesta kehittämisestä sekä siitä, miten vedyn alkuperätakuita pystyttäisiin hyödyntämään kaupankäynnissä ja markkinoiden luonnissa. Tällöin vetyä ei välttämättä tarvitsisi fyysisesti siirtää maasta toiseen. Visio vedynsiirtoverkkojen kehittämisestä on esitetty alla (ks. kuva 16).

Kuva 16. Euroopan kaasusiirtoverkonhaltijoiden visio Euroopan vedynsiirtoverkkojen kehittymisestä. Keltainen väri kuvaa kokonaan uutta vetyputkea ja vihreä nykyisen maakaasuputkiston uudelleenkäyttöä vetyverkon osana. (Wang et al., 2021)



3.3 Johtopäätökset EU:n ilmasto- ja energiapoliittisista tavoitteista ja toteutusvaiheesta

EU:n ilmastotavoitteiden saavuttaminen edellyttää EU-komission näkemyksen mukaan vedyn tuotannon ja käytön lisäämistä. Komission laatimissa sektori-integraatiostrategiassa ja vetystrategiassa on kuvattu tiekartta ja tavoitteet vedylle sekä se, millä alueilla kehitystä pitäisi tapahtua.

Vedyn edistämiseen kytkeytyy paljon EU-tasoista sääntelyä (mm. REDII ja EU-taksonomia). EU-tasoinen sääntely on muotoutumassa, ja vetyyn liittyviä suuria linjauksia on tulossa vuoden 2022 aikana. Sääntelyssä otetaan kantaa mm. siihen, mitä uusiutuva sähkö on, ja mikä sähkö on "lisäistä" ja "tukikelpoista". EU-taksonomian linjauksilla saattaa olla suuri vaikutus vetyinvestointeihin ja siihen, millaiseen vedyntuotantoon investoidaan. Sääntelyn keskiössä ovat etenkin vähähiiliseen vetyyn liittyvät kysymykset, sekä määritelmät, joissa kerrotaan, mikä on sallittua vedyntuotantoa missäkin yhteydessä. Tältä osin puhtaaseen vetyyn liittyvä sääntely ei vielä ole valmista, mikä vaikeuttaa investointipäätösten tekemistä vetyhankkeisiin.

Kansallisvaltioissa odotetaan EU-tasoinen sääntelyn valmistumista. Meneillään on vaihe, jossa kukin maa ja muut tahot arvioivat ja kommentoivat EU-tason sääntelyä ja luovat omia maakohtaisia näkemyksiään siitä, mitä vetytalous kussakin maassa tarkoittaisi konkreettisesti. Näistä kerrotaan tarkemmin seuraavassa luvussa.

Puhtaan ja vähähiilisen vedyn tuotanto vaatii ylimenovaiheessa tukitoimenpiteitä toteutukseen. Vetystrategia kytkeytyy siten EU:n rahoitusinstrumentteihin ja elvytysrahastoon, joista kanavoidaan rahoitusta vetytalouden edistämiseen. Rahoitusinstrumentit perustuvat suurelta osin joko lainoihin, takauksiin tai velkakirjoihin. Suoraa EU-tukea saavat lähinnä hankkeet, joilla on tutkimuksellista uutuusarvoa. Tästä syystä valtiontukiin perustuva vety-IPCEI on tärkeä instrumentti vetytalouden edistämiseen, jos/kun tutkimuksellinen uutuusarvo vähenee.

Infrastruktuurin kehittäminen on mainittu vetystrategiassa keskeisenä tavoitteena pidemällä tähtäimellä. On vielä epäselvää, miten siirtoinfrastruktuuri tulisi kehittymään. Vedyn ja kaasun siirtoinfrastruktuuriin ja kaupankäyntiin liittyviä sääntöjä pyritään selkeyttämään joulukuussa 2021 julkaistussa kaasun dekarbonisaatiopakettissa. Euroopan maakaasunsiirtoverkonhaltijoiden yhteisesti laatimassa European Hydrogen Backbone raportissa esitetään tiekartta vedyn siirtoinfrastruktuurin kehitykselle. Hydrogen Backbone on kuitenkin visio, ei konkreettinen suunnitelma. Eurooppa-neuvosto on pyytänyt komissiota tarkentamaan vetystrategiassa esiteltyjä suunnitelmia ja huomioimaan vedyn muissakin keskeisissä infrastruktuuria käsittelevissä suunnitelmissa (10-vuotissuunnitelmat, IPCEI, TEN-E). Vedylle ollaan myös kehittämässä alkuperätakuujärjestelmää, jonka yhtenä tavoitteena

on edistää puhtaalla ja vähähiilisellä vedyllä tapahtuvaa maiden rajojen ylittävää kaupankäyntiä kustannustehokkaasti ja luotettavasti. Jää nähtäväksi, millä ehdoilla kaupankäyntiä voidaan toteuttaa maiden rajojen yli ilman fyysistä siirtoa.

Sääntelyn, infrastruktuurin ja rahoituksen kehittämisen lisäksi Euroopan komissio seuraa tiiviisti vetyprojektien kehittymistä Euroopan alueella. EU-maiden välistä yhteistyötä edistetään Clean Hydrogen Alliancen ja Clean Hydrogen Joint Undertakingin kautta, joista ensimmäinen painottuu investointiprojekteihin ja jälkimmäinen T&K-kysymyksiin ja osaamisen jalkauttamiseen. Maidenvälistä maailmanlaajuista yhteistyötä pyritään tiivistämään mm. Clean Hydrogen Mission-aloitteen kautta. Vedyn ympärille on myös muodostunut vetysektorin kaupallisia toimijoita edustavia kansainvälisiä edunvalvontajärjestöjä, kuten Hydrogen Council ja Hydrogen Europe, jotka osaltaan pyrkivät edistämään vetysektorin kehittymistä.

4 Vetystrategiat, -tiekartat ja vetyprojektit eri maissa

Yhteenveto

Useat Euroopan maat ja muutamat Euroopan ulkopuoliset maat ovat luoneet omia kansallisia vetystrategioitaan ja -tiekarttojaan viime vuosina, tai vetystrategia on parhaillaan valmisteilla. Kansalliset lähtökohdat vaikuttavat kunkin maan vetystrategiaan.

Teollisuuden prosessit ovat suurin vedyn käyttökohde Euroopassa. Vetytalouden kehitys keskittyykin tässä vaiheessa voimakkaimmin teollisuusklusterien välittömään läheisyyteen. Tämän lisäksi liikenne mainitaan useiden maiden vetystrategioissa ja tiekartoissa keskeisenä loppukäyttösektorina. Liikenteessä nähdään erityisen suuri potentiaali Aasian maissa.

Vedyn siirtoinfrastruktuurin kehittämiseksi on tässä vaiheessa tarpeita lähinnä teollisuuskeskittymien yhteydessä. Nähtäväksi jää, missä määrin vedyn alkuperätakuuta voitaisiin tulevaisuudessa hyödyntää Euroopassa maidenväliseen kaupankäyntiin siten, ettei vedyn fyysinen siirtäminen olisi välttämätöntä.

Saksassa kotimaisen vedyn kysyntä ylittää pitkällä aikavälillä kotimaan tuotantoresurssit, jonka vuoksi Saksan vetystrategiaa on rakennettu alusta lähtien tuontimahdollisuuksia silmällä pitäen. Ranskan erityispiirteenä on olemassa oleva hiilineutraali ydinvoima, joka voisi olla kilpailukykyistä vedyn tuotannossa. Ranska pyrkii vaikuttamaan EU-sääntelyyn tältä osin. Norjassa vetyä ei tarvita tasapainottamaan sähköjärjestelmää vesivoiman ansiosta. Mahdollisuuksia nähdään etenkin meriliikenteen vetyratkaisuihin ja tuulivoiman hyödyntämisessä vedyntuotantoon. Norjan öljy- ja kaasukentillä voitaisiin lisäksi varastoida hiilidioksidia sekä Norjasta että muista maista.

Tanskassa nähdään suuria mahdollisuuksia tuulivoiman hyödyntämisessä vedyn tuotantoon sekä viennissä etenkin Saksaan. Ruotsissa vety kuuluu maan sähköistymisstrategiaan, ja vetystrategiassa on asetettu kansalliset tavoitteet puhtaan vedyn tuotannolle. Etelä-Euroopassa puhtaan vedyn tuotanto perustuisi aurinkosähköön. Iso-Britanniassa vuorostaan tavoitteena on tuottaa ja hyödyntää puhdasta sekä vähähiilistä vetyä.

Australia, Chile, Saudi-Arabia, Marokko, Tunisia ja Kanada suunnittelevat laajamittaista vedyn vientiä valtavilla hankkeilla. Saksa, Etelä-Korea ja Japani ovat ilmoittaneet tarpeistaan vedyn maahantuonnille.

Useimmissa maissa halutaan myös kehittää vetyteknologioita ja edistää teknologiavientiä. Etenkin Alankomaissa, Saksassa ja Ranskassa on paljon konkreettisesti vaiheessa olevia teknologiahankkeita. Etelä-Korea ja Japani keskittyvät liikenne- ja voimalaitosratkaisuihin liittyvien teknologioiden kehittämiseen.

Tukirahoitus ohjaa kehitystä Euroopassa, koska puhdas ja vähähiilinen vety eivät vielä ole kilpailukykyisiä. Pilotti- ja demonstraatiohankkeita on kansainvälisesti kehitteillä tuhansia, joten julkisesta rahoituksesta käydään kovaa kilpailua tulevina vuosina.

4.1 Kansalliset vetystrategiat ja -tiekartat Euroopassa

Useat Euroopan maat ovat luoneet omia kansallisia vetystrategioitaan ja tiekarttojaan vuosien 2019–2021 aikana. Seuraavassa esitellään valikoitujen Euroopan maiden vetystrategioita sekä vetytalouden kehittämisen lähtökohtia. Vaikka kaikissa esitellyissä maissa tavoitteena on kasvattaa puhtaan tai vähähiilisen vedyn tuotantoa ja käyttöä, poliittisten tavoitteiden sekä edellytysten välillä on havaittavissa selviä eroja. EU:n vetystrategian mukaisesti useissa maissa nähdään, että vedyllä voi pidemmällä tähtäimellä olla merkittävä rooli osana energiaratkaisuja ja vähähiilistä tulevaisuutta.

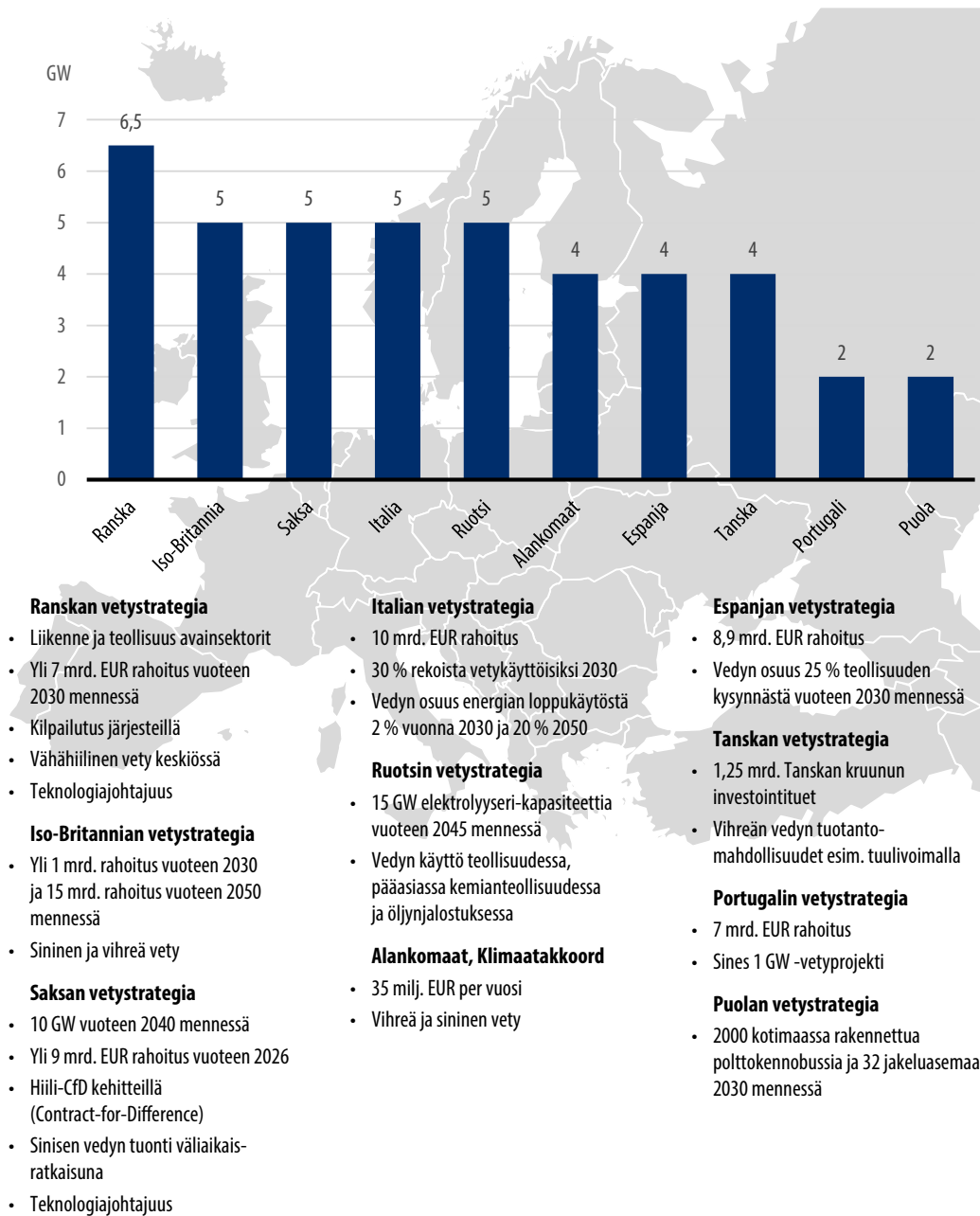
Alankomaat harkitsee väliaikaisena ratkaisuna vähähiilisen (sinisen) vedyn käyttöä hyödyntämällä maakaasun yhteydessä CCS-ratkaisuja. Saksa, Espanja ja Italia eivät näe sinisellä vedyllä keskeistä roolia. Ranska on Euroopassa poikkeustapaus, koska sen energiantuotanto tukeutuu edelleen vahvasti ydinvoimaan. Ranskan osalta on ymmärrettävää, että vedyn tuotantoa elektrolyysillä ydinsähkön avulla suunnitellaan, vaikka EU-regulaation suhtautuminen vähäpäästöiseen (esimerkiksi ydinvoimalla tuotettuun) vetyyn sisältää epävarmuustekijöitä.

Useimmissa maissa halutaan kehittää vetyteknologiaa ja edistää teknologian vientiä. Erityisesti Saksa haluaa panostaa teknologiajohtajuuteen, mutta myös useat muut EU-maat (Ranska, Britannia, Tanska, Alankomaat) näkevät teknologiaan panostamisessa mahdollisuuksia. Teknologiaviennissä nähdään potentiaalia talouskasvuun sekä työllisyyden lisäämiseen.

Saksassa kotimaisen vedyn tuotanto ei riitä kattamaan vedyn tarvetta, joka syntyy Saksan teollisuuden valtavasta kysynnästä. Siksi vähäpäästöisen vedyn tuonnilla tulee olemaan keskeinen rooli Saksassa myös pidemmällä tähtäimellä.

Useat maat näkevät vedyn viennissä uusia mahdollisuuksia etenkin, jos maissa voidaan tuottaa vähäpäästöistä tai uusiutuvaa vetyä (nykyinen tuotantorakenne on suotuisa tai maantieteellinen sijainti luo hyvät edellytykset uusiutuvan energian tuotannolle). Tällainen maa on mm. Espanja, jolla on suuri aurinkosähkön tuotannon potentiaali. Tanskassa tuulिसähkön tuotannon lisääntyessä myös vedyn vienti voisi olla mahdollista. Vienti nähdään mahdollisuutena myös Iso-Britanniassa ja muissa rannikkomaissa. Tulevaisuudessa Iso-Britannian runsas merituulivoimapotentiaali sekä mahdollinen sinisen vedyn hyväksyminen voivat luoda vientimahdollisuuksia (OIES, 2021). Sama koskee Alankomaita, joka tullee olemaan yksi sinisen vedyn suurimmista tuottajamaista. Pohjois-Afrikasta voitaisiin tuoda paljon vetyä. Tähän liittyy kuitenkin paljon epävarmuustekijöitä. Yhteenveto maakohtaisista vetystrategioista ja -suunnitelmista on esitetty alla (ks. kuva 17).

Kuva 17. Yhteenvedo maakohtaisista vetystrategioista ja -suunnitelmista Euroopan maissa, jotka ovat asettaneet vedyntuotannolle kapasiteettitavoitteita vuoteen 2030 mennessä



Euroopassa odotetaan merkittäviä määriä investointipäätöksiä teollisen kokoluokan vetyprojekteista 2022–2024. Lyhyt yhteenveto valikoitujen maiden strategioista ja esimerkkejä julkaistuista kehitteillä olevista vetyprojekteista on esitetty alla.

4.1.1 Saksa, Hollanti ja Iso-Britannia

Saksa





Saksassa julkaistiin kansallinen vetystrategia vuonna 2020. Kansallisen strategian lisäksi Saksassa on laadittu myös alueellisia vetystrategioita. Saksan valtio panostaa puhtaaseen vetyyn, ja vain puhdas vety voi saada kansallisia tukia. Vetymarkkinan kehittymisen vauhdittamiseksi Saksa tarjoaa 7 mrd. EUR tukea vetyyn liittyviin hankkeisiin ja investointeihin. Lisäksi 2 mrd. EUR on käytettävissä kansainvälisiin yhteistyöhankkeisiin. Saksa on jo allekirjoittanut useita yhteistyösopimuksia eri valtioiden kanssa (mm. Saudi-Arabia, Australia, Chile, Namibia, Kanada, Ukraina, Marokko ja Arabiemiraatit). Tämän lisäksi myös vähäpäästöisellä vedyllä on rooli Saksan vetystrategiassa. Vähäpäästöistä vetyä voidaan tuoda Saksan teollisuuden ja liikennekäytön tarpeisiin ylimenovaiheessa.

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

Vetyinvestoinnit voisivat Saksan vetystrategian mukaan olla vaihtoehto sähkönsiirtoverkon rakentamiselle. Teollisuutta ja liikennekäyttöä tuetaan, ja etenkin teollisuus tulee hyötymään tuista. Tärkeimpiä teollisuuden sektoreita ovat kemianteollisuus sekä terästeollisuus. Energiaintensiiviselle teollisuudelle on olemassa investointitukia, jotka kohdistuvat pilottihankkeisiin sekä fossiilisesta teknologiasta ilmastoneutraaliin teknologiaan siirtymiseen liittyviin toimenpiteisiin. Puhtaan vedyn tuotannon tukemiseksi Saksassa on suunniteltu mm. Carbon-Contracts-for-Difference -tuotteiden käyttöönottoa, jolla edistetään teollisuuden investointeja vähähiilisiin ja hiilineutraaleihin ratkaisuihin sekä varmistetaan teollisuuden kansainvälinen kilpailukyky.

Saksalla on kansallinen innovaatio-ohjelma polttokennoteknologialle (National Innovation programme for Fuel cell technology, NIP). Tämän lisäksi tukea on varattu 0,9 mrd. EUR kaupallisessa käytössä oleville ajoneuvoille ja 0,6 mrd. EUR mm. ilmastoystävällisten linja-autojen hankkimiseen. Vetytankkausasemien lukumäärän ennustetaan lisääntyvän voimakkaasti. Tavoitteena on nostaa määrä 400 tankkausasemaan vuoteen 2025 ja 1000:een vuoteen 2030 mennessä.

Taulukko 2. Valikoituja suuria vetyprojekteja Saksassa

Projekti	Vaihe	Vedyn tyyppi	Sijainti	Tavoitteet	Kumppanit
HYBRIDGE		Puhdas	Emsland, Saksa	<ul style="list-style-type: none"> • 100 MW elektrolyysilaitos uusiutuvan vedyn tuotantoon • Vetyputki läheiselle 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 elektrolyyserikapasiteetilla tuulivoimalla • Investointipäätös 2022 • Kaupallinen käyttöönotto 2024 • BP pitkäaikaissuunnitelma 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 elektrolyyseri (100 MW) & energiapuisto Bad Lauchstädt (40 MW) • Käyttöönotto 2024 • Loppukäyttäjänä paikallinen kemiateollisuus 	Siemens, Linde AG, VNG Gasspeicher GmbH, ONTRAS Gastransport GmbH, Terrawatt Planungsgesellschaft GmbH, DBI Gastecnologisches Institut gGmbH Freiberg, Uniper, 50Hertz Transmission GmbH, Fraunhofer Institute for Microstructure of Materials and Systems IMWS



Esiselvitys



Konseptisuunnittelu



Investointipäätös



Rakentaminen



Kaupallinen toiminta

Saksa on puhtaan vedyn tuotantoprojektien johtava maa projektimäärissä ja julkisella rahoituksella mitattuna. Saksa ilmoitti 28.5.2021 tukevansa 62 vetyprojektia IPCEI-mekanismin kautta. Tähän varattu julkisen rahoituksen määrä on yhteensä 8 mrd. EUR. Hankkeiden toivotaan johtavan yhteensä 33 mrd. EUR kokonaisinvestointeihin. Valinta tehtiin kaikkiaan 230 projektin joukosta, jotka edustivat vetyarvoketjun kaikkia osia, ja joiden yhteenlaskettu elektrolyyserikapasiteetti ylittää 2 GW. Esimerkiksi kaikki Saksan terästeollisuuden yritykset ovat hakeneet rahoitusta projekteilleen. Lyhytlistattuja projekteja ovat mm. RWE:n Lingen (300 MW), Rostock (100 MW) ja Heligoland (28 MW), sekä Vattenfallin Hamburg-Moorburg (100 MW). Valikoituja julkisuudessa esitettyjä projekteja on esitetty alla (ks. taulukko 2).

Alankomaat







Alankomailla on vetystrategia liittyen Alankomaiden tavoitteeseen vähentää päästöjään 49 % vuoteen 2030 ja 95 % vuoteen 2050 mennessä vuoden 1990 lähtötasosta.

Alankomaiden ilmastopimuksessa todetaan, että tarkoituksena on keskittyä puhtaaseen vetyyn pääosin elektrolyysiä hyödyntämällä, mutta myös kestäviä biogeenisiä raaka-aineita hyödyntäen. Ilmastopimuksessa tunnistetaan vähähiilisen sinisen vedyn rooli, mutta se ei strategian mukaan saisi rajoittaa puhtaan vedyn tuotannon kasvua. Alankomailla on erityinen etulyöntiasema muihin EU-maihin verrattuna, koska sillä on rinnakkaisia maakaasuverkkoja. Yhdessä verkossa siirretään matalan lämpöarvon kaasua (L-kaasua) pääasiassa Groningenin kentältä ja toisessa muista kohteista peräisin olevaa korkeamman lämpöarvon kaasua (K-kaasua). Osaa kahdennetuista verkoista voitaisiin mahdollisesti hyödyntää vedyn siirtämiseen.

Hallitus suunnittelee kannustumia kaasunsiirtoverkonhaltija Gasunielle, jotta se kehittäisi vetyinfrastruktuuria. Yksityiskohtaisia mekanismeja tämän toteuttamiseksi ei vielä ole esitetty. Harkinnassa on myös suurempien vetymäärien sekoittaminen nykyiseen kaasuverkoon. Vetyä koskevaa erityislainsäädäntöä ei kuitenkaan vielä ole.

Marraskuussa 2020 julkaistussa Pohjois-Alankomaiden investointisuunnitelmassa esitettiin lähivuosien keskeisiä politiikkatoimia vetysiirtymän toteuttamiseksi. Mahdollisina tukitoimina esitettiin valtiontukia vedyn tuotannolle, kriittisen infrastruktuurin (siirtoinfrastruktuuri ja varastointi) kehittämiseksi sekä puhtaan vedyn loppukäytölle.

Taulukko 3. Valikoituja suuria vetyprojekteja Alankomaissa

Projekti	Vaihe	Vedyn tyyppi	Sijainti	Tavoitteet	Kumppanit
Magnum		Vähähiilinen	Eemshaven, Alankomaat	<ul style="list-style-type: none"> Maakaasun höyryreformointi ja CCS Kaasuvoimalaitoksen konversio vetykäyttöiseksi CCGT: 3X440 MW (3 turbiinia), 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 elektrolyyserikapasiteettia vedyntuotantoon 35 000 t/vuosi käytettäväksi öljynjalostukseen 	Port of Rotterdam, BP, Nouryon
Hydrogen Delta		Puhdas / vähähiilinen	Zeelannialue, Alankomaat	<ul style="list-style-type: none"> Uusiutuvan vedyn tuotanto 2025: 100 MW elektrolyyserilaitospilotti 2030: 1 GW elektrolyyserikapasiteetti Alkuvaiheessa käytettäisiin vähähiilistä vetyä 	ArcelorMittal, Dow Benelux B.V., Engie, Fluxys, Gasunie, ICL-IP, ImpulsZeeland, Nederlands Ministerie van Economische Zaken & Klimaat, North SeaPort, Orsted, Provincie Oost-Vlaanderen, Provincie Zeeland, Smart delta Resources, Yara Sluiskil, Zeeland Refinery
North2		Puhdas	Eemshaven, Netherlands	<ul style="list-style-type: none"> Uusiutuva vety offshore-tuulivoimalla Maakaasuinfra uudelleenkäyttö Ensimmäiset tuuliturbiinit valmiina vedyntuotantoon 2027 10 GW tuulivoimaa, jolla vetyä 800 ktH2/vuosi 	Shell, Gasunie, Groningen Seaports
H2ermes		Puhdas	IJmuiden, Alankomaat	<ul style="list-style-type: none"> Fossiilittoman teräksen tuotanto tuulivoimalla tuotetulla vedyllä Investointipäätös vuoden 2021 aikana 2024: 100 MW elektrolyyserikapasiteettia (15 kt per vuosi) 	Tata Steel, Nouryon, Port of Amsterdam



Esiselvitys



Konseptisuunnittelu



Investointipäätös



Rakentaminen



Kaupallinen toiminta

Euroopan komissio hyväksyi vuonna 2020 Alankomaiden kansalliset säännöt 30 mrd. EUR valtiontukien jakamiseen kasviuonekaasupäästöjen alentamiseen tähtääville projekteille (nk. SDE++ suunnitelma), joka sisältää myös vedyntuotantohankkeet. Tukea ohjataan huu- tokauppamekanismia käyttäen uusiutuvan energian tuotantoon, yhteistuotantoon, teol- lisuuden ylijäämälämmön talteenottoon ja lämpöpumppuihin, teollisuuden sähköistämiseen, teollisuusprosessien hiilidioksidin talteenottoon ja varastointiin sekä vedyntuotan- toon. Kansallisen vetyohjelman yhteydessä on julkaistu joidenkin julkista tukea saaneiden projektien tietoja. Alankomaissa vety-IPCEI-prosessiin on päässyt noin 60 projektia kesään 2021 mennessä (NWP, 2021). Hydrogen Delta hanke tunnetaan myös nimellä SeaH2Land ja se ulottuu Alankomaista Belgian Gentiin. Valikoituja julkisuudessa esitettyjä projekteja on esitetty alla (ks. edellisellä sivulla taulukko 3).

Iso-Britannia

Iso-Britannia julkisti kansallisen vetystrategiansa elokuussa 2021. Strategiaan liittyvä kuu- leminen päättyi lokakuussa 2021 ja vuoden 2022 alkuun on suunniteltu vetysektorin toi- mintasuunnitelman julkistaminen (Hydrogen Sector Action Plan). Jo tätä edeltäneessä pääministerin 10 kohdan suunnitelmassa vuonna 2020 asetettiin vedylle tavoitteeksi 5 GW tuotantokapasiteetti vuoteen 2030 mennessä. Vetystrategiassa asetetaan tavoitteeksi edis- tää sekä tarjontaa että kysyntää. Toisin kuin muissa EU maissa, tarkoituksena on tukea sekä sinistä vetyä (tuotettu maakaasusta käyttämällä hiilen talteenottoa ja varastointia) että puhdasta vetyä (tuotettu uusiutuvista energialähteistä).

Tiekartassa oletetaan, että vetyhankkeet ovat 2020 luvun alkupuolella verrattain pieniä, kokoluokaltaan n. 20 MW, elektrolyyseriprojekteja, jotka ovat kytköksessä paikallisiin kul- jetus- ja teollisuuskeskittyymiin. 100 MW:n elektrolyyseriprojekteja voisi käynnistyä 2020 luvun puoliväliin mennessä. Ensimmäiset sinisen vedyn tuotantolaitokset, jotka tukisivat vedyn laajempaa käyttöä, käynnistyisivät niin ikään 2020 luvun puolivälissä (mm. vedyn lämpöpilotit ja vetysekoituksen siirto kaasuverkossa). Tiekartassa oletetaan, että sinisen vedyn suuremman, yli 500 MW mittakaavan, tuotantolaitoksia rakennettaisiin vuosikym- menen loppupuolella.

Vedyn siirtoinfrastruktuurin oletetaan kehittyvän teollisuusklustereissa tai niiden lähellä. 2030 luvun puolivälissä arvioidaan, että maassa voisi olla kymmeniä tai satoja kilometrejä vetyverkkoa. Siinä vaiheessa voisi arvion mukaan syntyä myös ammoniakkin kysyntää laiva- liikenteessä. Vasta lähemmäs 2050 ennakoidaan, että siirtoverkosto voisi olla jossain mää- rin kansallisesti kattava.

Vuoteen 2030 mennessä vähähiilisen vedyn kysyntä teollisuudessa voisi olla noin 10 TWh vuodessa, jos tarjonta rajoittuu klustereihin ja jopa noin 20 TWh vuodessa, jos vetyä voi- daan käyttää myös klustereiden ulkopuolella. Vähähiilisen vedyn teollisen kysynnän

tulisi olla 45 TWh vuoteen 2035 mennessä, jotta kansalliset vähähiilisyystavoitteet saavutettaisiin.

Vuoteen 2030 mennessä vetyä voisi olla käytössä raskaassa liikenteessä, linja-autoissa ja junissa. Alkuvaiheen käyttöä voisi esiintyä kaupallisessa merenkulussa ja lentoliikenteessä. Vähähiilisen vedyn kysynnän ennakoidaan olevan jopa 6 TWh. Vedyn roolin odotetaan kasvavan ilmailussa ja merenkulussa pitkällä aikavälillä. Britannian ilmastotavoitteiden saavuttaminen 2035 edellyttäisi n. 20–45 TWh kysyntää liikennesektorilla.

Vedylle esitetään uudentyyppistä tukimekanismia ("Hydrogen Business Model"), jolla tuetaisiin tuotantoa ja kysyntää vuoden 2023 alusta alkaen. Harkinnassa on kolme vaihtoehtoa tukimallia hintariskin hallitsemiseksi: kiinteä hinta, hintapremio sekä vaihteleva hintapremio, jossa premio muodostuisi referenssihinnan ja markkina- tai kauppahinnan erotuksesta. Tämänhetkinen ajatus on, että vaihteleva premio olisi toimivin ratkaisu tukien tarpeen vähentyessä ajan myötä. Yhdessä esitettyssä vaihtoehdossa myyntihintaa käytettäisiin referenssihintana ja pohjahintana olisi maakaasun markkinahinta. Volyymiriskin hallintaan on puolestaan hahmoteltu viittä vaihtoehtoa, esimerkkeinä saatavuusmaksut ja julkisen sektorin minimiostotakuu. Valtio suosii mahdollisesti liukuvaa tukimallia, joka tarjoaisi korkeamman tuen alkuajan tuotannolle, mikä kattaisi osin kiinteitä investointikuluja. Tuen määrä laskisi, kun tuotantovolyymit ja myynti kasvavat.





Vetysektoria tuetaan erilaisilla rahoitusmekanismeilla. Net Zero Innovation Portfolio on 1 miljardin punnan rahasto, joka keskittyy vähähiilisten teknologioiden, järjestelmien ja liiketoimintamallien kaupallistamiseen. Net Zero Hydrogen Fund (NZHF) on 240 miljoonan punnan pääoma-avustusohjelma, jonka tavoitteena on vähentää vähähiilisen vedyn tuotannon investointien riskejä. NZHF tukee useita tuotantoteknologioita mukaan lukien puhdas ja vähähiilinen vety.

Iso-Britanniaan on perustettu kansallinen Hydrogen Advisory Council, jonka tavoitteena on suunnata vetytoimialan kehitystä.

Vähähiilisen vedyn standardin on määrä valmistua vuoden 2022 alussa. Sääntelyjärjestelmän meneillään oleva laajempi tarkastelu tukee myös standardin kehittämistä.

Iso-Britanniassa on käynnistetty noin 12 teollisen mittakaavan hanketta, joissa tähdätään vedyn tuotantoon maakaasusta ja hiilidioksidin talteenottoon ja varastointiin Pohjanmerelle sekä uusiutuvan vedyn tuotantoon tuulivoimalla. Iso-Britanniassa projekteja on tällä hetkellä kehitteillä tuotantokapasiteetiltaan yhteensä 18 GW vuoteen 2037 mennessä. Valikoituja julkisuudessa esitettyjä projekteja on esitetty alla (ks. taulukko 4).

Taulukko 4. Valikoituja suuria vetyprojekteja Iso-Britanniassa

Projekti	Vaihe	Vedyn tyyppi	Sijainti	Tavoitteet	Kumppanit
H2 Teesside		Vähähiilinen	Teesside, UK	<ul style="list-style-type: none"> 1 GW vähähiilistä 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 vähähiilistä vetyä CCUS-laitos Hiilidioksidin kuljettaminen Pohjanmerelle 	PaleBlueDotEnergy, Chrysaor, Shell, Total
H2H Saltend		Vähähiilinen	Humber, UK	<ul style="list-style-type: none"> Maakaasusta vähähiilistä 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 vähähiilistä 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



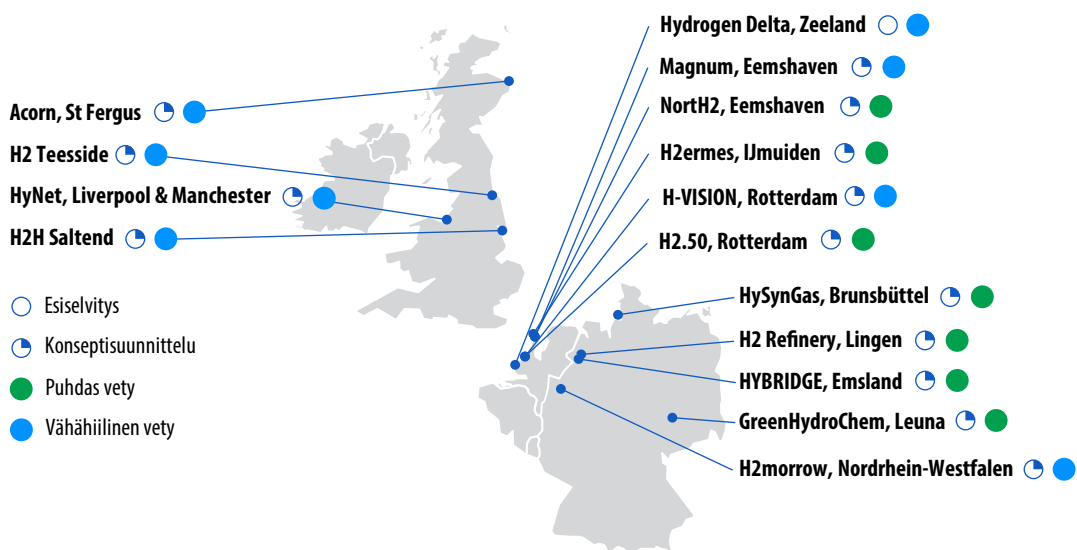
Rakentaminen



Kaupallinen toiminta

Alla on esitetty yhteenveto edellä esitetystä vetyprojekteista eri maissa karttakuvana (ks. kuva 18).

Kuva 18. Esimerkkejä suurista vedyntuotantoprojekteista Alankomaissa, Iso-Britanniassa ja Saksassa



4.1.2 Ranska, Portugali, Espanja ja Italia




Ranska

Ranska julkaisi kansallisen vetystrategian vuonna 2018. Strategiaa on uudistettu myöhemmin osana COVID-19-elvytyssuunnitelmaa. Strategia koskee sekä puhdasta että vähäpäästöistä vetyä. Ranskan tavoitteena on kehittyä vetyteknologian johtavaksi maaksi.


Strategialla tuetaan vedyntuotantoa ja teknologioiden kehittämistä. Investointitukea on tarjolla 7 mrd. EUR 2030 mennessä. Noin puolet tuesta myönnetään vuoteen 2023 mennessä ja se allokoidaan teollisuuteen (54 prosenttia), liikenteeseen ja kaupan alalle (27 prosenttia) sekä tutkimukseen ja kehitykseen (19 prosenttia). Lämmityssektoria ei tueta.


Elektrolyysikapasiteetille on asetettu n. 6,5 GW tavoite vuoteen 2030 mennessä. Myös ydinvoima hyväksytään energianlähteeksi. Vetystrategiassa tavoitellaan yhteistyötä muun muassa Saksan kanssa.

Taulukko 5. Valikoituja suuria vetyprojekteja Ranskassa


Projekti	Vaihe	Vedyn tyyppi	Sijainti	Tavoitteet	Kumppanit
La Mèdegreen H2		Puhdas	Châteauneuf-les-Martigues, Bouches-du-Rhone	<ul style="list-style-type: none"> • Uusiutuvan vedyn tuotanto aurinkovoimalla (>100 MW) • 40 MW elektrolyyserikapasiteettia, 5 tH₂/d vetyä biopolttoaineiden valmistukseen Totalin La Mède-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 varastoimalla suolaesiintymiin ja 130 MW elektrolyyserikapasiteettivuonna 2024 • Elektrolyyserikapasiteetti 435 MW (10,44 ktH₂/vuosi) 2027 	Engie, Air Liquide, DLVA
H2V Normandy		Puhdas ja vähähiilinen	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

Ranskan vetystrategiassa asetetaan tavoitteita teollisuuden ja liikenteen vedyn käytölle. Keskeisenä tavoitteena on korvata teollisuuden fossiilinen vety vähäpäästöisellä vedyllä. Vuoteen 2023 mennessä 10 prosenttia nykyisestä fossiilisesta vedystä (noin 90 tuhatta tonnia vuodessa) korvattaisiin vähähiilillä vedyllä ja vuonna 2028 osuus nousisi 20–40 prosenttiin (180–360 tuhatta tonnia vuodessa).

Strategian toisena painopistealueena on liikenne. Tavoitteet ovat kunnianhimoisia etenkin raskaalle liikenteelle. Polttokennoautoille (FCEV) on asetettu tavoitteeksi, että ajoneuvojen määrä olisi 5 000 vuoteen 2023 mennessä ja 20 000–50 000 vuoteen 2028 mennessä. Polttokennorekkojen lukumäärätavoite on 200 rekkaa vuonna 2023 ja 800–2000 rekkaa vuonna 2028. Liikenteen vedynjakelussa tavoitteena on 100 tankkausasemaa vuonna 2023 ja 400–1 000 tankkausasemaa vuonna 2028. Tukea myönnettäisiin etenkin vakioireiteillä liikkuville ajoneuvoille kuten pakettiautoille, linja-autoille sekä jäteautoille (OIES, 2021).

Ranskassa projektikehitys on erittäin vilkasta. Keskeisiä suuria hankkeita on esitelty edellisellä sivulla (ks. taulukko 5). Tämän lisäksi suuria hankkeita ovat mm. GRHYD ja VHyGO.







Espanja

Espanja julkaisi vetytiekartan vuonna 2020 keskittyen puhtaan vedyn tuotantoon. Tavoitteiden toteuttaminen vaatii arviolta 8,9 mrd. EUR investoinnit, josta noin 1,5 mrd. EUR allokoidaan EU:n elvytysrahastosta. Espanjalla on valtava aurinkovoiman tuotantopotentiaali useimpiin muihin Euroopan maihin verrattuna. Tavoitteena onkin puhtaan vedyn vienti pidemmällä tähtäimellä.

Espanja tavoittelee vähintään 4 GW elektrolyyserikapasiteettia vuoteen 2030 mennessä, josta 300–600 MW toteutuisi vuoteen 2024 mennessä. Suurimmat mahdollisuudet vedyn hyödyntämiseen nähdään teollisuudessa ja liikenteessä. Puhtaan vedyn osuudeksi teollisuudessa tavoitellaan 25 prosenttia vuoteen 2030 mennessä. Liikenteessä tavoitellaan 5000–7500 vetyajoneuvoa kevyessä ja raskaassa tavaraliikenteessä sekä 150–600 valtion linja-autoa samalla aikajänteellä. Lisäksi panostettaisiin vetyuniin ja vetyä hyödynnettäisiin myös satamissa ja lentokentillä. Tankkausverkostossa olisi 100–150 tankkausasemaa vuoteen 2030 mennessä. Pitkällä tähtäimellä aiotaan hyödyntää maan hyviä mahdollisuuksia vedyn maanalaiseen varastointiin. Suunnitelmassa on lähes 60 toimenpidettä, joilla vetytaloutta halutaan edistää.

Osa julkisesta tuesta on tarkoitus kohdistaa vetylaaksoihin, joissa puhdasta vetyä tuotettaisiin lähellä teollisuutta. Myös vedyn siirtoon ja varastointiin aiotaan panostaa mm. rahoittamalla pilottihankkeita. Espanjassa on kehitteillä suuria vedyntuotantohankkeita (ks. taulukko 6 alla). Yksin Endesalla on kehitteillä 23 vedyntuotantoprojektia, joiden yhteenlaskettu investointikustannus nousee yli 2,9 mrd. euroon.

Taulukko 6. Valikoituja suuria vetyprojekteja Espanjassa

Projekti	Vaihe	Vedyn tyyppi	Sijainti	Tavoitteet	Kumppanit	Investointikustannus (kuten ilmoitettu)
As Pontes		Puhdas	As Pontes, Espanja	<ul style="list-style-type: none"> Elektrolyyserikapasiteetti 100 MW ja tuulivoimaa 611 MW 	Endesa	738 MEUR
Huelva		Puhdas	Huelva, Espanja	<ul style="list-style-type: none"> Elektrolyyserikapasiteetti 100 MW ja aurinkovoimaa 430 MW 	Endesa	413 MEUR
Teruel		Puhdas	Teruel, Espanja	<ul style="list-style-type: none"> Elektrolyyserikapasiteetti 60 MW ja tuuli- ja aurinkovoimaa 335 MW 	Endesa	294 MEUR
La Robla		Puhdas	Leon, Espanja	<ul style="list-style-type: none"> Elektrolyyserikapasiteetti 32MW, aurinkovoima 150W Vedyn varastointi 12 tH₂ per päivä Vety tuotettaisiin vientiin 	Enagas	266 MEUR
Hidrógeno Verde Puertollano		Puhdas	Puertollano, Espanja	<ul style="list-style-type: none"> Uusiutuva vety ammoniakin tuotantoon 100 MW aurinkovoimaa, 20MWh litium-ioninakku sähkön varastointiin ja 20 MW elektrolyyserikapasiteettia vedyn tuotantoon 720 t per vuosi 	Iberdrola, Fertiberia	150 MEUR
ORANGE.BAT		Puhdas	Castellón, Spain	<ul style="list-style-type: none"> Elektrolyyserikapasiteetti 100 MW perustuen uusiutuvaan sähkөөn. Vety hyödynnetään keramiikan valmistukseen 	ETRA, Smatenergy, Sunfire, Enel Green Power	



Esiselvitys



Konseptisuunnittelu



Investointipäätös



Rakentaminen



Kaupallinen toiminta

Taulukko 7. Portugalin lippulaivaprojekti

Projekti	Vaihe	Vedyn tyyppi	Sijainti	Tavoitteet	Kumppanit
Green Flamingo		Puhdas	Sines, Portugali	<ul style="list-style-type: none"> Uusiutuvan vedyn tuotanto tuuli- ja aurinkovoimalla Vedyn tuotannon aloittaminen 2023 1 GW elektrolyyserikapasiteettia (465 ktH₂ per vuosi) vuoteen 2030 mennessä 	REN, Vestas, ABNAMRO, H2B2, Vopak, Anthony Veder

Taulukko 8. Italiassa ei toistaiseksi ole julkaistu tietoja suurista hankkeista

Projekti	Vaihe	Vedyn tyyppi	Sijainti	Tavoitteet	Kumppanit
Sarasin jalostamo		Puhdas	Saras, Sardinia	<ul style="list-style-type: none"> 20 MW elektrolyyseripilotti uusiutuvaan sähköön perustuen Sarasin öljynjalostamolla 	Enel Green Power, Saras
Enin jalostamot		Puhdas	Ei julkaistu	<ul style="list-style-type: none"> 20 MW elektrolyyserikapasiteettia pilottina Enin öljynjalostamoilla Italiassa alkaen 2022–2023 	Enel, Eni
5 suurta kehitysprojektia		Puhdas	Ei julkaistu	<ul style="list-style-type: none"> Kumppanuussopimus viiden vetyprojektin kehittämistä Italiassa ja Välimeren alueella 	Enel, Eni

Esiselvitys

Konseptisuunnittelu

Investointipäätös

Rakentaminen

Kaupallinen toiminta

Portugali

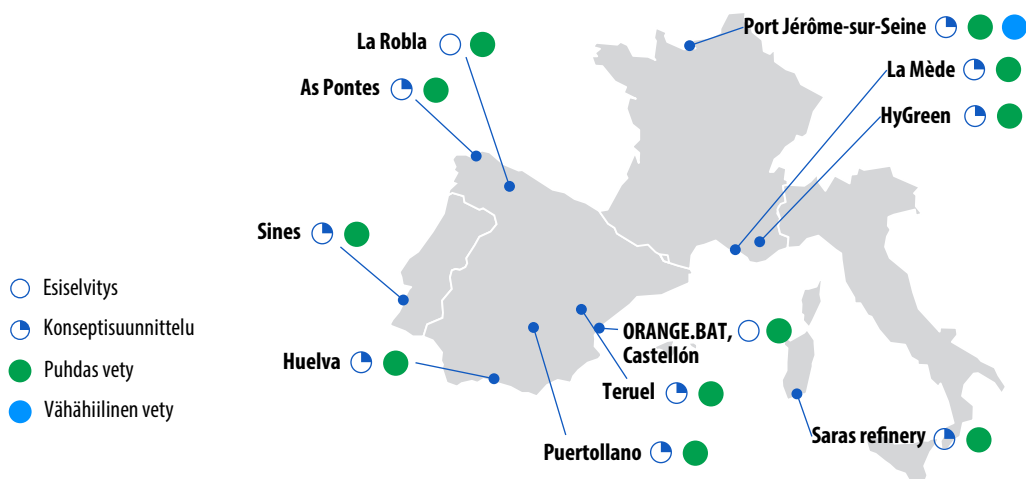
Portugalin kansallisessa vetystrategiassa on asetettu tavoitteeksi 7 mrd. EUR investoinnit vetyprojekteihin, joista 900 milj. EUR perustuisi julkisiin tukiin. Tavoitteena on rakentaa 2 GW elektrolyysikapasiteettia vuoteen 2030 mennessä. Portugali on valinnut 37 vetyprojektia IPCEI-salkkuunsa, mutta toistaiseksi tietoja on julkaistu vain lippulaivaprojektista Sinesissä, jonka arvioitu investointikustannus olisi 1,5 mrd. EUR (ks. taulukko 7 edellisellä sivulla). Portugalin suurimmat energiayhtiöt EDP ja Galpa ilmoittivat vetäytyvänsä hankkeesta kesäkuussa 2021. Julkisuudessa on ilmoitettu maassa olevan kehitteillä ainakin kahdeksan suurta projektia, joiden yhteenlaskettu investointikustannus nousisi yli 10 mrd. euroon.

Italia

Italia on julkaissut kunnianhimoisen vetystrategian, jonka tavoitteena on 20 % energian loppukäytöstä vedyllä vuoteen 2050 mennessä. Italia on asettanut tavoitteekseen rakentaa 3 GW elektrolyysikapasiteettia vuoteen 2030 mennessä. Tämän arvioidaan vaativan noin 10 mrd. EUR investoinnit. Vety nähdään raskaan teollisuuden raaka-aineena, pitkän matkan rekkaliikenteen ja junien polttoaineena sekä maakaasun korvaajana energiantuotannossa. Mahdollisuutena nähdään, että Italia voisi toimia Euroopan ja Pohjois-Afrikan yhdistävänä vetyhubina. Toistaiseksi suurista vetyhankkeista ei ole tiedotettu yksityiskohtia julkisesti (ks. taulukko 8 edellisellä sivulla). Puglian alueelle on kuitenkin kehitteillä vetylaaksohanke, jossa kumppaneina ovat Edison ja kaasunsiirtoverkonhaltija Snam.

Yhteenvedo Ranskan, Espanjan, Italian ja Portugalin vetyprojekteista on esitetty alla (ks. kuva 19).

Kuva 19. Yhteenvedo Ranskan, Espanjan, Italian ja Portugalin vetyprojekteista



4.1.3 Ruotsi, Norja ja Tanska

Ruotsi

Ruotsin ilmastopolitiikan toimintasuunnitelmassa todetaan, että vedyllä voi olla tulevaisuudessa nykyistä suurempi rooli. Vety sisältyy hallituksen sähköistymisstrategiaan ja vetytalouden edistäminen kuuluu Ruotsin sähköistämiskomission vastuualueelle. Ruotsin kansallinen vety- ja sähköpolttoainestrategia valmistui marraskuussa 2021 (Energimyndigheten, 2021).

Vetystrategiassa arvioidaan vedyn, sähköpolttoaineiden ja ammoniakkin tuotanto-, varastointi- ja loppukäyttöpotentiaali lyhyellä, keskipitkällä sekä pitkällä aikavälillä. Strategiassa otetaan huomioon lähtökohdat sekä tekniset ja taloudelliset mahdollisuudet hyödyntää vetyä energiavarastona, mikä lisäisi energiajärjestelmän joustavuutta. Lisäksi strategiassa tunnistetaan vedyn hyödyntämisen esteet, arvioidaan alustavasti, kuinka toteuttamiskelpoisia ehdotuksia voidaan edistää, sekä tunnistetaan mahdollisuuksia kansainväliseen yhteistyöhön muiden eurooppalaisten toimijoiden kanssa.

Strategiassa on päätetty luoda edellytykset vähintään 5 GW elektrolyyserikapasiteetille vuoteen 2030 mennessä, millä tavoitellaan 3–6 prosentin päästövähennemää Ruotsissa. Kapasiteettia lisättäisiin vielä 10 GW:lla vuoteen 2045 mennessä.

Tavoitteiden saavuttaminen vuoteen 2030 mennessä johtaisi arviolta 60 TWh sähkön lisätarpeeseen olettaen, että vety tuotetaan kilpailukykyisillä sähköhinnoilla. Vuoden 2045 tavoitteesta seuraisi 126 TWh vuosittainen sähkön lisätarve.

Ruotsissa suositaan puhdasta vetyä, jota haluttaisiin käyttää siellä, missä se tuottaa eniten hyötyä. Ensisijaisesti kyse on siis kohteista, joihin muut energiatehokkaammat menetelmät eivät sovellu teknisistä, taloudellisista tai kestävyysliittyvistä syistä. Lisäksi yhtenä tärkeänä tavoitteena on tuoda joustoa energiajärjestelmään sekä joustavan tuotannon että joustavan kulutuksen muodossa. Resurssitehokkuutta voidaan strategian mukaan parantaa sektori-integraatiolla sekä hyödyntämällä sivuvirtoja (lämpö, happi ja vedyn yli-tuotanto), mikä parantaa samalla hyötysuhdetta.

Puhdasta vetyä käytettäisiin pääosin teollisuudessa, raskaassa liikenteessä ja energiasektorilla. Suurin osa Ruotsissa nykyisin käytetystä vedystä (noin 6 TWh/a) käytetään teollisuudessa, pääasiassa öljynjalostuksessa. Vetyä käytettäisiin teollisissa keskittymissä lähellä tuotantolaitoksia. Strategiassa mainitaan, että öljynjalostuksessa ja muussa teollisuudessa sähkön siirtorajoitteet voivat alussa rajoittaa puhtaan vedyn käyttömahdollisuuksia, jolloin osa teollisuudesta joutuu tukeutumaan hiilidioksidin talteenotto- ja varastointiteknologioihin. Strategiassa esitettyjen analyysien mukaan Ruotsin tuotantokustannukset ovat Euroopan alhaisimpia ja fossiiliton vety tulisi terästeollisuudessa kilpailukykyiseksi noin 100 euro/tonni päästöoikeuden hintatasolla.

Strategiassa esitetään, että fossiilivapaalle vedylle, sähköpolttoaineille ja ammoniakille kehittyvät uusia arvoketjuja aikavälillä 2030–2045, jos puhtaan sähkön saatavuus ja muut ehdot (sähkön siirtokapasiteetti) täyttyvät. Siirtymä puhtaaseen vetyyn etenee terästeollisuudessa, kemianteollisuudessa sekä öljynjalostuksessa. Liikennekäyttö laajenee, ja vetyä käytetään mahdollisesti ainakin raskaassa liikenteessä sekä työkoneissa, ehkä muillakin sektoreilla. Merenkulun ja lentoliikenteen päästöjen vähentämisen tavoitteet lisäävät päästöttömien polttoaineiden (vety tai sähköpolttoaineet) kysyntää, mikä saattaa johtaa lisääntyneeseen elektrolyyserikapasiteetin tarpeeseen.

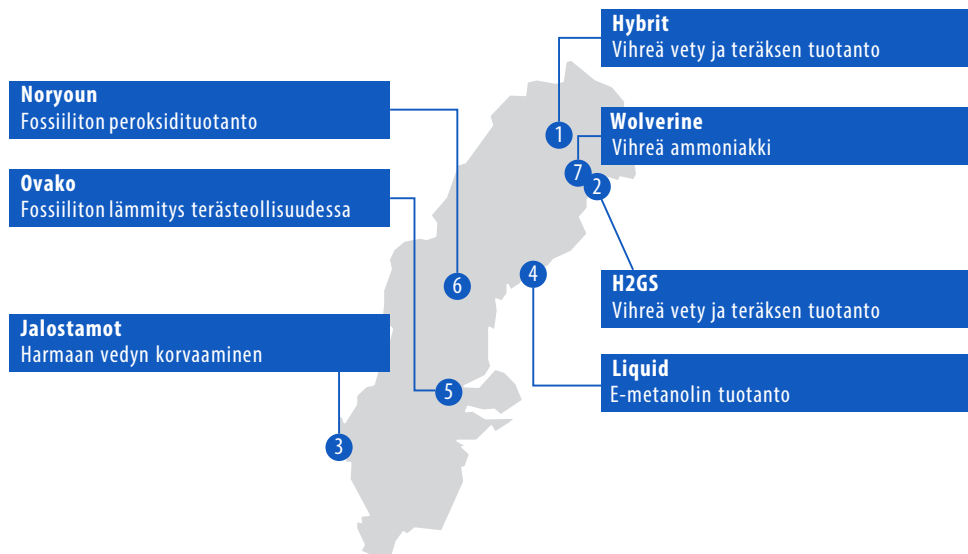
Ruotsin maakaasun siirtoverkko rajoittuu Ruotsin länsirannikolle. Suunnitelmissa ei ole hyödyntää sitä vedyn kuljetukseen. Strategiassa korostetaan, että on tärkeää huomioida, miten vedyn kysyntä kehittyi Ruotsin teollisuudessa sekä Ruotsin ja naapurimaiden teollisuusklusterien välillä. Lisäksi Euroopan laajuinen kehitys vaikuttaa siihen, millaisia siirtomenetelmiä tarvitaan ja miten vetyä mahdollisesti varastoidaan tarkoituksenmukaisesti. Strategiassa ennakoitaan, että vedynsiirtoinfrastruktuuria saattaa kehittyä täydentämään nykyistä energiainfrastruktuuria, mutta tarkkoja tavoitteita ei esitetä. Fossilfritt Sverige suosittelee omassa selvityksessään, että tuotanto ja kulutus sijaitsisivat samalla alueella sen sijaan, että vetyä tuotettaisiin keskitetysti ja siirrettäisiin kulutuskeskitymiin.

Strategiassa korostetaan, että vedyn, sähköpolttoaineiden ja ammoniakkin vientimahdollisuuksia tulisi arvioida jatkuvasti.

Ruotsin energiavirasto tukee vetytalouden kehittymistä vetyyn liittyvää tutkimustoimintaa tukemalla sekä erilaisilla teollisuuden suuntautuvilla toimenpiteillä. Industriklivetin kautta on mahdollista saada tukea teollisuuden pilottihankkeisiin. Klimatpremiin kautta voi saada rahoitusta esimerkiksi polttokennoajoneuvoihin liittyviin investointeihin. Tankkausinfrastruktuurin kehittämiseksi hallitus esittänyt hieman yli miljardin kruunun kohdentamisen alueellisille raskaan liikenteen sähköistyspiloteille vuosina 2021–2022. Sähköistyspilotteihin sisältyisi myös vedyn tankkausinfrastruktuurin kehittäminen. Valtiontukien jakaminen vety-IPCEI:n puitteissa nähdään mahdolliseksi. Ruotsissa on lukuisia muitakin tukia, joita voidaan hyödyntää vetytalouden kehittämisessä mm. liikennesektorilla. Vetystrategiassa ei ole suoraan esitetty uusia tukimekanismeja vedyn tuotannolle, vaan viitataan sen sijaan tarpeeseen selvittää asiaa.

Yhteenveto Ruotsin vetyprojekteista on esitetty alla kuvassa 20.

Kuva 20. Ruotsin kehitteillä olevia vetyhankkeita, joista on tiedotettu julkisesti



Norja

Norjan kansallisessa vetystrategiassa (2020) kuvataan vedyn mahdollisuuksia sekä määrittellään sektorit, joihin jatkossa panostetaan. Kesäkuussa 2021 julkaistiin tämän lisäksi vetytiekartta. Strategiassa ja tiekartassa ei esitetä varsinaisia tavoitteita elektrolyysikapasiteetille, vaan vetyä ja vetyteknologioita tarkastellaan teknologianeutraalisti.

Norja toimittaa nykyisin noin 20–25 % Euroopan maakaasusta. Maan 40,5 GW:n sähkön tuotantokapasiteetista 84 % koostuu vesivoimatuotannosta. Lisäksi 10 % kapasiteetista on maatuulivoimaa. Tämä tarjoaa hyvät mahdollisuudet puhtaan vedyn tuotannolle, minkä lisäksi Norjan maantieteellinen sijainti ja kaasuresurssit tarjoavat edellytyksiä sinisen vedyn tuotannolle ja hiilidioksidin varastoinnille.

Teknologiajohtajuus meriliikenteen vedyssä on tärkeää Norjalle. Norjassa selvitetään vedyn hyödyntämismahdollisuuksia lautta- ja meriliikenteessä. Vetytiekartassa mainitaan, että Norjassa tullaan käyttämään aktiivisesti myös kansallisia hankintoja erilaisten vähäpäästöisten teknologioiden kaupallisen hyödyntämisen vauhdittamiseen (esimerkiksi sähkölautat ja edellä mainittu vetyalus). Rakenteilla on jo yksi valtiontukea saanut vetylaiva.

Meriliikenteelle perustetaan viisi vetyhubia vuoteen 2030 mennessä, ja tavoitteena on kahden teollisuushankeen käynnistäminen vuoteen 2025 mennessä. Lisäksi viidestä kymmeneen pilottihankkeen katsotaan tukevan kustannustehokkaita vetyratkaisuja ja teknologioita. Sen sijaan vedyn hyödyntäminen osana energiajärjestelmää ei kiinnosta Norjaa. Tämän selittää joustava vesivoima, jonka erinomaisten säätöominaisuuksien ansiosta vetyä ei tarvita tuomaan lisäjoustoja.

Vientiin liittyvät tavoitteet täsmentyivät hieman tiekartassa. Yhtenä tavoitteena mainitaan tarve positoida Norja Euroopan vetymarkkinoilla vuoteen 2030 mennessä. Erityisesti mainitaan Saksa, jossa kysyntä kasvaa voimakkaasti. Norjalla ei kuitenkaan vaikuta olevan suunnitelmia vedyn viennin siirtoinfrastruktuurin kehittämiseksi. Sen sijaan Norjan maakaasun vientiä kaavaillaan maihin, joissa sinistä vetyä voitaisiin valmistaa paikallisesti.

Puhtaan vedyn pääasiallinen käyttökohde Norjassa olisi liikenne. Keskeinen tavoite on meriliikennehubien kehittäminen. Vetyajoneuvojen hankintaa ja käyttöä tuetaan eri tavoin kysynnän kasvattamiseksi. Sinisen, vähäpäästöisen vedyn pääasiallinen käyttökohde olisi teollisuus, jossa sitä hyödynnettäisiin päästöjen vähentämiseen. Tästä seuraava tasainen kysyntä sopii hyvin sinisen vedyn tuotannolle.

Strategiassa esitetään tarve lisätä vähäpäästöisen vedyn kilpailukykyä esimerkiksi päästöverotuksen ja tiukempien kiintiöiden avulla. Elektrolyysissä käytetty sähkö on jo vapautettu sähköverosta. Tiekartassa sääntelyn toteuttamista avattiin hieman enemmän. Teollisuuden kilpailukykyä haluttaisiin turvata CfD-sopimusten avulla, jotka mahdollistaisivat teollisen mittakaavan vähäpäästöisen vedyntuotannon. Teolliset toimijat näkevät CfD-sopimukset välttämättömänä vähäpäästöisen vedyn tuotannon edistämiseksi. Norjan valtion kaavailemat tiukemmat CO₂-verot auttavat osaltaan päästöjen vähentämisessä. Tiekartan mukaan CO₂-vero voisi nousta jopa tasolle 2000 NOK/tCO₂ vuonna 2030. Näillä keinoilla pyritään edistämään vähäpäästöisen vedyn kilpailukykyä suhteessa fossiiliseen vetyyn.

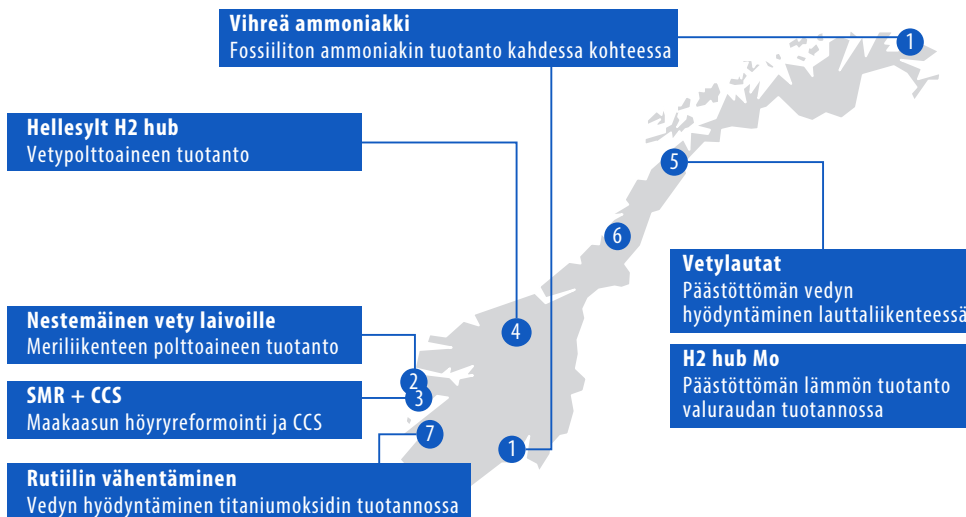
Valtio-omisteinen Enova rahoittaa teknologian pilottihankkeita sekä edistää vetyklusterien ja tarvittavan infrastruktuurin kehittämistä. Norjan hallitus kaksinkertaistaa valtion vetyhankerahoituksen 200 miljoonaan kruunuun (20 miljoonaa euroa). Vetyinfrastruktuurin ja markkinoiden kehittämiseen varatun rahoituksen ennakoitaan kasvavan 185 miljoonaan kruunuun (18,4 miljoonaa euroa). Norjaan perustetaan lisäksi vetyyn ja ammoniakkiin keskittyvä tutkimuskeskus.

Norjassa ehdotetuista 25 vetyhankkeesta viisi projektia on päässyt vety-IPCEI-arvioinnissa toiseen vaiheeseen huhtikuuhun 2021 mennessä. Myönteisen tukipäätöksen ovat saaneet tähän mennessä ainakin Horisont Energi Barnets Blue -projekti Hammerfestissä (482 milj. NOK) ja Finnmark Hydrogen -projekti (500 milj. NOK). Näistä kahdesta on julkaistu lyhytlistauksen yhteydessä lehdistötiedote:

- Barents Blue -projekti Finnmarkissa olisi maailman ensimmäinen puhtaan ammoniakin valmistuslaitos. Laitoksessa jalostetaan puhdas vety ammoniakiksi, joka kuljetettaisiin meriteitse ja muunnettaisiin takaisin vedyksi loppukäyttökohteessa. Kokonaisuus sisältäisi myös offshore-CO₂-varastointilaitoksen. Kehittämisestä vastaa Horisont Energi AS.
- Aurora Liquid Hydrogen -projektissa tavoitteena on rakentaa kattava nestemäisen vedyn toimitusketju laivoille. Projektissa rakennettaisiin nestemäisen vedyn tuotantolaitos Mongstadiin Equinorin olemassa olevan jalostamon lähelle. Tavoitteena on tuottaa elektrolyysiprosessilla 6 t/d uusiutuvaa nestemäistä vetyä. Yhteistyökumppanit kuljettaisivat nestemäistä vetyä Länsi-Norjan rannikon kuluttajille vetyä polttoaineenaan käytävillä Topeka Ro-Ro -aluksilla. Projektin kehittämisestä vastaavat BKK, Air Liquide ja Equinor.

Yhteenvedo Norjan vetyprojekteista on esitetty alla kuvassa 21.

Kuva 21. Norjan kehitteillä olevia vetyhankkeita, joista on tiedotettu julkisesti



Tanska

Tanskan vety-yhdistys julkaisi vetystrategian vuonna 2020 ja vetytiekartan vuonna 2021. Tanskan kansallinen vetystrategia valmistui joulukuussa 2021.

Tanskan kansallinen vetystrategia korostaa vihreän vedyn tuotantomahdollisuuksia. Tanskalla on erinomaiset edellytykset lisätä tuulivoimakapasiteettia ja siten valmistaa vihreää vetyä suuressakin mittakaavassa vientiin esimerkiksi Saksan markkinoille. Vetystrategiassa

asetetaan tavoitteeksi 4–6 GW elektrolyyserikapasiteetti vuonna 2030. Strategian mukaan kasvun tulisi tapahtua markkinaehtoisesti ja samalla tukea Tanskan vienti- ja liiketoimintapotentiaalin toteutumista PtX-sektorilla. Strategian mukaan tavoitteena on samalla pienentää Tanskan globaalia hiilijalanjälkeä sekä edistää kansallisten ja kansainvälisten ilmastotavoitteiden saavuttamista.

Strategiassa vedyn käyttö suunnataan sektoreille, joilla hiilineutraalisuutta olisi vaikeaa saavuttaa muilla keinoilla. Sähköistäminen nähdään ensisijaisena vaihtoehtona. Strategiassa on mainittu vedyn hyödyntäminen raskaassa liikennekäytössä sekä meriliikenteessä. Tanskassa ei ole lannoitetuotantoa lukuun ottamatta juurikaan raskasta teollisuutta, joka voisi käyttää puhdasta vetyä tai jossa voitaisiin korvata harmaata vetyä.

Hallitus ehdottaa 1,25 miljardin Tanskan kruunun investointitukia. Kilpailutuksen kautta myönnettäisiin mahdollisesti kymmeneksi vuodeksi tuotantotukea vedyn ja muiden PtX-tuotteiden tuotannolle. Tuen edellytyksenä on, että hankkeiden on edistettävä kasvua, työllisyyttä sekä Tanskan liiketoiminta- ja vientimahdollisuuksia. Tuen kohdistaminen puhtaasti vedyn tuotantoon varmistaa, että tuotanto tapahtuu elektrolyysillä. Vetyä jatkajalostettaisiin ammoniakiksi, metanoliksi tai e-kerosiiniksi. Alueellisia kehitysklustereita sekä sektorin tutkimusta ja kehitystä tuetaan lisäksi suurilla summilla.

Strategiassa kuvataan sektori-integraation periaatteita ja vedyn tuotannon roolia osana joustavaa sähköjärjestelmää, joka mahdollistaa tanskalaisen edullisen tuulivoiman hyödyntämisen sähkön ylituotantotilanteissa. Sähkönsiirtotariffijärjestelmän uudistamisella tavoitellaan edullisia tuotantokustannuksia sekä sektori-integraatiota. Kiinteitä tehotariffeja harkitaan, ja vedyn tuotannon kysynnänjoustoa tarjoamalla olisi mahdollista saada alennuksia sähkönsiirtotariffeihin. Tarkoituksena on lisäksi suunnitella alueellisesti eritasoisia siirtotariffeja, joilla voitaisiin antaa alennuksia sähkönsiirtomaksuihin ja ohjata vedyntuotantolaitoksia sijoittumaan koko energijärjestelmän kannalta tarkoituksenmukaisesti. Lisäksi aiotaan muuttaa nykyistä lainsäädäntöä siten, että se mahdollistaisi sähköntuotannon omaan käyttöön, jos tuotantopaikka on liitetty suoraan loppukäyttäjään erillisellä sähkölinjalla.

Strategiassa korostetaan kehittämistä tietyillä maantieteellisillä alueilla, joissa hyödynnettäisiin alueellisia vahvuuksia vedyn tuotannossa, siirrossa jne. Viennin edistämiseksi halutaan kehittää siirtoyhteyksiä, joilla mahdollistetaan yhteys Euroopan laajemmille vetymarkkinoille. Vientitavoitteita esitetään vedyn ja vedystä jalostettujen tuotteiden lisäksi teknologiaviennille. Tanskassa tuotettu vety on selvityksen mukaan kustannuksiltaan edullista (samaa luokkaa kuin Marokossa tuotettu vety), ja sen vahvuutena on lisäksi maantieteellinen sijoittuminen lähelle Euroopan suuria kysyntäkeskuksia. Tanska panostaa vetysektorilla vahvasti kansainväliseen yhteistyöhön sekä järjestöjen kautta että solmimalla kahdenvälisiä sopimuksia eri maiden kanssa. Yhteistyön tavoitteena on edistää kansallisia intressejä sekä vientiä.

Tanskassa on lukuisia vetyyn liittyviä pilotteja ja kehityshankkeita. Vety-IPCEI-esikarsinnan läpäisseitä hakemuksia oli 28, joista jatkoon valittiin 18.6.2021 annetun ilmoituksen mukaan seuraavat kuusi projektia:

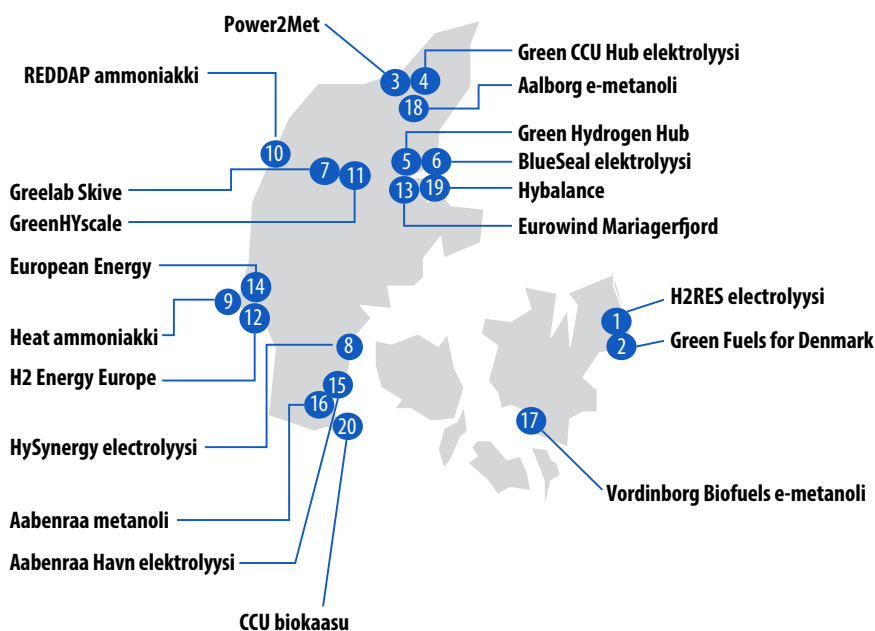
- Blue Seal projektikehittäjänä Ballard Power Systems
- Green Fuels for Denmark projektikehittäjänä Ørsted
- Green CCU Hub Aalborg projektikehittäjänä REIntegrate
- HySynergy projektikehittäjänä Everfuel
- HØST projektikehittäjänä Copenhagen Infrastructure Partners
- PtX@EIS projektikehittäjänä GreenLab Skive

Lisäksi vuonna 2021 on käynnistynyt muitakin merkittäviä hankkeita:

- GreenHyScale Power-to-X-projekti, jossa tuotetaan puhdasta vetyä. Se sijaitsee GreenLab Skive -teollisuuspuistossa ja on saanut 30 milj. EUR tukea Horizon 2020 ohjelmasta. Projektissa elektrolyyserikapasiteetti olisi ensin 6 MW ja myöhemmin 100 MW.
- H2 Energy Europe aikoo rakentaa 1 GW elektrolyysin Esbjergiin puhtaan vedyn tuotantoon ja josta jatkojalostetaan sähköpolttoaineita raskaan liikenteen käyttöön.

Tanskassa kehitteillä olevien vetyhankkeiden potentiaalinen tuotantokapasiteetti ylitti jo 7 GW vuoden 2021 lopulla. Muutamia suurimpia julkaistuja hankkeita on esitelty alla (ks. kuva 22).

Kuva 22. Tanskassa kehitteillä olevia vetyhankkeita, joista on tiedotettu julkisesti



4.1.4 Baltian maat

Latvia

Latviassa ei toistaiseksi ole vetystrategiaa. Latvian NECP:n (National Energy and Climate Plans) mukaan vety voi olla tulevaisuuden vaihtoehtoinen polttoaine, jolla voidaan korvata fossiilisia polttoaineita. NECP:ssa ei ole varsinaisesti esitetty lyhyen tähtäimen tavoitteita vedyn käytölle tai tuotannolle, eikä siinä esitetä vetyyn liittyviä politiikkatoimia.

Latvian toimintaympäristö voisi mahdollistaa uusiutuvan vedyn käytön etenkin liikenteessä. Latviassa on siihen liittyvää T&K-toimintaa, ja ensimmäinen vetytankkausasema otettiin käyttöön Riikassa jo 2016. Latvia on ollut mukana usean Euroopan maan kattavassa liikennesektorin H2GO4-IPCEI-hankkeessa.

Liettua

Liettua on valmistelemassa omaa vetystrategiaansa. Liettuan NEIS:n (National Energy Independence Plan) mukaan Liettuassa on suunniteltu, että 2030 mennessä uusiutuvan energian kapasiteetti yli kaksinkertaistuisi, ja suurin osa energian tarpeesta tulisi uusiutuvista tai vähäpäästöisistä lähteistä vuoteen 2050 mennessä (LME, 2017). Tavoitteena on, että 5 % liikenteen energian kulutuksesta tulisi biokaasusta ja uusiutuvasta vedystä vuonna 2030. Vauhdittajina tässä kehityksessä voisivat olla julkiset hankintasäännöt sekä julkisen liikenteen velvoite käyttää vaihtoehtoisia polttoaineita.

Ensimmäisessä vaiheessa on määrä laatia kansalliset suuntaviivat vetysektorin kehittämiseksi. Liettuan energiaministerin mukaan kestävä kehitys on yksi Liettuan tärkeimmistä prioriteeteista. Vety nähdään tärkeänä kehitysalueena, joka mahdollistaa päästöjen vähentämisen usealla eri sektorilla. Liettua on myös tunnistanut vientiin liittyvät mahdollisuudet, jonka vuoksi vedyn siirtomahdollisuuksia halutaan kartoittaa. Itämeren tuulipuistoista saatava uusiutuva sähkö luo edellytyksiä vedyntuotannolle. Vienti nähdään uutena taloudellisena mahdollisuutena Liettualle, joka kannattaisi hyödyntää samalla, kun maa pyrkii irti fossiilisista polttoaineista. Amber Gridiä kaavaillaan tahoksi, joka olisi vastuussa vedyn siirtoinfrastruktuurista. Ajatuksena on, että kaasuinfrastruktuuria voitaisiin käyttää myös vedyn siirtämiseen. (LME, 2021)

Liettuan energiaministeriö perusti 2020 vedyn kehittämisalustan, jossa on mukana 19 toimijaa. Sen tavoitteena on:

- osallistua politiikkatoimien kehittämiseen paikallisella ja EU-tasolla.
- Vetystrategian kehittäminen ja toimintasuunnitelman laatiminen
- sektori-integraation ja teknologian käyttöönoton sekä T&K- ja innovaatio-toiminnan edistäminen
- rahoitusmahdollisuuksien hyödyntämisen koordinointi
- vedyn kysynnän ja vetyliiketoiminnan edistäminen

- tuotantohankkeiden käynnistäminen ja kansainvälisen kaupankäynnin edistäminen sekä yhteistyön kehittäminen
- Liettuan yhteisen näkemyksen muodostaminen ja siitä viestiminen

Puhtaaseen vetyyn liittyvään tutkimukseen on varattu 2 miljoona euroa. Toistaiseksi käynnissä (kevät 2021) on kaksi vedyn pilottihanketta: puhtaan vedyn tuotantohanke ja rajattuun kaasuverkkoon syöttämishanke. T&K-yhteistyötä on mm. Islannin ja Latvian kanssa. SG Dujos Auto on solminut sopimuksen Luoteis-Liettuaan sijoitettavasta PtG-tuotantolaitoksesta, jonka tuottama metaani syötettäisiin nykyiseen maakaasuverkkoon.

Viro

Viro valmistelee parhaillaan omaa vetystrategiaansa. Strategian pohjana käytetään toukokuun 2021 alussa valmistunutta selvitystä vedyn mahdollisuuksista ja vetytiekarttaa.

Vihreään vetyyn liittyvään tutkimukseen on varattu kaksi miljoona euroa. Keväällä 2021 oli käynnissä kaksi julkista vedyn pilottihanketta: vihreän vedyn tuotantohanke sekä rajattuun kaasuverkkoon syöttämishanke. T&K-yhteistyötä on mm. Islannin ja Latvian kanssa.

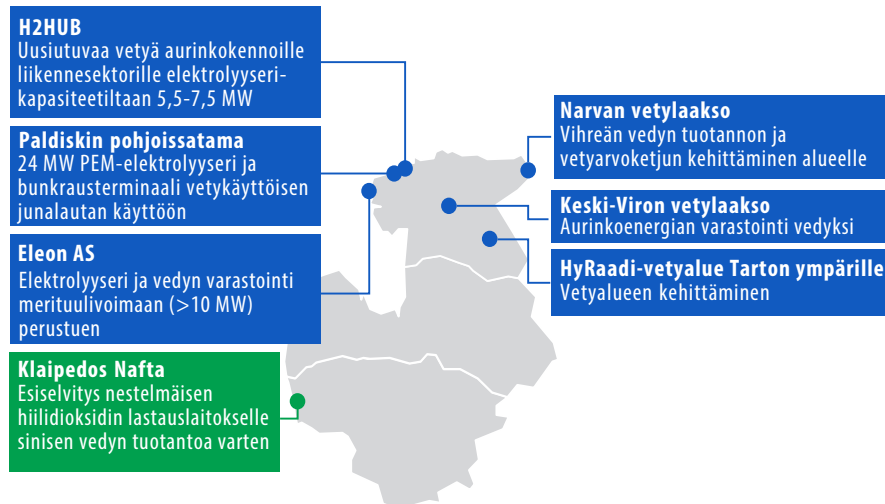
Virossa on tunnustettu suuri tuulivoimapotentiaali, joka voisi mahdollistaa vedyn tuotannon ja vihreän vedyn viennin esimerkiksi Saksaan, Hollantiin, Liettuaan ja Suomeen. Kotimaan kysyntä olisi pientä, koska vetyä hyödyntävää teollisuutta on vähän. Tallinnassa on yksi vedyn tankkauspiste ja maahan on rekisteröity muutama vetyajoneuvo. Tallinnan sataman vetystrategia valmistui 2021.

Hallitus on päättänyt tukea vetyhankkeita ja vetyarvoketjujen kehittämistä siten, että kokonaisinvestoinnit nousisivat 111 milj. euroon, josta osa olisi valtion tukea. Viron vety-IPCEI-hakuun saatiin 20 hakemusta, joista 10 saa tukea.

Virossa on kesäkuuhun 2021 mennessä julkistettu muutama vedyntuotantoon tähtäävä hanke (EAS, 2021). Liettuaassa on tiedossa yksi välivaiheen projekti. Koko Baltian alueella on yksi teollisuusyritys, joka tarvitsee suuria määriä vetyä (ACHEMA:n lannoitetehtas Liettuassa). Alla esitettyjen projektien lisäksi Viro ja Latvia ovat mukana EU-projektissa H2Nodes, jossa luodaan konsepti vetytankkausasemien verkostolle, joka ulottuisi Viron Paldiskista Pärnun kautta Latvian Riikaan ja Latviasta Puolan ja Saksan läpi Alankomaiden Arnheimiin.

Alla on esitetty yhteenveto Baltian julkisista vetyhankkeista (ks. kuva 23).

Kuva 23. Vetyprojekteja Baltian maissa



4.2 Kansalliset vetystrategiat ja -tiekartat Euroopan ulkopuolella


Seuraavassa esitellään valikoituja maita Euroopan ulkopuolelta, joissa vetytalous on nähty maan ilmasto- ja energiastrategiassa tai ulkomaankaupan kannalta olennaiseksi tai joissa on voimakasta vetyyn liittyvää teknologista kehitystä. Kaikista julkistetuista vetyprojekteista noin 55 prosenttia on Euroopassa, mutta kehitystä on erityisesti myös Australiassa, Japanissa, Etelä-Koreassa ja Yhdysvalloissa (Hydrogen Council, 2021b). Yhteenveto Euroopan ulkopuolisten maiden vetystrategioista on esitetty alla (ks. kuva 24 seuraavalla sivulla).




Saudi-Arabia on ilmoittanut tähtäävänsä maailman suurimmaksi vedyntuottajaksi. Maassa on käynnissä 5 mrd. EUR aurinko- ja tuulivoimahanke Helios Green Fuels, joka tulee tuottamaan vetyä Neomin kaupunkiin vuoteen 2025 mennessä (ks. taulukko 9) (Power Technology, 2021).

Kuva 24. Vetyyn liittyvät tavoitteet valikoiduissa maissa Euroopan ulkopuolella



Taulukko 9. Saudi-Arabian lippulaivaprojekti tuottaisi ammoniakkia

Projekti	Vaihe	Vedyn tyyppi	Sijainti	Tavoitteet	Kumppanit
Helios Green Fuels		Puhdas	Neom, Saudi Arabia	<ul style="list-style-type: none"> • Uusiutuvan vedyn tuotanto aurinko- ja tuulivoimalla (4 GW) • Vedyn varastointi • Vedyntuotanto elektrolyysereilla 650 tH₂ per päivä • Typen tuotanto ilmasta • Vihreän ammoniakin tuotanto 1,2 Mt per vuosi • Suunniteltu käyttöönotto 2025 	Air Products, ACWA Power, NEOM

 Esiselvitys Konseptisuunnittelu Investointipäätös Rakentaminen Kaupallinen toiminta

Marokko on asettanut uusiutuvan energian tavoitteekseen 52 % tuotantokapasiteetistaan vuoteen 2030 mennessä. Nykyinen osuus on 37 %. Marokko on solminut vedyssä yhteistyösopimukset Saksan ja Portugalin kanssa vuonna 2020, ja maassa on perustettu GreenH2-vetyklusteri puhtaan vedyn tuotannon kaupallistamiseksi. Ensimmäisen teollisen mittakaavan projektin odotetaan aloittavan toimintansa 2025. Tuotantomäärä olisi noin 10 kt vetyä vuodessa.

Namibia on nimennyt vihreän vedyn ja ammoniakkin tutkimuksen yhdeksi 16 keinosta, jonka avulla se pyrkii edistämään valtiontalouden suosiollista kehitystä vuosien 2021–2025 aikana. Vihreän vetytalouden edistämiseksi on perustettu ministerikomitea kesällä 2021, joka on nimittänyt tiimin teknisiä asiantuntijoita tukemaan alan kehitystä. Komitean odotetaan julkistavan kansallisen vetystrategian vuoden 2022 aikana. (Government of Namibia, 2021)

Namibian ensimmäinen suuren mittakaavan vetyprojekti julkaistiin marraskuussa 2021, ja sen tavoitteena on 0,3 miljoonan tonnin vuosittainen vedyntuotanto Tsau/Khaeb-kansallisuuden alueella. Projektin tarkoituksena on rakentaa alueelle yhteensä 5 GW uusiutuvaa sähköntuotantokapasiteettia ja 3 GW elektrolyyserikapasiteettia kuluvan vuosikymmenen aikana. (HYPHEN, 2021)

Tunisia ja Saksa allekirjoittivat joulukuussa 2020 yhteisymmärryssopimuksen, jonka myötä Saksa lahjoittaa 30 miljoonaa euroa vihreän vedyn markkinoiden kehittämiseen Tunisiassa (Ullah, 2021). Teollisen mittakaavan vetyhankkeita ei ole toistaiseksi julkaistu.

Ukraina on julkaissut maaliskuussa 2021 oman vetytiekarttansa, jossa ensimmäisenä toimenpiteenä ehdotetaan kansallisen vetystrategian laatimista (UNECE, 2021). Ukraina mainitaan Hydrogen European julkaisemassa aloitteessa ”2x40 GW Green Hydrogen Initiative” EU:n naapurimaana, josta voitaisiin maahantuoda vihreää vetyä. Ukrainan energiaministeriö on esittänyt julkisuudessa useita vetyhankkeita, joista suurin olisi Danube Hydrogen Valley, jossa tavoitellaan pitkällä tähtäimellä 3 GW elektrolyyserikapasiteettia.

Venäjä julkaisi vuonna 2020 energiastrategian, jossa kuvataan korkealla tasolla maan suunnitelmia vedyn suhteen, sekä erillisen tiekartan vetyyn liittyvästä kehityksestä vuoteen 2024 asti. Tämän lisäksi elokuussa 2021 julkaistiin ”Concept for the Development of Hydrogen Energy in Russia”, joka kuvaa tavoiteltua kehitystä tarkemmin. (CSIS, 2021)

Vetystrategian mukaan Venäjä haluaa säilyttää merkittävän roolinsa globaaleilla energiemarkkinoilla, ja se näkee vedyn vientiin panostamisen tärkeänä osana tätä tavoitetta. Suunnitelmissa mainitaan 3–4 vetyklusteria, joista luoteinen klusteri erikoistuu vedyn vientiin Euroopan markkinoille ja itäinen klusteri vedyn vientiin Aasian markkinoille. Elokuussa 2021 julkaistussa konseptissa Venäjän vientitavoitteet on jaettu kolmeen




vaiheeseen. Ensimmäisessä vaiheessa (2021–2024) Venäjä tavoittelee 0,2 miljoonan tonnin vedyn vientiä lähinnä pilottilaitoksista ja toisessa vaiheessa (2025–2035) 2 miljoonan tonnin vientiä kaupallisista projekteista. Toisessa vaiheessa myös vetyteknologian vientiä laajennetaan. Kolmannessa vaiheessa (2036–2050) Venäjä pyrkii asemoitumaan johtavaksi toimijaksi globaalilla vetymarkkinalla, tuottaen 15–50 miljoonaa tonnia vetyä vientiin vuoteen 2050 mennessä.

Strategiassa korostetaan vedyntuotannon teknologianeutraaliutta, jolla Venäjä pyrkii suojelemaan mahdollisuuksia sekä fossiilisten polttoaineiden että ydinvoiman hyödyntämiseen vedyntuotannossa. Venäjä kuitenkin tunnistaa vientikohdemaiden tavoitteet vähähiilisen vedyn suhteen. Vetykehityksen konsepti -dokumentissa mainitaan vähähiiliseksi vedyksi laskettavan myös sellainen vety, jonka hiilipäästöt on kompensoitu muilla ilmastoprojekteilla.

Kiina tukee vetyteknologioiden kehittämistä voimakkaasti. Kiinan uusimmassa viisi-vuotissuunnitelmassa vaaditaan, että puolet maan ajoneuvoista olisi sähkökäyttöisiä vuoteen 2035 mennessä, mukaan lukien sähköajoneuvoiksi hyväksytyt polttokennoajoneuvot (Reuters, 2020). Tämän jälkeen on nostettu esille tarve kokonaisvaltaisemmalle pitkän tähtäimen suunnitelmalle (Lin, 2021). Kiinassa on kehitteillä sekä laajoja omia vedyntuotantoprojekteja että lukuisia uuden teknologian kehitys- ja pilottihankkeita yhteistyössä ulkomaisten toimijoiden kanssa. Teollisen mittakaavan projekteja on ilmoitettu jo yli 50, ja julkista tukea hankkeille on tarjolla yli 20 mrd. USD. Esimerkkejä vedyn tuotantoon liittyvissä projekteista on esitetty seuraavalla sivulla (ks. taulukko 10).

Australian kansallinen vetystrategia hyväksyttiin marraskuussa 2019, ja sen tavoitteena on tehdä maasta merkittävä globaali toimija vetyalalla vuoteen 2030 mennessä. Kansallisessa vetystrategiassa on asetettu "H2 alle 2" -tavoite, joka asettaa vedyn tuotantokustannuksiksi alle 2 AUD /kg. Vetyyn liittyviin projekteihin on kesäkuuhun 2021 mennessä investoitu 1,7 mrd. AUD, ja noin 590 hanketta on saanut tukea Australian uusiutuvan energian viraston (ARENA) kautta. Hankekehitys käy parhaillaan vilkkaana (ks. taulukko 11).

Taulukko 10. Esimerkkejä suurista vetyprojekteista Kiinassa

Projekti	Vaihe	Vedyn tyyppi	Sijainti	Tavoitteet	Kumppanit
Baofeng solar H2		Puhdas	Ningxian autonominen alue	<ul style="list-style-type: none"> Maailman suurin aurinkovoimalla vetyä tuottava laitos 200 MW elektorlyyserikapastieettiä , 160 milj. m3 vetyä per vuosi 	Baofeng Energy
Ordos ja Baotou Green H2		Puhdas	Ordos ja Baotou, Mongolia	<ul style="list-style-type: none"> Aurinkovoimaa 1,85 GW ja tuulivoimaan 370 MW Käyttöönotto 2022 Lopullinen suunniteltu kapasiteetti 67 ktH2 per vuosi 	Sinopec
Kuqa solar H2		Puhdas	Kuqa, Xinjian	<ul style="list-style-type: none"> 20 ktH2 vuodessa perustuen 1 GW aurinkovoimaan 	Sinopec



Esiselvitys



Konseptisuunnittelu



Investointipäätös





Rakentaminen



Kaupallinen toiminta

Taulukko 11. Australiassa suunnitellaan jättimäisiä vetyhankkeita vedyn ja ammoniakkiin vientiin Japaniin ja Etelä-Koreaan

Projekti	Vaihe	Vedyn tyyppi	Sijainti	Tavoitteet	Kumppanit
Murchison Project		Puhdas	Murchison House Station/ Kalbarri, Australia	<ul style="list-style-type: none"> • Uusiutuva vety perustuen 5 GW aurinko- ja tuulivoimakapasiteettiin • Ensimmäisessä vaiheessa pilotti • Toisessa vaiheessa vedyn sekoittaminen maakaasuverkkoon • Kolmannessa vaiheessa tuotannon laajentaminen vientiin Japaniin ja Etelä-Koreaan (käyttöönotto suunniteltu 2028) 	Siemens, Hydrogen Renewables Australia
East Pilbara ammonia		Puhdas	East Pilbara	<ul style="list-style-type: none"> • 26 GW aurinko- ja tuulivoimaa vedyntuotantoon ja ammoniakkiin tuotanto vedystä vientitarkoituksiin • Ensimmäinen vaihe 15 GW tuotannossa 2027–2028 • Investointipäätös arviolta 2025 	InterContinental Energy
Karratha ammonia		Puhdas	Karratha, Australia	<ul style="list-style-type: none"> • 10 MW elektrolyyseri, josta uusiutuva vety ammoniakkiin tuotantoon 	Engie, Yara Pilbara Fertilisers
Clean Energy Innovation Park		Puhdas	Warradarge, Australia	<ul style="list-style-type: none"> • 10 MW elektrolyyseri. Vety sekoitetaan maakaasuun ATCO's Clean Energy Innovation Park'issa 	ATCO Australia
Murray Valley Hydrogen Park		Puhdas	Wodonga	<ul style="list-style-type: none"> • 10 MW elektrolyyseri. Vety sekoitetaan maakaasuun AGIG's Murray Valley Hydrogen Park'issa. 	Australian Gas Networks Limited



Esiselvitys



Konseptisuunnittelu



Investointipäätös






Rakentaminen



Kaupallinen toiminta

Taulukko 12. Etelä-Korea investoi maailman suurimpaan vedyntuotantolaitokseen ja aikoo rakentaa kotimaisen vetyekosysteemin

Projekti	Vaihe	Vedyn tyyppi	Sijainti	Tavoitteet	Kumppanit
Incheon		Puhdas	Incheon	<ul style="list-style-type: none"> 1. vaihe: 30 kt nestemäisen vedyn tuotanto sivutuotteena olevasta vedystä vuoteen 2023 mennessä Shinincheon Bitdream -polttockennovoimalaitos valmistui vuonna 2021. Laitos toimii mahdollistamassa alueen vedyn ekosysteemin rakentumista. 	SK Group, POSCO Energy ja Doosan Fuel Cell
Boryeong		Puhdas	Boryeong	<ul style="list-style-type: none"> 2. vaihe: 250 kt puhtaan vedyn tuotanto vuoteen 2025 mennessä Boryeongin LNG-terminaalin yhteydessä 	GS Energyn ja SK Groupin yhteishanke
Teollisuuden klusterit		Puhdas	Useita lokaatioita	<ul style="list-style-type: none"> Etelä-Korean teollisuusministeriö aikoo perustaa viisi vetyteollisuusklusteria Incheoniin, Ulsaniin sekä Pohjois-Jeollan, Pohjois-Gyeongangin ja Gangwonin maakuntiin luomaan ekosysteemin energialähteelle valtakunnallisesti 	SK Group ja teollisuusyritykset, kuten Hyundai



Esiselvitys



Konseptisuunnittelu



Investointipäätös



Rakentaminen



Kaupallinen toiminta

Etelä-Korea julkaisi tammikuussa 2019 vetyekonomisen etenemissuunnitelmansa, jossa asetetaan tavoitteeksi tuottaa 6,2 miljoonaa polttokennoista sähköautoa ja ottaa käyttöön vähintään 1200 tankkausasemaa vuoteen 2040 mennessä. Lisäksi tavoitteena on toimittaa 15 GW polttokennoja sähköntuotantoon vuoteen 2040 mennessä (IPHE, 2021). Etelä-Korea ilmoitti tukevensa erityisesti vedyn tankkausasemien rahoitusta ja luvitusta, tukien täten vedyn infrastruktuurin kehitystä. Vedyn rahoitus Etelä-Koreassa on merkittävää, ja vetyrahoituksen määrä vuonna 2021 kasvoi 40 % vuoteen 2020 verrattuna. Etelä-Korean suunnitelmia on esitetty taulukossa 12 edellisellä sivulla.



Japanista tuli yksi ensimmäisistä maista, joka otti käyttöön vetyä koskevan perusstrategian vuonna 2017. Japani on sen jälkeen tarkentanut suunnitelmiaan tulla vetyyhteiskunnaksi (METI, 20217). Vetystrategian tavoitteena on saavuttaa kustannuspariteetti sähköntuotannossa kilpailevien polttoaineiden, kuten nesteytetyn maakaasun kanssa. Japani on asettanut tavoitteekseen 5,3 milj. maakaasu- tai propaanikäyttöistä polttokennoa kotikäytössä, 800 000 vetyajoneuvoa, 900 vetytankkausasemaa ja 1 200 polttokennobussia vuoteen 2030 mennessä. Japani tukee tutkimus- ja kehitysrahoituksella erityisesti polttokennovoimaloita ja meriliikennettä. Japanissa on myös käynnissä useita kansainväliseen vedyn maahantuontiin tähtääviä hankkeita, sillä Japanin vetytalous tulee pohjautumaan vahvasti tuontiin. Valikoituja vetyprojekteja on esitetty taulukossa 13 seuraavalla sivulla.

Kanadan hallitus on sitoutunut saavuttamaan nettonollapäästöt vuoteen 2050 mennessä. Kanada on julkaissut vetystrategian joulukuussa 2020 osana tätä tavoitetta (NRCAN, 2020). Vetystrategian mukaan vuoteen 2050 mennessä vety tuottaa jopa 30 % Kanadan loppuenergiankäytöstä. Strategiassa kaavailaan vedynjakeluverkostoa, joka voisi sisältää sekä suuria keskitettyjä laitoksia maan maakaasupitoisissa maakunnissa tai alueilla, joilla on paljon halpoja uusiutuvia energianlähteitä, että pienempää hajautettua elektrolyyttituotantoa lähellä kysyntäkeskuksia. Eurooppa, Aasia ja Yhdysvallat tunnistetaan strategiassa potentiaalisiksi vientimarkkinoiksi Kanadan puhtaalle vedylle. Valintaa perustellaan alueiden maakohtaisilla strategioilla, kysyntäpotentiaalilla ja sijainnilla. Valikoituja vetyprojekteja on esitetty taulukossa 14 seuraavalla sivulla.

Taulukko 13. Japanissa on omaa vedyn tuotantoa, mutta vetytalous pohjautuu vahvasti tuontiin

Projekti	Vaihe	Vedyn tyyppi	Sijainti	Tavoitteet	Kumppanit
Fukushima Hydrogen Energy Research Field (FH2R) production unit		Puhdas	Namie, Fukushiman prefektuuri	<ul style="list-style-type: none"> Hanketta käytetään vihreän vedyn tuotantoon Tuotanto suuntautuu vetyautojen ja linja-autojen polttoaineisiin Japanissa 10 MW tuotantokapasiteetti Tuotanto aloitettu 2020 	New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO), Toshiba, Tohoku Electric Power Co., Inc. ja Iwatani Corporation
The Hydrogen Energy Supply Chain (HECS) project		Puhdas	Suiso Frontier (nesteytetyn vedyn kantoalus)	<ul style="list-style-type: none"> Hiili-vety-hankkeen pilottitoiminta on aloitettu sekä kaasutus- että kaasunjalostamoissa vuonna 2021 Pilottihanke kehittää vedyn tuontia Australiasta Japaniin 	Kawasaki Heavy Industries (KHI), J-Power, Iwatani, Marubeni ja Sumitomo, sekä Australian AGL Energy

Taulukko 14. Esimerkkejä vedyntuotantoprojekteista Kanadassa

Projekti	Vaihe	Vedyn tyyppi	Sijainti	Tavoitteet	Kumppanit
The Fort Saskatchewan project		Puhdas	Fort Saskatchewan, Alberta	<ul style="list-style-type: none"> 300 000 tonnia puhtaan vedyn tuotantoa vuodessa Tuotannon aloitus suunniteltu vuodelle 2028 	Suncor, ATCO
Hydro-Québec		Puhdas	Varenes, Québec	<ul style="list-style-type: none"> Suunniteltu tuotantokapasiteetti on 11 000 tonnia vihreää vetyä vuodessa Tuotannon aloitus suunniteltu vuodelle 2023 	Hydro-Québec, Thyssenkrupp
Bécancour electrolyzer		Puhdas	Bécancour, Québec	<ul style="list-style-type: none"> Vedyn tuotanto 3 000 tonnia vuodessa Tuotanto aloitettu 2021 	Air Liquide, Cummins



Esiselvitys



Konseptisuunnittelu



Investointipäätös






Rakentaminen



Kaupallinen toiminta

Taulukko 15. Esimerkkejä vedyntuotantoprojekteista Yhdysvalloissa

Projekti	Vaihe	Vedyn tyyppi	Sijainti	Tavoitteet	Kumppanit
The Intermountain		Puhdas	Utah, Yhdysvallat	<ul style="list-style-type: none"> Voimalaitos aikoo integroida 30% vetypolttoainetta vuonna 2025, jolloin muuntumisen maakaasuksi odotetaan olevan täydellinen, ja käyttää sitten 100% vetyä vuoteen 2045 mennessä 	Mitsubishi Power, Magnum Development
ACES project		Puhdas	Utah, Yhdysvallat	<ul style="list-style-type: none"> Maanalaisen suolakupolin kehittäminen puristetun vedyn varastointiin 150 000 MWh varastointikapasiteettia Työmaa sijaitsee Intermountain-projektin vieressä 	Mitsubishi Hitachi Power Systems (MHPS), Magnum Development ja Chevron New Energies
The SGH2 Lancaster plant		Puhdas	Kalifornia, Yhdysvallat	<ul style="list-style-type: none"> Lancasterin laitos pystyy tuottamaan 11 000 kg vihreää vetyä päivässä Laitos käyttää tekniikkaa, jossa kierrätetty sekapaperijäte kaasutetaan vihreän vedyn tuottamiseksi 	Lancasterin kaupunki, Fluor Group, ABB



Esiselvitys



Konseptisuunnittelu



Investointipäätös







Rakentaminen



Kaupallinen toiminta

Taulukko 16. Esimerkkejä vedyntuotantoprojekteista Chilessä

Projekti	Vaihe	Vedyn tyyppi	Sijainti	Tavoitteet	Kumppanit
Prillex America Plant		Puhdas	Mejillones, Chile	<ul style="list-style-type: none"> • 14–36 MW aurinkovoimaa vedyntuotantoon ja vihreän ammoniakkin tuotantoon 	Engie, Enaex
Mining trucks decarbonisation		Puhdas	Atacama, Chile	<ul style="list-style-type: none"> • 20 MW polttokennojärjestelmä, joka käyttää aurinkovoimalla tuotettua vihreää vetyä 	Engie, Mining3
Magallanes' Hydrogen Energy Storage		Puhdas	Punta Arenas, Chile	<ul style="list-style-type: none"> • Varastointijärjestelmä tuulipuistolle (vety ja akut) 	Tractebel (Engie), ENAP
Magallanes Green Ammonia		Puhdas	Magallanes, Chile	<ul style="list-style-type: none"> • 2 GW uusiutuvaa energiaa ja 1,4 GW elektrolyyserikapasiteetti vihreän ammoniakkin vientiin 1 Mt vuodessa • Käyttöönotto 2026 	AustriaEnergy, Ökowind EE



Esiselvitys



Konseptisuunnittelu



Investointipäätös



Rakentaminen



Kaupallinen toiminta

Yhdysvallat ei ole asettanut konkreettisia kansallisia tavoitteita, mutta generinen vetyvisio on luotu jo vuonna 2002 (USDE, 2002). Työtä on jatkettu tutkimus- ja teknologiankehitysohjelmilla (USDE, 2022). Tutkimusohjelmien pohjalta julkaistu vetystrategia ei nimestään huolimatta ole varsinainen strategia, vaan lähinnä kiinnostavien tutkimusalueiden kuvaus (USDE, 2020). Vuonna 2019 julkaistu Fuel Cell and Hydrogen Energy Associationin luoma vetytiekartta on tehty yhteistyössä teollisuustoimijoiden kanssa, ja siinä tavoitteeksi on asetettu 100 % kotimainen vety vuoteen 2030 mennessä. Erityisesti Kalifornian osavaltiossa halutaan panostaa vetyyn. Kalifornian energiakomissio (CEC) hyväksyi joulukuussa 2020 suunnitelman investoida jopa 115 miljoonaa dollaria lähes 200 julkisen vetytankkausaseman rakentamiseen polttokennosähköajoneuvoille (FCEV) seuraavan vuosikymmenen aikana (IHS, 2020). Vaikka USA:lla ei ole yhtenäistä kansallista vetystrategiaa, se on kuitenkin luonut vakiintuneita kannustimia vähähiiliseen vetyyn veroetujen avulla. Tästä esimerkkinä on parannettu 45Q-verohyvitys, joka palkitsee hiilidioksidin varastoisesta geologisissa varastoissa (Adler, 2020). Taulukossa 15 edellisillä sivuilla on esitetty valikoituja vetyprojekteja Yhdysvalloista.

Chile julkaisi kansallisen vetystrategiansa marraskuussa 2020, jonka mukaan maa pyrkii maailman edullisimmaksi vihreän vedyn tuottajamaaksi ja johtavaksi viejämaaksi vuoteen 2030 mennessä (CME, 2020). Maan vihreän vedyn strategiassa asetetaan elektrolyysillä tuotetulle vedylle 25 gigawatin tuotantotavoite vuoteen 2030 mennessä, ja vedyn tuotantokustannuksiksi tavoitellaan alle 1,50 dollaria/kg. Strategian mukaan maassa käynnistetään 50 miljoonan USD:n rahoituskierrös vihreän vedyn tueksi. Chilen vihreän vedyn tuotanto on vielä varhaisessa vaiheessa, ja rahoitusapu suuntautuu erityisesti skaalautuvuudeltaan potentiaalsiin kohteisiin. Vetyhankkeita on kansallisen vetyohjelman tiedossa noin 40. Valikoituja hankkeita (osin pilot-kokoluokassa) on esitetty alla (ks. taulukko 16 edellisellä sivulla).

4.3 Johtopäätökset kansallisista vetysuunnitelmista

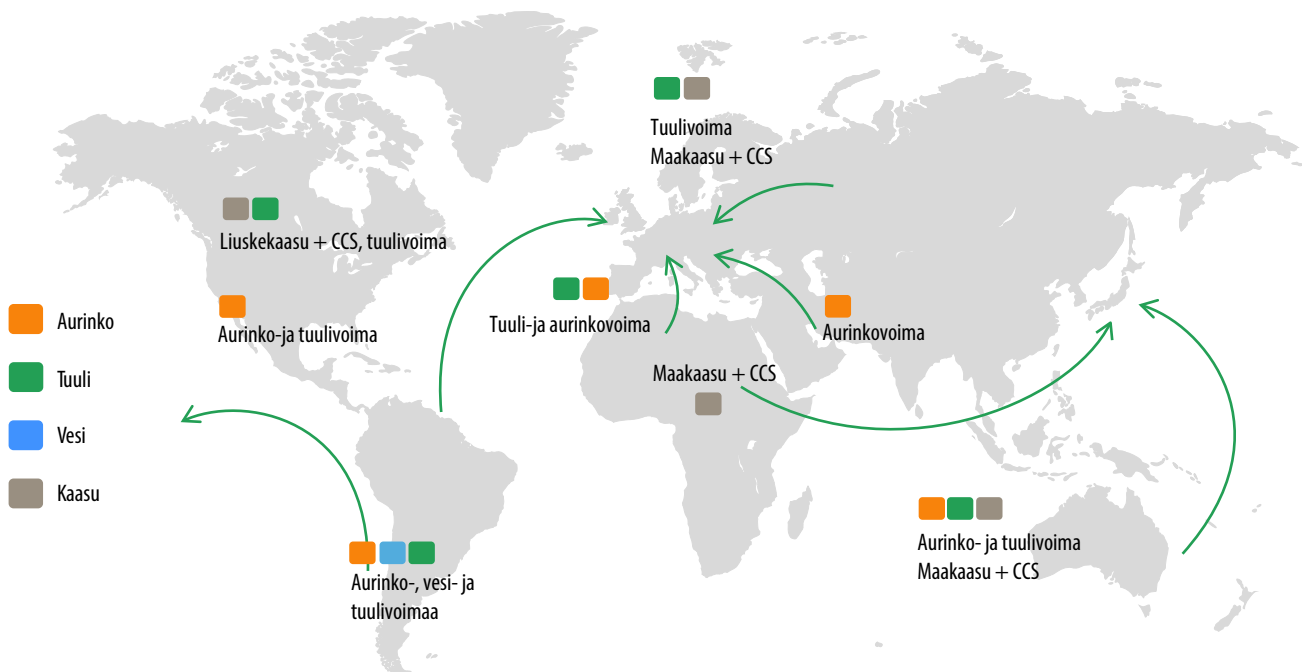
Useat Euroopan maat ovat luoneet tai ovat luomassa omia kansallisia vetystrategioitaan ja -tiekarttojaan vuosien 2019–2022 aikana. Vedyllä katsotaan voivan olla merkittävä rooli vähähiilisen tulevaisuuden mahdollistamisessa pitkällä aikavälillä EU:n vetystrategian mukaisesti. Vaikka useimmissa esitellyissä maissa tavoitteena on kasvattaa vähäpäästöisen tai puhtaan vedyn tuotantoa ja käyttöä, poliittisten tavoitteiden sekä edellytysten välillä on havaittavissa selviä eroja.

Maantieteellinen sijainti ja uusiutuvan energian resurssit vaikuttavat suuresti maiden vetystrategiaan. Rannikkoalueilla on mahdollisuus tuottaa tuulivoimaa, ja Etelä-Euroopan maissa on hyvät edellytykset tuottaa vetyä aurinkosähköllä. Jos vedyntuotanto rakennetaan tuuli- ja/tai aurinkovoimaan perustuen, tuotantolaitosten suunnittelussa

huomioidaan tarjolla olevan sähkön hinta- ja tuotantoprofiilit sekä lopputuotteen toimitusvaatimukset (tuotantomäärä ja sen sallittu vaihteluväli). Elektrolyyseri- ja vedyn varastointikapasiteetti mitoitetaan asetettujen vaatimusten mukaisesti. Mitä korkeampi vaatimustaso keskeytyksettömälle tasaiselle tuotannolle on, sitä suurempi ylimitoitus tarvitaan sekä elektrolyyserille että vetyvarastolle, jos kyseessä on suoraan loppukäyttäjän prosessiin liitetty vedyntuotantolaitos. Myös luonnonmuodostelmilla on vaikutus vetytalouteen. Luolastoihin voidaan varastoida talteen otettua CO₂:ta tai vetyä.

Vetytaloudesta muodostunee globaali markkina sillä ehdolla, että vedyn vienti on taloudellisesti kannattavaa. Vedyn todennäköisiä vienti- ja tuontimaita yhdessä näiden vedyn tuotantomuotojen kanssa on esitetty alla olevassa kuvassa 25.

Kuva 25. Vedyn todennäköiset vienti- ja tuontimait maailmanlaajuisesti



Oman maan kysyntäkohteilla on suuri merkitys siihen, kannattako vetyä tuottaa paikallisesti. Etenkin terästeollisuus, öljynjalostusteollisuus ja lannoiteteollisuus voivat olla tulevaisuudessa suuria puhtaan ja vähähiilisen vedyn hyödyntäjiä. Myös muun teollisuuden vähähiilisyystavoitteet luovat kysyntää puhtaalle ja vähäpäästöiselle vedylle. Ennen kuin vedyn siirto on mahdollista ja vedyn siirtoinfrastruktuuri on kehittyy, paikallinen tuotanto lähellä kulutusklustereita tai nk. vetylaaksoissa on ainoa vaihtoehto. Ainoastaan Alankomaissa on kahdennettuja kaasuverkkoja, joita voitaisiin käyttää vedyn siirtoon

ilman mittavia uusinvestointeja. Muualla vedyn siirtoon pitäisi kehittää uusia ratkaisuja, ja vedynsiirtoverkkoja pitäisi rakentaa ainakin keskeisten teollisuusklusterien tarpeeseen. Infrastruktuurikehittämisessä on myös huomioitava tarve kehittää sähkönsiirtokapasiteettia tai tarve huomioida siirtorajoitteet tuotannon ja kulutuksen sijoittamisessa.

Mielenkiintoinen kysymys on, voitaisiinko vedyn alkuperätakuuta hyödyntää jatkossa puhtaan vedyn kansainvälisessä kaupassa. Tällöin fyysinen siirto voitaisiin korvata alkuperätakuiden ostamisella ja siten vähentää tarvetta uuden siirtoinfrastruktuurin rakentamiselle.

Useimmissa maissa halutaan kehittää vetyteknologiaa ja edistää teknologian vientiä. Erytisesti Saksa haluaa panostaa teknologiajohtajuuteen, mutta myös useat muut EU-maat kuten Ranska, Britannia, Tanska, Norja ja Alankomaat näkevät teknologiaan panostamisessa mahdollisuuksia. Teknologiaviennissä nähdään potentiaalia talouskasvuun sekä työllisyyden lisäämiseen. Maat hakevat teknologiajohtajuutta omilla painopistealueillaan: Norja (meriliikenne), Saksa & Ranska & Hollanti (teollisuus, kaikki tuotantoteknologiat), Ruotsi (terästeollisuus), Etelä-Korea ja Japani (vetyautot). Meriliikenteeseen ja laivateknologiaan panostaminen keskittyy rannikkomaihin.

Saksassa kotimaisen vedyn tuotanto ei riitä kattamaan puhtaan vedyn tarvetta, joka syntyy Saksan teollisuuden valtavasta kysynnästä. Siksi puhtaan sekä vähäpäästöisen vedyn tuonnilla tulee olemaan keskeinen rooli Saksassa myös pidemmällä tähtäimellä. Vedyn viennin kannalta merkityksellisiä ovat kohdemaan sijainti ja käytävissä oleva infrastruktuuri. Esimerkiksi Tanska näkee mahdollisuuksia vedyn viennissä Saksaan. Ranskassa erityispiirteenä on hiilineutraali ydinvoimatuotanto, joka voisi olla kilpailukykyistä vedyn tuotannossa. Keskeistä Ranskan kannalta on, millaiseksi EU- sekä kansallinen sääntely muodostuvat tältä osin. Iso-Britanniassa erikoispiirteenä on panostus sekä vihreään että siniseen vetyyn.

Teollisuuden dekarbonisaatio on alkuvaiheessa ylivoimaisesti suurin vedyn käyttökohde Euroopan laajuisesti tarkasteltuna. Vetytalouden kehitys näyttäisi alussa keskittyvän teollisuusklusterien välittömään läheisyyteen. Tämä kehitys mainitaan muun muassa Espanjassa, Alankomaissa, Saksassa, Norjassa ja Ruotsissa.

Norja poikkeaa muista maista olennaisesti. Norja ei ole asettanut elektrolyyseritavoitteita, koska Norjassa vähähiilisuuden edistämisen halutaan olevan teknologianeutraalia. Millekään yhdelle teknologialle ei siis ole haluttu asettaa sitovaa tavoitetta. Norjassa säädettävää ja varastoitavaa vesivoimaa on paljon, mistä seuraa, ettei oman sähköjärjestelmän tasapainottamiseen tai joustoihin tarvittaisi lainkaan vetyä. Norjassa käytetään julkisia hankintoja vauhdittamaan kehitystä (esimerkkinä sähkölautat ja mahdollisesti vetyalukset).

Joissakin maissa, kuten Alankomaissa, Saksassa ja Ranskassa on suuria toteutusvaiheessa olevia hankkeita. Useimmissa muissa maissa keskitytään ensin pienempiin pilotteihin. Vuoden 2021 aikana hankkeiden määrä on kasvanut voimakkaasti. Esimerkiksi Italiassa vetystrategian tavoitteet ovat kunnianhimoiset, mutta projektikehityksessä ei olla kovin pitkällä ainakaan julkisten tietojen perusteella. Maat tekevät myös yhteistyötä erilaisissa hankkeissa, mistä esimerkkinä Ranska ja Saksa.

Tukiraha ohjaa kehitystä Euroopassa, koska puhdas vety ei vielä ole kilpailukykyistä. Aihiovaiheessa olevia hankkeita on valtava määrä, mutta kaikki eivät todennäköisesti ole teknistaloudellisesti tarkasteltuina perusteltuja. EU-ETS-päästöhinnan suotuista kehitys voi antaa edellytyksiä kilpailukykyiselle vihreän vedyn tuotannolle etenkin Pohjoismaissa, joissa sähkön hinta on kilpailukykyisempi kuin muualla Euroopassa. EU-ETS-hinnalla on kuitenkin heikko ennustettavuus, mikä luo epävarmuutta investointeja suunniteltaessa.

Vetytalouden mahdollistavien ja estävien tekijöiden tunnistaminen on keskeinen asia EU-tasoisessa sekä kansallisessa sääntelyssä. Useissa maissa on meneillään sääntelyn suunnittelu, jossa pyritään ottamaan huomioon puhtaan vedyn tuotanto. Esimerkiksi Tanskassa eri tahot ovat sitä mieltä, että osa nykyisestä sääntelystä on jo vanhentunutta, ja esimerkiksi tuulivoimaan siirtotariffeja tulisi kehittää, jotta vedyntuotanto olisi kannattavaa. Niitä tullaan strategian mukaan todennäköisesti muuttamaan siten, että ne edistävät vetytaloutta ja sektori-integraatiota nykyistä paremmin. Ranskassa tarkastellaan investointitukikriteereitä. Saksassa nähdään mahdollisuuksia CfD-sopimuksissa teollisuuden kilpailukyvyyn turvaamiseksi. Isossa-Britanniassa kehitellään parhaillaan vedyn liiketoimintamalleja ja arvioidaan erilaisia tuotannon ja kysynnän tukimekanismeja. Sääntelyyn liittyviä esteitä on tunnistettu monissa maissa. Vastaavaa tarkastelua pitäisi tehdä myös Suomessa etupainotteisesti.

Kuvassa 26 on esitetty yleisellä tasolla erilaisia vetytalouden kehittymisen esteitä sekä valikoima mahdollisia toimenpiteitä ja politiikkatoimia, joilla esteisiin voitaisiin eri tavoin puuttua, ja joita on mainittu eri maiden suunnitelmissa.

Kuva 26. Vetyarvoketjun kehittämisen esteet sekä mahdolliset politiikkatoimet, joilla esteitä voitaisiin poistaa tai lieventää

	Sähkö ▶	Puhtaan vedyn tuotanto ▶	Siirto ja varastointi ▶	Kulutus ▶
Esteet	<ul style="list-style-type: none"> • Siirtotariffien rakenne tai hinnoittelu P-to-X -hankkeissa • Verotus • Lupaprosessien hitaus siirto- ja tuulivoimahankkeissa • Siirtokapasiteetin rajoitteet • Asenteet tuulivoimahankkeisiin 	<ul style="list-style-type: none"> • Epävarma ja keskeneräinen regulaatio EU-tasolla • Epäselvät kriteerit puhtaalle ja vähäpäästöiselle vedylle • Tiukat lisäysvaatimukset • Tukien puute tai monimutkaiset tukiprosessit • Tuotanto ei kilpailukykyistä fossiilisiin vaihtoehtoihin nähden • Kansallisten tavoitteiden ja ohjaustoimenpiteiden puute tai keskeneräisyys • Toimintaympäristön epävarmuus -ei uskalleta tehdä investointeja • Puutteellinen osaaminen 	<ul style="list-style-type: none"> • Epävarma ja keskeneräinen regulaatio EU-tasolla • Siirtoinfrastruktuurin puute • Luonnonvarastojen puute ja maanpäällisten varastojen kalleus • Kansallisten verkonkehityssuunnitelmien ja strategioiden puute tai suunnitelmien keskeneräisyys 	<ul style="list-style-type: none"> • Epävarma regulaatio EU-tasolla • Epäselvät kriteerit puhtaalle ja vähäpäästöiselle vedylle • Kallis hinta verrattuna muihin polttoaineisiin • Loppukäytön edellyttämät teknologiat osin puuttuvat tai ovat kalliita (meriliikenne, sähköntuotanto, varastointi) • Kannusteiden puute eri sektoreilla (teollisuus, liikenne) • Jakelu- ja tankkausinfrastruktuurin puute • Toimintaympäristön epävarmuus -ei uskalleta tehdä investointeja
Politiikkatoimet	<ul style="list-style-type: none"> • Nopeammat lupaprosessit • Vedyn huomioiminen siirtotariffeissa ja verotuksessa • Riittävän siirtokapasiteetin rakentaminen • Sektori-integraatiostrategia, joka huomioi sekä uusiutuvan sähkön että vedyn (tavoitteet, sijoittuminen, siirtokapasiteetit ym.) • Siirtotariffirakenne, joka huomioi sektori-integraation sekä siirtorajoitteet (ohjaava vaikutus tuotannon ja kulutuksen sijoittamiselle) • Verojen yhtenäistäminen ja vedyn erityispiirteiden huomiointi 	<ul style="list-style-type: none"> • EU- ja kansallisen regulaation selkeyttäminen • Selkeät kriteerit ja standardit vähäpäästöiselle ja vihreälle vedylle • Lisäyskriteerit, jotka eivät estä tuotantoinvestointeja • Riittävät investointituet alkuvaiheessa • Tuotantotuet, esim. CfD-tukimekanismi ja erilaiset preemiomallit • Ostovelvoitteet ja tukiotot, jos tarpeen • T&K-panostukset etenkin jatkojalostukseen 	<ul style="list-style-type: none"> • Nopeammat lupaprosessit • Määrittäminen, millä kriteereillä voidaan siirtää tai varastoida kaasuverkossa • Kansalliset suunnitelmat ja strategiat siirrolle ja varastoinnille ja sektori-integraatiostrategia eli sähköverkkojen, lämpöverkkojen ja maakaasu- ja vetyverkkojen rinnakkainen suunnittelu • Turvallisuuskriteerit ja standardit 	<ul style="list-style-type: none"> • Tuotantotuet esim. CfD-mekanismi • Riittävä päästöoikeuksien hinta • Investointituet • Liikenteen jakeluvuorotteet • Tavoitteet vetyä käyttävälle teollisuudelle • Laivaliikenteen päästövähennystavoitteet • Standardien ja kriteerien luominen puhtaalle ja vähäpäästöiselle vedylle • Hiilitullit EU-rajoille, mikäli kaikki teollisuus päästökaupan piirissä • TKI-panostukset ja demonstraatiohankkeet • Verotukien poistaminen fossiilisilta polttoaineilta

EU-maiden kansallisista strategioista voidaan lisäksi löytää hyviä yleispäteviä periaatteita ja käytäntöjä, joita voi ja kannattaa soveltaa myös Suomessa. Alla valikoituja esimerkkejä peruseriaateista, jotka toistuvat useiden verrokkimaiden strategioissa, ja jotka on hyvä muistaa politiikkatoimia suunniteltaessa:

- Kansallisten tavoitteiden ja toimintasuunnitelmien luominen sekä vedylle että sektori-integraatiolle (strategia) sekä näitä tukeva vakaa sääntely-ympäristö luovat pitkäaikaista luottamusta toimintaympäristöstä, jossa teollisuus voi investoida vetyyn.
- Selkeät tavoitteet sektori-integraatiolle ja oikeaan suuntaan ohjaavat toimenpiteet. Tavoitteina tulisivat olla sekä joustava vedyn tuotanto että vedyn kulutus, jotka yhdessä mahdollistavat kestävän ja resurssitehokkaan energijärjestelmän.
- Siirtymäaikana puhtaan vedyn tuotannon ja kulutuksen tukeminen voi olla tarkoituksenmukaista, jos vety ei ole kilpailukykyistä niillä sektoreilla ja koh-teissa, joissa vetyä tarvitaan hiilineutraalisuuden saavuttamiseksi. Tavoitteena tulisi samalla olla nopea siirtyminen markkinaehtoiseen toimintaan.
- Sähköistämisen pitäminen etusijalla niillä sektoreilla ja käyttökohteissa, joissa se on mahdollista (resurssitehokkuus).
- Tarkoituksenmukaisen vedyn kuljetus- tai siirtoinfrastruktuurin suunnittelu, joka ottaa huomioon Euroopassa tapahtuvan kehityksen, vientimahdollisuu-det ja kilpailukyyn.
- Alueellisten vahvuuksien huomioiminen, kun suunnataan kehityspanostuksia ja tukia (vrt. Tanskan vetystrategia).
- Lainsäädännön päivittäminen siten, ettei se estä vetytalouden kasvua ja varmistaa selkeän toimintaympäristön.
- Selkeät, yhtenäiset kriteerit vedylle EU:ssa, jotka mahdollistavat investoinnit tuotantoon ja kulutukseen vakaalla pohjalla.
- Kansainvälisen yhteistyön aktiivinen kehittäminen ja kahdenvälisen suhteiden luominen keskeisten maiden kanssa vetytalouden osa-alueilla, esimerkiksi pohjoismainen yhteistyö mm. neuvotteluissa EU:n kanssa.

Yleisenä havaintona voidaan esittää, että politiikkatoimia suunniteltaessa on huomioitava paikalliset olosuhteet, asetetut tavoitteet ja strategia sekä vetytalouden kehitysvaihe. Etenkin taloudelliset ohjaukeinot vaativat kustannus-hyötyanalyysien toteuttamista ja vaikutusarvioinnin, jotta markkinaehtoinen kehittäminen ei vaikeutuisi, ja jotta koko energijärjestelmän kannalta päästäisiin tarkoituksenmukaiseen tulokseen resurssitehokkaasti ja kestävästi.

5 Suomen lähtökohdat vetytalouteen

Yhteenveto

Vetytalouteen liittyy Suomessa **mahdollisuuksia** niin päästövähennysten kuin liiketoiminnan suhteen. Vedyllä voi olla merkittävä rooli suomalaisen teollisuuden kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä, ja vetytalouden **edellytyksenä** onkin vedylle muodostuva kysyntä ja suhteessa muihin ratkaisuihin kilpailukykyinen tarjonta.

Suomen **vahvuuksia** ovat muun muassa pitkälle edennyt sähköntuotannon dekarbonisaatio, vahvat siirtoverkot ja merkittävä vähähiilisen sähköntuotannon lisärakennuspotentiaali. Lisäksi Suomessa on käynnissä merkittävä määrä demo- ja pilottihankkeita sekä tutkimushankkeita, jotka puoltavat vetyinnovaatioiden, osaamisen ja ekosysteemien syntyä Suomeen.

Suomella on kuitenkin monia **haasteita ja rajoitteita** vetytalouden suhteen. Suomi ei sijaitse lähellä potentiaalisia päämarkkinoita. Kattava päästöttömän vedyn infrastruktuuri tulee rakentumaan sinne, missä kysyntää ja teollista toimintaa on paljon pienellä pinta-alalla, eli esimerkiksi Keski-Euroopan teollisuusalueiden yhteyteen tai niiden yhdistäjäksi. Suomella tuskin on myöskään mahdollisuuksia tehdä absoluuttisesti yhtä suuria, julkisia investointeja vetytalouteen kuin monet Euroopan maat ovat lähivuosina tekemässä. Toisaalta useat Suomeen kehittyvän vetytalouden rajoitteista eivät ole yksin Suomen haasteita: mahdollistava ja tukeva lainsäädäntö sekä vaaditut panostukset infrastruktuuriin ovat haasteita myös muualla.

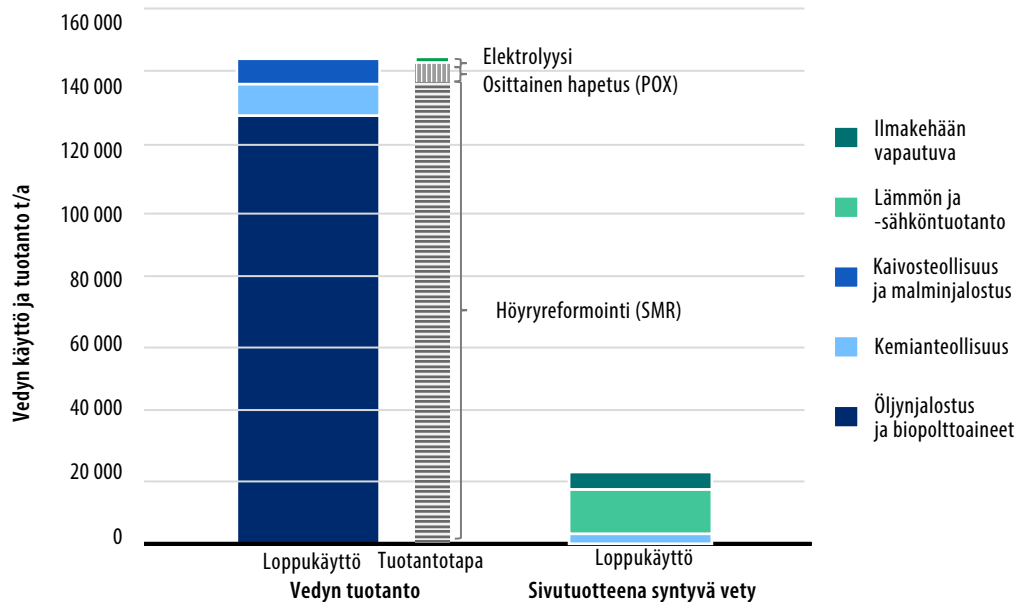
Suomi ei myöskään maantieteellisesti sijaitse lähellä maakaasun lähteitä tai geologisia varastointimahdollisuuksia, jotka puoltaisivat suomalaista sinisen vedyn tuotantoa. Lisäksi Suomen maakaasun siirtoverkosto rajoittuu maantieteellisesti eteläisimpään Suomeen. Näin ollen Suomi ei näydy kansainvälisesti houkuttelevana sinisen vedyn tuotantomaana, sinisen vedyn mahdollisesti paremmasta kustannuskilpailukyvästä huolimatta.

Vetytalouteen liittyy monia **riskejä**. Vetytalouden ratkaisut eivät välttämättä ole kustannustehokas tapa saavuttaa päästövähennyksiä ts. vetysiirtymä riippuu voimakkaasti poliittisesta ohjauksesta, ja toimialakohtaiset erot vaatimuksissa ja soveltamisessa ovat suuria. Laajamittainen vetytalouden varaan laskeminen voisi myös viivästyttää siirtymää pois fossiilisten polttoaineiden käytöstä (Ueckerdt *et al.*, 2021). Vetytalouden vaatimat infrastruktuuripanostukset ja investoinnit vaativat myös huomattavasti maa-alaa ja raaka-aineita, millä voi olla merkittäviä laajempia luonto- ja biodiversiteettivaikutuksia (Pörtner *et al.*, 2021).

Seuraavassa käydään läpi tarkemmin vedyn tuotannon, loppukäytön ja vetyprojektien nykytilaa sekä esitetään sidosryhmien näkemyksiä vetytalouden lähtökohdista Suomessa keväällä 2021.

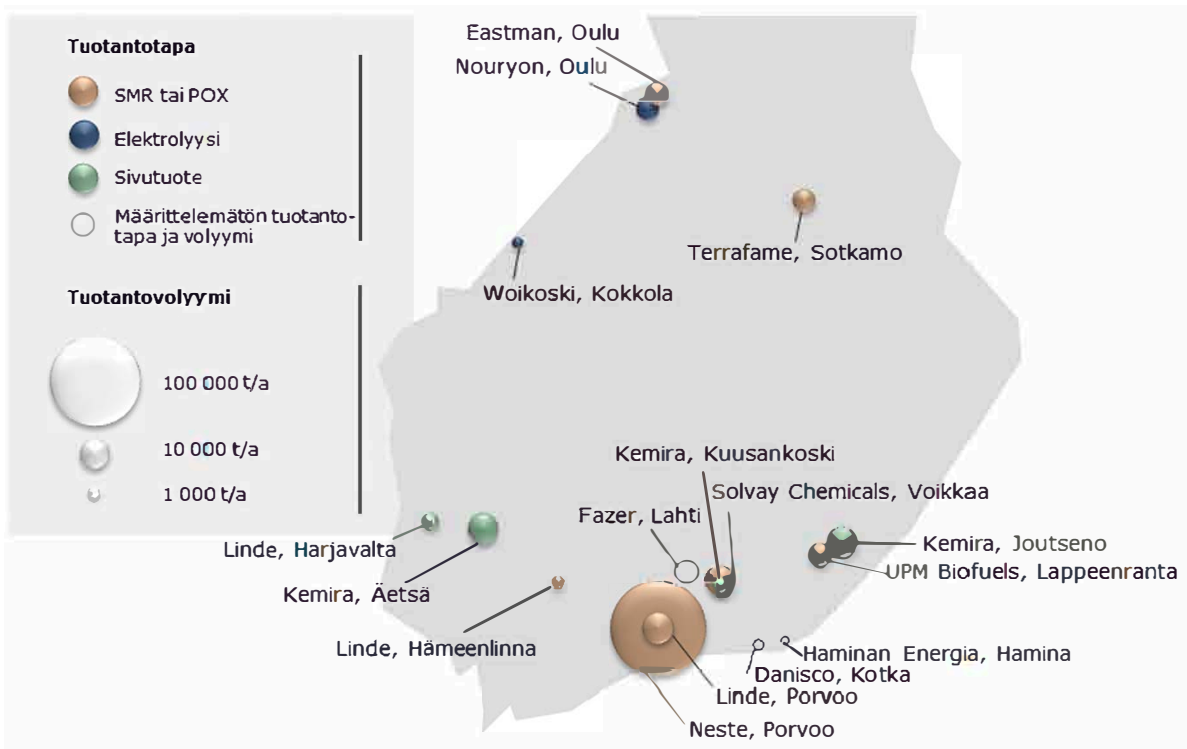
5.1 Vedyn tuotannon ja loppukäytön nykytila Suomessa

Vuonna 2020 vetyä tuotettiin Suomessa arviolta 145 000 tonnia (5 TWh) teollisuuden tarpeisiin, joka vastaa noin 1,5 prosenttia Euroopassa tuotetusta vedystä. Tämän lisäksi vetyä syntyy teollisuuden prosessien sivutuotteena. Vuonna 2020 vetyä syntyi sivutuotteena 23 000 tonnia (765 GWh), tosin tältä osin tilastointi on rajallista. Suomalaisen teollisuuden merkittävämpiä vedyn käyttökohteita ovat öljynjalostus ja biopolttoaineiden tuotanto. Vetyä käytetään myös pienissä määrin kemianteollisuuden prosesseissa (esim. vetyperoksidin valmistus) sekä kaivosteollisuudessa (Laurikko *et al.*, 2020).

Kuva 27. Vedyn tuotanto ja käyttö Suomessa (Laurikko et al., 2020)

Suomalainen vedyn tuotanto keskittyy kemianteollisuuden tuotantolaitosten yhteyteen (ks. kuva 27 yllä) Lähes kaksi kolmasosaa vuonna 2020 tuotetusta vedystä valmistettiin Nesteen Porvoon jalostamokokonaisuuden alueella. Muita merkittäviä suomalaisia vedyntuottajia ovat AGA, jolla on vedyntuotantoyksikkö Nesteen Porvoon jalostamon yhteydessä, sekä Terrafame ja UPM. Nykyisin tuotettu vety valmistetaan tyypillisesti maakaasusta reformoimalla. Valmistusprosessissa maakaasun hiili ja vety erotetaan toisistaan, jonka lisäksi hiili hapetetaan hiilidioksidiksi. Näin lopputuotteena syntyy hiilidioksidia sekä vetyä. Woikoski Oy kuitenkin valmistaa vetyä elektrolyysin avulla Kokkolassa teollisuudelle.

Kuva 28. Vedyn käyttö ja tuotanto Suomessa (Laurikko et al., 2020)



Suomalaisessa teollisuudessa sivutuotevetyä syntyy erityisesti klooraattivalmistuksen (NaCl:n elektrolyysi) sivutuotteena. Usein sivutuotteena syntyvää vetyä hyödynnetään teollisuuskäyttöisten kattiloiden polttoaineena, prosessikaasun valmistuksessa tai kaukolämmön valmistamisessa (Kauranen *et al.*, 2013). Vaihtoehtoisesti se voidaan myydä muuhun teollisuuskäyttöön. Tällöin vetyä kuljetetaan teräspulloissa, pullopattereissa tai konteissa. Sivutuotteena syntyvä vety voi edellyttää puhdistusta, mikä nostaa sivutuotevedyn kustannusta.

Puhdasta elektrolyysierillä tuotettua vetyä ei tällä hetkellä valmisteta Suomessa kaupallisessa mittakaavassa Woikosken Kokkolan tuotantolaitosta luukunottamatta (ks. kuva 28). Lisäksi vedynkäyttö teollisuuden ulkopuolella, esim. liikenteessä, on vielä hyvin rajallista johtuen puhtaan vedyn kaupallistamisen haasteista sekä vielä riittämättömästä infrastruktuurista.

5.1.1 Vetyprojektit Suomessa

Suomessa on valmisteilla kymmenittäin uusia puhtaaseen ja vähähiiliseen vetyyn liittyviä investointiprojekteja. Suurin osa hankkeista on esiselvitys- tai esisuunnitteluvaiheissa, jotka toimivat pohjana rahoituksen järjestämiselle ja myöhemmin investointipäätöksille. Hankkeet perustuvat pääosin puhtaan vedyn valmistamiseen ja tuulivoiman hyödyntämiseen energianlähteenä.

Kuvassa 29 esitetään esimerkkejä julkisista vetyhankkeista Suomessa. SSAB:n terästehtaan teollisen mittakaavan tutkimusprojektissa tavoitteena on fossiilivapaan teräksen valmistaminen vetypelkistyksen ja puhtaan sähkön avulla. Lisäksi eteläiseen Suomeen on keskittynyt joukko demonstraatiovaiheessa olevia vetyhankkeita koskien synteettisen maakaasun tuotantoa (Q Power ja Wärtsilä), puhtaan vedyn tuotantoa ja hyödyntämistä lauttaliikenteessä (Flexens) sekä synteettisen metanolin (Joutsenon yrityskonsortio) ja puhtaan ja vähähiilisen vedyn valmistamista öljyn ja biopolttonesteiden jalostamiseen (Neste). Osalle projekteista on jo myönnetty julkisia investointitukia. Ensimmäisistä kansallisista vety-IPCEI -proessin kautta julkista rahoitusta saavista hankkeista julkaistaan komission notifiointipäätökset mahdollisesti alkuvuodesta 2022. Syksyllä 2021 käynnistyi myös toinen vety-IPCEI-rahoitushakukierros.

Kuva 29. Esimerkkejä kotimaisista vetyprojekteista vuonna 2021

PtGtP

Uusiutuvan vedyn tuotanto**

Sijainti: Vaasa
 Vaihe: Demonstraatio
 Yritykset: EPV Energia, Vaasan Sähkö, Wärtsilä, Vaasan kaupunki

Prizztech

Synteettisen metaanin tuotanto

Sijainti: Meri-Pori
 Kapasiteetti: Soveltuvuus selvitys (20MW)

P2X Solutions

Vihreän vedyn tuotanto**

Sijainti: Harjavalta
 Vaihe: Suunnitteluvaihe 20MW
 Yritykset: P2X Solutions

Green H2UB Green NorthH2 Energy

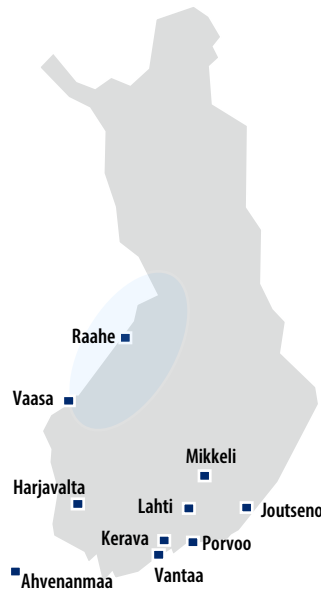
Vetypolttoaineiden tuotanto

Sijainti: Naantali
 Vaihe: Aiesopimus
 Yritykset: Green H2UB (Elomaticin kehitysyhtiö), Turun Seudun Energiantuotanto; Green NorthH2 Energy (Elomaticin tytäryhtiö), Flexens

Ren-Gas

Uusiutuvan metaanin ja vihreän vedyn tuotanto

Sijainti: Lahti
 Vaihe: Toteutettavuusanalyysi
 Yritykset: Lahti Energia



Wärtsilä

Synteettinen metaani**

Sijainti: Vantaa
 Vaihe: Demonstraatio
 Yritykset: Vantaan Energia, Wärtsilä

Flexens

Vedyn käyttö ja tuotanto meriteollisuudessa

Sijainti: Ahvenanmaa
 Vaihe: Pilotti
 Yritykset: Flexens

Both2nia

Vetylaakso

Sijainti: Perämeren rannikko FI-SE
 Yritykset: Konsortio

Ren-Gas

Uusiutuvan metaanin ja vihreän vedyn tuotanto

Sijainti: Mikkeli
 Vaihe: Toteutettavuusanalyysi
 Yritykset: Etelä-Savon Energia

Konsortio

Synteettinen metanoli

Sijainti: Joutseno
 Vaihe: Demonstraatio
 Yritykset: Finnsementti, Kemira, Neste, St1, Wärtsilä, Finnair, Shell

Soletair

Synteettisten polttoaineiden tuotanto + CO2 talteenotto

Sijainti: Joutseno
 Vaihe: Demonstraatio
 Yritykset: Soletair, LUT-yliopisto

Q Power

Synteettisen kaasun tuotanto

Sijainti: Kerava
 Vaihe: Demonstraatio
 Yritykset: Q Power, Keravan Energia

Neste

Puhdas ja vähähiilinen vety*

Sijainti: Porvoo
 Vaihe: Demonstraatio

* Tukipäätös 88 milj. EUR EU Innovation Fundilta 2021 ** Energiainvestointituki myönnetty 2021

5.2 Sidosryhmien näkemyksiä vetytalouden lähtökohdista

Keskeisiä sidosryhmiä haastateltiin Suomen vetytalouden lähtökohdista ja kehittämistarpeista ennen selvityksen skenaariovaiheen aloittamista. Haastatteluja järjestettiin yhteensä 21 ja niihin osallistui yhteensä 29 sidosryhmäedustajaa. Haastateltavat sidosryhmät valikoitiin siten, että vetyarvoketjun vaiheet olisivat kattavasti edustettuina. Suomalaisia energiansiirtoyhtiöitä (Fingrid Oy, Gasgrid Finland Oy) lukuun ottamatta yritysten näkökulmia kartoitettiin kootusti toimialojen edunvalvontajärjestöjen kautta, mukaan lukien palkansaajajärjestöt. Tämän lisäksi kuultiin tutkimuslaitoksia, riippumattomia asiantuntijatahoja ja ympäristöjärjestöjä. Lista haastatelluista organisaatioista ja henkilöistä löytyy liitteestä 1.

Haastattelut järjestettiin puolistrukturoituina ja niissä haettiin syötteitä erityisesti seuraaviin asiakokonaisuuksiin: a) mahdollisuudet ja rajoitteet vedyn kysynnälle Suomessa, b) mahdollisuudet vedyn viennille ja vetyekosysteemille Suomessa, sekä c) Suomelle tärkeät vetytalouteen liittyvät tutkimuskysymykset. Tämän lisäksi huomioitiin haastateltavien esille tuomat mahdolliset muut näkökohdat.

Haastatelluille sidosryhmille järjestettiin haastattelujen jälkeen yhteinen keskustelutilaisuus, jossa sidosryhmillä oli mahdollisuus täydentää esille tulleita näkemyksiä sekä kommentoida haastatelluista tehtyjä johtopäätöksiä. Keskustelutilaisuudessa kysyttiin myös täydentäviä yleiskysymyksiä, joiden tulokset on esitetty liitteessä 2.

5.2.1 Sidosryhmähaastattelujen tulokset

Suomen kilpailukykytekijöiksi nostettiin **teollisuuden rakenne ja sitoutuminen ilmastotoimiin, energiajärjestelmä ja vahva sähkönsiirron infrastruktuuri sekä muut suomalaisen yhteiskunnan erityispiirteet**. Sidosryhmät kokivat, että teollisuus on sisäistänyt toiminnassaan hallituksen hiilineutraalisuustavoitteen, jonka lisäksi Suomessa on selkeitä teollisuuskeskittymiä, joissa vedyn käyttö on jo tuttua.

Suomen vahvuutena nähtiin myös **merkittävä tuulivoimalla tuotetun sähköntuotopotentiaali** ja siinä hyödynnettävissä oleva uusin teknologia niin maalla kuin merellä. Tämän nähtiin mahdollistavan uusiutuvan ja kilpailukykyisen sähköntuotannon lisäämisen teollisuuden ja muun yhteiskunnan tarpeisiin. Lisäksi **Suomen maantieteellinen sijainti, makean veden saatavuus, biopohjaiset hiilidioksidilähteet, vakaat olosuhteet, hyvä hallinto sekä toimijoiden pieni lukumäärä ja siten ketterä verkostoituminen sekä vahva teollisuusyhteistyö** nähtiin suomalaisina vahvuuksina. Vedyn tuotannon sektorikytkentämahdollisuudet nähtiin merkittävänä johtuen muun muassa laajasta kaukolämpöverkosta.

Metallinjalostus, kemiallinen prosessiteollisuus, valmistava teollisuus sekä liikenne ja energiajärjestelmä nostettiin esille sektoreina, joilla vedyn kysynnän nähtiin kasvavan tulevaisuudessa, vaikka näkemuseroja olikin. Sidosryhmien näkemyksiä kartoitettiin myös lupaavimmista vetyarvoketjun osista, joissa korostuivat erityisesti **arvoketjun osia yhdistävät ratkaisut**, joilla viitataan esimerkiksi IT- ja tekoälypohjaisiin tuotannon optimointiratkaisuihin, kokonaistoimituksiin sekä projektiosaamiseen. Lisäksi **vedyn jalostus ja energiantuotanto** nimettiin Suomelle lupaavimmiksi arvoketjun osiksi.

Seuraavaksi sidosryhmien näkemykset esitetään jaotellen ne sen mukaan kuinka usein teemat toistuivat haastatteluissa ja olivatko esitetyt näkemykset yhteneviä. Näkemykset siis sijoitetaan yhteen neljästä vaihtoehdosta: Konsensus, Pitkä linja, Vedenjakaja tai Pinnan alla (ks. kuva 30 alla).

Kuva 30. Sidosryhmänäkemyksen nelikenttä

		TOISTUVUUS	
		Usein	Harvoin
NÄKEMYSTEN LUONNE	Yhteneviä	Konsensus	Pitkä linja
	Eriäviä	Vedenjakaja	Pinnan alla

Kuva 31 esittää sidosryhmähaastatteluissa esiin nousseita näkemyksiä nelikentässä. **Konsensus** (ylävasen neljännes) vallitsi vedyn kasvavasta roolista osana tulevaisuuden energiajärjestelmää. Erityisesti teollisuus nähtiin potentiaalisena loppukäyttösektorina. Suomen kilpailukykytekijöiksi nimettiin tuulivoiman rakentamispotentiaali ja siten kilpailukykyisen uusiutuvan sähkön tuotanto.

Kuva 31. Sidosryhmien näkemyksiä nelikentässä

		TOISTUVUUS	
		Usein	Harvoin
NÄKEMYSTEN LUONNE	Yhteneviä	<ul style="list-style-type: none"> Vedyllä on merkittävä rooli tulevaisuuden energiajärjestelmässä, mutta missä määrin, on se yhä epäselvää Suomen ehdoton kilpailuetu on tuulivoimalla tuotettu kilpailukykyinen sähkö Teollisuus on hyvä käyttökohde vedylle 	<ul style="list-style-type: none"> Kyse on systeemisestä muutoksesta, ei teknologisesta muutoksesta Sähkö, vety ja maakaasu tulee olla mahdollisimman integroitu järjestelmä Huoltovarmuustekijät tulisi huomioida laajemmin vetykeskustelussa Vetyosaamisen kehittäminen pitkäjänteistä työtä Vedyn turvallisuusasiat tulisivat olla prioriteetteina
	Eriäviä	<ul style="list-style-type: none"> Suomesta pitäisi viedä vetyä vs. vetyko- systeemin tuotteita ja palveluita vs. sähköä Suomella on mahdollisuus päästä mukaan kilpailuun osana vetykosysteemin vientiä Suomen kilpailuasema osana vetytalouden ekosysteemiä Painotus vedyn viennin ja tuonnin välillä ja investointien kohdentaminen Suomen vs. viennin tarpeisiin Vedyn "värit" ja "puhtaus" Vedystä valmistettujen polttoaineiden tulevaisuus 	<ul style="list-style-type: none"> Suomen pitäisi tavoitella asemaa vedyntuotantoteknologian viejänä Rahoituksen kohdentaminen, riskinjako ja julkisen rahoittajan rooli Regulaation ja verotuksen tarkoitusperä ja luonne Vedyn käyttö tulisi minimoida, sen käytön kasvu ei ole itseisarvo

Vedenjakaja (alavasen neljännes) esittää teemoja, jotka herättivät usein toistuvia ja eriäviä näkemyksiä sidosryhmähaastatteluissa. Ensinnäkin sidosryhmät esittivät eriäviä näkemyksiä Suomen mahdollisista vetytalouden vientituotteista. Eriäviä näkemyksiä esitettiin myös Suomen potentiaalista houkuttaa vetytalouden investointeja ja kuroa kiinni etumatkaa Keski-Euroopan maihin, joissa valtioiden tuki vetytalouden kehityshankkeisiin on moninkertainen Suomeen verrattuna. Toisaalta saatettiin korostaa, että Suomessa on laaja kirjo vahvuuksia vetytalouteen liittyen.

Poikkeavia näkemyksiä esitettiin laajalti, ja Suomen haasteina vetytalouden potentiaalın hyödyntämiselle nimettiin mm. nykyisin rajallinen yhteistyö teollisuuden ja akateemisen tutkimuksen välillä, luvitukseen liittyvät haasteet, suuri tarve kantaverkon kehittämislle sekä vedyn rajalliset varastointimahdollisuudet. Synteettisten polttoaineiden tuotantopotentiaali herätti polarisoituneita näkemyksiä. Lisäksi sidosryhmät esittivät eriäviä näkemyksiä siitä, tulisiko vety arvottaa eri tavoin riippuen sen valmistustavasta. Osa sidosryhmistä puoltaisi yksin puhdasta vetyä korostaen uusiutuvan sähköän alkuperän ratkaisevaa roolia, kun taas toiset puoltaisivat ylipäättään päästöttömyyden tärkeyttä sähköän alkuperästä riippumatta.

Pitkä linja (yläoikea neljännes) kokoa sidosryhmähaastatteluissa harvoin esiin nousseita, mutta sidosryhmiä yhdistäviä näkemyksiä. Yhtä mieltä oltiin vetytalousmurroksen kokonaisvaltaisuudesta ja energiajärjestelmän osa-alueiden integroinnin tärkeydestä. Sidosryhmät olivat myös samaa mieltä huoltovarmuus-, osaamis- ja turvallisuusasioiden tärkeydestä. Vedyn varastointiin liittyvät rajoitteet nousivat esille tärkeänä selvityskohtena.

Pinnan alla (alaoikea neljännes) esittää haastatteluissa harvoin esiin nousseita teemoja, joissa sidosryhmien suhtautuminen oli kuitenkin toisistaan eriävää. Erittäin laajat asiakokonaisuudet, kuten vetyinvestointien rahoitus, julkisvallan rooli sekä sääntely ja verotus jakoivat laajasti sidosryhmien mielipiteitä.

Sidosryhmähaastatteluissa haastateltavia pyydettiin myös tunnistamaan Suomelle tärkeitä vetytalouteen liittyviä tutkimuskysymyksiä tai -teemoja. Erilaisia ehdotuksia saatiin runsaasti. Kuva 32 esittää sidosryhmien ehdottamia tutkimusaiheita, jotka on ryhmitelty kuuteen pääkategoriaan: teknologia, markkinat, sovellukset, regulaatio ja infrastruktuuri sekä muut.

Kuva 32. Sidosryhmähaastatteluissa ehdotettuja tutkimuskysymyksiä ja -teemoja ryhmiteltyinä

<p>Vetyteknologia</p> <ul style="list-style-type: none"> • Voidaanko elektrolyysereitä tehdä massatuotantona? • Vaihtoehtoiset vedyntuotantoteknologiat, mm. fotokatalyyttiset prosessit • IT & tekoälyosaaminen • Perustutkimusta koskien vedyn siirtoa 	<p>Infrastrukturi</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kuinka saada sähkönsiirto edulliseksi? • Miten vetyä varastoitaisiin ottaen huomioon suomalainen ilmasto ja geologia? • Kaasu- ja sähköjärjestelmän linkittäminen toisiinsa • Kuinka maksimoida vedyn tuotannon joustavuus? • Ihmisten osallistaminen koskien tuulivoiman rakentamispäätöksiä 	<p>Sovellukset</p> <ul style="list-style-type: none"> • Miten voidaan käytännössä hyödyntää vetyä metallinvalmistuksen prosesseissa? • Perustutkimusta koskien vedyn tuotantoa ja käyttöä, esim. sähkökemian ja erilaisia katalyyttisiä menetelmiä
<p>Markkinat</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kuinka tukea kotimaisen vetyekosysteemin syntyä? • Jos kaikki fossiiliset korvataan, miten infrastrukturi ja kysyntä-tarjonta muuttuvat? • Miten vedyn tuotantoa verotetaan? • Mankala-periaatteen hyödyntäminen vetytaloudessa? 	<p>Regulaatio</p> <ul style="list-style-type: none"> • Miten regulaatio kehittyy eri markkina-alueilla (Aasia, Afrikka, USA)? • Mihin suuntaan ohjauskeinoja ja regulaatiota tulisi viedä? • Millaisia ovat toimivat politiikkakeinot maailmalla? • Standardointi 	<p>Muut</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vedyn käytön turvallisuus, turvallisuuskoulutus, vedyn käyttö teollisuuden ulkopuolella, teknologian käyttö ja tarkastus (TUKES) • Perustietopohja/skenaariotarkastelu • Mahdollisuudet ruuan- ja lannoitetuotannossa • Systemimuutoksen hahmottaminen

Alla kuvassa 33 on esitetty AFRYn muodostama esimerkki, miten yllä esitettyjä teemoja voitaisiin lähestyä ohjelmallisina hankekokonaisuuksina. Kyseessä on vain yksi tapa jäsenellä tutkimusaiheita ottamatta kantaa tutkimushankkeiden varsinaiseen toteutukseen.

Kuva 33. Sidosryhmien esittämien yksittäisten tutkimuskysymysten perusteella AFRYn tekemä ehdotus hypoteettisista tutkimuskokonaisuuksista, joissa yhdistyvät useat sidosryhmien ehdotuksista

<p>TUTKIMUSHANKE 1: Maailman turvallisin vety</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vedyn käytön turvallisuus, turvallisuuskoulutus, vedyn käyttö teollisuuden ulkopuolella, teknologian käyttö ja tarkastus (TUKES) • Toimivien politiikkatoimien esittely, esimerkkejä maailmalta, esim. Ludwigshafen • Miten vetyä varastoitaisiin huomioiden ilmasto ja geologia? • Kaasu- ja sähköjärjestelmän linkittäminen toisiinsa • Standardointi • Kuinka säädettävä prosessi? IT & tekoälyosaaminen 	<p>TUTKIMUSHANKE 2: Optimaalisesti integroitu energijärjestelmä</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kiertotalous • Kaasu- ja sähköjärjestelmän linkittäminen toisiinsa • Uusiutuva energia, säätövoima • Vedyn siirto ja varastointi • IT & tekoälyosaaminen 	<p>TUTKIMUSHANKE 3: Maailman nopeimmin nouseva vetyekosysteemi</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kuinka tukea ja nopeuttaa kotimaisen vetyekosysteemin syntyä? • Miten vedyn tuotantoa verotetaan? • Mankala-periaatteen hyödyntäminen vetytaloudessa • IT & tekoälyosaaminen • Ihmisten osallistaminen koskien tuulivoiman rakentamispäätöksiä • Vedyn siirto ja varastointi
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Maailman turvallisin vety (1) voisi olla hankekokonaisuus, jossa tutkittaisiin monipuolisesti vedyn tuotannon, varastoinnin ja käytön turvallisuuskysymyksiä erityisesti Suomen olosuhteissa, erityispiirteet huomioiden. Esimerkkejä parhaista toimintatavoista voitaisiin hakea niin kotimaasta kuin maailmalta.

Optimaalisesti integroitu sähköjärjestelmä (2) tutkisi energijärjestelmän eri osien yhdistymistä toisiinsa ja siihen voitaisiin liittää myös kiertotalouteen ja ekologiseen kestävyteen liittyviä tutkimuskysymyksiä.

Maailman nopeimmin nouseva vetyekosysteemi (3) olisi hankekokonaisuuksista luonteeltaan kaupallisin, ja se kartoittaisi suomalaisen ekosysteemin kehittymistä ja kehittämistä markkinoiden näkökulmasta. Hankkeessa voitaisiin myös arvioida konkreettisia mekanismeja, joilla julkisesti voitaisiin tukea vetytalouden kehitystä. Lisäksi hankkeessa voitaisiin tutkia sosiaalisen kestävyden ja hyväksyttävyyden edellytyksiä.

5.3 Suomen vetytalouteen valmistautumisen taustaa

Toisin kuin useissa muissa Euroopan maissa, Suomella ei ole erillistä vetystrategiaa. Vedyn rooli huomioidaan muun muassa osana valmisteilla olevaa kansallista ilmasto- ja energiastrategiaa, sektori-integraatiotyöryhmän loppuraportissa (TEM, 2021), Fossiilittoman liikenteen tiekartassa (LVM, 2021) sekä Suomen kestävä kasvun ohjelmassa (VN, 2021b).

Kesäkuussa 2021 Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisemassa Fossiilittoman liikenteen tiekartassa tunnistetaan vedyn merkittävä tulevaisuuden hyödyntämispotentiaali erityisesti raskaan liikenteen osalta. Toisaalta tiekartassa todetaan, että sellaiset vedyn liikennekäyttökohteet, jotka eivät edellytä koko maan kattavaa vedynjakeluinfrastruktuurin rakentamista voisivat olla järkevempiä. Esimerkkinä mainitaan meriliikenteen satamat. Pitkällä aikavälillä sähköpolttoaineiden ja suoran vedyn käytön rooli päästövähennysten mahdollistajana nähdään suurena liikennemuodoissa, joissa sähköistäminen ei tällä hetkellä näytä täydy mahdollisena. LVM:n tiekartassa arvioidaan vedyn suoran tai epäsuoran hyödyntämisen korvaavan 4 TWh fossiilista energiaa vuonna 2045.

Liikenteen toimenpiteisiin liittyen Suomessa on sovellettu liikennepolttoaineiden jakeluvaihtoehtoja biopolttoaineiden käytön edistämiseksi moottoribensiinin ja dieselöljyn korvaamiseksi liikenteessä vuodesta 2007 (laki biopolttoaineiden käytön edistämisestä liikenteessä 446/2007). Vuonna 2021 jakeluvaihtoehtoja muutettiin muotoon ”uusiutuvien polttoaineiden käytön edistämiseksi” ja mukaan korvattaviin polttoaineisiin otettiin maakaasun käyttö liikenteessä. Muutos luo edellytykset vedyn ja siitä jatkojalostettujen muiden sähköpolttoaineiden käytölle liikenteen uusiutuvina polttoaineina.

VTT:n ja Business Finlandin kansallisessa vetytiekartassa arvioidaan, että vähähiilisen vedyn käyttö voisi lisääntyä tulevaisuudessa erityisesti kemianteollisuuden jalostusprosesseissa, jos kasvipohjaisten öljyjen käyttö lisääntyy uusiutuvan dieselin valmistuksessa (Laurikko *et al.*, 2020). Toisaalta tiekartassa pidetään lupaavimpana P2X-tuotannon lisääntymistä alueilla, joissa on saatavilla ylijäämävetyä ja biopohjaisen hiilidioksidin pistelähteitä. Yhtenä tällaisista alueista mainitaan Joutsenon mahdollinen metanolin tuotanto, joka hyödyntäisi Kemiran sivuvirtana syntyvää vetyä ja elektrolyysillä tuotettua vetyä. Tiekartassa myös arvioidaan Suomen vahvuuksia, heikkouksia, mahdollisuuksia ja uhkia koskien vähähiilisen vedyn tuotannon ja käytön kasvua (ks. taulukko 17).

Taulukko 17. Suomen vahvuudet, heikkoudet, mahdollisuudet ja riskit Business Finlandin vetytiekartassa (Laurikko et al., 2020)

VAHVUUDET	HEIKKOUEDET
<ul style="list-style-type: none"> • tuulivoimaresussit • vahvat siirtoyhteydet 	<ul style="list-style-type: none"> • korkeampi sähkönhinta vs. Ruotsi ja Norja • ei vetyosaamista teollisuuden ulkopuolella • ei kokemusta vedyn liikennekäytöstä
MAHDOLLISUUDET	UHKAT
<ul style="list-style-type: none"> • olemassa oleva polttoainetuotanto • käytössä olevan vedyn dekarbonisaatio • fossiilivapaan teräksen tuotanto • teollisuuden logistiikkakustannusten leikkaaminen 	<ul style="list-style-type: none"> • muutokset / tulkinat RED II:sta, jotka mahdollisesti epäsuotuisia Suomelle • fossiilisten ja CO₂:n matala hinta • viivästynyt elektrolyysereiden tuotannon skaalaus • vetyteknologian korkea hinta

Suomalaisen yhteiskunnan vahvuuksiksi nimetään maa- ja merituulivoiman hyödyntämispotentiaali, vahva sähkönsiirtoverkko sekä vahva kokemus vedyn hyödyntämisestä teollisuudessa. Mahdollisuuksina nähdään erityisesti fossiiliton teräksentuotanto, erilaisten vetyjohdannaisten valmistus liikennepolttoaineiksi sekä teollisuudessa käytössä olevan vedyn korvaaminen vähähiilillä vedyllä. Toisaalta naapurimaihin verrattuna korkeampi sähkönhinta, vähäinen kokemus vedyn käytöstä teollisuuden ulkopuolella sekä suolaluolien puute nostetaan Suomen heikkouksiksi. Keskeisimpinä uhkina tiekartassa huomioidaan vetyteknologian kustannuskilpailukyvyyn heikko kehitys sekä tuotannon skaalaamisen haasteet, jotka voivat muodostaa pullonkaulan investointien toteutumiselle.

Vuonna 2020 julkaistuissa **toimialojen vähähiilitiekartoissa** vety tunnustetaan mahdollisena päästövähennyskeinona useassa eri roolissa, erityisesti metallinjalostuksessa ja kemianteollisuudessa (TEM, 2020b). **Kemianteollisuuden vähähiilitiekartassa** vähäpäästöisellä vedyn tuotannolla voidaan vähentää teollisuuden nykyisiä, fossiilisen vedyn valmistuksesta johtuvia päästöjä (Vasara et al., 2020a). Vaihtoehtoja vedyn valmistukselle on useita. Vaikka ratkaisut ovat hyvin tapauskohtaisia, Power-to-X -teknologioiden mahdollistamat päästövähennysten kustannukset on arvioitu vuoden 2019 tasossa huomattavasti korkeammaksi kuin useiden muiden vaihtoehtojen. Kemianteollisuuden skenaariotarkastelussa (scope 1 ja 2 -päästöt) elektrolyysivedyn tuotannon on arvioitu kuluttavan noin 10 TWh/a sähköä vuonna 2050. Merkittävässä mittakaavassa elektrolyysivedyn tuotannon on arvioitu alkavan 2030-luvun alku- tai loppupuolella (skenaariot 2 ja 3, vastavasti). **Teknologianteollisuuden vähähiilitiekartassa** vety on vaihtoehto fossiilivapaan teräksen valmistuksen pelkistimeksi (Soimakallio, 2020). Siirtymän vetyä hyödyntävään teräksen valmistukseen on arvioitu tapahtuvan vaiheittain vuosien 2025 ja 2040 välillä.

Liikenteen ja logistiikan vähähiilitiekartassa vedyn arvioidaan olevan yksi mahdollinen tulevaisuuden käyttövoima erityisesti raskaassa liikenteessä (Vasara *et al.*, 2020b). Vetyä tai synteettisiä polttoaineita hyödyntävien teknologioiden ei kuitenkaan arvioida kaupallistuvan laajasti ennen 2030-lukua henkilö- tai tavaraliikenteessä. Tiekartassa arvioidaan, että raskaassa liikenteessä kehitys voi olla nopeampaakin, mutta edellyttää panostuksia vedyn jakeluinfraktruktuuriin. On huomattava, että liikenteen ja logistiikan tiekartta ei tarkastellut kansainvälistä meri- tai lentoliikennettä. **Metsäteollisuuden tiekartassa** arvioidaan CCU-teknologioilla olevan mahdollinen rooli 2040-luvulla lisäämään hiilen sitomista (Vasara *et al.*, 2020c). **Energiäteollisuuden tiekartassa** vetyä arvioidaan yhtenä osana puhdistuvia kaasuja, jonka on arvioitu etenevän vahvasti erityisesti 2030-luvulla Euroopassa. Kasvava vedyn tuotanto lisäisi merkittävästi sähkön kysyntää (ET, 2020).

6 Vetytalouden arvoketjut

Yhteenveto

Vetytalouden arvoketjulla tarkoitetaan tässä toimintoja, joita yhdistämällä raaka-aineista ja resursseista saadaan ensin puhdasta tai vähäpäästöistä vetyä ja sitten mahdollisia jatkojalosteita, sekä toimijoita, jotka aktiivisesti tuottavat ja käyttävät vetyarvoketjussa liikkuvia virtauksia. Vaikka arvoketjuista voi muodostua runsaasti vaihtoehtoisia yhdistelmiä, vetyarvoketjuista voidaan tunnistaa muutamia toistuvia **ydinosia**.

Energian tuotannossa ja siirrossa kriittistä on päästöttömän sähkön riittävä saatavuus, koska varsinkin elektrolyysiin perustuvassa vedyntuotannossa sähköntarve on merkittävä.

Vedyn tuotantoteknologioita on monia. Fossiilisista polttoaineista voidaan valmistaa vähähiilistä vetyä käyttämällä prosesseja, joissa ei synny suoria hiilidioksidipäästöjä, tai ottamalla nykyisistä prosesseista syntyvä hiilidioksidi talteen. Uusiutuvia vedyn raaka-aineita ovat biomassa ja vesi. Biomassasta voidaan valmistaa vetyä useita eri reittejä, ja vedestä vetyä tuotetaan sähkön avulla elektrolyysiä hyödyntäen. Elektrolyysiteknologiat voidaan jakaa kolmeen pääkategoriaan, ja erityisesti näiden tuotantoteknologioiden investointikustannusten odotetaan laskevan kehityksen myötä. Lisäksi on lukuisia joukko mahdollisia valmistusteknologioita, joita tutkitaan, mutta jotka ovat edellä esitettyjä varhaisemmassa kehitysvaiheessa.

Vedyn käsittelyssä, varastoinnissa, logistiikassa ja jakelussa on kaksi päämuuttujaa: vedyn varastointimuoto (esim. nesteytetty, paineistettu tai kemiallinen sidonta) sekä kuljetustapa (esim. putkistot, maantie- tai laivakuljetukset). Siirto- ja varastointikustannukset voivat olla merkittävät suhteessa tuotantokustannuksiin.

Vetyä voidaan hyödyntää sellaisenaan tai lukuisissa erilaisissa johdannaistuotteissa. **Vedyn johdannaistuotteiden** valmistusteknologioissa on suuria eroja sen suhteen, kuinka kypsiä ne ovat teknisesti ja millaiseksi kokonaisprosessin hyötysuhde muodostuu. Mitä moniportaisempi tuotantoprosessi on kyseessä, sitä suuremmat ovat tyypillisesti energia- ja materiaalihäviöt. **Vedyn käyttökohteiksi** mainitaan tyypillisesti teollisuus, liikenne ja energiasektori. Vety ja sen johdannaistuotteet eivät ole kilpailukykyisin päästövähennyskeino kaikissa käyttökohteissa, ja vertailua on syytä tehdä fossiilisten ratkaisujen lisäksi muiden keinojen, kuten suoran sähköistämisen kanssa.

Toimivaan vetytalouteen tarvitaan edellä mainittujen arvoketjun osien lisäksi myös **arvoketjun poikkileikkaavia kokonaisuuksia**. Tällaisia ovat muun muassa projektinhallinta, teknologian ja laitteiden toimitus, IT-, automaatio- ja tekoälyosaaminen sekä laitteiston ja infrastruktuurin huolto. Myös erilaiset konsultti- ja suunnittelupalvelut mahdollistavat arvoketjun eri osien optimoinnin ja integroinnin.

Vety ja elektrolyysi ovat kiehtoneet insinöörejä kautta aikojen aina 1800-luvulta asti, kun vetyä käytettiin ensimmäistä kertaa mm. kuumailmapallojen ja ilmalaivojen polttoaineena (IEA, 2019). Vedyn tuottaminen vedestä elektrolyysin avulla löydettiin jo vuonna 1839 ja maailmansotien jälkeen vety vakiinnutti asemansa merkittävänä teollisuuden raaka-aineena (Wengenmayr, 2013). Vetytalous, polttokennoajoneuvot ja vetypolttoaineet vakiintuivat osaksi energiakeskustelua 1970-luvulla kansainvälisen öljykriisin aikoihin ja niiden saama teollisuuden, sijoittajien ja akatemian huomio on vaihdellut eri vuosikymmeninä.

Vetyhypeen (hydrogen hype) on viitattu useita kertoja historiassa, kun visiot vetyyn nojasta energiajärjestelmästä saavat kannatusta julkisessa keskustelussa ja odotukset vetyteknologian läpimurrosta nousevat korkealle. Merkittävä kiinnostus vetyä kohtaan koettiin edellisen kerran 2000-luvun alussa, kun Yhdysvallat ja myöhemmin autoteollisuus rahoittivat polttokennoautoja voimakkaasti (Qin *et al.*, 2014). Tällöin koetusta teknologisesta kehityksestä huolimatta polttokennoautot eivät kaupallistuneet odotetusti johtuen mm. tankausinfran ja autojen kysynnän muna-kana ongelmasta. Tämän myötä vetyteknologia sai maineen teknologiana, joka on aina kymmenen vuoden päästä läpimurrostaan. Edellinen vetyhype lopahti vuoteen 2010 mennessä, kun julkisten näyttöjen puuttuessa vetyhankkeiden oli yhä vaikeampaa saada rahoitusta (Bakker & Budde, 2012).

Aiemmasta poiketen nykyinen kiinnostus vetyä kohtaan ei fokusoidu yhtä vahvasti liikenteen ja polttokennojen ympärille, vaan vetytalouden mahdollisuudet nähdään keinona vastata tiukentuviin päästötavoitteisiin erityisesti raskaassa liikenteessä ja energiaintensiivisessä teollisuudessa. Toisaalta kaikkiin kohteisiin vetykään ei ole ratkaisu. IEA:n mukaan ilmastotavoitteiden lisäksi huoltovarmuustekijät tukevat vetysovellusten yhteiskunnallista tarvetta. Lisäksi puhtaiden ja vähähiilisten energianlähteiden parempi saatavuus sekä kilpailukykyisempi hinta puoltavat vetyratkaisujen päästöjä vähentävää potentiaalia.

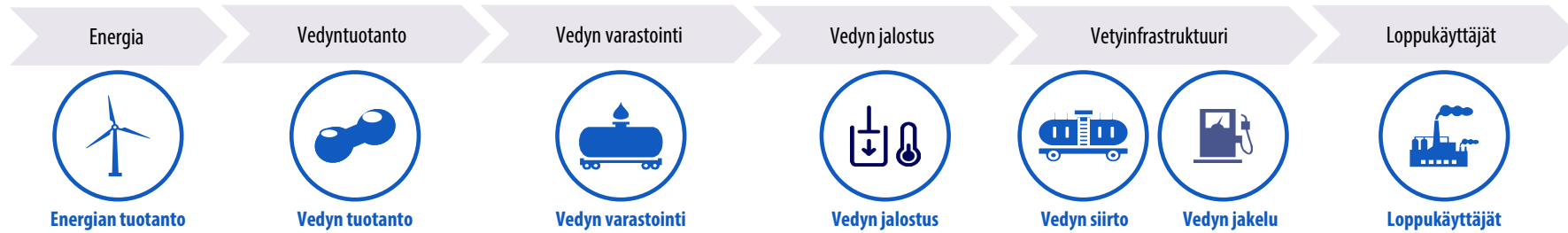
Vetytalouden arvoketjuissa vedyn tuotanto, logistiikka ja käyttö voivat järjestäytyä monilla tavoilla, mutta sekä yleisesti että Suomen näkökulmasta tietyt arvoketjut ovat todennäköisempiä kuin toiset. Tämä luku tarjoaa kokonaiskuvan vetytalouden kehittyvistä arvoketjuista ja niiden edellyttämistä resursseista. Luku pyrkii vastaamaan kysymyksiin vetyteknologian kehitysarvioiden realistisuudesta ja vetytalouden mahdollisista haasteista. Lähestymistapakuvaamisen jälkeen esitetään lyhyesti vetytalouden perinteisen arvoketjun ydin. Tämän jälkeen arvioidaan erikseen kunkin arvoketjun osan vaihtoehtoja ja kehitysnäkymiä sekä kokonaisvetyarvoketjun kaupallistumiskehitystä.

6.1 Lähestymistapa vetytalouden arvoketjujen kuvaamiseen

Painotuseroista riippuen talouden osakokonaisuuksia voidaan kuvata käsitteillä kuten arvoketju, ekosysteemi tai klusteri. Erityisesti uusien toimialojen muodostuessa näitä käsitteitä käytetään kuvaamaan syntyvien hyödykkeiden jalostumista uusiksi tuotteiksi. Tässä selvityksessä vetytalouden arvoketjulla viitataan niihin toimintoihin, joita yhdistämällä raaka-aineista ja resursseista saadaan ensin puhdasta tai vähäpäästöistä vetyä ja sitten mahdollisia jatkojalosteita, sekä niihin toimijoihin, jotka aktiivisesti tuottavat ja käyttävät vetyarvoketjussa liikkuvia virtauksia.

Vetytalouden arvoketjun ytimen muodostavat energiantuotanto ja -siirto, vedyn tuotanto, varastointi ja logistiikka, mahdollinen jatkojalostus ja loppukäyttö. Lisäksi useaan arvoketjun osaan voi kytkeytyä toimintoja kuten tutkimus, kehitys ja innovaatio (TKI), teknologian toimitus ja kehitys, projektikehitys, kokonaisratkaisuiden toimittaminen, rahoitus sekä laitteiston ja infrastruktuurin kunnossapito. Tietyt teknologiaperheet, kuten IT- ja automaatio-osaaminen, liittyvät keskeisesti kaikkiin arvoketjun osiin, kuten muillakin talouden aloilla. Vetytalouden arvoketjuja voidaan järjestää hyvin monin tavoin riippuen esimerkiksi siitä, kuinka keskitettyä tai hajautettua vedyn tuotanto ja vetytuotteiden kulutus ovat.

Kuva 34. Vetytalouden ydinarvoketju (yksi monista mahdollisista)



Kuva 35. Vetytalouden arvoketju laajasti ymmärrettynä



Kuva 34 edellisellä sivulla esittää vetytalouden arvoketjun ytimen. Kuva on yksinkertaistus, ja kohteesta riippuen erilaisia siirto- ja varastointiosioita voidaan tarvita vaihteleva määrä eri osissa arvoketjua. Huomattavaa on, että nykyisessä globalisoituneessa maailmassa kaikkien arvoketjun osien raaka-aineesta loppukäyttöön ei tarvitse sijaita yhden valtion alueella. Pandemian aikana globaalien arvoketjujen haavoittuvuus on monin tavoin tullut esille, ja arvoketjujen varmistaminen sekä uudelleensuunnittelu on monissa kohdin oletettavaa.

Kuva 35 edellisellä sivulla puolestaan esittää vetytalouden arvoketjun laajasti ymmärrettyä ja havainnollistaa useita arvoketjun läpileikkaavia toimintoja, kuten projekti-, huolto- ja automaatiotoimintaa.

Lopulta jokainen toteutuva vetyprojekti ja -arvoketju on kuitenkin yksilöllinen, ja esitetty on vain esimerkki siitä millaisia arvoketjut voivat olla. Vetytalouden arvoketjut tai niiden osat kytkeytyvät monin tavoin jo olemassa oleviin talouden rakenteisiin ja arvoketjuihin. On oletettavissa, että arvoketju muuntuu lähivuosikymmeninä myös tavoilla, joita nyt on vaikea ennakoida. Seuraavassa alaluvussa käsitellään tarkemmin vetytalouden ydinarvoketjun eri osia sisällyttäen kuvauksiin myös johtopäätöksiä Suomen kannalta.

6.2 Vetyarvoketjun osat

6.2.1 Energian tuotanto ja siirto

Energian tuotanto ja siirto muodostavat keskeisen osan vetytaloutta. Kun vedyn tuotanto perustuu veden elektrolyyttiseen hajottamiseen hapeksi ja vedyksi, tarvitaan vedyn tuotantoon merkittäviä määriä hiilineutraalia tai vähäpäästöistä sähköä. Sähkön tuotanto ja siirto muodostavat siten keskeisen osan vetytalouden arvoketjua. Vetyä voidaan käyttää myös sähköjärjestelmän tasapainottamiseen, jos vetyä varastoidaan käytettäväksi sähkön-tuotantoon niinä ajanhetkinä, kun järjestelmässä tarvitaan säätövoimaa tai vastaavasti, jos vedyn tuotanto joustaa. Vety tyypillisesti luokitellaan siihen käytetyn energian alkupe-
rän ja valmistusprosessin perusteella. EU:ssa valmistellaan parhaillaan yhteisiä lainsäädän-
nössä käytettäviä määritelmiä ja näihin sisältyviä teknisiä vaatimuksia.

Tietolaatikko 1. Energiantuotanto ja siirto Suomessa

Suomen vahvuutena vähähiilinen sähköntuotanto ja toimivat pohjoismaiset sähkömarkkinat

Vedyn tuotanto elektrolyysiin perustuvalla teknologialla on erittäin sähköintensiivistä. Mitä vähäpäästöisempää käytetty sähkö on, sitä suurempia ovat hyödyt päästövähennysten näkökulmasta.

Suomi on osa hyvin toimivia pohjoismaisia sähkömarkkinoita. Pohjoismaissa on jo nykyisin paljon vähähiilistä sähköntuotantoa. Suomessa ja Pohjoismaissa sähkömarkkinoiden dekarbonisaatio myös etenee verrattain nopeasti lähivuosina. Kotimaassa tuulivoimainvestointien merkittävän kasvun ja käyttöön tulevan uuden ydinvoimakapasiteetin myötä vähähiilistä sähköntuotantoa tulee markkinoille lähivuosina merkittävästi lisää. Erityisesti tuulivoima-alalla on merkittävää potentiaalia myös lisäinvestoinneille. Tulevalla EU-säätelyllä (*RED III*) on merkittäviä seurauksia sille, millaista sähköntuotantoa vetytalouden katsotaan voivan hyödyntää: poliittisesti herkkiä kysymyksiä ovat muun muassa maakaasun, bioenergian ja ydinvoiman hyödyntäminen vedyn tuotantoon. Näillä päätöksillä on merkittävä vaikutus myös suomalaisen vetytalouden kehitykseen.

Suomen vahvuuksiin kuuluu myös vahva sähkön siirtoverkko verrattuna esimerkiksi Keski-Eurooppaan, joka muodostaa erinomaisen lähtökohdan vetytalouden kehittämiseksi, vaikka lisäinvestointeja siirtokapasiteettiin tarvitaan ja tehdään merkittävästi lähitulevaisuudessa Suomessakin.

Suomessa ei sen sijaan ole valmiina koko maan kattavaa kaasuverkostoa, kuten esimerkiksi Keski-Euroopassa, jossa monin paikoin kartoitetaan nykyisen kaasuinfraktuurin hyödyntämistä tulevaisuuden vetytalouden tarpeisiin. Vetytalous Suomessakin hyötyisi integraatiosta sähkö-, kaasu- ja lämpösektorien ja teollisuuden kanssa.

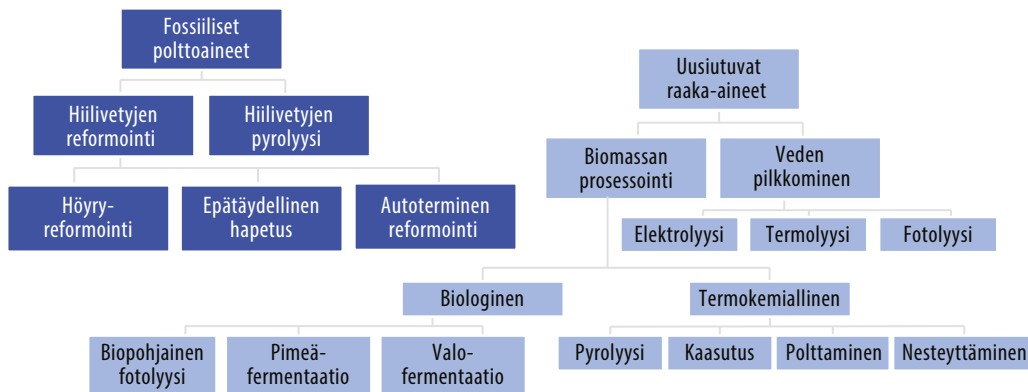
Energian tuotannon ja siirron näkökulmasta edellytykset suomalaisen vetytalouden synnylle kohdistuvat ennen kaikkea vähähiilisen, toimitusvarman ja edullisen sähkön saatavuuteen. Kotimaassa on myös käytävä keskustelua siitä, millaisiin infrastruktuuri-investointeihin ollaan valmiita mahdollisuuksien realisoimiseksi, ja kuinka investoinnit tulisi kohdistaa ajallisesti ja alueellisesti. Kansainvälinen yhteistyö ja toimivat pohjoismaiset sähkömarkkinat ovat pohjoismaisen vetytalouden perusedellytys.

6.2.2 Vedyn tuotantoteknologiat

Vaikka vety on maailmankaikkeuden yleisin alkuaine, vapaana alkuaineena sitä ei maapallolla esiinny. Vetyä voidaan kuitenkin valmistaa monin tavoin. Tässä alaluvussa esitetään vedyn tuotantoteknologioiden nykytilanne ja arvioidaan niiden kustannus- ja kaupallistumiskehitystä tulevaisuudessa.

Kuva 36 esittää vedyn valmistuksen pääasialliset vaihtoehdot: reitit fossiilisista ja uusiutuvista lähteistä vedyn tuotantoon. Molemmissa tapauksissa vaihtoehtoisia prosesseja on useita. Uusiutuvia lähteitä hyödyntävä vedyn tuotanto voidaan jakaa raaka-ainelähteensä mukaisesti vettä tai biomassaa käyttäviin prosesseihin. Biomassaa käyttäviä prosesseja on edelleen niin biologisia kuin termokemiallisia. Seuraavassa esitellään lyhyesti erilaisia päävaihtoehtoja.

Kuva 36. Pääasialliset vaihtoehdot vedyn tuotantoon (Nikolaidis & Poullikas, 2017)

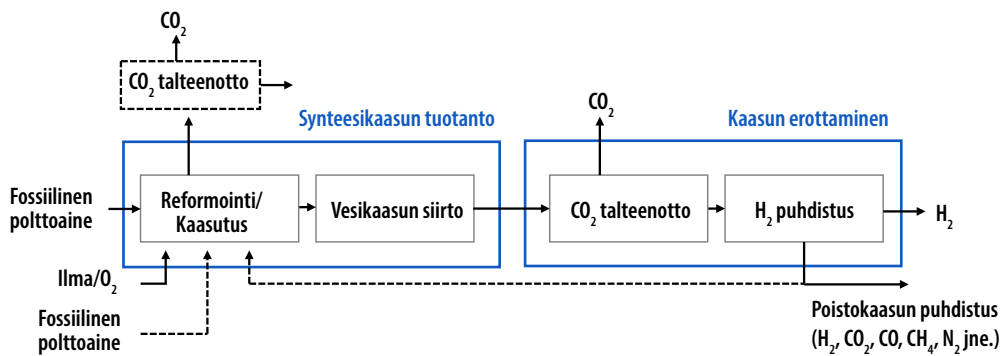


Vetyä voidaan tuottaa päätuotteena (*dedicated production*) tai vety voi olla sivutuote jostakin muuta teollisesta prosessista. IEA:n (2019) mukaan päätuotteena tuotetusta vedystä tuotetaan nykyisin 99 % fossiilista polttoaineista: maakaasusta (76%) ja kivihiilestä (23%). Nykyisin noin kolmannes maailman vedyn tuotannosta syntyy sivutuotteena prosessista, jonka pääasiallinen tuote on jokin muu kuin vety.

Vetyä voidaan valmistaa **fossiilisista polttoaineista**: maakaasusta ja kivihiilestä, mutta myös esimerkiksi naftasta. Maakaasusta vetyä tuotetaan yleisimmin höyryreformoinnilla (*steam methane reforming, SMR*), mutta myös osittaisella hapetuksella (*partial oxidation, POX*) tai näiden yhdistelmällä, niin kutsutulla autoteremisellä reformoinnilla (*autothermal reforming, ATR*). Kivihiilestä vetyä voidaan valmistaa kaasutuksella (IEA, 2019). Fossiilista raaka-ainetta käytettäessä syntyy kuitenkin hiilidioksidipäästöjä, jos raaka-aineeseen sitoutunut hiili hapettuu ja vapautuu ilmakehään hiilidioksidina. Hiilidioksidipäästöjä on mahdollista ehkäistä usealla tavalla. Ensinnäkin voidaan käyttää prosessia, jossa hiili ei hapetu hiilidioksidiksi: esimerkkinä fossiilisen metaanin pyrolyysi, josta hiili erotetaan kiinteänä hiilenä, jolloin vältetään suorat CO₂-päästöt (IEA, 2019). Toiseksi on mahdollista käyttää nykyisenkaltaisia prosesseja, joista syntyvä hiilidioksidi otettaisiin talteen ja varastoitaisiin, tai hyödynnettäisiin CCS/CCU-teknologioita käyttämällä.

Kuvassa 37 esitetään esimerkki hiilidioksidin talteenottoon perustuvasta, fossiilista raaka-ainetta hyödyntävästä vedyn tuotantoprosessista. Prosessissa syntyvä hiilidioksidi erotetaan ja otetaan talteen. Hiilidioksidi on tällöin mahdollista varastoida pitkäaikaisesti (CCS) tai hyödyntää raaka-aineena (CCU).

Kuva 37. Periaatekuva hiilidioksidin talteenottoon perustuvasta vedyn tuotannosta (Woldsund et al., 2016)



Kuva havainnollistaa kuinka vetyä valmistetaan fossiilisista polttoaineista hiilidioksidin talteenoton avulla. Kuvassa mustat viivat viittaavat kaasutukseen tai autotermiseen reformointiprosessiin. Katkoviivalla kuvaan on merkattu muut virtaukset. Hiilidioksidin talteenoton ja vedyn puhdistuksen järjestys kaasun erottelussa riippuvat käytetystä teknologiasta.

Vetyä voidaan valmistaa myös **biomassasta** mm. biokemiallisesti tai termokemiallisesti. Biokemiallisessa tuotannossa hyödynnetään mikro-organismeja. Termokemialliset reitit voivat perustua esimerkiksi biomassan kaasutukseen tai käymisreaktioon (IEA, 2019).

Vetyä voidaan valmistaa **vedestä sähköllä** hajottamalla vesimolekyyli hapeksi ja vedyksi elektrolyysillä. Elektrolyysiteknologiat jaetaan nykyisin yleensä kolmeen pääkategoriaan, jotka ovat alkalinen (ALK), polymeerimembraani (PEM) sekä kiinteäoksidikenno (SOEC) (IRENA, 2020). Teknologiat eroavat erityisesti käytetyn elektrolyytin ja toimintalämpötilan suhteen, mikä asettaa vaatimuksia laitteistossa käytettäville materiaaleille. ALK- ja PEM-teknologioita pidetään jo nykyisin kaupallisessa vaiheessa olevina, kun taas anionivaihtomembraani (AEM)- ja SOEC-teknologiat ovat varhaisemmassa kehitysvaiheessa (IRENA, 2020).

Taulukko 18 esittää elektrolyysiteknologioiden eroja. SOEC-teknologia vaatii huomattavasti korkeampaa lämpötilaa (700–850°C), kun taas muut teknologiat tyypillisesti käyttävät korkeampaa painetta. Elektrolyysiteknologioissa käytetyt materiaalit eroavat huomattavasti toisistaan niin elektrolyytin kuin rakenteiden (membraani, elektrodit, katodi, anodi) osalta.

Taulukko 18. Elektrolyysiteknologioiden ominaispiirteet (IRENA, 2020)

	Alkalinen	PEM	AEM	SOC
Käyttölämpötila	70–90 °C	50–80 °C	40–60 °C	700–850 °C
Käyttöpaine	1–30 bar	< 70 bar	<35 bar	1 bar
Elektrolyytti	Kaliumhydroksidi 5–7 molL ⁻¹	PFSA-membraani	DVB-polymeeri KOH tai NaHCO ₃ kantoaineliuksella	Yttriumoksid- stabiloitu zirkoniumoksid
Eroin	ZrO ₂ stabiloitu PPS -verkolla	Kiinteä elektrolyytti (ks. yllä)	Kiinteä elektrolyytti (ks. yllä)	Kiinteä elektrolyytti (ks. yllä)
Elektrodi/katalyytti (happipuoli)	Nikkelipinnoitettu rei'itetty ruostumaton teräs	Iridiumoksid	Suuri pinta-ala, nikkeli tai NiFeCo metalliseoksella	Perovskiitti- tyyppinen (esim. LSCF, LSM)
Elektrodi/katalyytti (vetypuoli)	Nikkelipinnoitettu rei'itetty ruostumaton teräs	Platina nanopartikkelit hiilimustalla	Suuri pinta-ala, nikkeli	Ni/YSZ
Huokoinen anodi kuljetuskerros	Nikkeliverkko (yleensä)	Platinapinnoitettu sintrattu huokoinen titaani	Nikkelivaaho	Karkea nikkeliverkko tai -vaaho
Huokoinen katodi kuljetuskerros	Nikkeliverkko	Sintrattu huokoinen titaani tai hiili vuori	Nikkelivaaho tai hiilivuoraus	-
Kaksinapainen anodilevy	Nikkelipinnoitettu ruostumaton teräs	Platinapinnoitettu titaani	Nikkelipinnoitettu ruostumaton teräs	-
Kaksinapainen katodilevy	Nikkelipinnoitettu ruostumaton teräs	Kultapinnoitettu titaani	Nikkelipinnoitettu ruostumaton teräs	Kobolttipinnoitettu ruostumaton teräs
Kehikko ja tiivistys	PSU, PTFE, EPDM	PTFE, PSI,	PTFE, silikoni	Keraaminen lasi

Huom. Harmaissa soluissa merkittävästi variaatioita yritysten välillä.

Vesi on elektrolyysiprosessin keskeinen raaka-aine. Stoikiometrisesti vettä tarvitaan 9 kg jokaista tuotettua kilogrammaa vetyä kohti. IRENA on kuitenkin arvioinut, että huomioiden prosessin häviöt tyypillinen veden tarve voi olla 18–24 kg vettä per kilo tuotettua vetyä (IRENA, 2020).

Kun vetyä tuotetaan elektrolyysin avulla sivutuotteena syntyy happea, joka tyypillisesti vapautetaan ilmakehään. Happea voidaan myös hyödyntää teollisuuden prosesseissa ja

lääketieteessä. Metalli-, kemian-, lasi- sekä sementtiteollisuus tarvitsevat happea teollisissa prosesseissaan ja erityisesti teräksen valmistuksessa masuunit kuluttavat merkittävästi happea (Kato *et al.*, 2005). Happea voidaan hyödyntää myös voimalaitos- ja lämpökattiloissa palamishyötysuhteen nostamiseksi, sekä hiilidioksidin talteenottoprosesseissa (happipoltto). Viime aikoina myös lääketieteellisen hapen tarve sekä sen puute ovat nousseet keskusteluun Covid-19 -pandemian myötä (Anderson, 2020). EU:ssa lääketieteellisiä kaasuja voivat kuitenkin ainoastaan valmistaa lääketeollisuuden tehtaat, joilla on virallinen lääkkeiden myyntilupa. Tästä poiketen happea voidaan kuitenkin valmistaa Suomessa sairaaloissa ja terveyskeskuksissa omaan käyttöön, jos turvallisuuden ja valvontaan liittyvät edellytykset täyttyvät (Fimea, 2021). Sivutuotehapella on siis kysyntää.

Elektrolyysiteknologioiden tehokkuuden ja kilpailukyvyn on arvioitu parantuvan huomattavasti tulevina vuosikymmeninä. Taulukko 19 esittää IEA:n arvion ALK-, PEM- ja SOEC-teknologioiden kehitykselle tulevina vuosikymmeninä. Tällä hetkellä kaupallisesti epäkypsin SOEC-teknologia tarjoaa korkeamman hyötysuhteen verrattuna muihin elektrolyysiteknologioihin. Kaikkien teknologioiden arvioidaan kehittyvän vuoteen 2030 mennessä. Erityisesti PEM-elektrolyysierien hyötysuhteen oletetaan nousevan jopa lähes 10 prosenttiyksikköä. Myös järjestelmien käyttöiän (*stack lifetime*) odotetaan pidentyvän huomattavasti, varsinkin SOEC-teknologian osalta. SOEC-teknologian investointikustannukset ovat tällä hetkellä jopa yli viisinkertaiset verrattuna halvimpaan ALK-teknologiaan, mutta eron arvioidaan kuroutuvan umpeen pitkällä tähtäimellä. Pitkällä aikavälillä elektrolyysiteknologioiden investointikustannusten arvioidaan asettuvan välille 200–1000 USD/kW_e (DEA, 2017).

Taulukko 19. Elektrolyysiteknologioiden arvioitu kehitys (IEA, 2019)

	Alkalielektrolyyseri			PEM-elektrolyyseri			SOEC-elektrolyyseri		
	Nykypäivä	2030	Pitkä aikaväli	Nykypäivä	2030	Pitkä aikaväli	Nykypäivä	2030	Pitkä aikaväli
Hyötysuhde (%)	63–70	65–71	70–80	56–60	63–68	67–74	74–81	77–84	77–90
Käyttöpaine (bar)	1–30			30–80			1		
Käyttölämpötila (°C)	60–80			50–80			650–1000		
Laitteen elinaika (käyttötunnit)	60 000–90 000	90 000–100 000	100 000–150 000	30 000–90 000	60 000–90 000	100 000–150 000	10 000–30 000	40 000–60 000	75 000–100 000
Kuorman jakauma (% suhteessa nominaaliseen kuormaan)	10–110			0–160			20–100		
Laitoksen hiilijalanjälki (m ² /kW _e)	0,095			0,048					
CAPEX (USD/kW _e)	500–1400	400–850	200–700	1100–1800	650–1500	200–900	2800–5600	800–2800	500–1000

Edellä esitetyn lisäksi tutkitaan paljon muitakin vedyn valmistusteknologioita, mutta nämä ovat vielä varhaisemmassa kehitysvaiheessa. Teknologiat voivat perustua esimerkiksi bioteknologian hyödyntämiseen tai erilaisiin fotokatalyyttisiin prosesseihin. Vertaisarvioituja julkaisuja on saatavilla mm. vedyn tuotantoteknologioista ylipäätään (Acar & Dincer, 2019), biologisista tuotantotavoista (Akhlaghi & Najafpour-Darzi, 2020), katalyyttisestä biomassan käsittelystä (Tanksale *et al.*, 2010) sekä valoa hyödyntävistä prosesseista (Acar *et al.*, 2019).

Elektrolyyserien investointikustannusten on arvioitu pienentyvän tulevina vuosikymmeninä merkittävästi (ks. kuva 38 alla). Samalla kuva 38 havainnollistaa suurta hajontaa, joka erityisesti elektrolyysitekniologioiden investointikustannusarvioihin liittyy. Arviossaan JRC huomauttaa, että eri lähteissä esitettyihin kustannusarvioihin liittyy epäyhteismitallisuutta, mikä voi osin selittää suuria eroja. Epävarmuutta liittyy sekä nykyisiin että tulevaisuuden kustannuksiin.

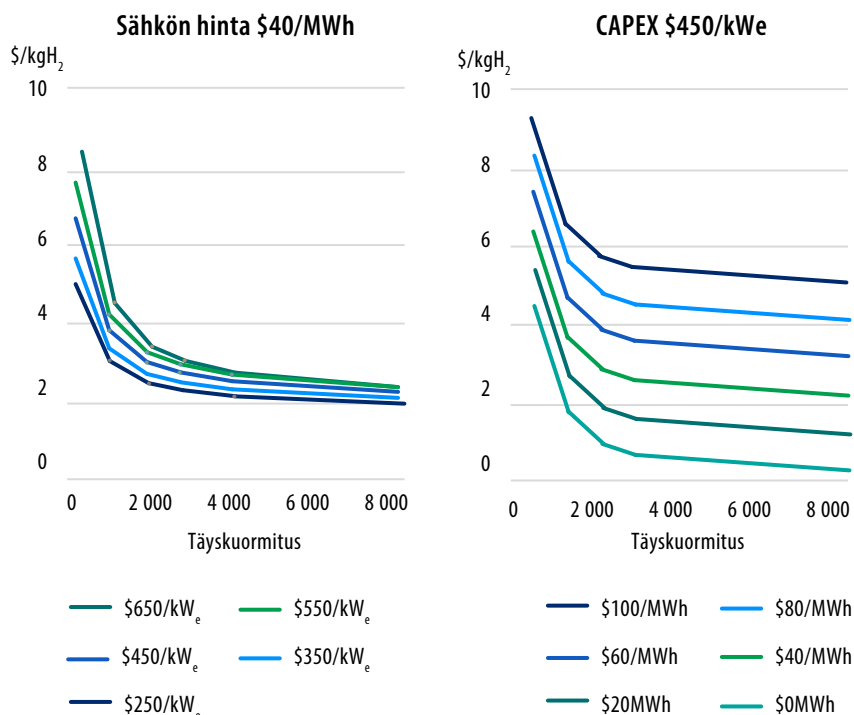
Kuva 38. Investointikustannusten kehitys 2020–2050 elektrolyyseritekniologioille (yllä) ja hiilidioksidin talteenottoon perustuvilla tekniologioilla (alla) (Cihlar *et al.*, 2020)



Investointikustannusten oletetaan pienenevän voimakkaimmin vuosina 2020–2030 ja tasaantuvan tämän jälkeen (DEA, 2017). Kaikkien arvoketjun osien ja teknologioiden kustannusten ei arvioida muuttuvan yhtä paljon tulevaisuudessa. Esimerkiksi infrastruktuurin rakentaminen (sähkö- ja kaasuverkot) on teknisesti ja kaupallisesti kypsää, ja kustannusten merkittävä lasku on epätodennäköisempää kuin vedyntuotantoteknologioille, jotka ovat tähän saakka olleet pienen mittakaavan ja epäoptimoidun tuotantoketjun vuoksi kalliimpia.

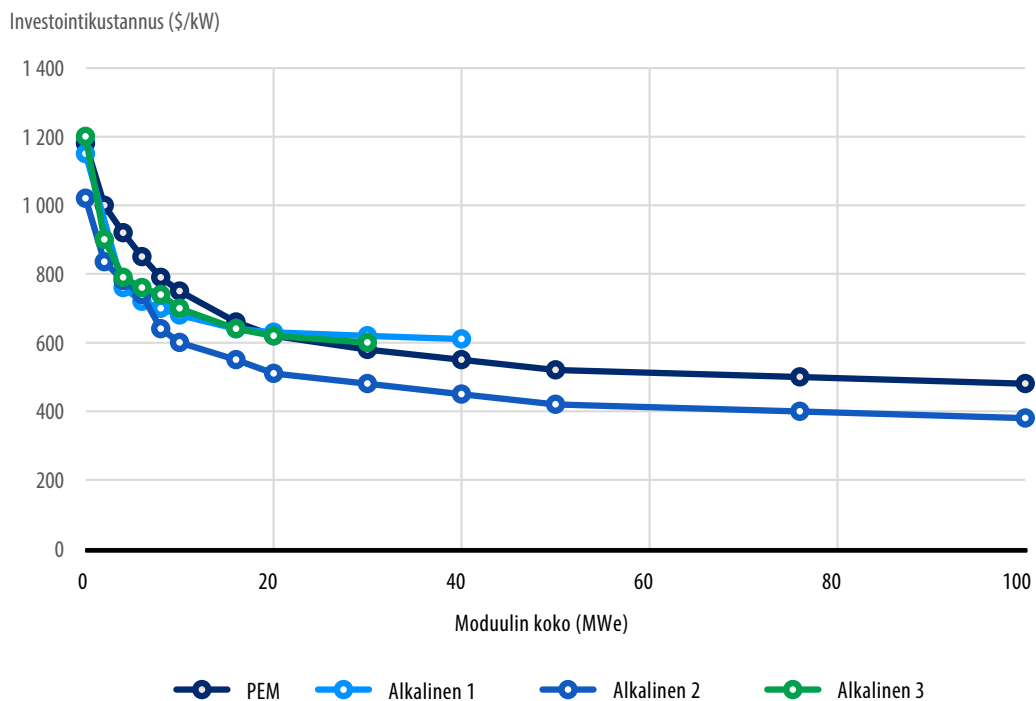
Keskeisiä tekijöitä vedyn tuotannon kannattavuudelle ovat elektrolyysin käyttötuntien määrä vuodessa ja sähkön hinta (ks. kuva 39 alla). Vasemmanpuoleisen kuvan mukaan investointikustannusten eron vaikutus tuotetun vedyn hintaan pienenee, kun käyttötuntimäärä kasvaa. Jos käyttötuntimäärä jää merkittävästi alle 2 000–3 000 tuntiin vuodessa, vedyn kustannukset nousevat huomattavasti. Oikeanpuoleinen kuva havainnollistaa sähkön hinnan vaikutusta vedyn hintaan. Olettaen noin 8 000 käyttötuntia vuodessa, elektrolyysillä päästään kustannustasoon noin 1,5 USD/kg vetyä (sähkön hintaoletus 20 USD/MWh) tai 7 USD/kg vetyä (sähkön hintaoletus 100 USD/MWh). Sähkön hankintakustannuksella (sisältäen siirron ja verot vedyn tuottajan näkökulmasta) on siis määräävä vaikutus elektrolyysivedyn tuotannossa.

Kuva 39. Elektrolyysillä tulevaisuudessa tuotetun vedyn tuotantokustannus vuotuisten käyttötuntien (vasen) ja sähkön hinnan (oikea) funktiona (IEA, 2019)



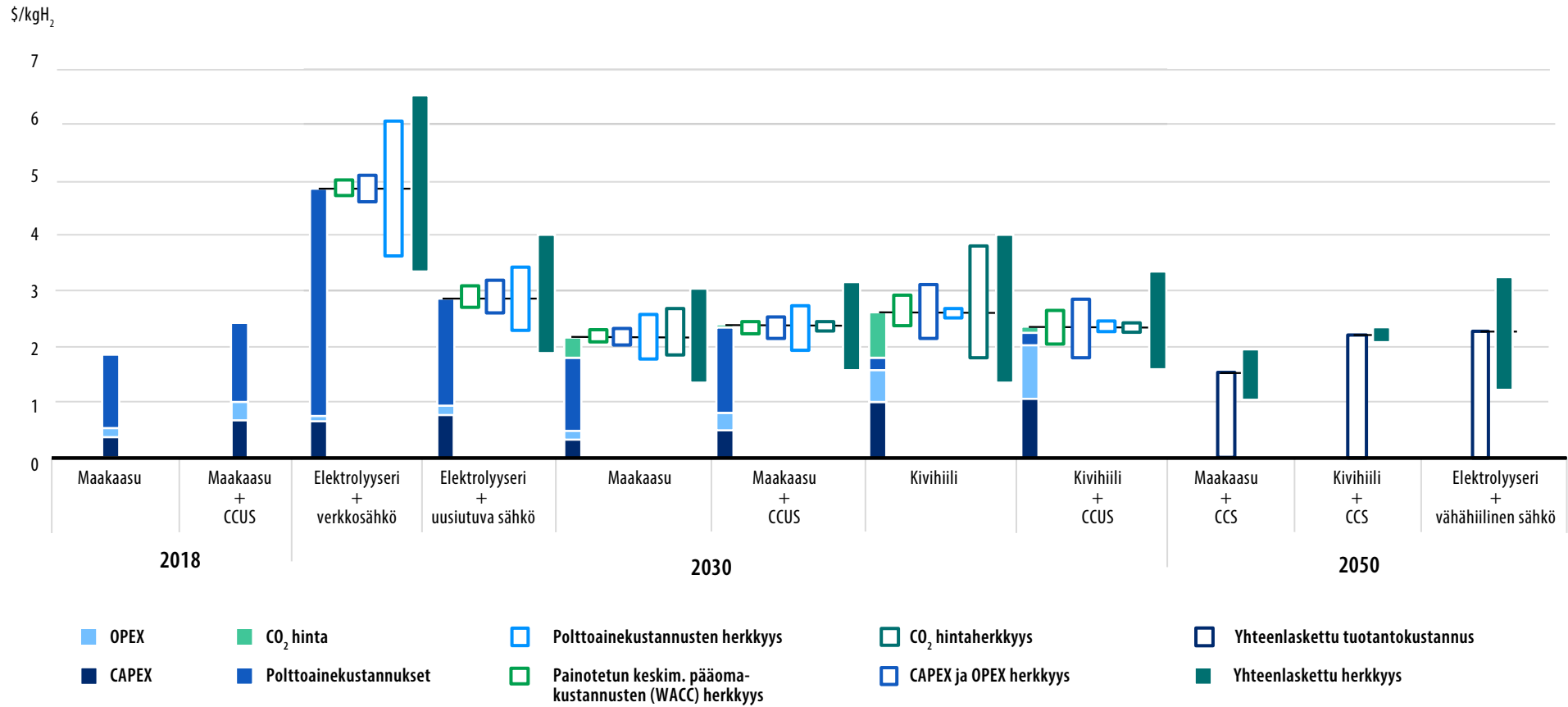
Elektrolyysille on odotettavissa merkittäviä kustannushyötyjä yksikkö- ja laitokseen kasvaessa (ks. kuva 40 alla). Elektrolyyserien massatuotanto ja projektikehityksen mahdollistama kehitystyö ovat merkittävässä roolissa elektrolyysiteknologioiden kustannusten alentamisessa (IRENA, 2020). Elektrolyyserien kustannukset ovat jo laskeneet merkittävästi (Saba *et al.*, 2018).

Kuva 40. Elektrolyysiteknologioiden investointikustannus yksikkökoon funktiona (IRENA, 2020)



Kuva 41 esittää IEA:n (2019) arvion vedyn tuotantoteknologioiden kustannuskilpailukyvyistä vuosina 2030 ja 2050. Fossiilisen vedyn tuotantokustannus on nykyisin noin 1,5–2 USD/kgH₂. Elektrolyysivety on IEA:n arvioissa huomattavasti kalliimpaa kuin fossiilisen vedyn tuottaminen vielä vuonna 2030, mutta saavuttaa saman kustannustason vuoteen 2050 mennessä. Arvioihin liittyy kuitenkin suuria epävarmuuksia.

Kuva 41. Arvio vedyn tuotantokustannuksista 2018, 2030 ja 2050 (IEA, 2019; IEA, 2021)



Tietolaatikko 2. Vetyteknologiat Suomen näkökulmasta

Monet teknologiat mahdollisia

Teknologiavalintaan vaikuttavat tarjolla olevien vaihtoehtoisten prosessien suorien kustannusten lisäksi vedyntuotantolaitoksen sijainti suhteessa tarvittaviin käyttöhyödykkeisiin (sähkö, vesi) ja mahdollinen integrointi olemassa olevaan teolliseen tuotantolaitokseen (esim. olemassa oleva fossiilisen vedyn tuotantolaitos).

Suomella on vahvuuksia elektrolyysiteknologioiden näkökulmasta. Suomessa on runsaasti puhdasta, makeaa vettä, jota voitaisiin hyödyntää elektrolyysin raaka-aineena. Myös vähähiilinen sähköntuotanto voidaan nähdä kotimaisena valttina. Sinisen vedyn tuotanto, joka edellyttää hiilidioksidin talteenottoa ja varastointia, voi Suomessa olla huomattavasti vähemmän houkuttelevaa kuin alueilla, joissa voidaan helpommin hyödyntää geologisia, esimerkiksi merenalaisia muodostumia hiilidioksidin varastointiin.

Suomessa on huomattavaa teknologista osaamista, jota voidaan hyödyntää vetytalouden tulevaisuudessa. Jos kuitenkin rajoitetaan tarkastelemaan vain vedyn nykyisiä tuotantoteknologioita, ei Suomella ole varsinaista etulyöntiasemaa. Suomessa on maailmanluokan huippuosaamista esimerkiksi biomassan käsittelyssä ja prosessoinnissa sekä uusien teknologioiden kehityksessä, mikä voi tarjota kiinnostavia mahdollisuuksia pidemmällä aikavälillä. Suomessa on osaamista esimerkiksi automaatioon, elektroniikkaan, tekoälyyn ja prosessiteknologiaan liittyen, joita voidaan hyödyntää vedyn tuotannossa.

Edellytyksenä suomalaisen vetytalouden syntymiselle ei tietysti ole minkään nimenomaisen teknologian tai prosessin hyödyntäminen kotimaassa. Samalla on selvää, että hiilidioksidin talteenottoon ja varastointiin perustuva vedyn tuotanto edellyttäisi kansainvälistä yhteistyötä varastointitarpeen vuoksi.

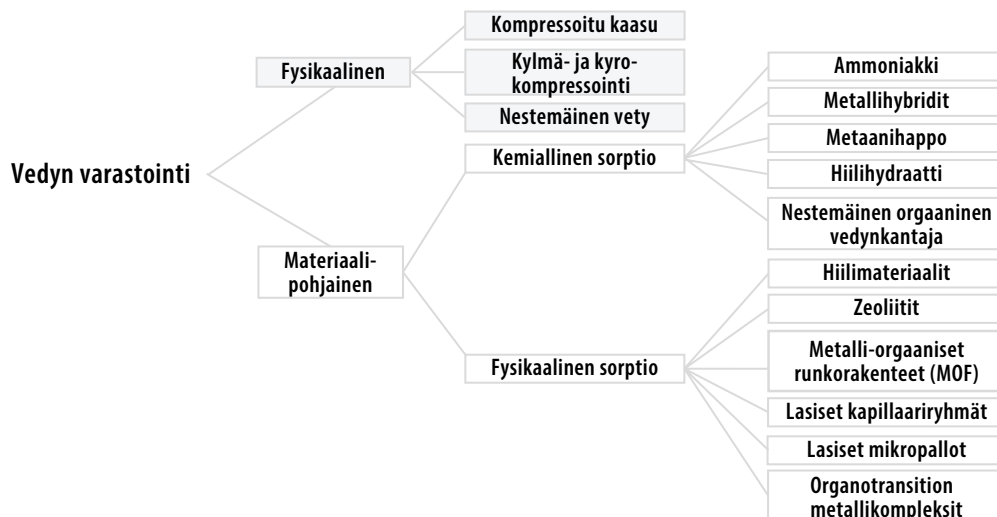
6.2.3 Vedyn käsittely, varastointi, logistiikka ja jakelu

Vedyn tuotanto ja kulutus eivät välttämättä kohtaa ajallisesti tai paikallisesti. Tästä seuraa tarpeita vedyn varastoinnille ja siirrolle. Jos vety voidaan tuottaa ja kuluttaa samassa pisteessä, vältetään siirtokustannuksilta, jotka voivat ääritapauksessa olla moninkertaisia vedyn tuotantokustannukseen verrattuna (IEA, 2019). Tässä aluvussa esitetään näkökulmia liittyen vedyn käsittelyyn varastointiin, logistiikkaan ja jakeluun.

Riippuen tuotantoprosessista ja käyttökohteesta tuotettu vety voi vaatia **jälkikäsittelyä** kuten puhdistusta. Erityisesti sivutuotteena syntyvä vety voi sisältää monenlaisia epäpuhtauksia. Vaadittu vedyn konsentraatio sekä siedetyt epäpuhtauspitoisuudet riippuvat vedyn käyttökohteesta ja logistiikasta (Voldsund *et al.*, 2016).

On monia tapoja **varastoida** vetyä. Periaatteellisesti vedyn varastointitavat voidaan jakaa varastointiin fysikaalisesti (paineistus, jäähdytys) tai materiaalina (kemiallisesti tai fysikaalisesti sitoutuneena), kuten kuvassa 42 esitetään (Moradi & Groth, 2019). Nykyisin yleisintä on varastoida vety kaasuna tai nesteenä paikallisissa varastoissa, mutta tulevaisuuden vetytalous vaatii myös suurempien varastointimahdollisuuksien hyödyntämistä. Suuren mittakaavan vedyn varastoinnissa voidaan hyödyntää erilaisia maanalaisia muodostumia kuten luolastoja ja ehtyneitä fossiilimuodostumia (IEA, 2019).

Kuva 42. Vedyn varastointitavat ryhmiteltynä (Moradi & Groth, 2019)



Vetyä voidaan varastoida ja kuljettaa jäähdytettynä nesteeksi tai korkeassa paineessa, tai sitä voidaan varastoida säiliöissä paineistettuna tai nesteytettynä tai absorboituneena erilaisiin materiaaleihin. Vetyä voidaan varastoida myös kemiallisesti esimerkiksi hiilivetyinä, ammoniakkinä tai hydrideinä, joiden osalta voidaan hyödyntää niille ominaista ja olemassa olevaa infrastruktuuria.⁵

Vedyn siirrossa on kaksi päämuuttujaa: vedyn varastointimuoto (esim. nesteytetty, paineistettu tai kemiallinen) sekä kuljetustapa (esim. putkistot, maantie-, rautatie- tai laivakuljetukset). Johtuen vedyn alhaisesta energiatihydestä sen kuljettaminen yli pitkien välimatkojen ilman erityisjärjestelyitä on haastavaa. Tästä johtuen vety kannattaa paineistaa, nesteyttää tai kemiallisesti sitoa muihin molekyyleihin tai materiaaleihin kuljetusta varten. Kemiallisesti varastoituna vetyä voidaan kuljettaa esimerkiksi ammoniakkinä tai nestemäisissä orgaanisissa kemikaaleissa (*liquid organic hydrogen carriers, LOHC*) (IEA, 2019). Logistiikassa voidaan periaatteessa hyödyntää esimerkiksi putkistoja, pieniä säiliöitä, paineistettua tai jäähdytettyä maantiekuljetusta tai rahtialuksia.

Kuva 43 esittää arvioita erilaisten kuljetusmuotojen kustannuksista erilaisilla kuljetusetäisyyksillä. Lyhyiden matkojen (0–100 km) siirto on edullisempaa kuin pitkien matkojen johtuen suurten siirtoverkkojen rakentamisen haasteista (mm. maankäytön esteet) sekä vetyhäviöistä. Lyhyimmillä matkoilla voidaan hyödyntää olemassa olevia maakaasuputkia, jos niitä on ja käyttö maakaasun jakeluun päättyy. Kuten kuva 44 esittää, vedyn siirto ja varastointi voi jopa moninkertaistaa vedyn hinnan loppukäyttäjälle verrattuna vedyn tuotantokustannuksiin, mutta jos logistiikkaa ei juuri tarvita, kustannusvaikutus on huomattavasti pienempi.

5 Vedystä kemiallisesti valmistettavista jatkojalosteista tarkemmin, ks. alla alaluku 6.2.4

Kuva 43. Eri kuljetusmuotojen kustannusarviointia (Hydrogen Council, 2021b)

Kuljetuskustannukset

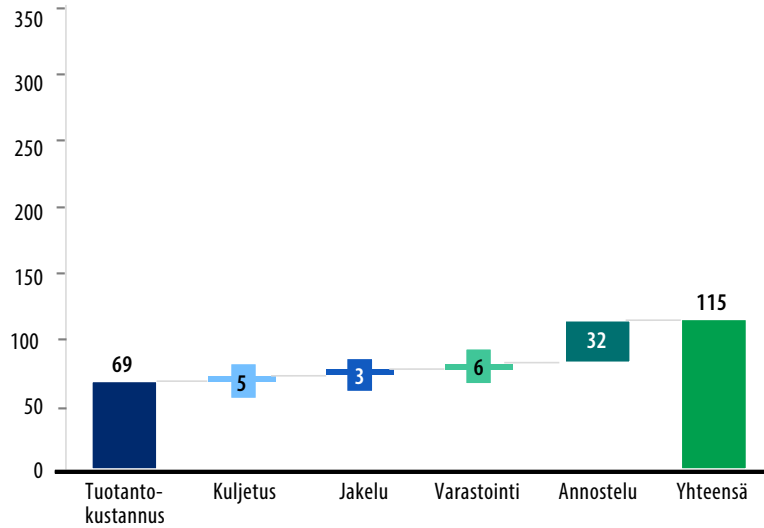


		Jakelu		Siirto		
		0–50 km	51–100 km	101–500 km	>1000 km	>5000 km
Putkisto	Jälkiasennettu	Jakeluverkko	Alueellinen jakeluverkko	Siirtoverkko (maalla)	Siirtoverkko (maalla tai merellä)	Ei käytössä
	Uusi	Jakeluverkko	Alueellinen jakeluverkko	Siirtoverkko (maalla)	Siirtoverkko (maalla tai merellä)	Ei käytössä
Merikuljetus	Nestemäinen vety	Ei käytössä	Ei käytössä	Ei käytössä	Laiva (LH ₂)	Laiva (LH ₂)
	Ammoniakki	Ei käytössä	Ei käytössä	Ei käytössä	Laiva (NH ₃)	Laiva (NH ₃)
Kuorma- autokuljetus	Nestemäinen orgaaninen vedynkantaja	Ei käytössä	Ei käytössä	Ei käytössä	Laiva (LOCH)	Laiva (LOCH)
	Nestemäinen vety	Kuorma-auto (LH ₂)	Kuorma-auto (LH ₂)	Kuorma-auto (LH ₂)	Ei käytössä	Ei käytössä
	Kaasumainen vety	Kuorma-auto (CH ₂)	Kuorma-auto (CH ₂)	Kuorma-auto (CH ₂)	Ei käytössä	Ei käytössä

Kuva 44. Esimerkki logistiikan ja varastoinnin vaikutuksista vedyn hintaan loppukäyttäjälle (Cihlar, 2020). Luvut saa muotoon EUR/kg H₂, kun ne kerrotaan arvolla 0,033 MWh/kg H₂.

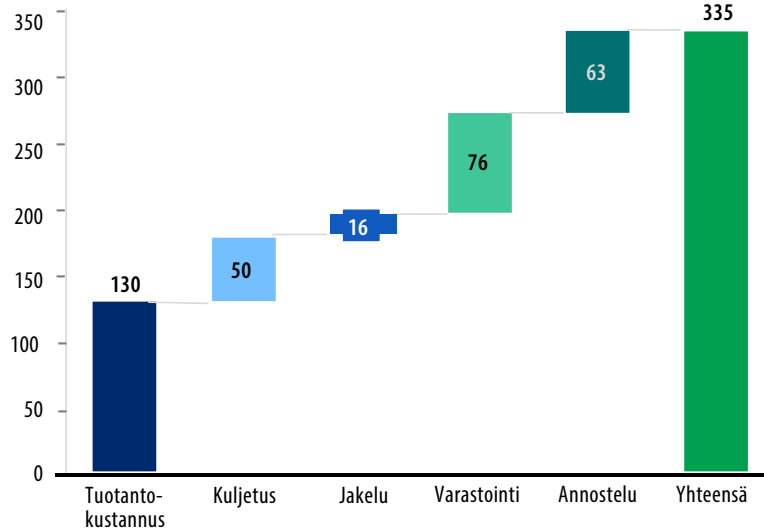
Alhaisen hintatason esimerkki

LCOE-menetelmällä lasketut tuotantokustannukset (EUR2019/MWh H_{2,LHV})



Korkean hintatason esimerkki

LCOE-menetelmällä lasketut tuotantokustannukset (EUR2019/MWh H_{2,LHV})

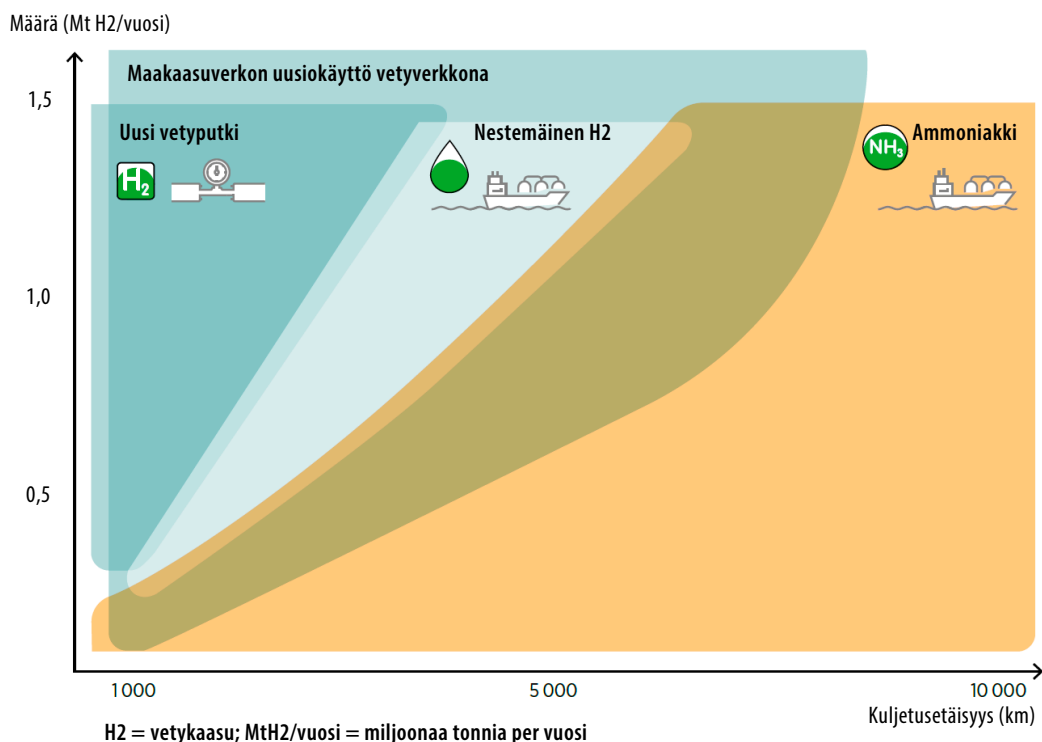


Vedyn jakelulla viitataan tässä loppukäyttäjille tapahtuvaan paikalliseen jakeluun. Vetyä voidaan jaella esimerkiksi tankkausasemien tai paikallisen putkiston kautta. Periaatteessa on mahdollista hyödyntää myös maantiekuljetusta. Se, missä muodossa (nesteytettynä, paineistettuna tai kemiallisesti) ja mitä kuljetusmuotoa hyödyntäen vety toimitetaan käyttökohteeseen, riippuu toimitusmatkasta, toimitusmääristä ja loppukäyttäjän tarpeista (IEA, 2019). Esimerkiksi Keski-Euroopassa Daimler Truck AG ja Volvo Group ovat julkistaneet tavoitteen korkean suorituskyvyn vetytankkausasemille: 300 asemaa vuoteen 2025 ja 1 000 asemaa vuoteen 2030 mennessä. Asemat palvelisivat erityisesti raskasta tieliikennettä (Volvo, 2021).

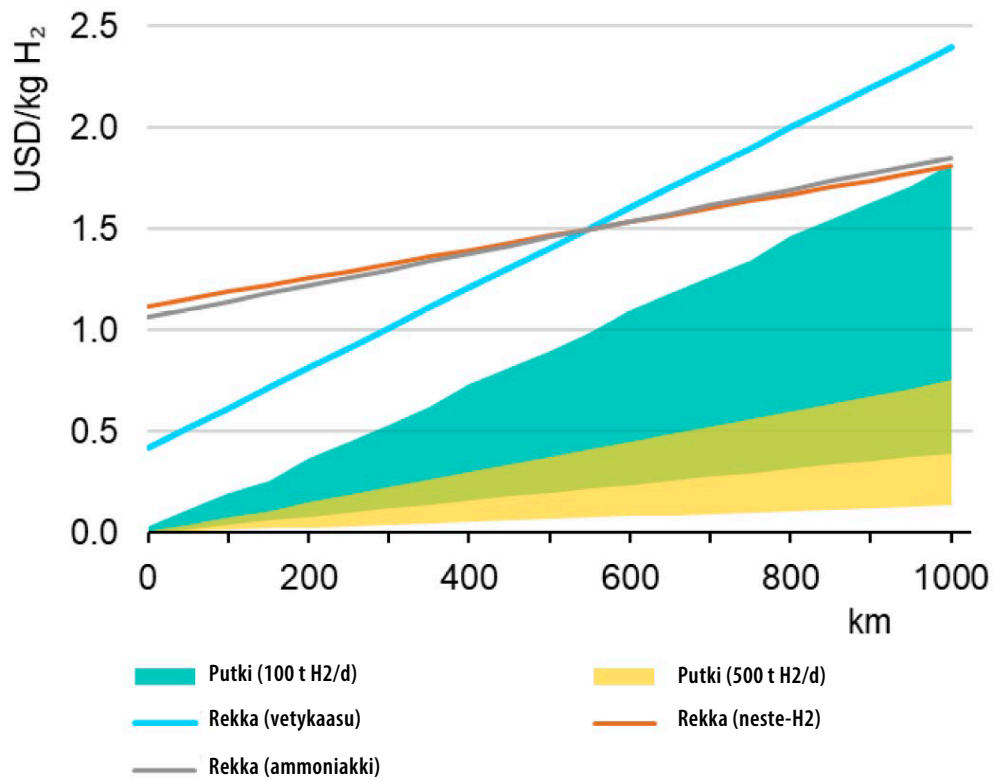
Käyttökohteessaan nesteytetty vety on saatettava takaisin kaasuksi tai paineistettu vety laskettava käyttöpaineeseensa.

Vetytalouden globaalin tai alueellisen kaupallistumisen kannalta ratkaisevia ovat koko vetyarvoketjuun liittyvien ratkaisuiden yhteensopivuus ja logistiikan kokonaiskustannukset. Kuten kuva 45 alla osoittaa, vedyn siirtoputkisto on laivakuljetuksia tehokkaampi lyhyillä matkoilla, mutta pidemmillä matkoilla laivakuljetukset ovat edullisempia. Suuren mittakaavan kuljetuksissa siirtäminen putkia pitkin on myös edullisempaa kuin maanteitse (ks. kuva 46 alla).

Kuva 45. Vedyn kannattavimmat kuljetusmuodot siirrettävien määrien ja kuljetusetäisyyksien suhteen (IRENA, 2022)



Kuva 46. Vedyn logistiikan arvioidut kokonaiskustannukset putkisto-, laiva- ja maatiekuljetuksille (IEA, 2021)



Tietolaatikko 3. Vedyn logistiikka ja siirto Suomen näkökulmasta

Osaamista teollisuudessa mutta rajatusti valmiita laajoja ratkaisuja

Toimiva ja tehokas vedyn varastointi ja logistiikka ovat laajamittaisen vetytalouden perusedellytyksiä. Alkuvaiheessa vedyn käyttö niin maailmalla kuin Suomessa perustuu vedyn paikalliseen tuotantoon lähellä sen kulutuspaikkaa, eikä kansainvälistä vetymarkkinaa tai -infrastruktuuria vielä ole.

Suomessa on hyvin rajallisesti sopivia luonnonmuodostumia, joita voitaisiin hyödyntää vedyn varastointiin. Merellinen sijainti voi mahdollistaa tehokkaan laivakuljetuksiin perustuvan infrastruktuurin kehittämisen. Myös vetyputket ovat mahdollisia, mutta maan kattavaa maakaasuinfrastruktuuria Suomessa ei ole tähän tarkoitukseen mahdollista käyttää. Eteläisen Suomen maakaasuverkoston hyödyntämistä sovitettuna vedyn siirtämiseen on esitetty vaihtoehtona myös Suomessa, mutta tämän haasteena on määritellä sellainen ajankohta, jolloin osia maakaasuverkosta voitaisiin ottaa 100 % vedyn käyttöön. Suomessa on jo pitkään käytetty vetyä teollisissa prosesseissa paikallisesti. Vedyn jakelua liikenteeseen ei ole.

Vetytalouden arvoketju voi rakentua Suomessa monella tavalla. Suomalaisissa ratkaisuissa täytyy ottaa huomioon vetytalouden kansainvälinen kehittyminen, sillä Suomen tarvitsema kansainvälinen infrastruktuuri ja arvoketjut vaativat yhteistyötä.

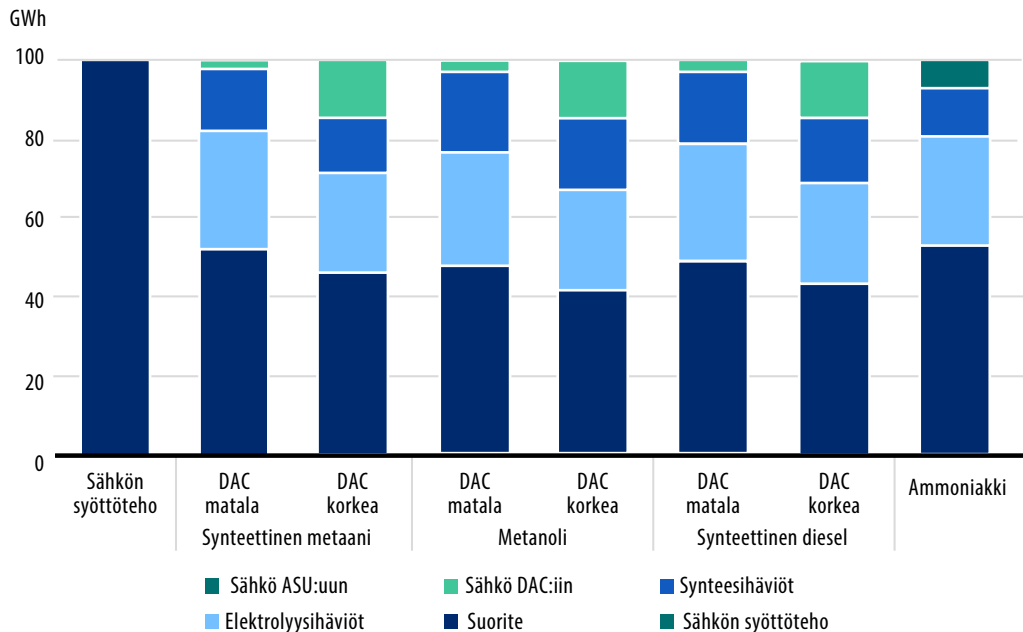
6.2.4 Vedyn johdannaistuotteet

Vetyä voidaan hyödyntää sellaisenaan tai lukuisissa erilaisissa johdannaistuotteissa. Vety voidaan käyttää suoraan energiaksi polttamalla (hapettamalla) se takaisin vedeksi. Vetyä voidaan käyttää sellaisenaan myös teollisuuden raaka-aineena esimerkiksi pelkistimenä metalliteollisuuden prosesseissa, joissa vety ei näin ollen sitoudu lopputuotteeseen, vaan poistuu vedeksi hapettuneena.

Vetyä voidaan käyttää myös monien erilaisten johdannaistuotteiden valmistuksessa. Tyypillisesti johdannaistuotteita valmistetaan sen vuoksi, ettei vety yksinään sovellu loppukäyttöön tai on hankala varastoitava tai kuljetettava sellaisenaan. Yhdistettynä muihin raaka-aineisiin (esimerkiksi hiilen tai typen lähteisiin) vedystä voidaan valmistaa erilaisia synteettisiä polttoaineita, kemikaaleja ja materiaaleja. Mitä pidemmälle tuotteita jalostetaan, sitä suurempia ovat kuitenkin kokonaisuuden häviöt, joihin voidaan lopulta vaikuttaa melko rajallisesti teknologia- ja prosessioptimoinnilla. Pitkällä tähtäimellä uudenlaisiin teknologioihin perustuvat ratkaisut voivat parantaa kokonaisyötysuhteita merkittävämmiin. Synteettiset materiaalit voisivat korvata fossiilisten materiaalien käyttöä eli toimia ns. *drop-in*-ratkaisuina, jotka voisivat hyödyntää olemassa olevaa infrastruktuuria ja tarjota päästövähennysratkaisuita alueilla, joissa vaihtoehtoiset ratkaisut ovat vähissä. Yleisesti esitettyjä vetyä hyödyntäviä synteettisiä tuotteita ovat esimerkiksi metaani, metanoli, diesel ja ammoniakki.

Vedyn johdannaistuotteiden valmistukseen on tarjolla lukuisia vaihtoehtoja. Teknologioissa on suuria eroja sen suhteen, kuinka kypsiä ne ovat teknisesti ja millaiseksi kokonaisprosessin hyötysuhde muodostuu. Mitä moniportaisempi tuotantoprosessi on kyseessä, sitä suuremmat ovat tyypillisesti energia- ja materiaalihäviöt. Useiden vetytuotteiden valmistuksessa menetetään noin 45–60 % käytetystä sähköstä valmistusprosessin aikana (ks. kuva 47 alla). Arvio perustuu suoraan ilmasta otettavan DAC-tekniikan hyödyntämiseen, mutta ei sisällä lisähäviöitä, jos synteettinen tuote poltetaan polttomoottorissa.

Kuva 47. Erilaisten synteettisten polttoaineiden ja kemikaalien tuotannon hyötysuhteita (IEA, 2019)



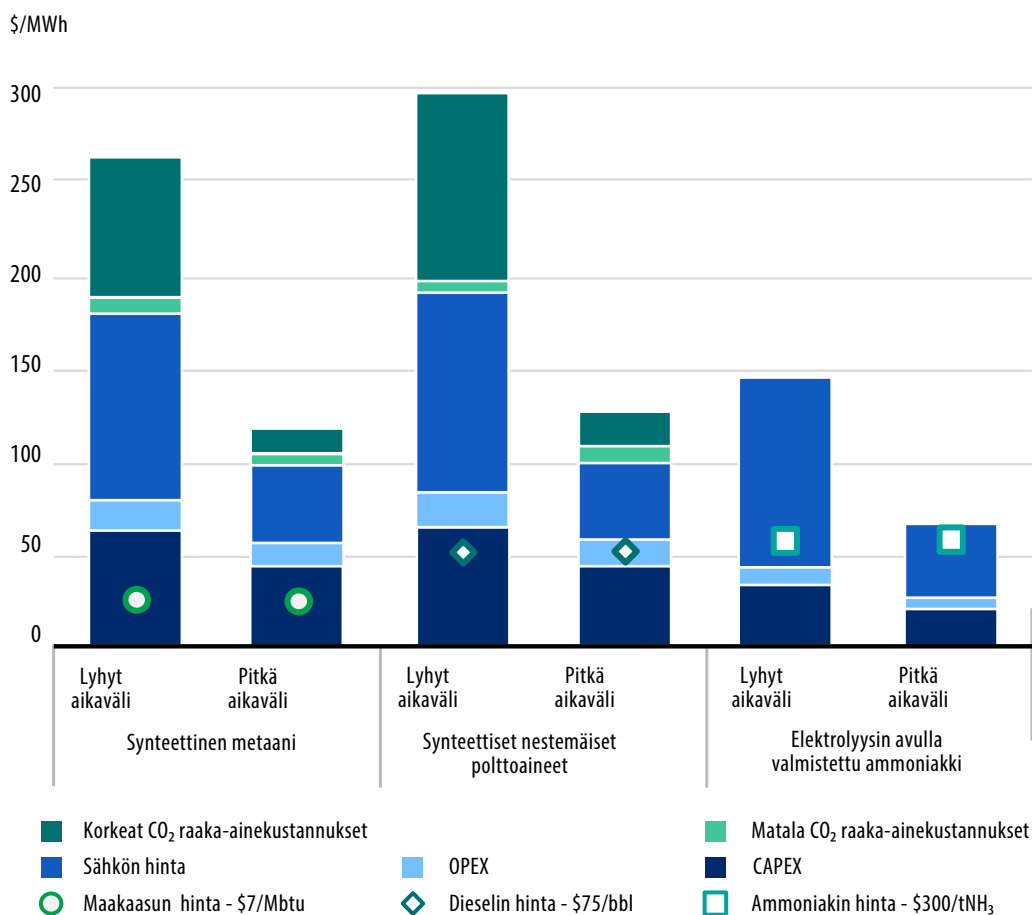
Huomioita: ASU = ilmanerotusyksikkö typen tuotantoon (air separation unit); DAC = hiilidioksidin talteenotto suoraan ilmakehästä (direct air capture). Suoritteiden energiasisällöt (metaani, metanoli, diesel ja ammoniakki) on oletettu perustuvan niiden teholliseen lämpöarvoon. Metaanille, metanolille, ja dieselille, DAC:in on oletettu olevan hiilidioksidin lähde ja sähkönkulutuksen olevan 250 kWh/tCO₂ matalan lämpötilan DAC:ille (DAC matala) ja 1750 kWh/tCO₂ korkean lämpötilan DAC:ille (DAC korkea). Matalan lämpötilan DAC edellyttää toimiakseen myös 1535 kWh/tCO₂ lämpöä, joka voitaisiin suurilta osin kattaa synteessin lämpöhäviöinä.

Vedyn johdannaistuotteiden kilpailukyky riippuu monista tekijöistä. Ensimmäinen merkittävä valinta on tehtävä sen suhteen, mihin synteettistä tuotetta ylipäätään verrataan, mikä puolestaan riippuu käyttökohteesta. Usein synteettisiä johdannaistuotteita verrataan niiden fossiilisten vastineiden nykyisiin tuotantokustannuksiin. Suora sähköistäminen on kuitenkin nopeasti muodostumassa vaihtoehdoksi useilla yhteiskunnan toimialoilla. Vertailua on siten perusteltua suorittaa erityisesti muita päästövähennyskeinoja vasten, ei vain fossiilisen ratkaisun kustannuksiin yksioikoisesti verraten. Lisäksi on otettava huomioon, kuinka monelle tekijälle synteettisten tuotteiden kilpailukyky on herkkä: erityisesti oletuksille koskien sähkön hintaa, käyttötunteja ja investointikustannuksia sekä hiilidioksidin hintaa.

Edellä esitettyine varauksineen voidaan tulkita esimerkiksi IEA:n esittämiä arvioita elektrolyysivetyä hyödyntävien tuotteiden kilpailukykyä (ks. kuva 48 alla). Lähitulevaisuudessa synteettisen metaanin ja synteettisten nestemäisten polttoaineiden tuotannon arvioitiin

maksavan 250–300 USD/MWh, eli noin 4–10 kertaa enemmän verrattuna fossiilisten vastineiden markkinahintaan. Ammoniakin tuotanto elektrolyysiä hyödyntäen oli vain noin 2,5 kertaa niin kallista kuin fossiilisia hyödyntävän ammoniakin tuotanto. Pitkällä aikavälillä erot kuroutuvat umpeen, mutta pelkkien investointikustannusten arvioidaan silti olevan lähes yhtä kalliita kuin fossiilisen vastinparin tuotteen markkinahinta. Ammoniakissa IEA:n arvio päätyy lähes kustannuspariteettiin pitkällä aikavälillä. Tulkinassa on kuitenkin huomioitava edellä mainitut epävarmuuden lähteet. Arvion perusteella on kuitenkin selvää, että yksin kustannushyötyjen avulla synteettiset polttoaineet tuskin kaupallistuvat lähivuosina.

Kuva 48. Synteettisten tuotteiden kilpailukyky verrattuna fossiilisiin vaihtoehtoihin lyhyellä ja pitkällä aikavälillä (IEA, 2019)



Huomioita: Uusiutuvan sähkön hinta oletus \$50/MWh 3000 tunnin täyskuormituksella lyhyellä aikavälillä ja \$25/MWh pitkällä aikavälillä. Matala CO₂ raaka-ainekustannus biometanolin tuotannosta lyhyellä ja pitkällä aikavälillä \$30/tCO₂. Korkea CO₂ raaka-ainekustannus DAC:in avulla lyhyellä aikavälillä \$400/tCO₂ ja pitkällä aikavälillä \$100/tCO₂. Käytetty diskonttokorko 8%.

Yksinkertaisimpien kemikaalien ja polttoaineiden lisäksi vedystä voidaan tulevaisuudessa valmistaa monia muitakin tuotteita, kuten synteettistä ravintoa (esimerkkinä suomalainen teknologiayhtiö Solar Foods).

Tietolaatikko 4. Vedyn johdannaistuotteet Suomessa

Mahdollisuus korkeampaan jalostusarvoon

Suomen näkökulmasta vedyn johdannaistuotteet (*hydrogen-based products*) tarjoavat monia mielenkiintoisia mahdollisuuksia uudelle liiketoiminnalle. Jos kansainvälisen vetytalouden kehityksen myötä syntyy rajat ylittävä markkina ja toimitusketjuja, vetyä voidaan periaatteessa viedä ulkomaille.

Suomessa vetyä hyödynnetään nykyisin muun muassa öljynjalostuksessa ja biopolttoaineiden tuotannossa. Puhtaalla tai vähäpäästöisellä vedyllä voitaisiin korvata näissä kohteissa käytettyä fossiilista vetyä. Myös fossiiliton teräksentuotanto on vetyyn perustuvan johdannaistuotteen esimerkki.

Tulevaisuudessa vetyä voidaan tarvita erilaisten kiertotalouden prosessien raaka-aineena, jos runsaasti happea sisältävistä raaka-aineista halutaan jalostaa esimerkiksi hiilivetyjä. Esimerkiksi synteettisen metaanin (synteettisen maakaasun, SNG) tuotanto yhdistämällä puhdasta tai vähähiilistä vetyä talteen otettuun hiilidioksidiin on saanut niin Suomessa kuin muualla huomiota. Jos prosessissa käytetty hiilidioksidi on peräisin biomassasta, käytetään termiä BECCU (*bioenergy carbon capture and utilisation*). Suomessa on meneillään tutkimustyötä synteettisen metaanin valmistamiseksi niin bioperäisistä kuin ei-bioperäisistä lähteistä.

Suomi ei ole yksin tavoittelemassa korkeamman jalostusarvon tuotteita vedystä. Kysymys on osittain siitä, mitä eri vetyarvoketjun osia on kannattavinta tehdä missäkin ympäristössä.

Tärkeitä edellytyksiä korkeamman jalostusarvon tuotannon syntymiselle Suomeen on ensimmäisten teollisten demonstraatiohankkeiden ja investointien toteuttaminen sekä suunnattu tutkimus- ja kehitystyö. Paljon riippuu myös teknologian kehittymisestä, ylikansallisesta sääntelystä sekä loppukäyttösektorien kehityksestä: vielä tässä vaiheessa ei ole selvää, millainen maksukyky ja -halukkuus eri toimijoilla on tulevaisuudessa (esimerkiksi 2030–2050-luvuilla) vetyyn perustuville tuotteille.

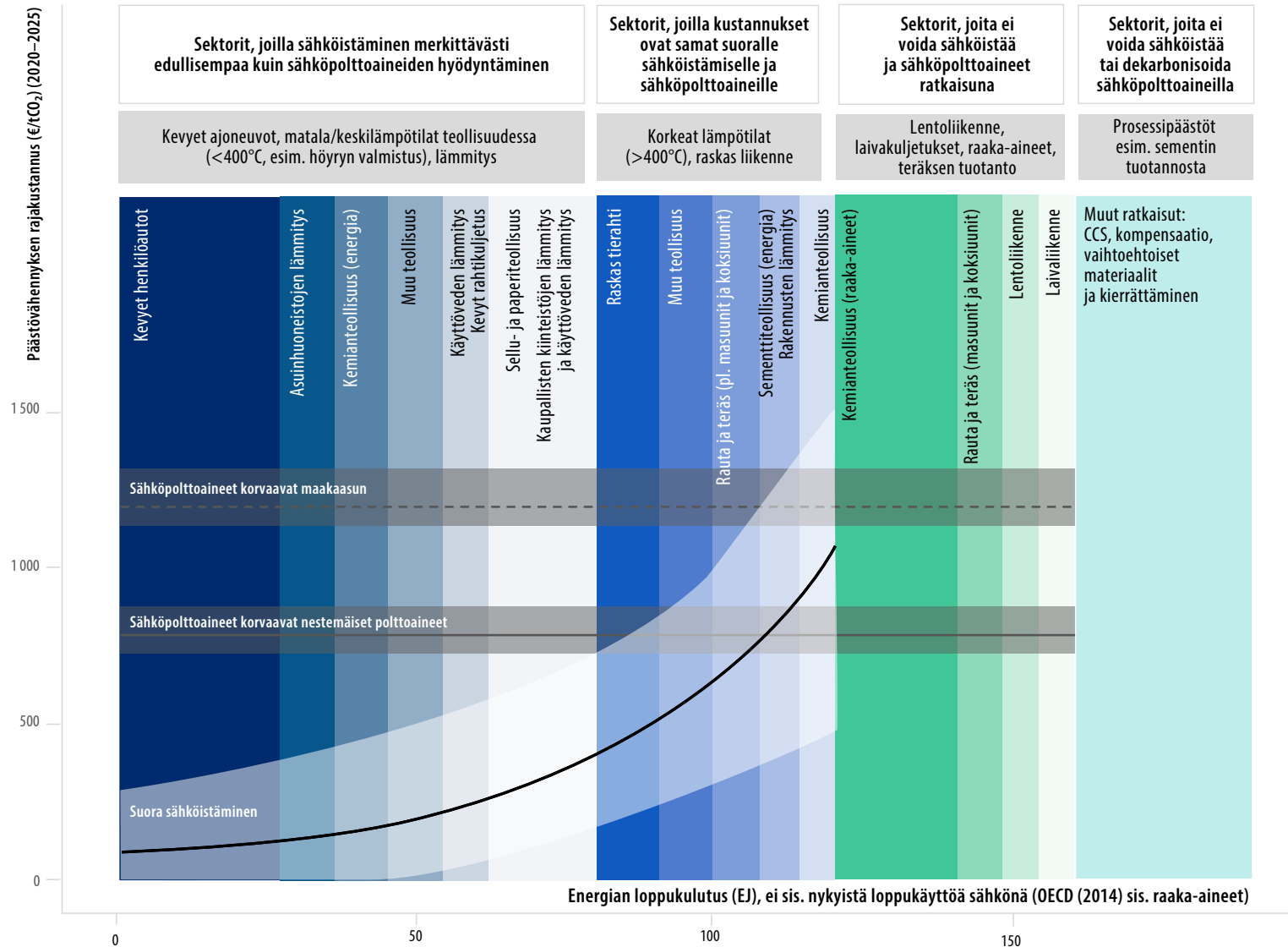
6.2.5 Vedyn erilaiset käyttökohteet

Koska vetyä voidaan polttaa energiaksi ja sitä sisältyy kemiallisesti sitoutuneena useimpiin yhteiskunnan materiaalivirtoihin, voidaan uudelle, puhtaalle ja vähähiiliselle vedylle esittää laaja joukko erilaisia käyttökohteita teollisuudessa, liikenteessä ja energiasektorilla.

Teollisuudessa vetyä ja vetytuotteita voidaan käyttää sekä energiana että raaka-aineena. Pääosa nykyisin käytetystä vedystä kuluu maailmanlaajuisesti öljynjalostuksessa ja lannoitetuotannossa, ja puhdas ja vähähiilinen vety soveltuisivat luonnollisesti korvaajiksi näille teollisuuden aloille. Vetyä voidaan käyttää tulevaisuudessa myös laajalti muun muassa kemianteollisuudessa, raudan ja teräksen valmistuksessa sekä muilla teollisuuden aloilla esimerkiksi polttoaineena korkean lämpötilan saavuttamiseksi (IEA, 2019).

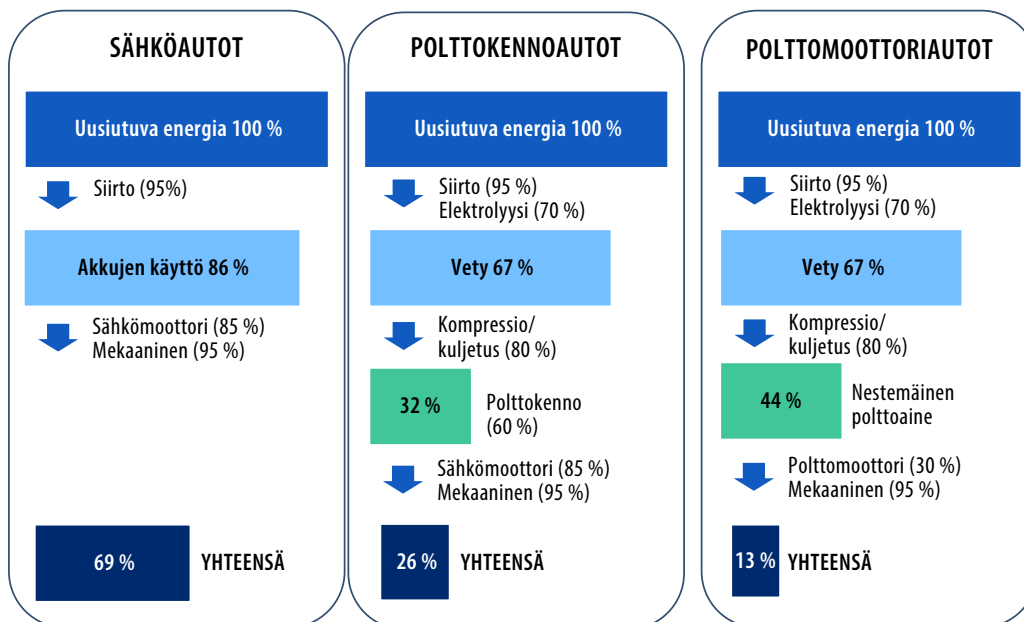
Eriäviä näkemyksiä esiintyy siitä, tulisiko vedyn käyttöä ylipäätään priorisoidusti kohdentaa tiettyihin käyttökohteisiin. Jos vedyn käyttöä tulisi kohdentaa, on ymmärrettävästi eroavia näkökulmia siihen, mitä käyttökohteita tulisi priorisoida ja millä periaatteilla. Vety yksinään ei ole paras vaihtoehto kaikille sektoreille, kuten kuvassa 49 esitetään. Suora sähköistäminen on kustannustehokkaampi päästövähennyskeino esimerkiksi kevyessä tieliikenteessä, alle 400°C:n teollisessa lämmössä ja tilojen lämmityksessä. Synteettisillä polttoaineilla puolestaan voidaan saavuttaa kustannushyötyjä esimerkiksi kemikaalituotannon raaka-aineena, terästeollisuudessa sekä pitkän matkan lento- ja meriliikenteessä. On myös toimialoja, kuten sementin tuotanto, joille sähköistäminen tai vetytuotteet eivät sovellu päästövähennysratkaisuiksi.

Kuva 49. Vedyn ja vetytuotteiden kustannustehokkuus päästövähennysten saavuttamiseksi eri loppukäytöissä (Ueckerdt et al., 2021)



Pitkissä vetytalouden arvoketjuissa kunkin vaiheen häviöt kumuloituvat, ja suora sähköistäminen on moninkertaisesti tehokkaampaa kuin vedyn käyttö. Esimerkiksi synteettisiä polttoaineita hyödyntävä polttomoottoriauto hukkaa noin 90 % energiasta arvoketjun eri vaiheissa verrattuna sähköauton 30 %:n häviöihin (ks. kuva 50).

Kuva 50. Vertailu kokonaisjärjestelmän hyötysuhteesta täyssähkö-, polttokenno- ja polttomoottoriauton (synteettinen polttoaine) käytölle (Agora, 2018)



Tietolaatikko 5. Loppukäyttösektorit Suomen näkökulmasta

Teollisuus selkeänä vedyn loppukäyttösektorina, tarve muilta osin vähäistä

Loppukäyttösektorit sekä kotimaassa että ulkomailla vaikuttavat merkittävästi suomalaisen vetytalouden kehittymisedellytyksiin. Samalla tarjonnan rakentaminen eli vetyarvoketjuihin panostaminen tukee loppukäyttäjien halukkuutta ottaa käyttöön vetyyn perustuvia ratkaisuja.

Suomessa merkittävä loppukäyttösektori on teollisuus, erityisesti metalliteollisuus sekä kemianteollisuus. Metalliteollisuudessa julkistettu SSAB:n fossiilivapaan teräksen tuotannon käynnistäminen Raahessa lähivuosikymmeninä toteutuessaan kuluttaa erittäin huomattavan määrän vetyä pelkistimenä. Kemianteollisuus on jo nykyisin merkittävä vedyn loppukäyttäjä. Teollisuudessa vetyä on mahdollista käyttää niin raaka-aineena kuin energiankantajana.

Kevyt tieliikenne on alkanut viime vuosina sähköistymään kiihtyvällä vauhdilla, ja on mahdollista, että sähköistyminen leviää myös raskaampaan liikenteeseen. Kansainvälisessä autoteollisuudessa on kuitenkin eriäviä näkemyksiä vedyn roolista tulevaisuuden liikennejärjestelmän energianlähteenä. Todennäköisesti kattavat vetyjakeluverkostot toteutuvat ensin tiheimmin liikennöidyillä ja asutuilla alueilla kuten Keski-Euroopassa.

6.2.6 Arvoketjun poikkileikkaavat kokonaisuudet

Yllä käsitellyt vetytalouden arvoketjujen palat eivät yksinään muodosta toimivaa vetytaloutta, vaan uusien toimintojen tulee integroitua kokonaisuudeksi, johon sisältyy myös läpileikkaavia elementtejä. Tällaisia ovat muun muassa projektinhallinta, teknologian ja laitteiden toimitus, IT-, automaatio- ja tekoälyosaaminen sekä laitteiston ja infrastruktuurin huolto. Myös erilaiset konsultti- ja suunnittelupalvelut mahdollistavat arvoketjun eri osien optimoinnin ja integroinnin.

Projektinhallinta ja yleinen osaaminen vetytalouden yhteydessä viittaa konkreettisten vetyhankkeiden ja -investointien toteuttamiseen. On useita erilaisia toimintamalleja, kuinka vetytalouden investointien toteutus ja hallinta voidaan järjestää. Arvoketjun yhdistävät ratkaisut voivat liittyä joko konkreettisiin projekteihin tai vetytalouteen laajemmin.

Teknologiatoimituksella tarkoitetaan tässä erilaisten laitteistojen, laitosten ja ratkaisuiden toimitusta eri osiin vetyarvoketjua. Teknologiayritykset voivat erikoistua joko tiettyihin erikoisalueisiin tai kattaa kokonaisvaltaisesti pitkiäkin osia arvoketjuista.

IT-, automaatio- ja tekoälyosaaminen viittaavat erilaisiin ratkaisuihin, joilla voidaan mahdollistaa ja optimoida vetyarvoketjun toimintaa. Älykkäitä ratkaisuja voidaan hyödyntää myös teknisten häiriöiden ennakoinnissa ja niihin reagoinnissa, kuten muussakin teollisessa toiminnassa.

Laitteiston ja infrastruktuurin kunnossapito on tärkeä osa mitä tahansa teollista arvoketjua.

Tietolaatikko 6. Arvoketjun poikkileikkaavat kokonaisuudet

Tärkeitä lisämahdollisuuksia ja -edellytyksiä otettavaksi huomioon

On tärkeää hahmottaa, että vetytalous ei kulminoidu yksittäisiin laitteisiin kuten elektrolyysereihin. Suomessa on laaja-alaista prosessiteollisuuden osaamista, jota voidaan hyödyntää myös eri osissa tulevaisuuden vetytalouden arvoketjuja.

Suomi on lisäksi profiloitunut ICT- ja tekoälypohjaisten ratkaisujen kehittäjänä ja tietojärjestelmäratkaisujen toimittajana. Algoritmeja, analytiikkaa, robotiikkaa ja koneoppimista voidaan hyödyntää suurten tietomassojen prosessoinnissa, joka mahdollistaa liiketoiminnan uudenlaisen kehittämisen. IT-, automaatio- ja tekoälyosaaminen voivat auttaa kilpailijoista erottautumisessa sekä niche-markkinarakojen löytämisessä vetytalouden ratkaisujen toimituksissa.

Toimivan vetyarvoketjun kehittäminen, infrastruktuurihankkeiden koordinointi sekä osaamisen kehittäminen edellyttävät kansainvälistä yhteistyötä. Kansainväliset vetytalouden tutkimus- ja kehityshankkeet tarjoavat erinomaisen mahdollisuuden kasvattaa kansallista osaamista.

7 Vetytalousskenaariot Suomeen

Yhteenveto

Suomelle laaditut viisi vetyskenaariota kuvaavat kotimaisen teollisuuden, kotimaisen ja kansainvälisen liikenteen ja raskaan tieliikenteen, sekä vedyn ja sähköpolttoaineiden viennin vaihtoehtoisia tulevaisuuksia.

Puhtaan vedyn tuotantomäärät skenaarioissa vaihtelevat välillä 3,7–7,9 TWh vuonna 2030 päätyen välille 6,4–132,9 TWh vuoteen 2050 mennessä. Suuret erot johtuvat vedyn ja sähköpolttoaineiden viennin oletuksista: minimiskenaarioissa keskitytään kotimaan kysyntään ja maksimiskenaarioissa tämän lisäksi vedyn ja/tai sähköpolttoaineiden vientiin.

Maksimiskenaarioissa tarvittava elektrolyserikapasiteetti nousisi 27 GW:iin vuoteen 2050 mennessä, tarvittava tuulivoiman lisäkapasiteetti 53 GW:iin (vrt. 3,3 GW vuonna 2021) ja vaadittavat kumulatiiviset investoinnit hieman alle 90 mrd. euroon. Maksimiskenaarioihin pääseminen edellyttäisi, että Suomi pysyisi erittäin kilpailukykyisenä kansainvälisillä markkinoilla ja kansainvälinen kysyntä kehittyisi vähintään Euroopan komission esittämien energiaskenaarioiden mukaisesti.

Minimiskenaarioissa tarvittava elektrolyserikapasiteetti olisi tasolla 0,5–1,3 GW vuonna 2030, joka pysyisi pienimmässä skenaariossa samalla tasolla ja jälkimmäisessä nousisi tasolle 2,6 GW vuoteen 2050 mennessä. Tarvittava tuulivoiman lisäys olisi 1,1–5,2 GW ja investointikustannukset jäisivät alle 6,2 mrd. euroon.

Suomen hiilineutraalisuustavoitteen saavuttamisen ja kansantalouden kannalta **tärkeimmät puhtaan tai vähähiilisen vedyn loppukäyttäjät ovat terästeollisuus sekä öljyn- ja biopolttoaineiden jalostus.** Jos terästeollisuudessa toteutetaan hiilineutraalisuus muilla keinoilla kuin raudan vetypelkistykseen perustuen, kotimaan vedyntarve jää noin 6,3 TWh vuodessa pienemmäksi kuin vetypelkistyksen kanssa. Kotimaan muun teollisuuden ja liikenteen potentiaalinen vedyn ja sähköpolttoaineiden tarve on terästeollisuuteen ja öljyn- ja biopolttoaineiden jalostukseen nähden pieni.

Suomen mahdollisuuksia viennissä rajoittavat ennen kaikkea kansainvälisen kysynnän kehittyminen ja kilpailu. Tästä syystä maksimiskenaarioissa esitettyä tuotantopotentiaalia on haasteellista saavuttaa.

Vetytalousskenaarioiden tavoitteena on tässä selvityksessä **havainnollistaa vetytalou- teen liittyviä mahdollisuuksia ja rajoitteita Suomen kannalta.** Tätä varten luodut viisi skenaariota kuvaavat vaihtoehtoisia tulevaisuuksia, joissa vedyn ja sähköpolttoaineiden kotimainen kysyntä ja vientimahdollisuudet näyttäytyvät eri tavoin erilaisten kasvua rajoit- taviin tekijöiden vallitessa.

Rajoittavista tekijöistä tärkeimpinä skenaarioissa on huomioitu kotimaisen maatuulivoi- man saatavuus, vedyn ja sähköpolttoaineiden kotimaisen kysynnän kehittyminen, mah- dollisen kansainvälisen vedynsiirtoputken mahdollistama vedyn vienti sekä sähköpol- toaineiden kansainvälisen kysynnän kehittyminen. Kotimainen kysyntä sisältää teollisuu- den, Suomen kotimaisen ja kansainvälisen vesi- ja lentoliikenteen sekä raskaan liikenteen. Vedyn käyttöä energiantuotantoon ei ole huomioitu, koska sen oletetaan jäävän margi- naaliseksi Suomen olosuhteissa muihin loppukäyttösektoreihin verrattuna.

Skenaariot laadittiin syksyllä 2021 yhteistyössä ohjausryhmän ja sidosryhmien kanssa (ks. osallistujat liitteessä 3). Skenaarioissa käytetyt lähtöarvot perustuvat osin julkisiin lähteisiin ja osin sidosryhmäyhteistyössä sovittuihin kehitysoletuksiin.

Seuraavassa esitetään aluksi skenaarioiden pääoletukset ja päätulokset. Tämän jälkeen kutakin skenaariota käsitellään yksityiskohtaisemmin ja keskustellaan skenaarioiden taus- talla vaikuttavista tärkeimmistä tekijöistä, jotka kannattaa huomioida arvioitaessa vetyta- louden kehittymistä Suomessa pitkällä aikavälillä.

7.1 Skenaarioiden oletukset ja tulokset

Vetytalousskenaarioiden pääoletukset on esitetty alla taulukossa 20. Kaikissa skena- arioissa oletetaan, että Suomi saavuttaa hiilineutraalisuustavoitteensa vuoteen 2035 men- nessä. Merkittävimmät erot skenaarioiden välillä syntyvät siitä, millainen kysyntä vedylle oletetaan terästeollisuudessa, öljynjalostuksessa ja viennin osalta. Kaksi ensimmäistä ske- naariota on nimetty 'Vain välttämätön A' ja 'Vain välttämätön B' kuvaten kotimaan mini- mikysyntä teollisuudessa ja liikenteessä. A-vaihtoehdossa terästeollisuudessa siirrytään raudan vetypelkistyksen sijasta vaihtoehtoisiin ratkaisuihin toteuttaa hiilineutraalisuus ja

tämän lisäksi siirtymä puhtaaseen vetyyn tapahtuu öljyn- ja biopolttoaineiden jalostuksessa hitaammin kuin B-skenaariossa. Skenaario 'Maltillinen kasvu' kuvaa kehitystä, jossa terästeollisuudessa hiilineutraalisuus toteutetaan muilla kuin vetyyn perustuvilla ratkaisuilla, mutta siirtymä puhtaaseen vetyyn vastaa 'Vain välttämätön B'-skenaariota. 'Maltillinen kasvu' sisältää lisäksi merkittäviä määriä vetykaasun ja sähköpolttoaineiden vientiä. Kasvu rajoittuu em. skenaariossa kansainvälisen kilpailun vuoksi kuitenkin huomattavasti alemmas kuin mikä olisi uusiutuvan energian saatavuuden kannalta mahdollista. 'Maksimi A ja B' kuvaavat maatuulivoiman lisärakentamispotentiaalin maksimaalista hyödyntämistä vedyn ja sähköpolttoaineiden vientiin. 'Maksimi A'-skenaariossa oletetaan maksimaalinen sähköpolttoaineiden vienti ilman vetykaasun vientiä ja 'Maksimi B'-skenaariossa vienti jakautuu sähköpolttoaineiden ja vetykaasun kesken.

Taulukko 20. Vetytalousskenaarioiden pääoletukset

Skenaarion tekijä	Vain välttämätön A	Vain välttämätön B	Maltillinen kasvu	Maksimi A	Maksimi B
Kotimaan ja kv. liikenteen vety ja sähköpolttoaineet valmistetaan Suomessa	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä
Terästeollisuudessa raudan suorapelkistys vedyllä	ei	kyllä	ei	kyllä	kyllä
Öljynjalostuksessa painotus voimakkaasti puhtaaseen vetyyn	ei	kyllä	kyllä	kyllä	ei
Suomen markkinaosuus Euroopan sähköpolttoaineista 2050*	Pieni	Pieni	4 %	Euroopan kysyntä ei rajoita vientiä	10 %
Vedyn vientimäärä	ei	ei	Kysyntä rajoittuu alle 25 TWh/a	ei	Vedyn kysyntä ei rajoita vetyputken mitoitusta

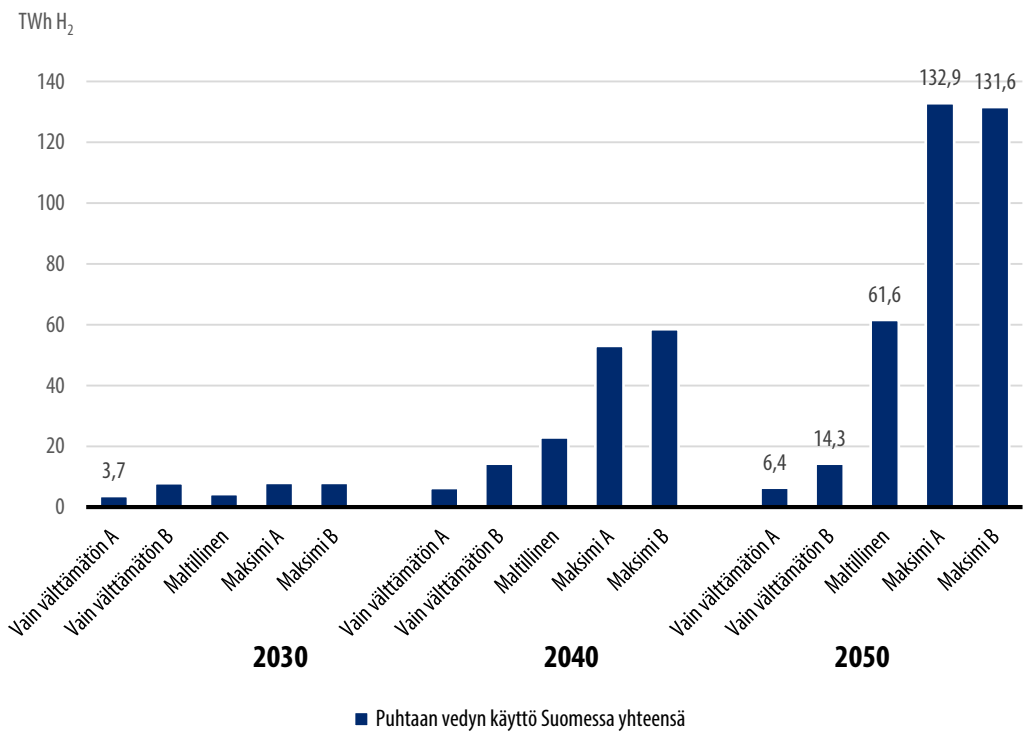
* Perustuen Euroopan sähköpolttoaineiden markkinan kokoon Euroopan komission referenssiskenaariossa 'MIX' (EC, 2020a)

Maksimiskenaarioissa 'Maksimi A' ja 'Maksimi B' vientiä rajoittaisi ainoastaan käytettävissä oleva maatuulivoiman kapasiteetti, jonka oletetaan rajoittuvan 80 GW:iin vuoteen 2050 mennessä. Em. rajoite perustuu olettamaan, että maatuulivoimaa voisi olla käytettävissä vedyntuotantoon noin 100 GW, josta noin viidennes jäisi toteutumatta teknis-taloudellisesti kannattamattomana tai muista syistä. Em. arvio perustuu AFRYn näkemykseen tuulivoimapotentialista sen jälkeen, kun yhteiskunnan suoran sähköistymisen vaatima tuulivoiman lisärakentamiskapasiteetti on vähennetty teoreettisesti käytettävissä olevasta maatuulivoimakapasiteetista. Vaikka edellä esitetty ei sisällä merituulivoimaa, samat teknis-taloudelliset vaatimukset pätevät merituulivoimalle kuin maatuulivoimalle. Niin pitkään kuin maatuulivoimahankkeet ovat kannattavampia kuin merituulivoiman, vedyn tuottajat priorisoivat maatuulihankkeita.

Minimiskenaarioista 'Vain välttämätön A ja B' ja maksimiskenaarioista 'Maksimi A ja B' seuraa kolme kysymystä: a) kuinka pitkälle tuulivoiman lisärakennuspotentialia voitaisiin Suomessa todellisuudessa hyödyntää, b) olisivatko Suomessa valmistetut vety ja sähköpolttoaineet kaikissa tilanteissa kilpailukykyisiä kansainvälisillä markkinoilla, ja c) miten vedyn ja sähköpolttoaineiden kysyntä kokonaisuutena kehittyisi kansainvälisillä markkinoilla. Näistä kysymyksistä johtuen minimi- ja maksimiskenaarioita täydennettiin viidennellä skenaariolla 'Maltillinen kasvu', joka esittää tilannetta, jossa vetytalouden kehittyminen olisi alkuvaiheessa maksimiskenaarioita hitaampaa johtuen siitä, että ensimmäisten kymmenen vuoden aikana Euroopan maat keskittyvät ensisijaisesti oman maansa tuotannon ja kysynnän kehittämiseen. Lisäksi pitkällä aikavälillä Suomen markkinaosuus vedyn ja sähköpolttoaineiden viennistä rajoittuisi kansainvälisestä kilpailusta ja siirtoinfrastruktuurin rakentumisen hitaasta aikataulusta johtuen alemmas kuin maksimiskenaarioissa.

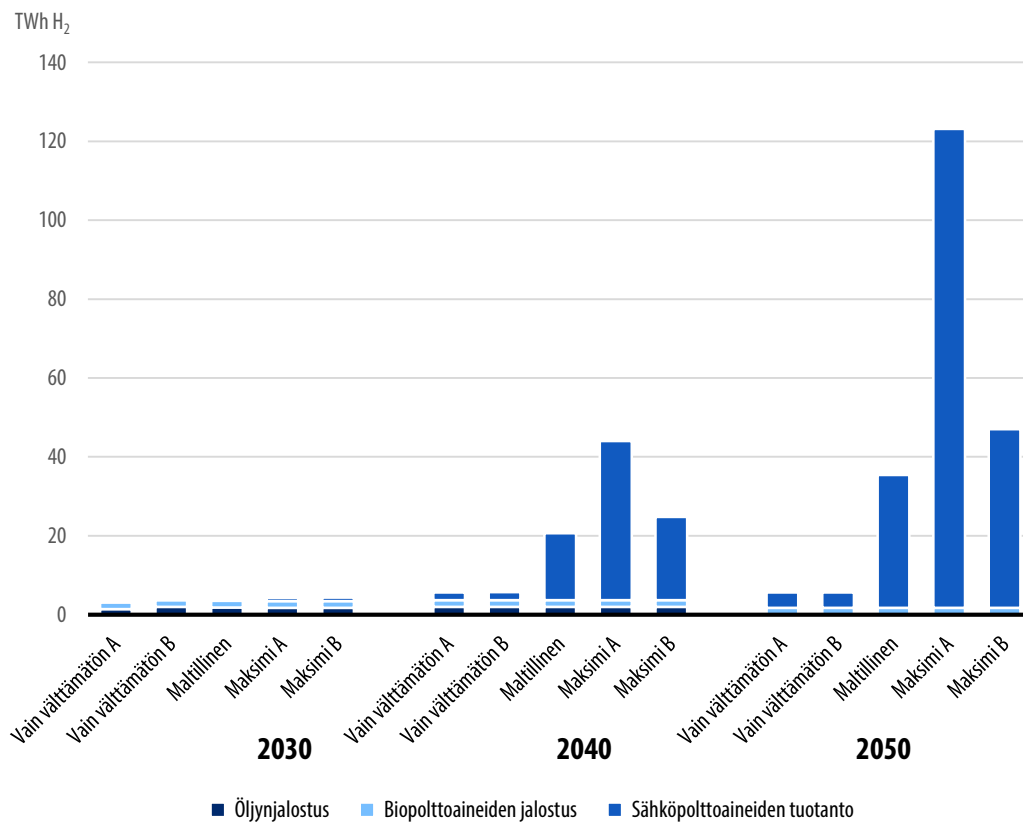
Skenaariot johtavat keskenään hyvin erilaisiin vedyn tuotantomääriin (ks. kuva 51 alla). Kotimaan kysyntään ja vaihtoehtoisiin teknologioihin keskittyvät 'Vain välttämätön' skenaariot edustavat vain murto-osaa maksimiskenaarioista, joissa tuulivoiman lisärakennus-potentiaali olisi hyödynnetty kokonaan. 'Maltillinen kasvu' jää alle puoliväliin maksimiskenaarioista, mutta on silti minimiskenaarioihin nähden moninkertainen.

Kuva 51. Vedyntuotannon kokonaismäärien kehitys eri skenaarioissa



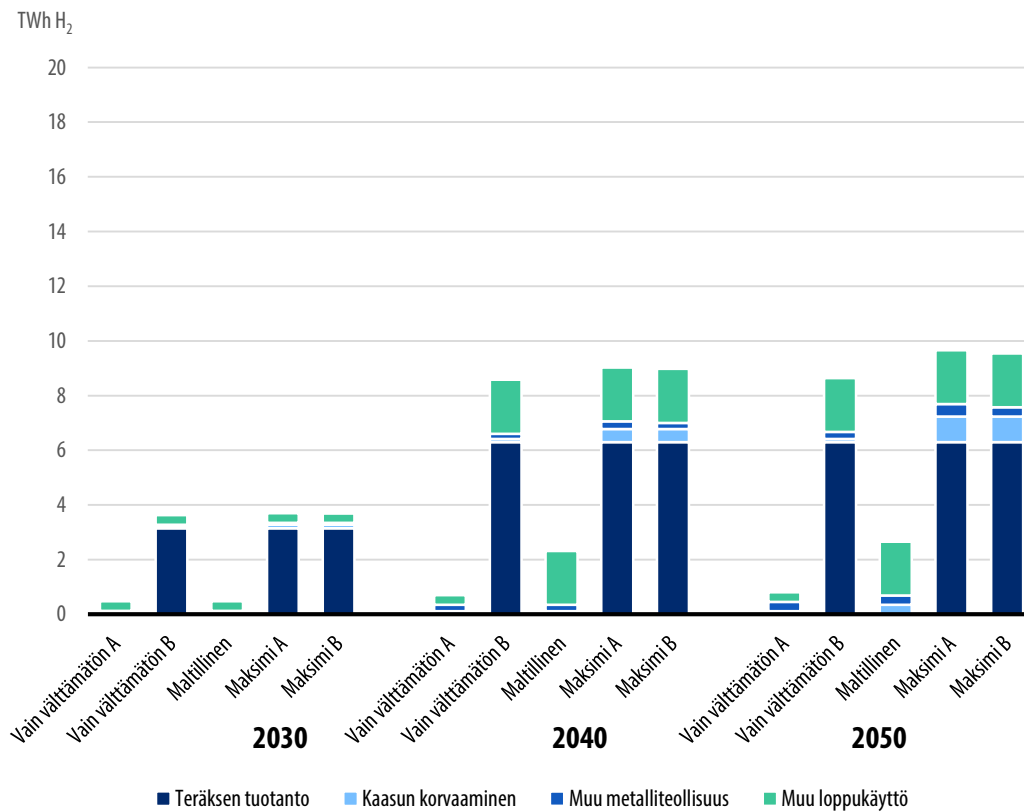
Sähköltoaineiden tuotantomäärät olisivat huomattavia skenaariossa 'Maksimi A' (ks. kuva 52 alla) edellyttäen, että sähköltoaineille muodostuisi Eurooppaa laajempi kansainvälinen markkina, Suomi olisi kilpailukykyinen suhteessa kilpailijamaihin ja ettei vienti perustuisi lainkaan vetykaasuun.

Kuva 52. Öljynjalostuksen, biopoltoaineiden valmistamisen ja sähköltoaineiden tuotannon tarvitseman vedyn määrät eri skenaariossa



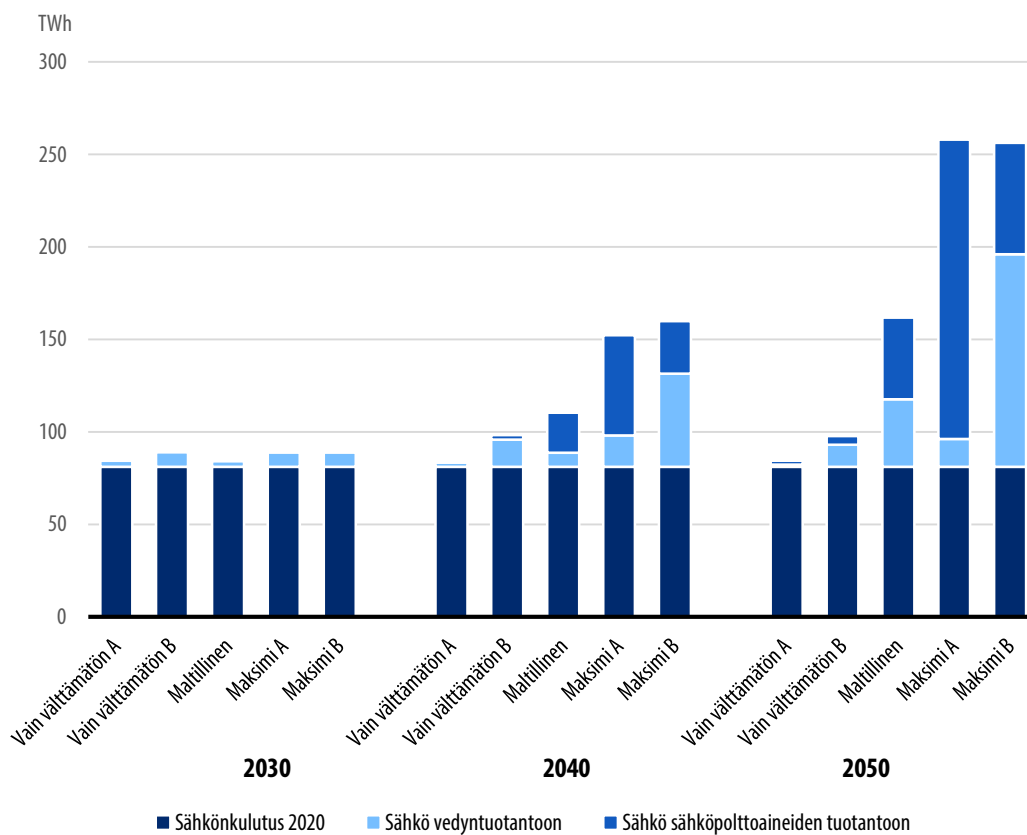
Vedyn kysyntä muilla kuin polttoaineiden valmistamiseen keskittyvillä aloilla määräytyy pääosin terästeollisuuden kysynnästä (ks. kuva 53 alla). Tähän vaikuttaa, siirrytäänkö Suomessa raudan vetypelkistykseen vai vaihtoehtoisiin ratkaisuihin tuottaa terästä hiilineutraalisti.

Kuva 53. Vedyn tarve muussa teollisuudessa kuin polttoaineiden valmistuksessa määräytyy voimakkaasti terästeollisuuden hiilineutraalisuusratkaisujen perusteella



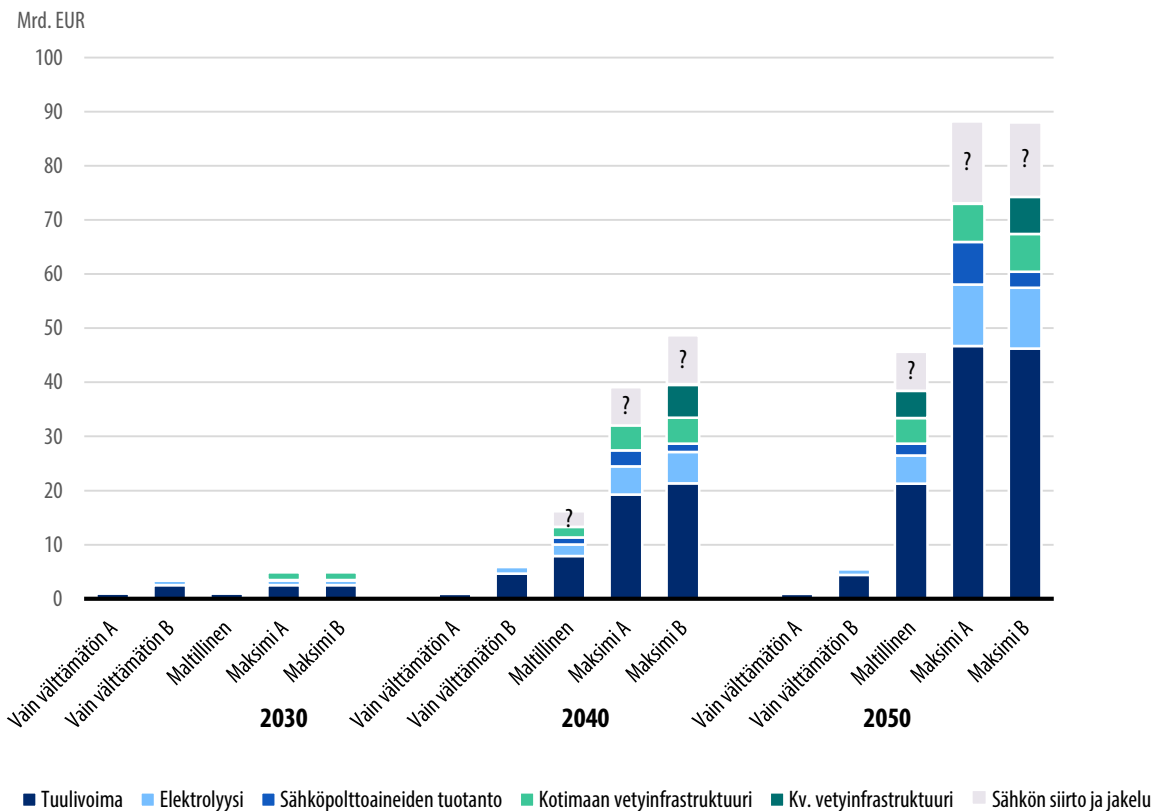
Vetytalouden vaikutukset Suomen sähkönkulutukseen olisivat merkittäviä kaikissa viemis-kenaarioissa (ks. kuva 54 alla). 'Maltillinen kasvu' kaksinkertaistaisi ja maksimiskenaariot yli kolminkertaistaisivat sähkönkulutuksen nykyisestä.

Kuva 54. Vetykenaarioiden vaikutukset sähkön kysyntään Suomessa



Vientiskenaariot 'Maltillinen kasvu', 'Maksimi A' ja 'Maksimi B' vaativat merkittäviä investointeja tuulivoiman lisärakentamiseen – tuulivoimaan liittyvien investointien osuus olisi yli puolet vetytalouden vaatimista kokonaisinvestoinneista (ks. kuva 55 alla). Vientiskenaarioissa korostuvat lisäksi investoinnit sähkön siirtoon ja vedyn kotimaiseen ja kansainväliseen siirtoinfrastruktuuriin, kun taas vedyn ja sähköpolttoaineiden suorat tuotantolaitosinvestoinnit muodostaisivat alle viidesosan kokonaisinvestointitarpeista.

Kuva 55. Vetykenaarioiden vaatimat investointikustannukset. Huom. tarvittavia sähköverkkoinvestointeja ei ole arvioitu, mutta suuruusluokka perustuu lähteeseen Heikkilä (2021).

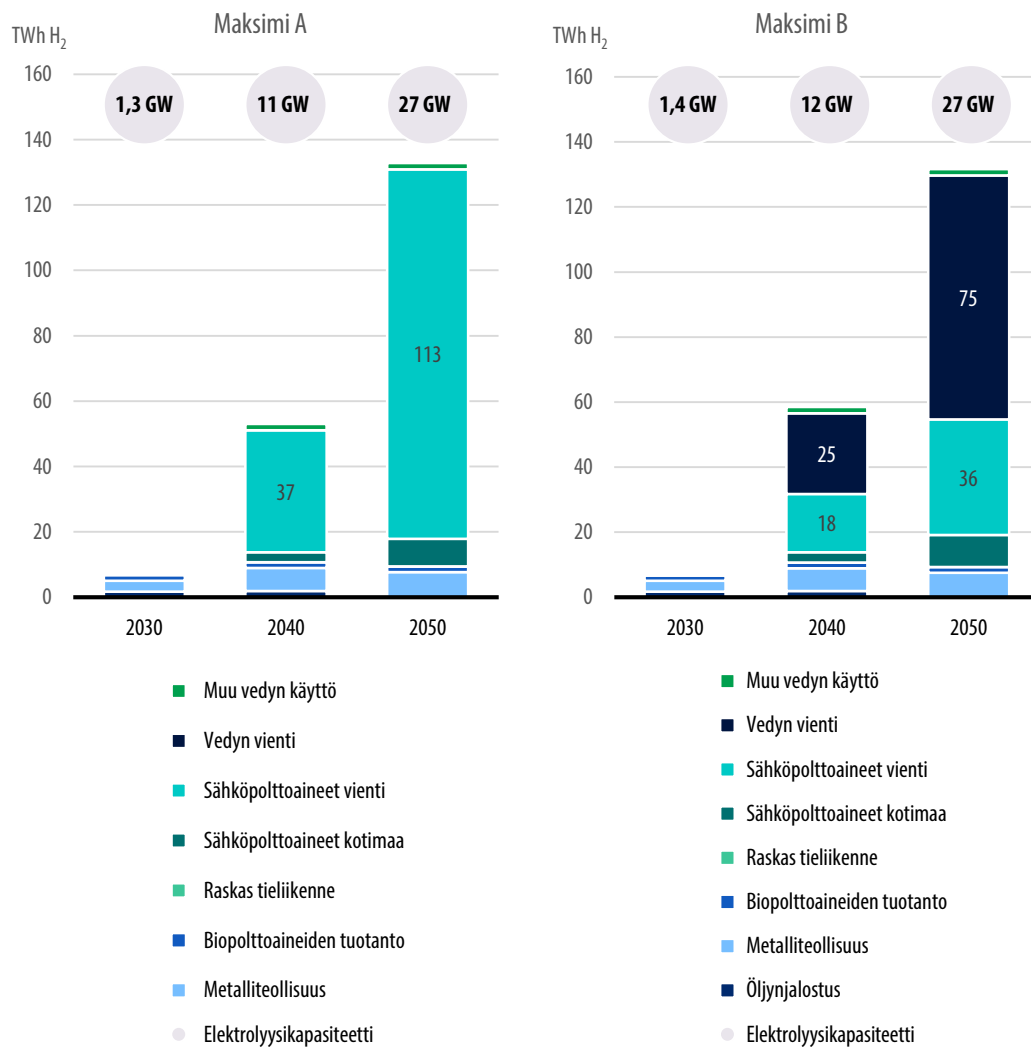


Skenaarioiden taustaoletukset on esitetty liitteessä 4.

7.1.1 Maksimi A ja Maksimi B

Maksimiskenaarioissa tarvittava elektrolyysikapasiteetti olisi 1,3–1,4 GW vuoteen 2030 mennessä perustuen fossiilisten polttoaineiden osittaiseen korvaamiseen nykyisessä vedyn tuotannossa öljynjalostuksessa ja nestemäisten biopolttoaineiden valmistuksessa, vetyperoksidin valmistuksessa, terästeollisuudessa sekä muussa kaasujen teollisessa loppukäytössä (ks. kuva 56 alla).

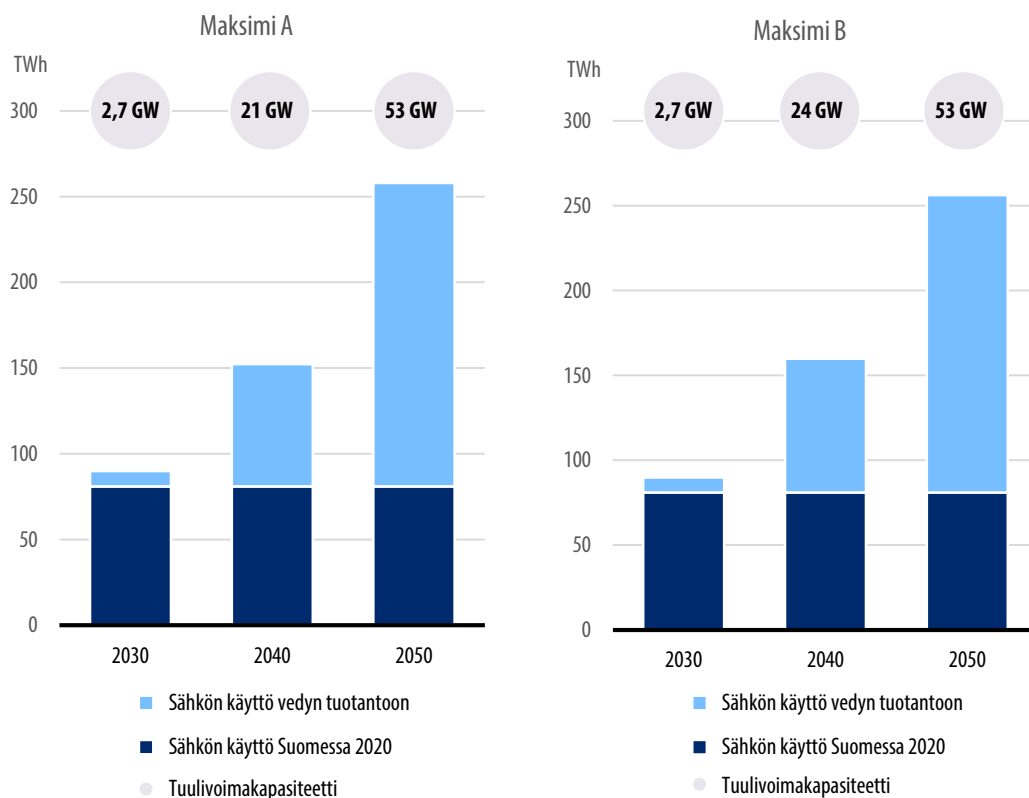
Kuva 56. Vedyn loppukäyttö ja tarvittava elektrolyysikapasiteetti skenaarioissa 'Maksimi A' ja 'Maksimi B'



Skenaariossa 'Maksimi A' investoitaisiin voimakkaasti sähköpolttoaineiden tuotantoon vuoteen 2040 mennessä, ja investointeja edelleen kiihdytettäisiin kohti vuotta 2050. Skenaariossa 'Maksimi B' investoitaisiin vedyn ja sähköpolttoaineiden tuotannon lisäksi suureen vetykaasun kansainväliseen vientiputkeen vuoteen 2040 mennessä. Vedyn vientimäärät kasvavat merkittävästi aina vuoteen 2050, kun tuotanto kasvaa maksimiinsa vuosien 2040–2050 välillä. Sähköpolttoaineiden vienti jää 'Maksimi B':ssä noin 10 %:iin Euroopan sähköpolttoaineiden markkinasta verrattuna EU-referenssiskenaarioon MIX (EC, 2020a).

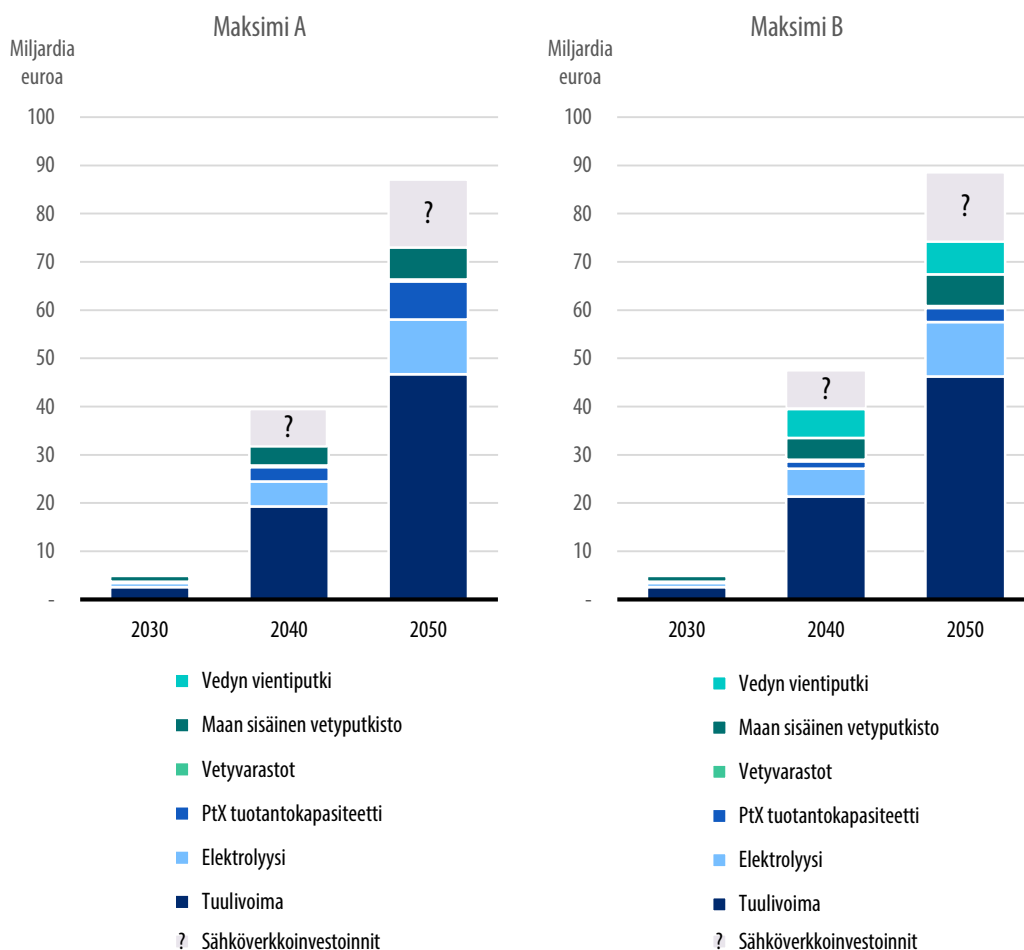
Tarvittava tuulivoimakapasiteetti vedyntuotantoon olisi 2,7 GW vuoteen 2030 mennessä ja kasvaisi 53 GW:iin vuoteen 2050 mennessä (ks. kuva 57 alla).

Kuva 57. Sähkön käyttö vedyntuotantoon ja tarvittava tuulivoimakapasiteetti skenaarioissa 'Maksimi A' ja 'Maksimi B'



Maksimiskenaarioissa tarvittavat kumulatiiviset investoinnit nousisivat 90 mrd. euroon vuoteen 2050 mennessä (ks. kuva 58 alla). Tuulivoiman lisärakentamisen osuus olisi tästä yli puolet ja noin kolmannes investoinneista tarvittaisiin sähkönsiirto- ja vedynsiirtoverkkoihin. Loput investoinneista kohdistuisivat vedyn ja sähköpolttoaineiden tuotantolaitoksiin. Vedyn tuotantolaitosten investointikustannukset sisältävät noin 8 h varastointikapasiteetin. Investointikustannuksissa ei ole huomioitu teollisuusprosessien ja liikenteen kaluston ja jakeluinfraktuurin investointikustannuksia siirryttäessä nykypolttoaineista vetyyn (mm. raudan vetypelkistyksen prosessilaitteet, vetypolttimet, liikenteen vedyn jakeluasemat ja vetyrekat).

Kuva 58. Investointikustannukset skenaarioissa 'Maksimi A' ja 'Maksimi B'



Maksimiskenaarioihin liittyvä vahvuuksia, heikkouksia, mahdollisuuksia ja uhkia on esitetty alla taulukossa 21 .

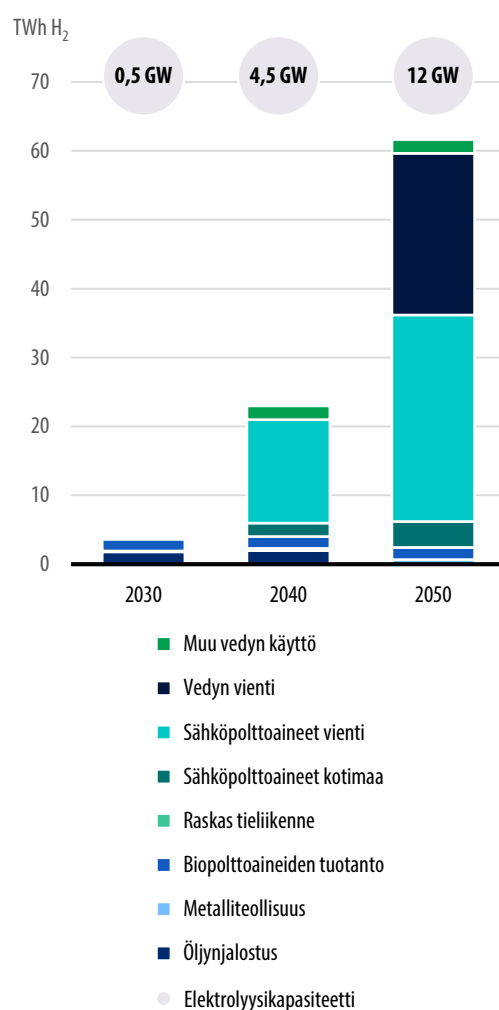
Taulukko 21. Maksimiskenaarioiden vahvuudet, heikkoudet, mahdollisuudet ja uhat

VAHVUDET	HEIKKOUEDET
<p>Valtava vientipotentiaali, jota kehitetään maksimaalisesti olettaen, että Suomella on jatkuva etulyöntiasema markkinoilla</p> <p>Tuo merkittävät investoinnit ja sitä kautta työllisyyttä Suomeen</p> <p>Tuulivoiman lisärakentamisen koko potentiaali hyödynnetään maksimaalisesti</p> <p>’Maksimi A:ssa’ keskitytään kansantalouden kannalta arvokkaisiin tuotantoketjuihin, eikä kansainvälisen vedyn siirtoinfrastruktuurin kehittämiseen tarvitse panostaa</p> <p>’Maksimi B:ssä’ hyödynnetään vedyn vientinä se osuus maksimituotantopotentiaalista, jota ei saada kv. markkinoille sähköpolttoaineina</p>	<p>Vaatii merkittävät investoinnit sekä sähkön- että vedynsiirtoinfrastruktuuriin, vaikka kansainvälisen markkinan kehittyminen on epävarmaa</p> <p>’Maksimi A:ssa’ vedyn viennin potentiaali jätetään hyödyntämättä, vaikka tuotantopotentiaalia jäisi sähköpolttoaineista yli</p> <p>’Maksimi A:ssa’ biogeenisen hiilidioksidin teknis-taloudellinen hyödynnettävyys voi nousta rajoitteeksi metaanin, metanolin ja nestemäisten hiilivetyjen tuotannolle</p> <p>Suuri kasvu asettaa paineita teknologioiden, palvelujen ja työvoiman saatavuudelle</p> <p>Suomen talous olisi herkkä vetytalouden kv. muutoksille</p>
MAHDOLLISUUDET	UHKAT
<p>Sähköpolttoaineiden ja vedyn vienti-investointien ja tuotannon optimointi markkinatilanteen kehittymisen mukaisesti</p> <p>Mikäli pitkällä aikavälillä näyttää, että kansainväliselle vedynsiirtoputkelle on tarvetta, investointi ’Maksimi A:ssa’ voidaan tehdä myöhemmin</p> <p>Laajan vetyverkoston avulla pystytään hajauttamaan vedyn tuotantopaikkoja siten, että hukkalämmöt saadaan paremmin hyödynnettyä, tuotantoa ja kulutusta tasapainotettua sekä vähennettyä tarvetta sähkönsiirtoverkon vahvistamiselle</p> <p>Biogeeninen hiilidioksidi saadaan hyödynnettyä markkinan tarpeisiin eli syntyy CCU-teollisuuden investointeja Suomeen</p> <p>Jos tuulivoimaa voidaan rakentaa edullisesti skenaarioissa esitettyä enemmän, voitaisiin saavuttaa vieläkin suurempi vienti</p>	<p>Sähköpolttoaineiden kansainvälistä markkinaa ei synny, koska EU-laajuiset ja kansalliset kannustimet tähän ovat riittämättömiä</p> <p>Kilpailu vedyn ja sähköpolttoaineiden globaaleilla markkinoilla on niin kovaa, että tuotanto Suomessa ei kannata</p> <p>Tarvittavat tuulivoima- ja infrastruktuuri-investoinnit kotimaassa eivät vastaa tarpeita (esim. liian kallista tai viiveitä), jolloin vientipotentiaalia menetetään</p> <p>Infrastruktuurin kehittäminen kustannetaan kansallisesti, mutta saatava hyöty ei kohdistuisi riittävästi Suomeen</p> <p>Jos tuotantokustannukset Suomessa nousevat kilpailijamaita enemmän (esim. tuulivoiman lisärakentamisen yksikkökustannukset nousevat, kun pyritään maksimaaliseen tuotantoon), tuotanto ei kannata</p>

7.1.2 Maltillinen kasvu

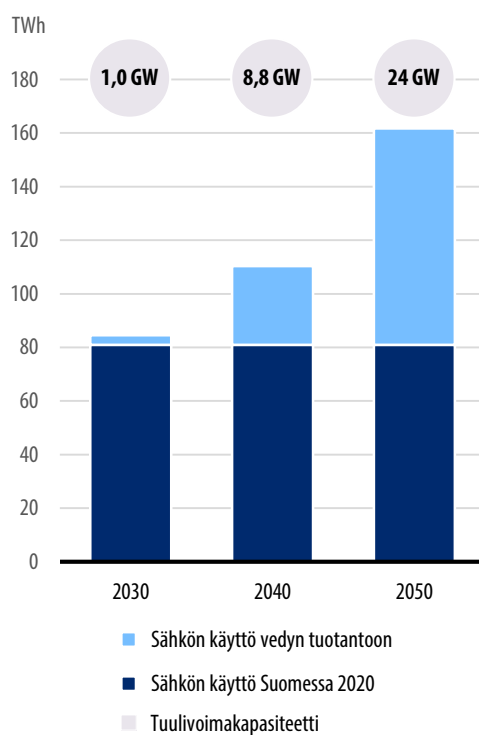
'Maltillisen kasvun' skenaario lähtisi hitaasti liikkeelle vastaten skenaarion 'Vain välttämätön A' kehitystä vuoteen 2030 saakka (ks. kuva 59 alla). Tätä selittäisivät vedyn ja sähköpolttoaineiden hidas kansainvälisen kysynnän kehittyminen, kun Euroopan maat keskittyvät 2020-luvulla ensisijaisesti kotimaisen tuotantonsa ja kysyntänsä kehittämiseen, ja terästeollisuuden siirtyminen vaihtoehtoihin hiilineutraalisuusratkaisuihin raudan vetytelikistyksen sijasta. Sähköpolttoaineiden vienti kasvaa merkittävästi vuoteen 2040 ja jatkaa kasvuaan saavuttaen 4 % markkinaosuuden Euroopan sähköpolttoaineista vuoteen 2050 mennessä. Vetykaasun vienti alkaa 2040 jälkeen, kun vientiputki Saksaan valmistuu. Vientimäärä jäisi alle 25 TWh:iin vuodessa. Tarvittava elektrolyyserien kokonaiskapasiteetti Suomessa olisi noin 12 GW vuoteen 2050 mennessä.

Kuva 59. Vedyn loppukäyttö ja tarvittava elektrolyyserikapasiteetti skenaariossa 'Maltillinen kasvu'



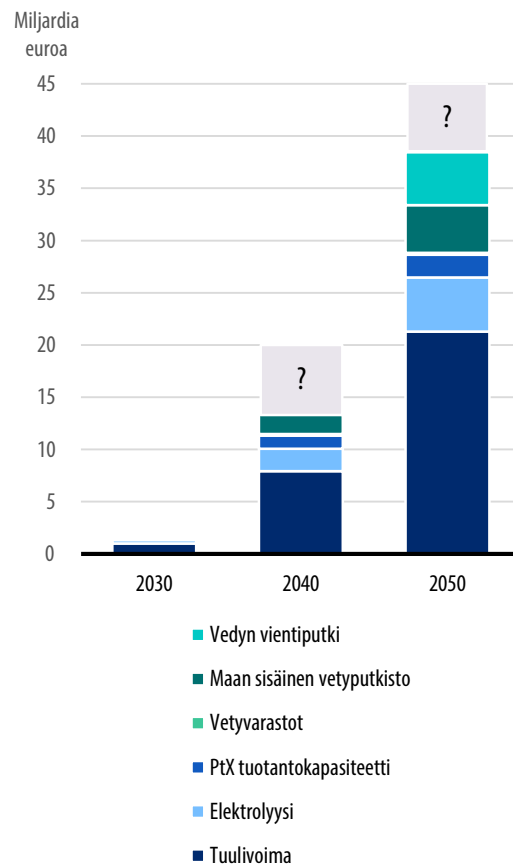
Tarvittava tuulivoiman lisäkapasiteetti kasvaisi voimakkaasti 2030-luvulta alkaen (ks. kuva 60 alla) ja olisi noin 24 GW vuoteen 2050 mennessä.

Kuva 60. Sähkön käyttö vedyntuotantoon ja tarvittava tuulivoimakapasiteetti skenaariossa 'Maltillinen kasvu'



Tarvittavat kumulatiiviset investointikustannukset olisivat noin 45 mrd. euroa vuoteen 2050 mennessä (ks. kuva 61 alla). Tuulivoiman lisärakentamiseen tarvittaisiin tästä noin puolet ja kolmannes kuluisi sähkönsiirto- ja vedynsiirtoinfrastruktuuriin. Loput investoinneista kohdistuisivat vedyn ja sähköpolttoaineiden tuotantolaitoksiin. Teollisuuden ja liikenteen konversiokustannuksia ei tässä yhteydessä ole huomioitu.

Kuva 61. Investointikustannukset skenaariossa 'Maltillinen kasvu'



‘Maltillisen kasvun’ skenaarion SWOT-analyysi on esitetty alla taulukossa 22.

Taulukko 22. ‘Maltillisen kasvun’ vahvuudet, heikkoudet, mahdollisuudet ja uhkat

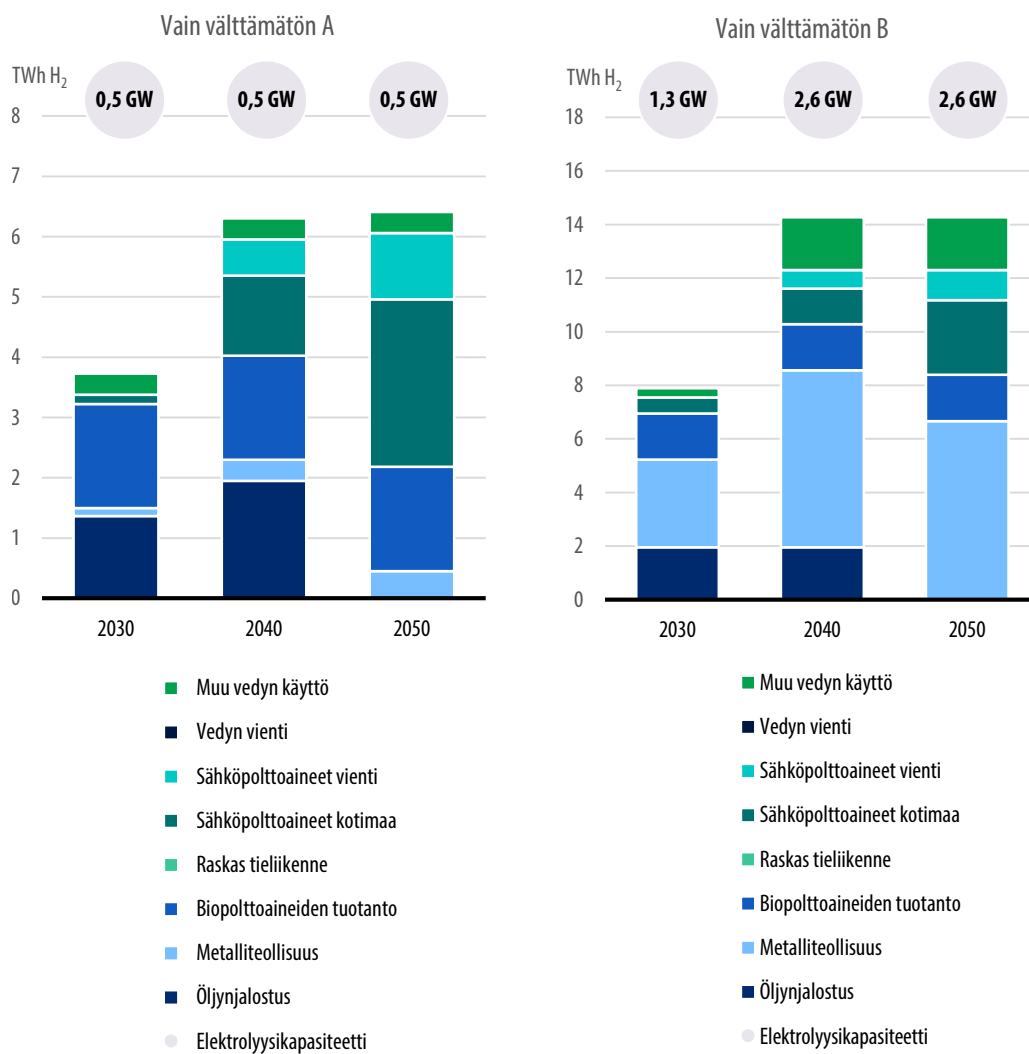
VAHVUUDET	HEIKKOUEDET
Vientiä rakennetaan maksimaalisesti kansainvälisen kilpailun ehdoilla hidasta alkua lukuun ottamatta	Suomi ei voi olla edelläkävijä vetytaloudessa, jos Suomen kansainvälinen vienti rakentuu hitaasti
Hidas alku varmistaa oikeat teknologia- ja tuotevalinnat, kun kv. markkina vasta hakee muotoaan	Suurehkot sähkön ja vedyn siirtoinfra investointikustannukset
Infrastruktuuria rakennetaan pitkäjänteisesti ja kulloinkin vallitsevia tarpeita vastaavasti	
Vetytalouteen liittyvät riskit pidetään hallittavina	
MAHDOLLISUUDET	UHKAT
Vienti voidaan aikatauluttaa kysynnän kehittymisen mukaisesti eri tavoin	Jos viennin kehittämisestä jättyäytään alkuvaiheessa pois, ei hyödynnetä Euroopan yhteistä kasvuvaihetta ja tarjolla olevia tukia, jolloin kehittämisen aikaikkuna voi sulkeutua lopullisesti
Vetyverkoston avulla pystytään hajauttamaan vedyn tuotantopaikkoja siten, että hukkalämmöt saadaan paremmin hyödynnettyä, tuotantoa ja kulutusta tasapainotettua sekä vähennettyä tarvetta sähkönsiirtoverkon vahvistamiselle	Sijoittajat voivat menettää kiinnostuksen Suomeen, jos alkuvaiheessa lähdetään liikkeelle passiivisesti
Biogeeninen hiilidioksidi saadaan hyödynnettyä markkinan tarpeisiin eli CCU-teollisuuden investointeja syntyy Suomeen	Osa alkuvaiheen vientipotentiaalista jätetään hyödyntämättä hitaan alun vuoksi

7.1.3 Vain välttämätön A ja B

Minimiskenaario ‘Vain välttämätön A’ korostaa vaihtoehtoisia teknologioita. Terästeollisuuden hiilineutraalisuus toteutuisi muilla kuin raudan vetypelkistykseen perustuvilla ratkaisuilla ja öljynjalostuksessa ja nestemäisten biopolttoaineiden valmistuksessa painotettaisiin hiilidioksidin talteenottoa. Vetyelektrolyysi jäisi pilottiasteelle noin 500 MW:iin (ks. kuva 62 alla). Skenaariossa ‘Vain välttämätön B’ vedyn loppukäyttö nousisi noin kaksinkertaiseksi A-skenarioon verrattuna, noin 14 TWh:iin vuodessa. Öljynjalostuksessa oletetaan, että puolet vedystä tuotettaisiin nojaamalla hiilidioksidin talteenottoon vuoteen 2040 saakka ja tästä eteenpäin kokonaan elektrolyysiin perustuen. Olemassa olevan

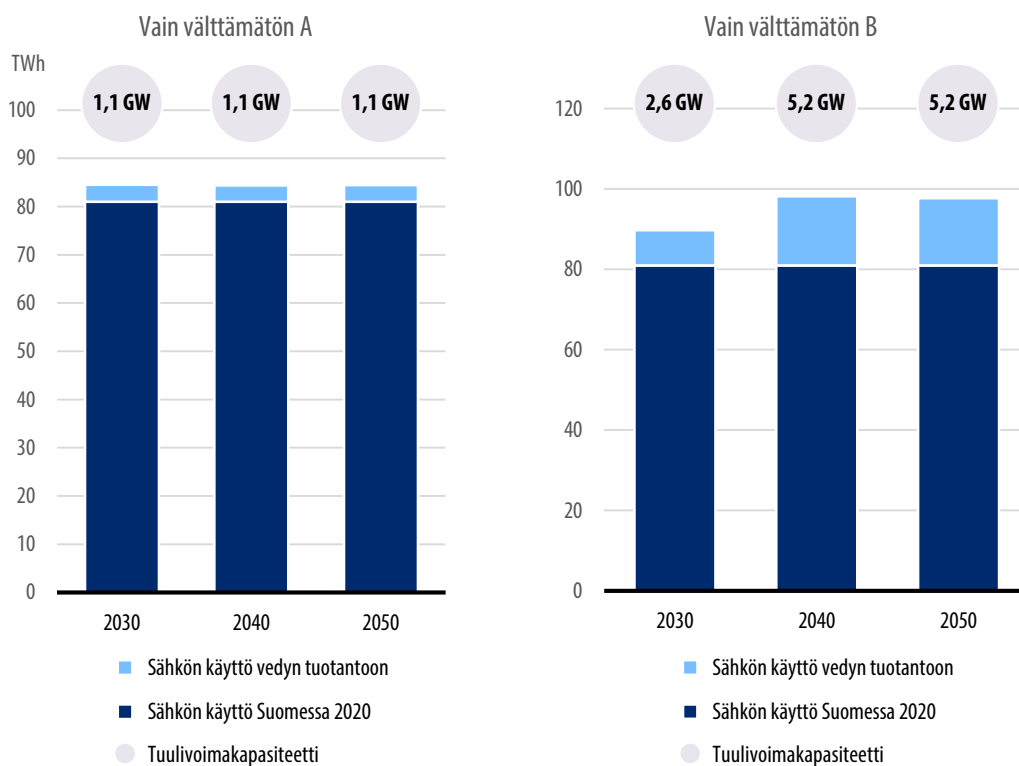
öljynjalostuskapasiteetin oletetaan siirtyvän sähköpolttoaineiden tuotantoon vaiheittain, kun öljytuotteiden käyttö vähenee. Skenaariossa 'Vain välttämätön B' tarvittava elektrolyysierikapasiteetti olisi 1,3 GW jo vuonna 2030.

Kuva 62. Vedyn loppukäyttö ja tarvittava elektrolyysierikapasiteetti skenaarioissa 'Vain välttämätön A' ja 'Vain välttämätön B'



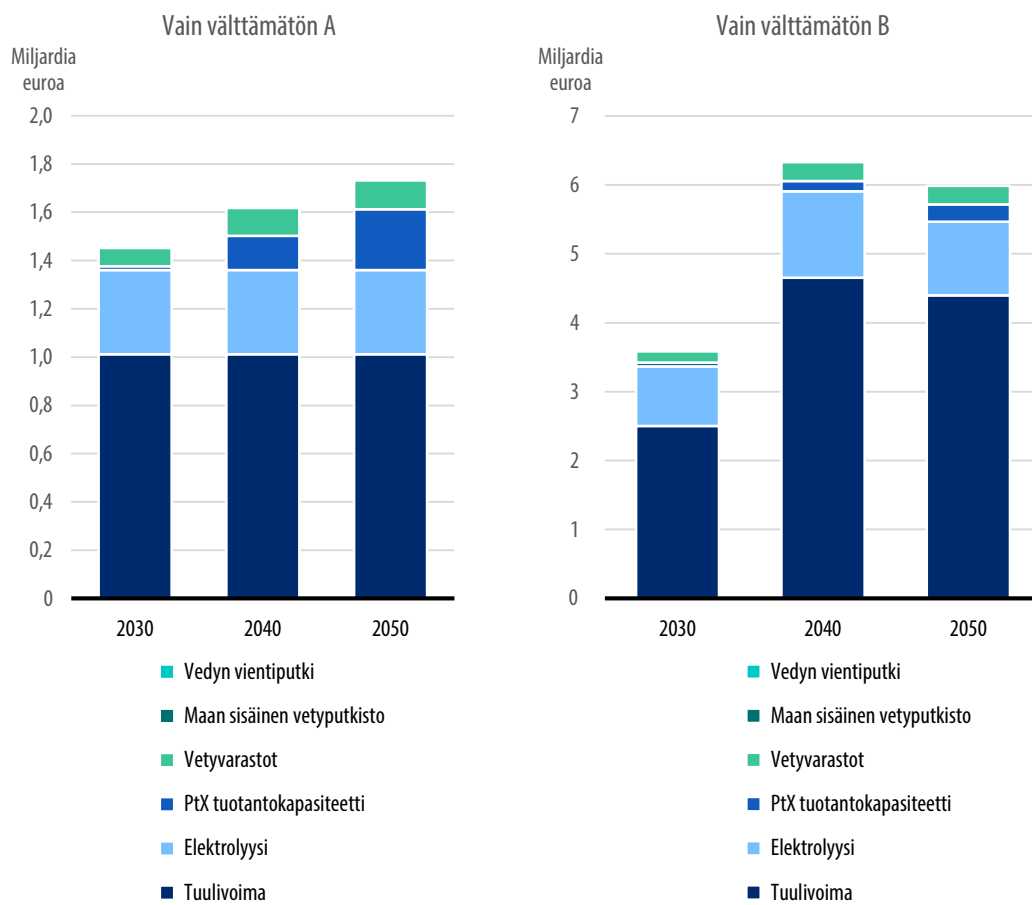
Tarvittava tuulivoiman lisärakennuskapasiteetti pysyy pienenä skenaariossa 'Vain välttämätön A' (ks. kuva 63 alla). Skenaariossa B tarve on jo nelinkertainen tähän verrattuna. Sähkönkulutus kasvaisi noin 20 % nykyisestä vuoteen 2040 mennessä.

Kuva 63. Sähkön käyttö vedyntuotantoon ja tarvittava tuulivoimakapasiteetti skenaarioissa 'Vain välttämätön A' ja 'Vain välttämätön B'



Investoinnit kohdistuvat 'Vain välttämätön' -skenaarioissa sähkön ja vedyn tuotantoon (ks. kuva 64 alla). Merkittäviä lisäinvestointeja sähkönsiirtoverkkoon ja vedyn siirtoon ei tarvittaisi.

Kuva 64. Investointikustannukset skenaarioissa 'Vain välttämätön A' (vasemmalla) ja 'Vain välttämätön B' (oikealla)



'Vain välttämätön' -skenaarioiden SWOT-analyysi on esitetty alla taulukossa 23.

Taulukko 23. Skenaarioiden 'Vain välttämätön' vahvuudet, heikkoudet, mahdollisuudet ja uhkat

VAHVUUDET	HEIKKOUEDET
<p>Jos teknologian kehitys etenee siten, että syntyy uusia, vetyä tehokkaampia ja kestävämpiä ratkaisuja, vedyn tuotantoa ja siihen liittyvää infrastruktuuria ei tarvitse voimakkaasti kehittää</p> <p>Vältetään suuren riskin investoinnit</p>	<p>Viennin potentiaali jätetään hyödyntämättä riippumatta siitä, miten teknologiat ja markkina kehittyvät</p> <p>Ei houkuttele investointeja Suomeen</p> <p>Suomeen syntyisi vain kapea osaaminen teemassa, johon kehitetään merkittävää osaamista muissa maissa</p> <p>Vedyn tuonti- ja varastointimahdollisuuksia ei hyödynnetä, koska siirtoinfrastruktuuri tähän puuttuu</p> <p>Paikallisiin tarpeisiin kehittäminen voi johtaa suurempiin tuotannon yksikkökustannuksiin kuin jos tuotanto olisi laajamittaista ja useita toimijoita yhdistävää</p>
MAHDOLLISUUDET	UHKAT
<p>Kotimaan kysynnän täyttäminen kokonaan kotimaisella tuotannolla</p> <p>Vedyn siirtoputkiston sijaan sijoitettaisiin hiilidioksidin siirtoon sähköpolttoaineiden tuotantoa ja/tai hiilidioksidin varastointia varten</p> <p>Sähköpolttoaineiden tuotantomahdollisuuksia voidaan hyödyntää markkinatilanteesta riippuen</p> <p>Vientiä voidaan kehittää tarvittaessa myöhemmin, kun kansainväliseen kysyntään liittyvät epävarmuudet vähenevät ajan kuluessa</p>	<p>Jos viennistä jätetään tässä vaiheessa pois, ei hyödynnetä Euroopan yhteistä kasvuvaihetta ja tarjolla olevia tukia ja kehittämisen aikaikkuna voi sulkeutua lopullisesti</p> <p>Jos vetyarvoketjuihin sijoittamisen sijaan ei sijoiteta muuhunkaan, Suomen talouskehitys voi jäädä jälkeen muista Euroopan maista</p>

7.2 Johtopäätökset vetytalousskenaarioista

Vedyn ja sähköpolttoaineiden tuotanto voi Suomessa rajoittua kansallisen kysynnän tarpeisiin tai laajentua tämän lisäksi vientiteollisuudeksi kansainvälisille markkinoille. Skenaarioiden väliset erot tuotantomäärissä ovat erittäin suuria vientioletuksista riippuen.

Suomen kotimainen kysyntä ja kysyntä Suomen kansainvälisessä liikenteessä voidaan täyttää 0,5–2,6 GW elektrolyyserikapasiteetilla vuoteen 2050 mennessä riippuen siitä, millaisia teknisiä ratkaisuja terästeollisuudessa ja öljyn ja biopolttoaineiden jalostuksessa tehdään hiilineutraalisuuden saavuttamiseksi. Viennin kehittyminen riippuu voimakkaasti kansainvälisestä kysynnästä ja Suomen kilpailukyvyistä tässä. Vedyn tuotanto Suomessa voisi vientivetoisissa maksimiskenaarioissa ylittää jopa yli 130 TWh:iin vuodessa vuoteen 2050 mennessä.

Sidosryhmien kommentteissa maksimiskenaarioiden vahvuuksina nähdään tuotantopotentiaalin täydellinen hyödyntäminen, mutta toisaalta tunnustetaan, että kysyntään ja Suomen kilpailukykyyn liittyy epävarmuuksia. 'Maltillinen kasvu' nähdään tältä osin maksimiskenaarioita realistisempänä, joskin sen hidas alku herättää kysymyksiä: voiko kasvu lähteä käyntiin, jos alkuvaiheen tilaisuuksia julkisille tuille ja markkinan jakamiselle Euroopassa ei hyödynnetä.

Minimiskenaariot edustavat tulevaisuutta, jossa kansainvälistä markkinaa ei joko synny tai vientimahdollisuudet jätetään tietoisesti hyödyntämättä. Useat sidosryhmien edustajista näkivät nämä skenaariot uhkakuvaksi, vaikka vedyn kotimainen teollisuuden ja liikenteen kysyntä täytettäisiin molemmissa minimiskenaarioissakin kotimaisella tuotannolla.

7.2.1 Skenaarioiden rajaukset

Vetyskenaarioihin ei ole arvioitu tarvittavia sähkönsiirtoverkkoinvestointeja, koska tämä edellyttäisi yksityiskohtaista verkkomallinnusta. Viitattu maksimiskenaarioiden tarvitsema sähkönsiirtoverkkojen lisäinvestointitarve perustuu Fingridin antamaan arvioon. Tässä yhteydessä on huomioitava, että Fingrid ja Gasgrid Finland ovat käynnistäneet syksyllä 2021 selvityksen, jossa tarkastellaan sähkönsiirto- ja vedynsiirtoverkkojen keskinäistä suhdetta ja verkkoskenaarioita. Tarkastelu valmistuu vuoden 2022 lopulla.

Selvityksessä mallinnetut vetyverkkoinvestoinnit perustuvat Gasgrid Finlandin European Hydrogen Backbone -raportissa esittämän vetyverkkovision osiin, koska konkreettisia investointisuunnitelmia ei ole julkisuudessa esitetty.

Skenaarioihin sisältyvä vetyputki Varsinais-Suomesta Saksaan toimii esimerkkinä vedyn kansainvälisestä viennistä, mutta ei sisällä oletusta, että juuri tämä ratkaisu olisi vaihtoehtoisia ratkaisuja parempi.

Skenaarioissa ei ole otettu kantaa, mitä sähköpolttoaineita Suomessa tuotettaisiin, koska tämä riippuu ennen kaikkea yksittäisten yritysten omista liiketoimintastrategioista ja sähköpolttoaineiden tulevan markkinan kehittymisestä. Samoin selvityksessä ei ole tutkittu yksityiskohtaisesti kaikkien liikenteen vaihtoehtoisten käyttövoimien kustannuskehitystä ja päästövaikutuksia, ja siten asetettu erilaisia kilpailevia käyttövoimia paremmuusjärjestykseen.

8 Suomen vetyskenaarioiden taustatekijöitä

Yhteenveto

Vetytaloudella tarkoitetaan talousjärjestelmää, jossa fossiilisista energianlähteistä tai raaka-aineista siirrytään puhtailla tai vähähiilillä energianlähteillä tuotettuun vetyyn energiankantajana tai raaka-aineena.

Suomen kannalta vetytalouden määrittelemiseen tarvitaan paitsi ymmärrys Suomen lähtökohdista ja kehittämisen vaihtoehtoista, myös priorisointi siitä, mitä Suomen kannattaa tavoitella ja miksi, jotta tarvittavat poliittiset ohjaustoimenpiteet voidaan määritellä.

Kansantalouden näkökulmasta vetytalous on Suomelle mahdollisuus. Tähän kuitenkin liittyy epävarmuuksia, joista suurimmat ovat kansainvälisen kysynnän kehittyminen ja Suomen kilpailukyky.

Vetytalouden tärkein yhteiskunnallinen tavoite on hiilineutraalisuustavoitteiden saavuttaminen ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi. Vetytalous heijastuu myös talouteen, koska se edellyttää muutoksia tietyissä liiketoiminnan arvoketjuissa. Suomelle maana, jolla on mahdollisuus hyödyntää hiilineutraaleja energioresursseja yli oman tarpeensa, vetytalous tarjoaa enemmän mahdollisuuksia kuin rajoitteita.

Suomalaisen vetytalouden kehitys riippuu kotimaisen kysynnän lisäksi vahvasti kansainvälisestä markkina-, teknologia- ja sääntelykehityksestä. Vetytalouden investointien kannattavuuteen, kohdentumiseen ja ajoitukseen vaikuttavista tekijöistä suurin osa on yhteisiä kaikelle teolliselle toiminnalle. Houkutteleva toimintaympäristö muodostuu ennakoitavuudesta, toimivasta energiajärjestelmästä, tuotannossa tarvittavien raaka-aineiden saatavuudesta, osaavasta työvoimasta, toimintaa tukevasta ja mahdollistavasta sääntelystä ja luvituksesta sekä suoraan taloudellisiin mittareihin vaikuttavista tekijöistä. Läheisyys markkinoihin sekä keskeisten tuotantopanosten että tuotteiden osalta on luonnollisesti etu. Toiminnan turvallisuus ja laaja yhteiskunnallinen hyväksyntä ovat kaiken kestävä

liiketoiminnan perusedellytys. Myös tulevaisuuden vetytalouden on rakennettava sosiaalisesti, ekologisesti ja taloudellisesti kestäväälle pohjalle.

Seuraavassa käydään läpi valikoituja Suomen vetytalouskehitykseen vaikuttavia tekijöitä, jotka ovat osaltaan vaikuttaneet tässä selvityksessä esiteltyihin vetytalousskenaarioihin, niissä tehtyihin rajauksiin sekä selvityksen johtopäätöksiin. Aluksi käydään läpi, mitä kilpailukyvyllä tarkoitetaan. Tämän jälkeen kuvataan tarkemmin sähkön roolia vetytaloudelle Suomessa, vedyn markkinakehityksen kansainvälisiä edellytyksiä ja biogeenisen hiilidioksidin saatavuutta Suomessa. Lopuksi tuodaan esille vetytalouden työllisyysvaikutuksiin ja poliittisiin ohjauskeinoihin liittyviä näkökohtia.

8.1 Mitä kilpailukyvyllä tarkoitetaan vetytaloudessa?

Kansantalouden kilpailukyky voidaan jakaa lyhyen ja pitkän aikavälin kilpailukykyyn (Stenborg *et al.*, 2020). Lyhyellä aikavälillä vetytalouden näkökulmasta olennaisia ovat **investointien muutos** ja **nettoviennin muutos** olettaen vetytalousskenaarioiden perusteella, että yksityisten ja julkisten kulutusmenojen muutoksella Suomessa ei ole vetytalouden kannalta suurta merkitystä, koska vetytalous ei kohdistu suoraan kotitalouksiin tai julkiseen sektoriin.

Nettovienti riippuu siitä, kuinka tuotanto menestyy vientimarkkinoilla tai kilpailussa tuonin kanssa. Tämä taas tarkoittaa riippuvuutta kustannuskilpailuvyvästä, eli **lyhyellä aikavälillä kilpailukyky on alhaisempien yksikkökustannusten ylläpitämistä suhteessa kilpailijamaihin**. Teollisuuden investoinnit reagoivat tyypillisesti viiveellä hintakilpailuvyvään muutoksiin. **Kohentunut hintakilpailukyky lisää teollisuuden investointeja ja heikentynyt vähentää niitä.** (Stenborg *et al.*, 2020)

Pitkällä aikavälillä kilpailukyky rakentuu tuottavuuden kasvusta (Stenborg *et al.*, 2020). Tuottavuuteen vaikuttavat yritysten kyky parantaa teknologioitaan, prosessejaan ja tuotteitaan paremmin markkinoiden tarpeisiin ja kysynnän kehitykseen soveltuviksi ja lyhyen aikavälin kilpailukykyä ylläpitäviksi, sekä toisaalta kyky suojautua kilpailulta mm. patentein tai keskittymällä tuotteisiin, joissa kilpailua on vähän.

Suomen kannalta vetytalouden kilpailukyky rakentuu kansallisista lähtökohdista (ks. luku 5) ja siitä, miten yritykset itse ja julkinen sektori rakentavat kilpailukykyä jatkossa suhteessa kysyntään. Tähän voidaan vaikuttaa poliittisten ohjauskeinojen kautta vaikuttamalla kustannustekijöihin ja huolehtimalla tuottavuuden kasvun yhteiskunnallisista edellytyksistä.

Suomen vetyskenaarioiden mukaisesti vetytalouden kannalta tärkein kustannustekijä on puhtaan sähkön hinta. Seuraavaksi nousevat esille sähkön, vedyn ja sähköpolttoaineiden siirto-, varastointi- ja kuljetuskustannukset. Tuotannon suorat investoinnit tulevat suuruusjärjestyksessä vasta kolmantena. Kustannustekijöihin vaikuttamisen lisäksi Suomi tarvitsee panostuksia vetyarvoketjuihin liittyvän osaamisen kehittämiseen ja erityisesti loppukäyttösektorien vetysiirtymän teknisten ja toiminnallisten edellytysten rakentamiseen, jossa Suomella on erinomaiset mahdollisuudet teknologian, suunnittelun ja palvelujen innovaatioille omilla vahvuusalueillaan.

8.2 Miten siirtymä vetytalouteen todennäköisesti tapahtuu?

Eurooppa elää 2020-luvun alussa vahvaa vetyprojektien kehittämisvaihetta, kuten luvuissa 3 ja 4 on esitetty. Julkaistujen hankkeiden määrä voidaan mitata tuhansissa ja ei-julkaistuja hankkeita on tähän verrattuna kehitetty monikymmenkertainen määrä.

Vetyhankkeet ovat tällä hetkellä pääosin kansallisia ja niitä rahoitetaan kansallisilla ja EU-tuilla, koska projektit eivät olisi tässä vaiheessa markkinaehtoisesti kilpailukykyisiä. Vetyyn ja sähköpolttoaineisiin liittyvän EU-tasoisin lainsäädännön voimaantulossa kestää vielä 2–3 vuotta riippuen siitä, miten EU-komission Fit-for-55-paketti, EU:n taksonomia ja kaasujen dekarbonisaatiopaketti etenevät EU:n parlamentin ja Eurooppa-neuvoston käsittelyssä ja kansallisen lainsäädännön valmistelussa tämän jälkeen. EU-tasoisin lainsäädännön valmistuminen toimii edellytyksenä kysynnän kehittymiselle, johon tarvitaan osin pakottavaa lainsäädäntöä (jakeluvelvoitteet, päästökauppa, käyttökiellot, määritelvät), osin esteiden poistamista (infrastruktuuri, markkinamekanismit, koulutus), ja osin taloudellisia tukia (verotuet, investointituet, tuotantotuet).

Alla esitetään tarkemmin tämän selvityksen aineiston perusteella muodostettuja johtopäätöksiä, miten vetysiirtymä todennäköisesti tapahtuu liikennesektorilla ja teollisuudessa Suomessa.

8.2.1 Liikenteen vetysiirtymä

Liikenteessä vety käy polttoaineeksi joko sellaisenaan (vetymoottorit, polttokennot) tai sähköpolttoaineiksi jalostettuna (ammoniakki, metanoli, metaani, kerosiini, diesel, bensiini). Lentoliikenteessä siirtymä tapahtuu todennäköisimmin kerosiiniin, pitkän matkan meriliikenteessä ammoniakkiin ja metanoliin ja raskaassa tieliikenteessä vetyyn. Kaikilla sektoreilla kehitetään myös sähköistämiseen ja biopolttoaineisiin perustuvia ratkaisuja.

EU-tasoisilla ja kansallisilla poliittisilla ohjaukskeinoilla voidaan vaikuttaa liikenteen vetysiirtymien nopeuteen drop-in-polttoaineissa (eli käytössä olevilla teknologioilla hyödynnettävissä polttoaineissa, joita ovat kerosiini, diesel, bensiini, metaani ja pieninä sekoiteosuuksina metanoli) jo tänä päivänä ja 100 % vetypohjaisissa ratkaisuisissa (100 % metanoli tai ammoniakki) siinä vaiheessa, kun kaupallinen käyttöönotto on mahdollista.

Suomi on sitoutunut vähentämään taakanjakosektorille kuuluvan kotimaan liikenteen päästöjä vähintään 50 % vuoteen 2030 mennessä ja liikenne muutetaan nollapäästöiseksi viimeistään vuoteen 2045 mennessä (LVM, 2021). Tältä osin Suomen itselleen asettamat päästövähennystavoitteet ovat kunnianhimoisemmat kuin EU-komission Fit-for-55-paketissa esitetyt tavoitteet.

Suomen sähköpolttoaineiden viennin kehittymisen kannalta on olennaista, millaisia EU-velvoitteita ja kansallisia velvoitteita eri maissa tullaan asettamaan liikenteen uusiutuvia polttoaineita ja tähän sisältyviä sähköpolttoaineita (ml. puhdas vety) koskeville jakeluvelvoitteille lento- ja tiiliikenteessä. Tämä määrittelee niin kotimaisen kuin kansainvälisen sähköpolttoaineiden kysynnän em. sektoreilla. Ilman jakeluvelvoitteita on vaikea nähdä, että sähköpolttoaineille syntyisi Euroopan laajuista markkinaa, koska sähköpolttoaineiden tuotantokustannukset ovat noin kolminkertaiset polttoaineiden fossiilisiin vastineisiin verrattuna. EU:n sisäisen lentoliikenteen päästöihin vaikuttavat tämän lisäksi nykyiseen päästökauppaan tulevat uudistukset, jotka eivät välttämättä lisääisi sähköpolttoaineiden käyttöä vaan lähinnä tarvetta päästökompensaatiomekanismien käyttöön. Suomessa jakeluvelvoitelakia (446/2007) muutettiin vuonna 2021 kattamaan biopolttoaineiden lisäksi muutkin uusiutuvat polttoaineet moottoribensiinin, dieselöljyn ja maakaasun korvaamiseksi liikenteessä.

Meriliikenteen päästövähennysten ohjaaminen perustuu Fit-for-55-paketissa päästökaupan laajentamiseen EU:n sisäiseen ja osin ulkoiseen meriliikenteeseen. Meriliikenteelle jätetään siten edelleen enemmän vapausasteita vähentää päästöjään myös muilla tavoilla kuin polttoaineita vaihtamalla, vaikka ReFuel Maritime -aloitteessa tiukentaa laivojen polttoaineiden päästörajoja. Meriliikenteen polttoainesiirtymä tapahtuu pitkään drop-in polttoaineiden kautta ennen kuin 100 % vetyyn, metanoliin tai ammoniakkiin perustuvat käyttövoimat ovat kaupallisesti saatavilla. **Lentoliikenteen osalta ReFuelEU Aviation -aloitteessa ehdotetaan kestävien polttoaineiden jakeluvelvoitteita EU-jäsenmaiden lentokentillä.** Velvoite sisältää nestemäisten biopolttoaineiden lisäksi myös synteettiset puhtaat ja vähähiiliset polttoaineet (mukaan lukien nk. sähköpolttoaineet). Sekoitevelvoite on 5 % vuonna 2030, josta 0,7 % tulisi olla ei-biologista alkuperää. Vuonna 2050 osuuden tulee olla 63%, josta 28 % tulisi olla ei-biologista alkuperää.

EU:n lisäksi kansainvälistä uusiutuvien polttoaineiden markkinaa määrittelevät YK:n alajärjestö International Maritime Organization (IMO), joka pyrkii edistämään kansainvälistä

yhteistyötä meriliikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi vapaaehtoisin sopimuksin, ja 193 jäsenmaan muodostama kansainvälinen siviili-ilmailujärjestö ICAO. ICAO on perustanut kansainvälisen lentoliikenteen hiilidioksidipäästöjen kasvun hyvittämiseen velvoittavan järjestelmän (CORSIA, Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation), jolla pyritään kansainvälisen lentoliikenteen hiilineutraaliin kasvuun vuodesta 2020 alkaen. CORSIA:ssa ilma-alusten käyttäjät hyvittävät kansainvälisen lentoliikenteen päästöjen kasvun ostamalla CORSIA:n hyväksymiä, pääosin muiden alojen päästövähennyshankkeista peräisin olevia päästöyksiköitä hiilimarkkinoilta. Hyvitysvelvoite laskeetaan vuosittain vertaamalla CORSIA:an kuuluvien jäsenvaltioiden välisiltä reiteiltä aiheutuneita päästöjä vuoden 2019 päästöjen keskiarvoon (Traficom, 2022).

Raskaan liikenteen vedyn jakeluasemille on tarvetta siinä vaiheessa, jos/kun raskaan liikenteen polttokennorekkoja tulee käyttöön Suomessa. Tämä voi tulla ajankohtaiseksi, jos EU-lainsäädännössä näin vaaditaan, vetyrekkoja on käytössä kansainvälisessä liikenteessä suuntautuen Suomeen tai vetyrekoista tulee hinnaltaan kilpailukykyisiä vaihtoehtoisiin käyttövoimiin nähden. Lentoliikenteessä polttoaineena toimisi synteettinen kerosiini, joka ei vaadi muutoksia nykyiseen jakeluinfrastruktuuriin. **Vesiliikenteen jakeluinfrastruktuurin kehittäminen vaatii investointeja siinä vaiheessa, kun aluksia siirtyy 100 % vetypohjaisiin polttoaineisiin.**

8.2.2 Teollisuuden vetysiiirtymä

Terästeollisuus. Suomessa on kaksi suurta terästeollisuuden toimipaikkaa. SSAB Raaha valmistaa kahdessa masuunissa raakarautaa, joka jalostetaan teräkseksi terässulatolla. Outokumpu Tornio valmistaa kierrätysteräksestä ja ferrokromista ruostumatonta terästä.

SSAB ilmoitti 28.1.2022 siirtyvänsä fossiilivapaaseen teräksen tuotantoon jo vuoteen 2030 mennessä. Raahan tehdasta uudistetaan nk. minimills-tuotannolla, johon sisältyvät valokaariuunit ja valssaamot, ja masuunit ajetaan alas vuoteen 2030 mennessä. Tarkempi toimenpide- ja muutossuunnitelma on rakenteilla. Tiedotteessa ei viitattu, missä muodossa raaka-aine saapuu Raahan tehtaalle. Tältä osin Suomen vetyskenaarioiden sisältämät molemmat vaihtoehdot ovat edelleen mahdollisia, mutta masuunien käytöstä poisto aikaistuu.

SSAB:n tavoin Outokumpu on asettanut omat päästövähennystavoitteensa ja toimenpideohjelmansa. Suunnitelmissa on mm. korvata fossiilisia polttoaineita ja pelkistimiä kestäville vaihtoehdoilla (Outokumpu, 2021a). Kierrätysteräs sulatetaan sähköllä valokaariuuneissa. Ferrokromin tuotannossa tarvitaan koksia, jonka korvaamista on tutkittu aiemmin mm. biopohjaisella hiilellä. Outokummun prosessien osalta on edelleen avoinna, millä teknisillä vaihtoehdoilla korvaaminen on mahdollista, mutta tutkimus jatkuu (Outokumpu, 2021b).

Johtopäätöksenä edellisestä terästeollisuus voi rakentaa hiilineutraalin siirtymänsä myös sellaisten ratkaisujen varaan, joihin ei tarvita vetyä. Toisaalta vetyyn perustuvien ratkaisujen soveltaminen voi tulla kyseeseen, jos se on Suomessa kilpailukykyistä.

Öljyn- ja biopoltonesteiden jalostus **ja sähköpolttoaineiden valmistus**. Kemianteollisuudessa vetysiirtymä voi tarkoittaa olemassa olevan fossiilisen vedyn käytön korvaamista ja uutta vetyyn perustuvaa tuotantoa puhtaalla tai vähähiilisellä vedyllä. Nesteen Porvoon jalostamo edustaa suurinta osaa olemassa olevasta vedyn käytöstä kemianteollisuudessa. Yhtiö ei ole asettanut tuotannolleen tiettyä hiilineutraalisuuden tavoitevuotta. Neste on saanut EU-rahoitusta nykyisen vedyn käytön kehittämiseksi kohti vihreää ja sinistä vetyä Porvoon jalostamolla (Neste, 2021). Vetysiirtymän taustalla vaikuttaa myös lopputuotteiden kysynnän muutos, sillä siirtymän edetessä perinteisen öljynjalostuksen tuotteiden kysyntä laskee, mutta uusien tuotteiden kysyntä kasvaa. Sähköpolttoaineiden valmistaminen raaka-aineiksi ja liikenteen polttoaineiksi lähtee kasvuun sen jälkeen, kun EU-lainsäädäntö, kansalliset politiikkatoimet ja kohdemarkkinoiden kehitystilanne luovat edellytykset viennille ja teollisen mittakaavan laitosten sijoittamiselle Suomeen.

Muu teollisuus. Suomessa valmistetaan pieniä määriä vetyperoksidia, johon tarvittava vety valmistetaan tänä päivänä fossiilisista polttoaineista (maakaasu tai raskas polttoöljy). Vaihtoehtona on joko varustaa nykyinen prosessi hiilidioksidin talteenotolla ja varastoinnilla tai siirtyä puhtaaseen vetyyn. Maakaasua, LNG:tä ja LPG:tä käytetään korkeaa lämpötilaa vaativissa prosesseissa elintarviketeollisuudessa, rakennusmateriaalien valmistamisessa, keraami- ja lasiteollisuudessa sekä tietyissä metsäteollisuuden prosesseissa (mm. paperin infrapunakuivaaminen ja meesauuni). Pääosa nykyisestä fossiilisten kaasujen käytöstä voidaan korvata suoralla sähköistämällä tai muilla uusiutuvilla polttoaineilla kuten biokaasulla. Niissä ratkaisuissa, joihin muut teknologiat eivät sovellu, kuten korkeaa lämpötilaa vaativat metallien lämpökäsittelyt, voidaan siirtyä vetyyn, jos polttoteknologiaa vaihdetaan. Haasteita tähän asettavat vedyn hankintaan ja käyttöteknologioihin liittyvät lisäkustannukset sekä turvallisuusnäkökohdat. **Fossiilisten kaasujen korvaaminen vedyllä erilaisissa erikoistuneissa loppukäyttökohteissa vaatii siten tutkimusta.**

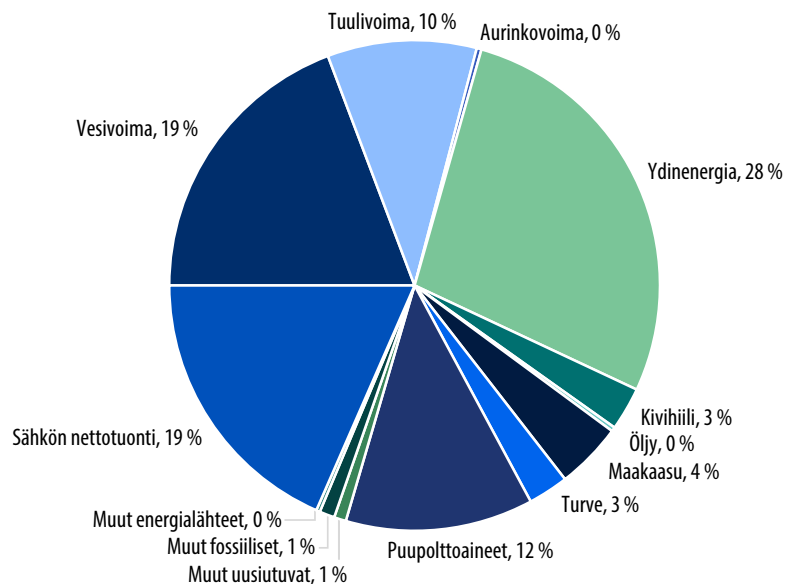
8.3 Sähkön rooli vetytaloudessa Suomen kannalta

Sähkö ja sähkön siirto ovat vetytalouden kannalta keskeisimmät kilpailukykytekijät, kuten luvussa 8.1. on esitetty. **Suomessa on suuri tuulivoiman lisärakentamispotentiaali**, mikä on tärkeä edellytys teollisen mittakaavan vedyntuotantohankkeille. Tuulivoimahankkeita on julkaistu tammikuuhun 2021 mennessä yhteensä 21,3 GW (Tuulivoimayhdistys, 2021). Toteutuessaan tämä ylittäisi Suomen koko nykyisen sähköntuotantokapasiteetin, joka on noin 11,3 GW vuoden 2021 lopussa (Energiavirasto, 2021).

Tämän lisäksi **Suomeen on rakenteilla ja suunnitteilla uutta ydinvoimaa**. Olkiluoto 3 (1,6 GW) on koekäytössä tammikuusta 2022 alkaen ja säännöllinen tuotanto aloitetaan kesäkuussa 2022 (YLE, 2021). Pyhäjoelle suunnitellun Hanhikivi 1 (1,2 GW) ydinvoimalan rakennuslupaa odotetaan vuonna 2022 (Fennovoima, 2021). Keskustelu ydinvoiman sallittavuudesta vähähiilisen vedyn tuotannossa jatkuu Euroopassa. Vaikka ydinvoima ei täyttäisi puhtaan tai vähähiilisen vedyn tuottamiselle EU-säätelyssä asetettuja vaatimuksia suoraan, ydinvoimalla on Suomessa merkitystä kansallisen hiilineutraalisuustavoitteen saavuttamisessa ja se vaikuttaa verkosta hankittavan sähkön keskimääräiseen hiilidioksidipäästökertoimeen. Ydinvoiman sallittavuus vedyntuotannossa toimii kynnyksysymyksenä etenkin Ranskalle, jossa valtaosa sähköstä tuotetaan ydinvoimalla (WNN, 2021).

Suomen sähköntuotanto perustuu jo nyt pitkälle hiilineutraaleihin energianlähteisiin. Esimerkiksi vuonna 2020 kotimaisen sähkön hankinnasta noin 86 % perustui uusiutuvista energianlähteistä peräisin olevaan sähköön ja ydinvoimaan (ks. kuva 65 alla). Tulevaisuudessa hiilineutraalin sähköntuotannon osuus kasvaa myös siksi, että fossiilisiin polttoaineisiin perustuvaa sähköntuotantokapasiteettia poistuu markkinoilta ja turpeen käyttöä edelleen vähennetään.

Kuva 65. Sähkönhankinta energianlähteittäin Suomessa vuonna 2020 (Tilastokeskus, 2021)



Suomen sähkönsiirtoverkkoon kuuluu noin 14 400 km voimajohtoja (ks. kuva 66 alla).

Fingrid suunnittelee kantaverkkoa sähkömarkkinalain 40 § mukaisesti siten, että verkon siirtokapasiteetti olisi riittävä varmistamaan edellytykset Suomen

säilyttämiseen yhtenäisenä sähkökaupan tarjousalueena (pl. Ahvenanmaa, joka kuuluu Ruotsin tarjousalueeseen SE3) (Fingrid, 2021a). Fingrid investoi Suomen kantaverkon kehittämiseen nykyisten suunnitelmiensa mukaan noin 1,4 mrd. EUR vuoteen 2030 mennessä. Vuoden 2021 alussa julkaistun verkkovision perusteella kokonaisinvestoinnit voisivat nousta jopa 2,5–4 mrd. euroon vuoteen 2035 mennessä.

Kuva 66. Fingridin sähkösiirtoverkko 1.1.2020 (Fingrid, 2021b)



Suomen kantaverkko on vahva verrattuna Ruotsiin, jossa maa on jaettu neljään tarjous-alueeseen etelä–pohjoissuuntaisista siirtorajoitteista johtuen. Tästä on Suomelle etua, kun ajatellaan sähkönsiirtoverkon vahvistamisen tarpeita Suomessa verrattuna Ruotsiin. Sähkön tuotantokapasiteetin (runsaasti tuuli- ja vesivoimaa) ja sähkön markkinahintojen kannalta Ruotsi on toisaalta edullisempi kuin Suomi. Esimerkiksi vuonna 2021 sähkön markkinahinta on ollut Pohjois-Ruotsissa keskimäärin 15 EUR/MWh edullisempi kuin Suomessa. Pohjois-Ruotsin ja Suomen välille on tulossa uusi rajasiirtoyhteys Aurora Line (800 MW Ruotsista Suomeen) vuonna 2025, joka osaltaan kaventaa hintaeroja tulevaisuudessa. Sähkön hintaeroilla voi olla merkitystä, kun tarkastellaan vedyntuotannon ja mahdollisten vetyputkien sijoittumista maiden välillä. Toisaalta Pohjois-Ruotsin oma sähkön tarve voi kasvaa huomattavasti paikallisen terästeollisuuden tulevaisuudessa tarvitseman vedyn vuoksi, jolloin Suomen kyvykyys siirtää sähköä ja/tai vetyä Ruotsiin voi tulla ajankohtaiseksi.

Fingridin verkkovisiossa todetaan, että jos Suomeen syntyy merkittävästi uutta sähköintensiivistä teollisuutta tai Suomesta tulee sähkön ja sähköstä tuotettujen polttoaineiden viejä, kantaverkkoinvestointeja tarvitaan todennäköisesti suunniteltua enemmän. Tärkeimpänä yksittäisenä epävarmuustekijänä Fingrid näkee sähkön kulutuksen kehittymisen Suomessa, johon vaikuttavat energian loppukäytön sähköistyminen, teollisuustuotannon kehittyminen ja vedyntuotannon kehittyminen. Fingrid selvittää parhaillaan yhteistyössä Gasgrid Finlandin kanssa, miten laajamittainen säävaihteleva sähköntuotanto yhdistettynä puhtaan vedyn tuotantoon Suomessa voisi vaikuttaa sähköjärjestelmään, ja toisaalta milloin vetyä olisi kustannustehokkainta siirtää vetyputkia pitkin sen sijaan, että vedyntuotanto sijaitisi lähellä loppukäyttöä. Työn odotetaan valmistuvan vuoden 2022 loppuun mennessä. Samoin Fingrid on laatimassa järjestelmävisiota vuonna 2022, joka ottaa huomioon myös sähkömarkkinoissa tapahtuvat muutokset.

Toimialojen laatimissa vähähiilisyystiekartoissa vuonna 2020 tuotiin esille merkittävä toimialojen sähköistämistarve, jonka vaikutuksia sähköjärjestelmään arvioitiin vuonna 2021 (Forsman *et al.*, 2021). Selvityksessä todettiin kulutusjouston rooli tärkeäksi säävaihtelevan sähköntuotannon lisääntyessä. Yhtenä joustoelementtinä tutkittiin vedyntuotannon mahdollisia joustoja. Vedyn paikalla varastoiminen ei ole erityisen edullista ja, kun paikallinen vedyntuotanto yhdistetään teolliseen loppukäyttöön, vedyntuotannon alasajosta johtuviin tuotantokatkoksiin liittyisi suuria kustannuksia. Jos käytössä olisi useiden tuottajien ja loppukäyttäjien välinen vedynsiirtojärjestelmä, tilanne voisi olla erilainen, koska putkilinja voisi koostaan riippuen tasoittaa vedyn tuotannon ja kysynnän vaihteluja, vaikka tosin myös tähän liittyisi investointikustannuksia. Pitkällä aikavälillä PEM-elektrolyysierien alkali-elektrolyysereita nopeampi ja joustavampi säädettävyys voi osaltaan auttaa ratkaisemaan sähköjärjestelmän ylläpitoon liittyviä haasteita.

Vedyntuotantolaitoksen kokonaiskustannuksista 70–90 % muodostuu sähkön hankintakustannuksista. Tästä syystä sähkönhankintaan liittyviltä hinta- ja volyyimiriskeitä suojaaminen on vedyntuotantoinvestoinneissa erityisen tärkeää. Tähän pyritään erilaisin järjestelyin; esimerkiksi solmimalla pitkäaikaisia ostosopimuksia (Power Purchase Agreement, PPA), jossa ostohinta ja -volyyymi voidaan sitoa tyypillisesti 10–12 vuodeksi eteenpäin. Vedyntuottaja voi myös hankkia sähköä omakustannushintaan ostamalla voimalaitoksia omistukseensa suoraan. Suomessa on lisäksi mahdollista toimia Mankala-periaatteella, jossa voittoa tuottamaton osakeyhtiö voi tuottaa sähköä osakkailleen omakustannushintaan. Tämän kaltaiset suojausmekanismit eivät kuitenkaan vähennä jouston arvoa: niin kauan kuin sähkömarkkinoilla on huomattavia hintavaihteluja, vedyn tuottajat voivat saada lisäarvoa joustavuudesta, vaikka sähkön hinta olisikin pitkälti suojattu.

Käytännössä vedyntuottajat tulisivat optimoimaan sähkönhankintasalkkuaan yhtiönsä valitseman hankintapolitiikan mukaisesti. Osana lyhytaikaisen hankinnan optimointia mukana olisi myös kulutuksen jousto, jonka marginaalikustannus on määritelty omien erityispiirteiden mukaan tapauskohtaisesti.

Pitkällä aikavälillä PPA-sopimusten hintojen voidaan olettaa mukautuvan sähkön markkinahintojen pitkäaikaiseen kehitykseen. Jos Suomeen rakennettaisiin paljon vedyntuotantokapasiteettia esimerkiksi vientiin, tämä nostaisi keskimääräisiä sähkön hankintakustannuksia olettaen, että edullisimmat tuulivoiman rakennuspaikat on hyödynnetty, asettaen samalla kasvulle rajat, kun hintaero kilpailijamaihin kaventuu. Samoin, jos/kun tuulivoiman osuus Suomen sähköjärjestelmässä kasvaa suureksi, sähkön markkinahintojen volatilitteetti kasvaa ja tämä heijastuu myös pitkäaikaisiin sopimuksiin, koska sopimusten sisältämä riskipremio nousee.

Ruotsin ja Norjan vesivoimalla on erittäin suuri säätökyky, vaikka säävaihtelevan tuotannon osuus kasvaa pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla. Tämä tarkoittaa, ettei pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla voisi rakentaa vedyntuotantolaitoksia myöskään sen olettaman varaan, että sähkön hinnassa esiintyisi paljon matalan hinnan tunteja, joita vedyntuotantolaitos hyödyntäisi. Säätökyky lisäksi vaihtelee vesivuosisista riippuen: kuivina vuosina hinnat ovat korkeampia kuin hyvinä vesivuosisina. Poikkeavien vesivuosisien vaikutus näkyy markkinahinnoissa vielä 2–3 vuoden ajan poikkeavan kauden jälkeen. Tämä edelleen nostaa suojaamisen tarvetta vedyntuotantoinvestointeja harkittaessa.

Suomen sähköjärjestelmän ylläpidon näkökulmasta tuulivoiman osuuden merkittävä kasvu on haastavampaa Suomelle kuin Ruotsille ja Norjalle, koska säätävää vesivoimaa on tarjolla Suomessa huomattavasti vähemmän. Tästä syystä esim. Fingrid on pohtimassa, mitä odotuksia voidaan asettaa vedyntuotannon kulutusjoustolle ja vedyn varastoinnille Suomessa ja mikä merkitys mahdollisilla vedynsiirtoverkoilla ja tuotannon ja kulutuksen sijainneilla olisi tässä.

8.3.1 Vedyn tuotannon ja kulutuksen jouston tarve, mahdollisuudet ja rajoitteet

Vedyntuotantolaitokset, jotka on kytketty suoraan teolliseen loppukäyttäjään, varustetaan yleensä vetyvarastolla, joka auttaa tasoittamaan vedyntuotannon ja -kysynnän välisiä lyhytaikaisia vaihteluja. Kun kyse on vedystä sivutuotteena tai harmaan vedyn tuotannosta, välivarasto on tyypillisesti mitoitettu tasoittamaan vaihteluja korkeintaan muutamien minuuttien ajan. Välivarastojen painetaso on myös hyvin korkea, luokkaa 250–300 bar, jotta varastoinnin materiaalikustannuksia (teräs) voitaisiin alentaa. Välivarastointi kuluttaa sähköä, koska vety on komprimoitava tuotanto- ja loppukäyttöprosesseja korkeampaan paineeseen. Tämän lisäksi varastoinnissa syntyy vetyhäviöitä, koska vety läpäisee terästä.

Edellä kuvattu on hyvä huomioida silloin, jos vedyn välivarastoja halutaan kasvattaa sähkön kulutusjouston mahdollistamiseksi. Jos välivarastoja ei olisi, tarkoittaisi elektroylyysilaitoksen jousto loppukäyttäjän teollisen tuotannon säätämistä alas siksi aikaa, kun vetyä ei ole saatavilla. Tämä nostaisi kulutusjouston marginaalikustannuksen niin korkeaksi, ettei kulutusjousto tulisi käytännössä kyseeseen. Välivarastojen kasvattaminen olisi siten ainoa keino kulutusjouston toteuttamiseen toisiinsa kytketyillä laitoksilla.

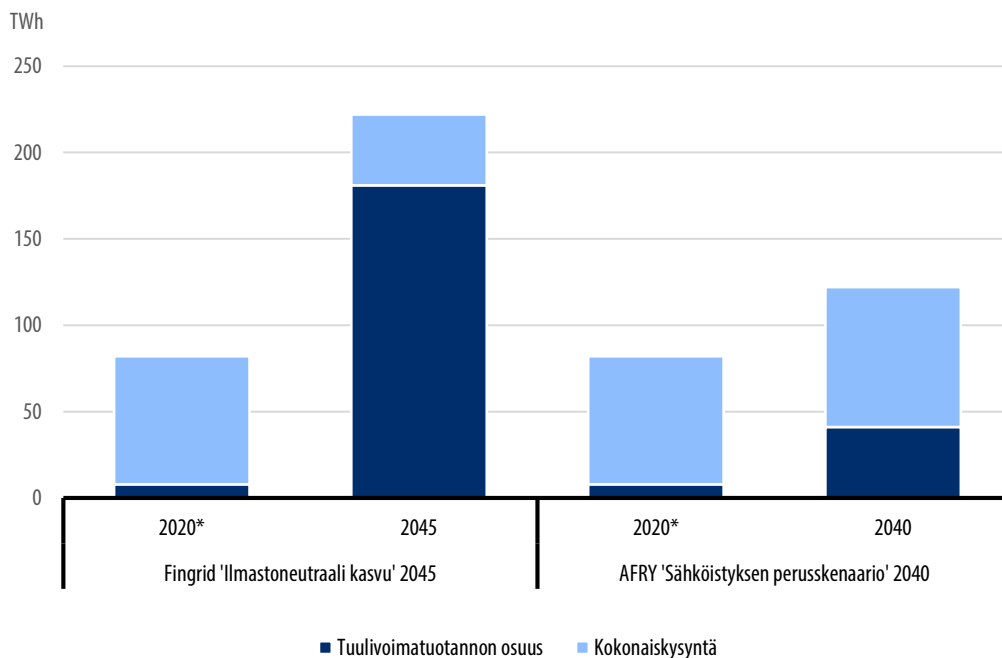
Vedyn kyky läpäistä materiaaleja on huomioitava vedyn pitkäaikaisessa varastoinnissa ja vedyn siirrossa. Siinä, missä maakaasuverkkojen häviöt perustuvat lähinnä rikkoutumisiin tai materiaalivaurioihin, vedyn siirtoverkoissa häviöitä tapahtuu myös materiaalin läpi vedyn korkean läpäisykyvyn vuoksi. Tämä on otettava huomioon mm. pitkiä putkilinjayhteyksiä suunniteltaessa. Toistaiseksi laaja kokeellinen aineisto vedynsiirtoputkien siirtohäviöistä puuttuu, mutta häviöiden voidaan olettaa kasvavan, mitä suurempia kuljetuspaineita käytetään. Eräissä lähteissä vedynsiirtoputkien häviöiksi on arvioitu 0,77 % per 100 km, joka tarkoittaisi 14 % häviöitä 2 000 km siirtoetäisyydellä (Mazza & Hammerschlag, 2004). Toistaiseksi kokeita häviöistä on tehty lähinnä jakeluverkkojen paineissa (3–4 bar) maakaasun ja vedyn seoksille. Samoin vetyä varastoitaessa korkeissa paineissa (teollisuussovelluksissa 250–300 bar teräsastia) syntyy merkittäviä vetyhäviöitä varsinkin, jos varastointiaika on pitkä.

Perinteisesti vesivoima on toiminut Pohjoismaissa tuotannon ja hintavaihteluiden tasajana, mutta sähköistymisskenaarioissa kysyntä voi kasvaa huomattavasti, eikä sähköjärjestelmän kannalta voi olettaa, että olemassa oleva vesivoimatuotanto riittää tulevaisuudessa ratkaisemaan koko järjestelmän tasapainokysymystä. Pitkällä aikavälillä vaikuttavia ajureita ovat lisäksi Manner-Eurooppaan ja Iso-Britanniaan rakennettavat siirtoyhteydet, mikä tarkoittaa, että pohjoismaisen vesivoiman säätöpotentiaali jakautuu laajemmille sähkömarkkinoille. Nykytilanteessakin on viimeaikaisia esimerkkejä, joissa vesivoimatuotanto on ollut alhaisella tasolla, mikä yhdessä muiden sähkömarkkina-ajurien kanssa on aiheuttanut huomattavan korkeita sähkön hintoja. Esimerkiksi 2021 toisella puoliskolla Suomen

aluehinnan kuukausikeskiarvo on vaihdellut välillä 65 EUR/MWh ja 193 EUR/MWh (Nordpool, 2022).

Kysynnän kasvaessa pääasiallinen uusi tuotantokapasiteetti Pohjoismaissa tulee todennäköisesti olemaan sääriippuvaista: Suomessa etenkin maatuulivoimaloita, mutta myös merituulivoimaloita ja aurinkosähköpaneeleita (ks. kuva 67).

Kuva 67. Tuulivoimat tuotannon osuus kokonaiskysynnästä eri skenaarioissa Suomessa (Fingrid, 2021a; Forsman et al., 2021, *2020 päivitetty viimeisimmän tilastotiedon mukaan: Tilastokeskus 2022)

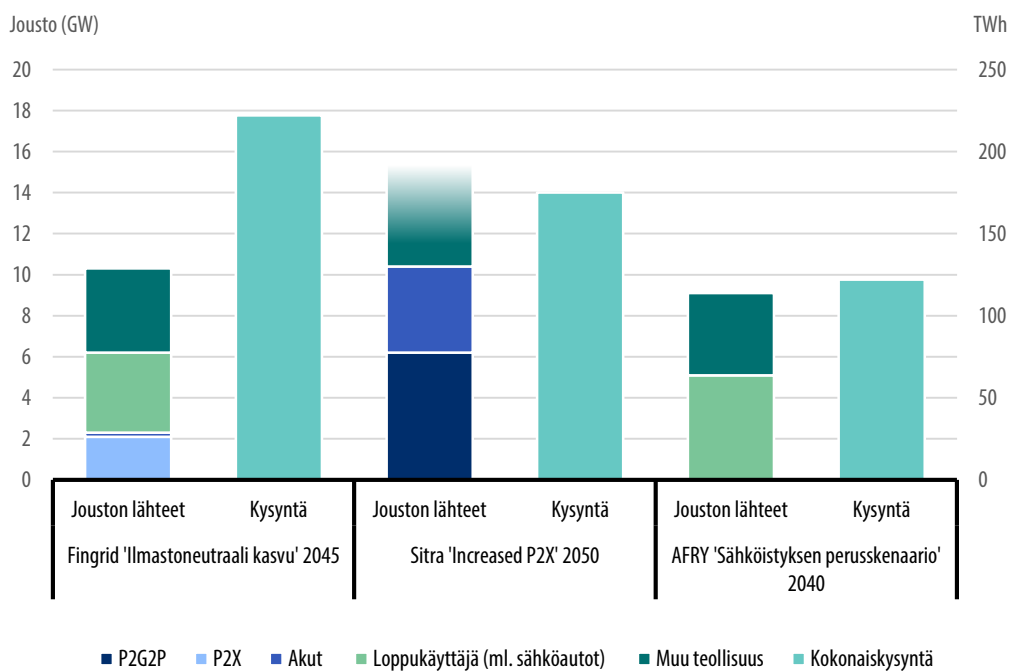


Tämä tarkoittaa, että pääasiassa tasaisen profiilin kysynnän kasvuun vastataan sääriippuvaisella tuotannolla. Kokonaisuuden tasapainottamiseksi tarvitaan lisää joustavia ratkaisuja: joko joustavaa tuotantokapasiteettia, kysyntäjoustoa tai energiavarastoja.

Suomessa on tehty lähiaikoina kolme koko Suomen kattavaa sähkömarkkinamallinnusta, joiden tekijäorganisaatiot ovat Fingrid (Fingrid, 2021a), AFRY (Forsman et al., 2021) ja Sitra (Roques et al., 2021). Kuva 68 esittää näissä mallinnoissa käytettyjä oletuksia kokonaiskysynnästä (TWh) ja kysyntäjousta (GW). Kaikissa skenaarioissa on oletettu huomattava määrä joustavaa kysyntää eri lähteistä. Fingridin 'Ilmastoneutraali kasvu'-skenaariossa joustoa tulee loppukäyttäjiltä, lähinnä sähköautoista ja sähkölämmityksestä, teollisuudesta ja P2X-tuotannosta. Sitran 'Increased P2X'-skenaariossa joustoa tulee etenkin

akuista, P2G2P (Power-to-gas-to-power) -tuotannosta ja teollisuuden joustoista, vaikka jälkimmäistä ei tosin ole tarkasti kvantifioitu. Sitran skenaariossa on myös oletettu uutta kaasuntuotantokapasiteettia jouston lähteenä. AFRYn 'Sähköistyksen perusskenaariossa' joustoa tulee etenkin loppukäyttäjiltä ja teollisuudesta sisältäen P2X-tuotannon. AFRYn selvityksessä tosin teollisuuden kysyntäjousto ei ole täysin joustavaa, vaan pikemminkin 'huippuja leikkaavaa' joustoa.

Kuva 68. Kysyntäjousto ja kokonaiskysyntä eri selvityksissä ja skenaarioissa (Fingrid, 2021a; Forsman et al., 2021; Roques et al., 2021)



Huomattavaa on, että kaikissa edellä esitetyissä skenaarioissa jouston tarve kasvaa huomattavasti tuulivoiman kattaessa suuren osan kysynnästä. Erilaisia jouston lähteitä on huomattava määrä, mutta samaan aikaan kaikissa skenaariossa on oletettu vedyn tuotannon osaltaan osallistuvan tämän jouston tarjoamiseen huomattavallakin kapasiteetilla. Sähkömarkkinajousto voi elektrolyysivedyn kohdalla tarkoittaa joko kysyntää leikkaavaa joustoa eli kysyntää, joka reagoi hintapiikkeihin leikkaamalla kulutusta, tai hinnan suhteen optimoivaa kulutusta eli kysyntää, joka muuttaa kulutusta hintasignaalien mukaan. Ensimmäinen on mahdollista, jos vedyn tuotantokapasiteetti on korkeampi kuin keskimääräinen kysyntä ja kysyntä voi tarvittaessa joustaa, ja jälkimmäinen esim. ylimitoittamalla elektrolyysilaitos ja rakentamalla vetyvarasto elektrolyserin yhteyteen.

Elektrolyyserikapasiteetti ja vedyn varastointi ovat nykytilanteessa vielä huomattavan kalliita, eikä vedyn joustava tuotanto todennäköisesti ole yleistä vetysiirtymän alkuvaiheessa. Joustavasta vedyn tuotannosta voi tulevaisuudessa tulla kannattavampaa, kun varastointi- ja vedyntuotantoteknologiat kehittyvät ja tuulivoimakapasiteetti kasvaa.

Suomessa jouston tarvetta voidaan osaltaan ratkaista myös kasvattamalla sektori-integraatiota, etenkin vahvistamalla sähköjärjestelmän ja lämpöjärjestelmän integraatiota. Vedyn ja sähköjärjestelmän näkökulmasta tällä on kaksi pääasiallista vaikutusmekanismia:

- Hukkalämmön hyödyntäminen – Elektrolyyseri tuottaa huomattavan määrän hukkalämpöä, joka voidaan hyödyntää esim. kaukolämpönä. Hyödyntämistä rajoittaa kaukolämpöverkkojen ja elektrolyyserilaitosten keskinäinen sijainti ja lämmön kysynnän vuodenaikavaihtelu. Elektrolyysit todennäköisesti sijaitsevat joko vedyn kysynnän läheisyydessä teollisuuslaitosten yhteydessä, tai mahdollisesti tulevaisuudessa sähkön tuotannon yhteydessä. Tällöin elektrolyysit eivät välttämättä sijaitse kaukolämpöverkon yhteydessä, mikä vähentää hukkalämmön hyödyntämispotentiaalia.
- Lämmityksen sähköistyminen – Lämmön varastointi on tyypillisesti edullisempaa kuin sähkön varastointi. Lämmityksen sähköistyminen voi tarkoittaa, että kaukolämpöverkot voivat osaltaan tasata vaihtelevaa sähköntuotantoa tuottamalla lämpöä varastoon, kun sitä on tarjolla huomattava määrä, ja hyödyntää varastoitua lämpöä, kun uusiutuvaa tuotantoa on vähemmän. Potentiaalia rajoittaa osaltaan kaukolämmön kokonaiskysyntä, varastointiteknologiat ja se, että lämmön kysyntä on myös pitkälti joustamatonta.

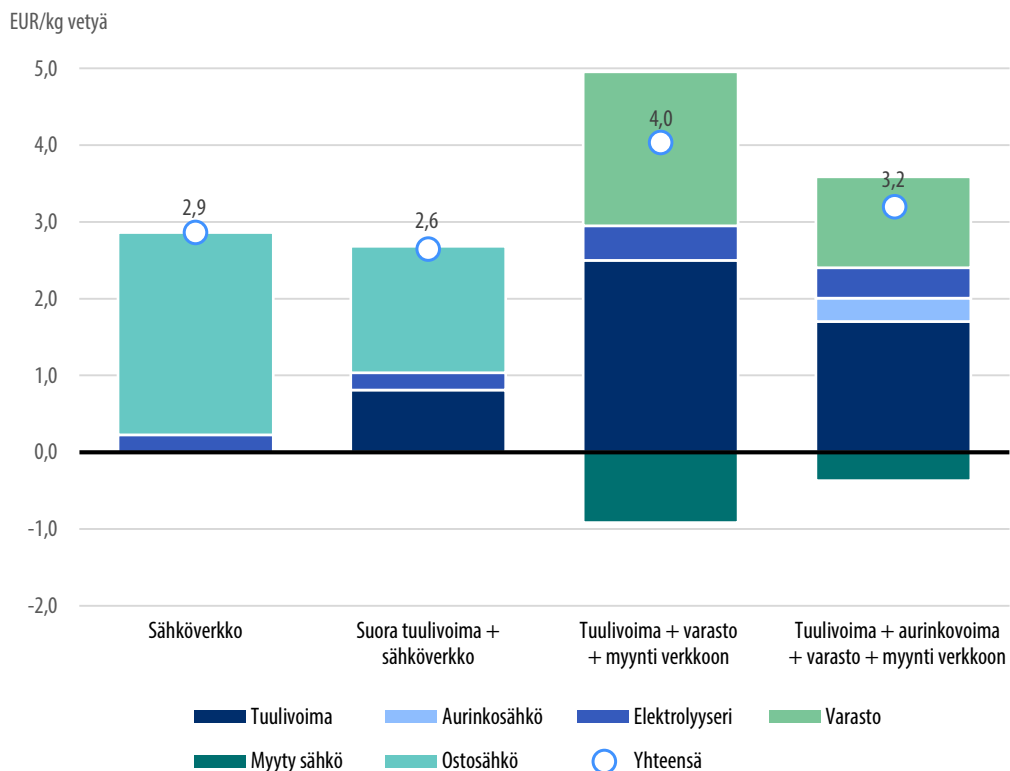
8.4 Vedyn kustannustekijät

Vedyn lopulliseen hintaan vaikuttavat tuotantokustannukset ja mahdolliset logistiikkakustannukset. Tuotantokustannustekijät riippuvat tuotantorakenteesta. Mahdollisia tuotantorakenteita elektrolyyserivedylle on 1) sähköverkkoon yhdistetty elektrolyyseri, 2) suoraan sähköntuotantolaitokseen kytketty elektrolyyseri. esim. osana tuuli- tai aurinkopuistoa, tai 3) näiden yhdistelmä. Ensimmäinen tuotantorakenne on yksinkertaisin ja kuvastaa esim. tilannetta, jossa elektrolyyserilaitos on rakennettu teollisen loppukäytön yhteyteen. Muissa vaihtoehtoissa elektrolyyseri sijaitsee tuotantolaitoksen yhteydessä, josta vetyä siirretään esim. siirtoputkea pitkin loppukäyttäjälle, tai vaihtoehtoisesti sähkön siirron kustannus sähkön tuotannon ja elektrolyyserin välillä on huomattavan pieni. Toisessa ja kolmannessa vaihtoehdossa sähköntuotanto on tulevaisuudessa todennäköisesti sääriippuvaista, jolloin sähköntuotantoa täytyy tasata joko vety- tai sähkövarastolla tai hyödyntämällä sähköverkkoa ja sähkömarkkinoita, millä on huomattava vaikutus tuotetun vedyn kokonaiskustannukseen. Tämä on huomioitava etenkin kun lasketaan uusiutuvilla

energiälähteillä tuotetun vedyn kokonaiskustannusta, jolloin on huomioitava tarvittava kapasiteettimitoitus ja varastoinnin tarve.

Kuva 69 esittää, millainen vaikutus tällä voi olla kokonaiskustannuksiin. Kuvan tulokset perustuvat tuntitason mallinnukseen, jossa malli pyrkii minimoimaan kokonaiskustannuksia annettujen rajoitusten puitteissa Suomen olosuhteissa tulevaisuudessa. Ensimmäisessä vaihtoehdossa 'Sähköverkko' vety tuotetaan markkinahintaisella sähköllä (~63 EUR/MWh). Toisessa vaihtoehdossa vety tuotetaan suoraan kytketyn tuulivoiman ja markkinasähkön yhdistelmällä (vaihtoehtoisesti tuulivoiman tuottama sähkö siirretään verkossa hyvin pienillä lisäkustannuksilla). Kolmannessa vaihtoehdossa vety tuotetaan kokonaan elektrolyysiin suoraan kytketyllä tuulivoimalla, mutta 'ylijäämä' tuulivoima voidaan myydä sähkömarkkinoille. Neljäs vaihtoehto on samanlainen kuin kolmas vaihtoehto, mutta tuulivoiman lisäksi siinä hyödynnetään aurinkosähköä. Kaikissa vaihtoehdoissa vedyn loppukäyntä on ajan suhteen vakio ja sama. Vertailun tarkoitus on havainnollistaa uusiutuvien energialähteiden ja vedyn tuotannon yhdistämistä.

Kuva 69. Vedyn tuotantokustannukset eri tuotantorakenteilla (elektrolyysin ominaisinvestointina käytetty arvoa 490 EUR/kW)

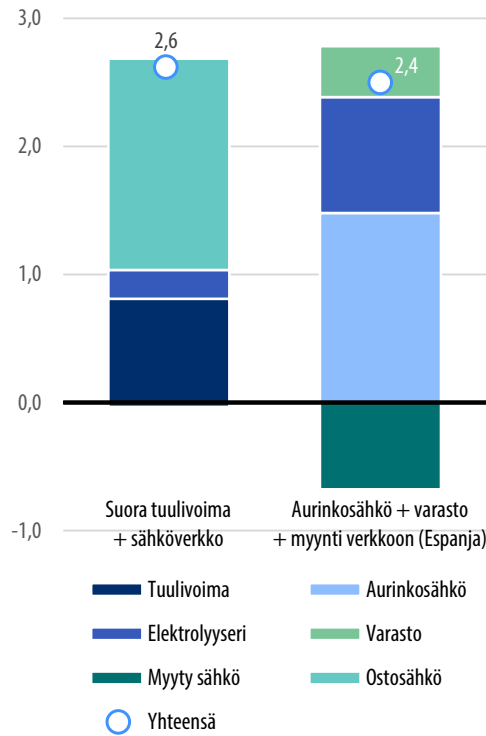


Ensimmäinen vaihtoehto tuottaa suhteellisen korkean hinnan vedylle suhteellisen korkeasta sähkön hinnasta johtuen, joskin tämä sähkön hinta (63 EUR/MWh) ei historiallisesti ole poikkeuksellinen pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla. Yhdistämällä tuulivoimatuotanto ja sähkömarkkina saavutetaan suhteellisen huomattava säästö. Jos vety pyritään tuottamaan puhtaasti tuulivoimalla, joudutaan yli-investoimaan huomattavasti sekä tuulivoimaa että elektrolyyserikapasiteetteihin ja yhdistämään merkittävä varastointikapasiteetti kokonaisuuteen. Neljäs vaihtoehto havainnollistaa, että jo pienellä aurinkosähkön lisäämisellä kolmatta vaihtoehtoa vastaava kokonaisuus hyötyy huomattavasti.

Havainnollistavan mallinnuksen pohjalta keskeisimpiä havaintoja ovat: sähkömarkkinat tulevat olemaan tärkeässä roolissa uusiutuvien energialähteiden ja vedyn tuotannon kustannustehokkaassa yhdistämisessä etenkin silloin, jos tuotanto pohjautuu huomattavasti vaihtelevaan uusiutuvaan tuotantoon, jota maatuulivoima tyypillisesti on. Puhtaasti tuulivoimaan pohjautuva puhtaan vedyn tuotanto voi nostaa tuotantokustannuksia merkittävästi ja aurinkosähkö, pienissäkin määrissä, voi edesauttaa tuulivoimavoittoista vedyntuotantoa.

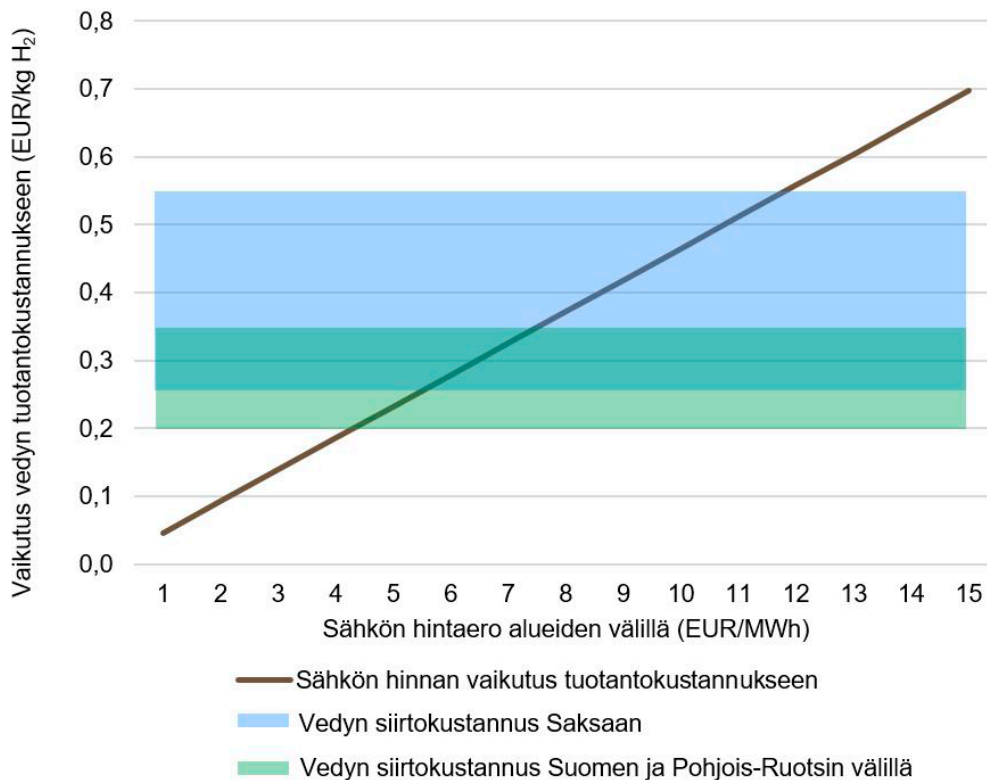
Kuva 70 näyttää vastaavanlaisen tarkastelun tuloksen kuin edellä sillä erotuksella, että kuvassa verrataan Suomen tilannetta esimerkimaahan, tässä tapauksessa Espanjaan, jossa vety tuotettaisiin todennäköisesti aurinkosähköllä. Edellisestä kuvasta on valittu kustannustehokkain vaihtoehto, ja sitä on verrattu Espanjassa aurinkosähköllä tuotettuun puhtaaseen vetyyn. Aurinkosähkoesimerkissä vedyn tuotanto tapahtuu täysin elektrolyyseriin suoraan kytketyllä aurinkosähköjärjestelmällä, mutta ylijäämätuotanto on mahdollista myydä verkkoon, jolle on oletettu 10 EUR/MWh arvo. Huomattavaa on, että aurinkosähkoesimerkissä lähes kokonaan suoraan tuotantoon kytketty elektrolyyserivety on suhteellisen kustannustehokasta suhteessa edelliseen esimerkkiin, missä suoraan tuulivoimaan kytketty vety ei ollut kustannustehokasta. Tämä viittaa siihen, että tuulivoimapanotteisissa (etenkin, jos kyseessä on maatuulivoima) järjestelmissä sähkömarkkinoilla on tärkeä rooli tuotannon ja kysynnän tasaajina ja vastaavasti aurinkosähköpanotteisissa järjestelmissä suoraan aurinkosähkön tuotantoon kytketyt elektrolyyserilaitokset ovat mahdollisia. Huomiona tässä on, että Espanjassa aurinko-olosuhteet ovat suhteellisen tasaisia, kun taas joillain potentiaalisilla aurinkosähköalueilla (esimerkiksi Lähi-Itä), hiekkamyrskyt voivat aiheuttaa pitkiäkin aurinkosähkön tuotantoseisokkeja. Vastaavanlaisia arvioita on esittänyt mm. EHB (2021), jonka arvion mukaan vedyn tuotanto on kustannustehokkainta Euroopassa aurinkosähköllä.

Kuva 70. Vedyn tuotantokustannus Suomessa ja Espanjassa eri tuotantorakenteilla



Vedyn viennin taloudellinen kannattavuus ja vientivedyn kilpailukyky kohdemaassa tuotettua vetyä vastaan riippuu useasta tekijästä. Elektrolyysillä tuotetun vedyn kohdalla merkittävä tekijä kustannuskilpailukyvyssä on vienti- ja tuontialueen välinen kustannusero sähkön hinnassa, sekä vedyn kuljetuskustannus alueiden välillä. Alla kuvassa 71 on esitetty, kuinka paljon vedyn putkikuljetuksen kustannus kahden alueen välillä saa korkeintaan olla, jotta on taloudellisesti kannattavaa siirtää vetyä alueelta toiselle, riippuen sähkön hintaerosta alueiden välillä. Vedyn putkikuljetuksen Suomesta Saksaan arvioidaan maksavan 0,26–0,55 EUR/kgH₂, riippuen saavutettavasta vientivolyymistä. Sähkön hintaeron alueiden välillä tulisi olla 6–12 EUR/MWh, jotta Suomessa tuotettu vety olisi edullisempaa kuin Saksassa tuotettu.

Kuva 71. Esimerkki sähkön hintaeron vaikutuksesta vedyn tuotantokustannukseen Suomen ja Saksan sekä Suomen ja Pohjois-Ruotsin välillä

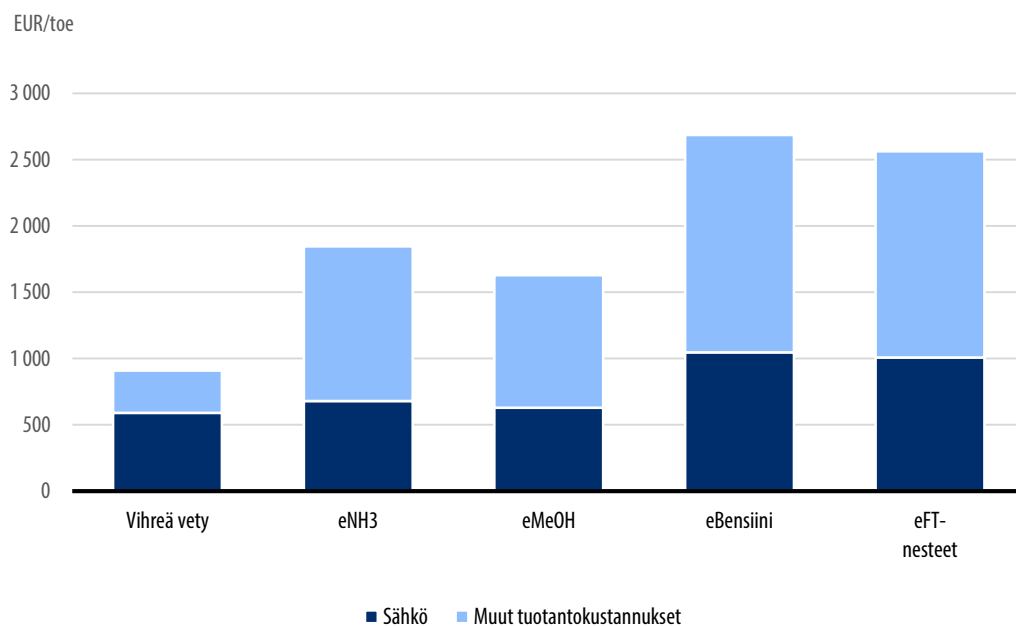


Kun vedyn kuljetuksen Pohjois-Ruotsin ja Suomen välillä arvioidaan maksavan 0,20–0,35 EUR/kgH₂, on kuljetus alueiden välillä kannattavaa, kun sähkön hintaero on 5–8 EUR/MWh. Hintaero Pohjois-Ruotsin ja Suomen välillä on viimeisten vuosien aikana on vaihdellut välillä 2–14 EUR/MWh Ruotsin hyväksi (Nordpool, 2022).

Vedyn vientiin ja tuontiin vaikuttaa muitakin tekijöitä kuin puhtas tuotantokustannusten kilpailukyky, kuten omaan vedyntuotantoon riittämätön puhtaan sähköntuotannon kapasiteetti, jolloin vetyä on tuotava muualta. Joidenkin alueiden kuten Suomen ja Pohjois-Ruotsin välillä vetyputkisto voi mahdollistaa markkinan, jossa vedyn virtaussuunta vaihtelee markkinatilanteen ja esimerkiksi kulloistenkin tuulivoiman tuotanto-olosuhteiden mukaan. Jos kuitenkin toisella alueella (esimerkiksi Pohjois-Ruotsissa) on systemaattisesti paremmat olosuhteet ja keskimäärin edullisempi sähkön hinta, on todennäköistä, että vedyn virtaus tapahtuu sieltä kalliimman sähkön alueelle.

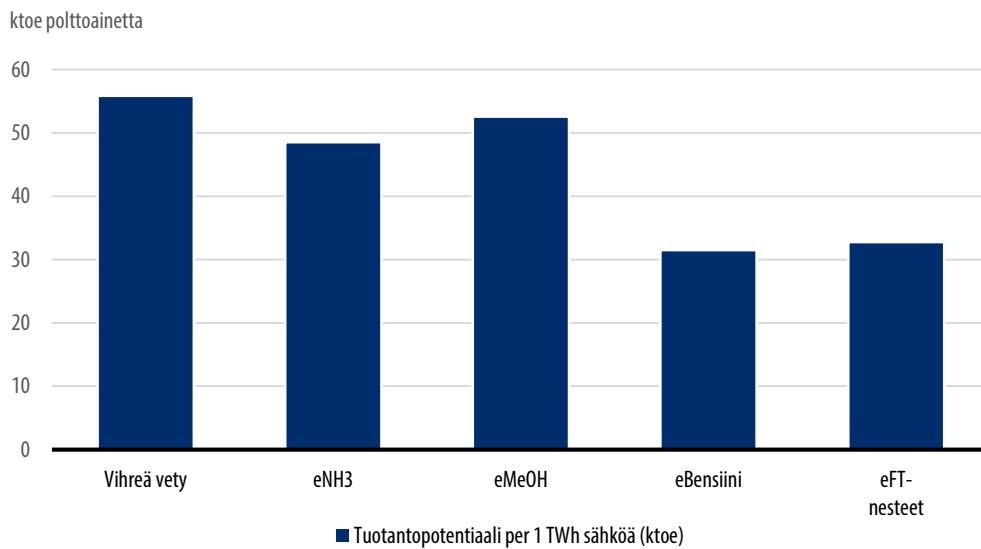
Kuva 72 esittää vihreän vedyn ja neljän eri sähköpolttoaineen (synteettisen ammonia-kin, metanolin, e-bensiinin sekä eFT-nesteiden) tuotantokustannusten jakautumisen sähkön ja muiden tuotantokustannusten välillä, vuoden 2040 tuotantokustannusoletuksien perusteella. Jos tietyn maan tai alueen kilpailukyky sähköpolttoaineiden suhteen perustuu erityisesti edullisen sähkön saatavuuteen, suurin suhteellinen kilpailukyky saavutetaan niiden polttoaineiden kohdalla, joissa sähkön osuus tuotantokustannuksista on suurin. Vihreän vedyn tuotantokustannuksista sähkö edustaa jopa kahta kolmasosaa, kun taas muiden tarkasteltujen sähköpolttoaineiden tuotantokustannuksista sähkön osuus on noin 40 %. Muut tuotantokustannukset koostuvat mm. investoinneista tuotantolaitokseen sekä muista muuttuvista kustannuksista.

Kuva 72. Vihreän vedyn ja valikoitujen sähköpolttoaineiden tuotantokustannusten jako sähkön ja muiden kustannusten välillä vuonna 2040



Sähköpolttoaineiden tuotantopotentiali käytävissä olevaa sähköenergian määrää kohden on oleellinen tekijä, jos rajoittava tekijä sähköpolttoaineiden tuotannolle on vähäpäästöisen sähkön saatavuus. Kuva 73 esittää eri sähköpolttoaineiden tuotantopotentialin esimerkkinä 1 TWh sähköntuotantoa kohden. Pisimmälle jalostettavissa sähköpolttoaineissa häviöt ovat suurempia, joten lopputuotetta saadaan pienempi määrä kuin esimerkiksi vihreää vetyä, jossa tuotannon häviöt ovat pienemmät. E-bensiiniä tai eFT-nesteitä saadaan tuotettua vain noin 60 % siitä määrästä, mitä vastaavalla sähköntuotannolla voidaan tuottaa vihreää vetyä.

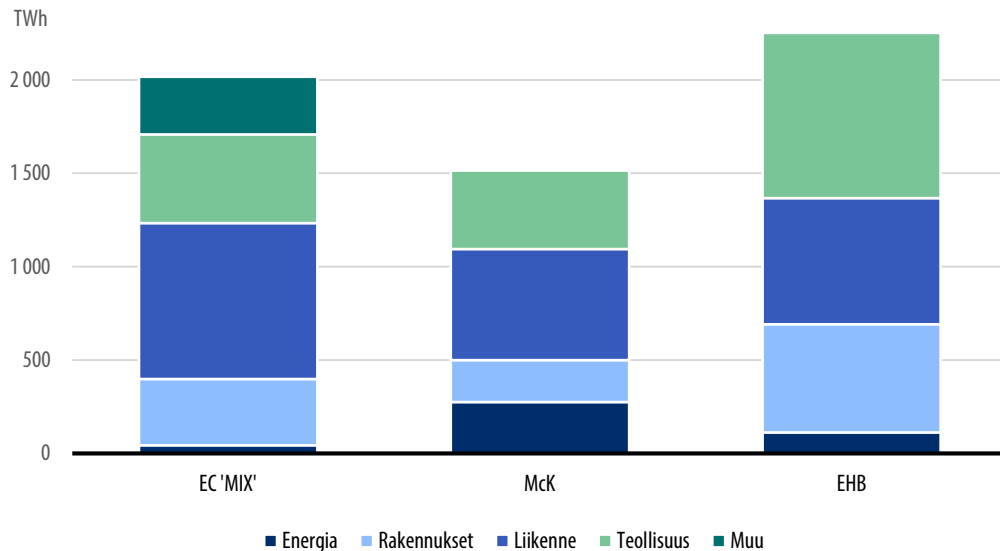
Kuva 73. Vihreän vedyn ja valikoitujen sähköpolttoaineiden tuotantopotentiaali 1 TWh sähköntuotantoa kohden



8.5 Vedyn ja sähköpolttoaineiden kansainvälisen markkinan kehittyminen

Kansainvälisen kysynnän kehittymiseen vedylle ja vedyn jalosteille liittyy epävarmuuksia kuten luvussa 7.2 on viitattu. Näitä ovat mm. se, miten nopeasti ja millä sektoreilla kysyntä kehittyi kussakin maassa, miten eri maiden tuotantokapasiteetti, vientimarkkinat ja tuotantokustannukset kehittyvät ja kuinka laajan alueen kansainväliset vety ja vetyjalosteiden markkinat kattavat. Suomelle kehitys voi edustaa huomattavaa vientipotentiaalia.

EU:ssa ympäristöystävällisen vedyn kysynnän on useissa arvioissa ennustettu nousevan noin tasolle 1 500–2 000 TWh (ks. kuva 74). Korkeampia arvioitakin on esitetty – mm. McKinsey (2021) on esittänyt vetypainotteisen skenaarion, jossa Euroopan vedynkysyntä nousee tasolle noin 2 400 TWh/a. Vientipotentiaalın näkökulmasta kiinnostavaa on myös kysynnän jakautuminen eri tuotteiden välillä, koska tämä luonnollisesti vaikuttaa, mitä lopputuotteita Suomessa tulevaisuudessa voidaan valmistaa vientiin. Kaikissa skenaarioissa liikennepolttoaineet (ml. maa-, meri- ja lentoliikenne) edustavat suurinta yksittäistä kokonaisuutta, jopa noin puolta koko vedyn kysynnästä. EHB:n (2021) skenaariossa liikennepolttoaineet edustavat myös huomattavaa osaa kokonaiskysynnästä, mutta siinä sähköpolttoaineiden tuotanto on esitetty osana teollisuuden kysyntää. Tämä tarkoittaa, että luvussa 7 esitetyissä viennin skenaarioissa liikennekäytön ja sähköpolttoaineiden tulisi todennäköisesti edustaa huomattavaa osaa kokonaisviennistä.

Kuva 74. Vedyn kysyntä Euroopassa eri skenaarioissa (EC, 2021g; McKinsey, 2021; EHB, 2021)

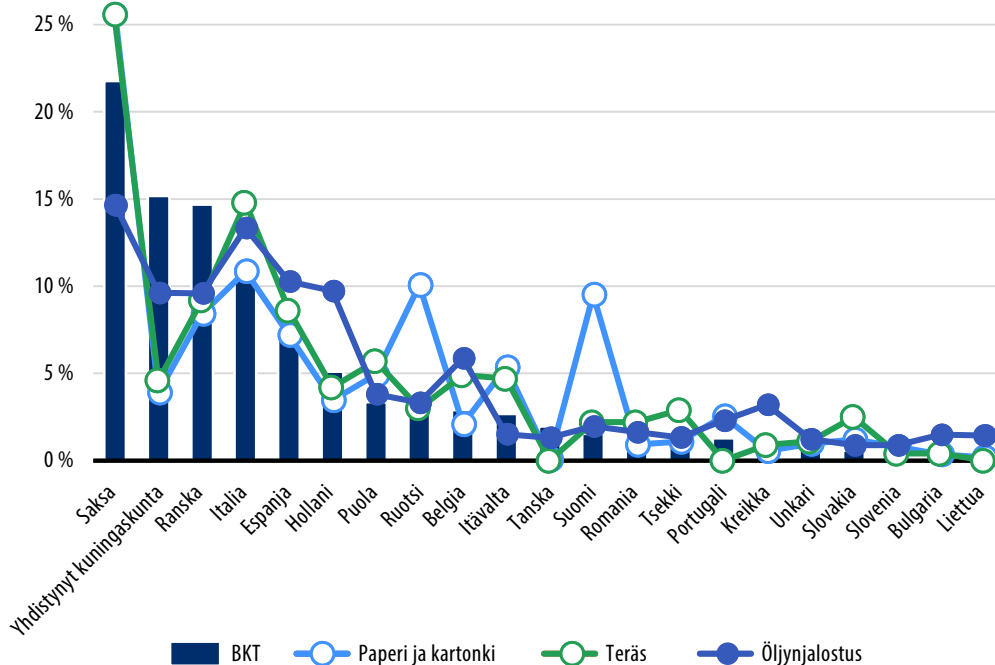
Tuotantokustannuksilla ja tuotantopotentiaalilla on huomattava vaikutus, millä ja mistä peräisin olevilla tuotteilla vedyn kysyntä täytetään. Luvussa 4 on tarkemmin käsitelty eri Euroopan maiden vetystrategioita, josta yhteenvedona voidaan todeta, että suurimmalla osasta Euroopan maista on vetystrategia (jos se on tehty), jossa tavoitteeksi on asetettu viennin kasvattaminen. Mm. EHB (2021) on tarkastellut vedyn tuotantopotentiaalia ja tuotantokustannuksia Euroopassa. Tämän perusteella Euroopassa on huomattavasti enemmän tuotantopotentiaalia suhteessa kysyntään, sillä tuotantopotentiaali olisi lähes 4 000 TWh/a vuonna 2050. Kysyntä voitaisiin täyttää pääsääntöisesti aurinkosähköllä tuotetulla vedyllä, jonka tuotantokustannus jäisi alle 1,5 EUR/kg. Tuotantopotentiaaliarvioita ovat esittäneet mm. myös Kakoulaki *et al.* (2021), ja eri selvitysten perusteella näyttää siltä, että Euroopassa on huomattavasti enemmän uusiutuvan energian tuotantopotentiaalia suhteessa ennustettuun vedyn kysyntään. AFRYn tekemän arvion mukaan (ks. luku 8.4) Suomessa tuotettu vety voi kuitenkin olla kilpailukykyistä suhteessa esimerkiksi Espanjassa aurinkosähköllä tuotettuun vetyyn. Erot analyysin lopputuloksessa olivat pieniä ja muilla tekijöillä kuten investointiympäristöllä, luvitusprosesseilla ja sähkömarkkinoilla voi olla huomattava vaikutus investointipäätöksiin.

Vedyn jalosteille voi syntyä myös kansainväliset markkinat. Mm. Roland Berger (2021) on arvioinut, että vuonna 2050 jopa 40 % Euroopassa käytetystä vedystä voisi olla tuontia Euroopan ulkopuolelta. IEA (2019) on puolestaan arvioinut, että paikallinen tuotanto on todennäköisesti monessa tilanteessa kustannustehokkain vaihtoehto paitsi silloin, jos kuljetettavalle tuotteelle on kysyntää sellaisenaan, esim. ammoniakki, jolla on potentiaalia meriliikenteen polttoaineeksi tulevaisuudessa. EHB (2021) on arvioinut, että vihreää vetyä

voidaan tuottaa Euroopan lähialueilla esim. Pohjois-Afrikassa kustannustehokkaammin kuin Euroopassa. Edelleen EHB arvioi, että myös Norjassa tai Venäjällä sininen vety voi olla hyvin kustannustehokasta johtuen todella alhaisista maakaasun hinnoista, joskin kysymykseksi voi nousta alkuperän todentaminen.

Lopullinen viennin ja tuonnin tasapaino tulee riippumaan yllä kuvatuista tekijöistä, mutta myös muista tekijöistä, kuten yleisestä investointiympäristöstä, regulaatiosta, pääoman hinnasta jne. Vety ja vedyn jalosteet tulevat olemaan ns. bulkkituotteita, jolloin osviittaa voi antaa muiden bulkkituotteiden markkinarakente. Kuva 75 esittää valittujen EU-maiden osuuden koko EU:n BKT:sta ja osuuden valittujen perustuotteiden markkinasta (teräs, paperi ja kartonki, öljynjalostus). Vedyn tuotanto, hinnanmuodostus ja logistiikka tulevat luonnollisesti poikkeamaan näistä markkinoista, mutta ainakin historiallisesti perustuotemarkkinoilla harva valtio on 'kokoaan suurempi'.

Kuva 75. Valittujen Euroopan maiden keskinäiset BKT-osuudet ja osuudet valittujen teollisuusalojen tuotannosta EU:ssa ja Iso-Britanniassa (Eurofer, 2020; Eurostat, 2021; Fuels Europe, 2021; AFRYN tietokannat)



Yhteenvetona vedyn ja vetyjalosteiden vienti edustaa huomattavaa potentiaalia Suomelle. Vedyn kysyntä kasvaa huomattavasti tulevaisuudessa pelkästään Euroopassa, eivätkä kaikki loppukäyttäjät tai maat tule kykenemään kattamaan kysyntäänsä omalla tuotannolla. Suomessa voidaan todennäköisesti tuottaa vetyä kilpailukykyisesti, mutta samaan aikaan Euroopassa ja globaalisti on huomattava määrä edullista vihreän vedyn tuotantopotentiaalia, mikä tarkoittaa, että vienti tulee todennäköisesti olemaan kilpailtua ja vientimaan roolin saavuttaminen ei ole itsestään selvää.

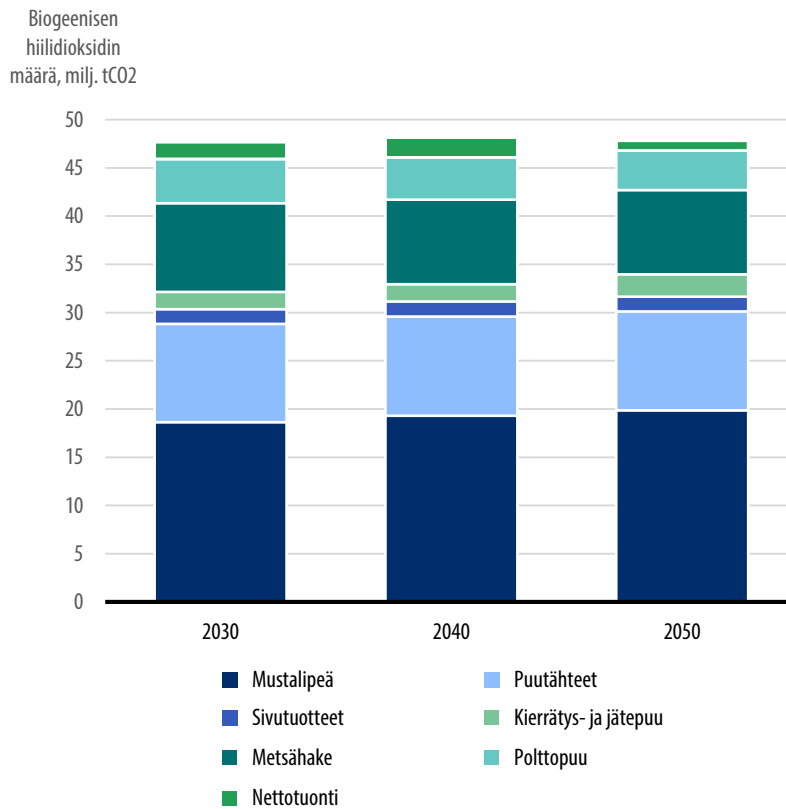
8.6 Biogeenisen hiilidioksidin saatavuus Suomessa

Puhtaaseen vetyyn perustuvien hiilivetyjen ja metanolin valmistamiseen tarvitaan biogeenista hiilidioksidia. Biogeeninen hiilidioksidi tarkoittaa biomassaperäisen orgaanisen aineen polttamisessa tai hajoamisprosessissa syntyvää hiilidioksidia. Biogeenisen hiilidioksidin saatavuus voi rajoittaa, mitä sähköpoltoaineita Suomessa kannattaa valmistaa.

Kuvassa 76 alla on esitetty karkea arvio biogeenisen hiilidioksidin saatavuudesta Suomessa perustuen biomassojen käyttömääriin ilmasto- ja energiastrategian taustaraportin WAM-skenaariossa (Lehtilä *et al.*, 2021) ja Tilastokeskuksen vuoden 2021 oletuspäästökertoimiin⁶. Tämän lisäksi biogeenista hiilidioksidia voitaisiin hyödyntää pieniä määriä biokaasun poltosta ja biokaasun jalostusprosessista biometaaniksi.

6 Puun nettotuonti on WAM-skenaariossa energiapuun tuontia, joka on mallinnuksessa rajoitettu korkeintaan 5 TWh:n määrään (Lehtilä *et al.*, 2021).

Kuva 76. Biogeenisen hiilidioksidin saatavuus biomassojen poltosta perustuen biomassojen käyttöön ilmasto- ja energiastrategian WAM-skenaariossa (sovellettu lähteestä Lehtilä et al., 2021)



Yllä kuvassa 76 esitetyt biogeenisen hiilidioksidin määrät riittäisivät metanolin, metaanin ja kerosiinin valmistamiseen kaikissa tässä selvityksessä esitetyissä skenaarioissa. **Käytännössä hiilivetyjen ja metanolin tuotantoa rajoittaisivat biogeenisen hiilidioksidin paikallinen teknis-taloudellinen hyödynnettävyys sekä sääntelyn asettamat vaatimukset.** Teollisuuden ja yhdyskuntien tuotantokapasiteetti sijaitsee osittain tiiviisti rakennetussa ja asutetussa ympäristössä, jolloin talteen otettu hiilidioksidi tulisi kuljettaa kauempana sijaitseville sähköpolttoaineiden tuotantolaitoksille. Tämän lisäksi hiilidioksidin talteenotto keskittyisi lähinnä suuren kokoluokan laitoksiin teollisen mittakaavan tuotannon osalta.

Hiilidioksidin lähteenä voisi siirtymäaikana kustannustehokkuussyistä olla perusteltua käyttää biogeenisen hiilidioksidin lisäksi fossiilisista polttoaineista tai prosessien sivutuotteina syntyvää hiilidioksidia, jos sitä on tarjolla, ja kokonaiskäyttö alittaisi kotimaan biogeenisen hiilidioksidin tarjonnan, eikä hyödyntäminen pidentäisi fossiilisten

energianlähteiden käyttöä. Tämä ei kuitenkaan välttämättä tule olemaan EU-tasoisen sääntelyn puolesta mahdollista, jos tavoitteena on määritellä lopputuote puhtaaksi tai vähähiiliseksi.

8.7 Suomen vetysiirtymän työllisyysvaikutukset

Suomen vetysiirtymän työvoiman kysyntää lisäävät vaikutukset ovat merkittäviä, koska ne kattavat koko vetyarvoketjun energian tuotannosta vedyn jatkojalosteiden loppukäyttöön sekä tuotteiden, teknologioiden ja palvelujen vientiin. Työllisyysvaikutukset riippuvat voimakkaasti viennin laajuudesta, kun taas vedyn ja sähköpolttoaineiden kotimainen kysyntä määrittelee työllisyysvaikutusten minimin.

Vetysiirtymän työllisyysvaikutukset eivät ole kokonaan lisäisiä: vetysiirtymä tarkoittaa samaan aikaan työpaikkojen menettämistä fossiilisiin polttoaineisiin ja raaka-aineisiin perustuvissa arvoketjuissa. **Vetytalouden työllisyyden kokonaisvaikutusten lisäisyys Suomessa perustuisi siten ennen kaikkea vedyn ja sähköpolttoaineiden, teräs- ja kemiantuotteiden, teknologian sekä palvelujen kasvavan viennin synnyttämiin lisäisiin vaikutuksiin**, vaikka myös nykyisissä viennin arvoketjuissa on osia, joissa työpaikkoja menetetään. Toisaalta työvoiman kysyntä fossiilisiin polttoaineisiin ja raaka-aineisiin liittyvissä arvoketjuissa vähenee tulevaisuudessa joka tapauksessa ja vetytalous edustaa vain yhtä kestävästä siirtymän osa-alueista, joissa työvoiman kysyntä kasvaa.

Tässä selvityksessä vetytalouden työllisyysvaikutuksia ei ole arvioitu määrällisesti, koska se edellyttäisi syvällistä selvitystä edellä esitetyn mukaisesti sekä työvoiman kysyntää lisäävistä että vähentävistä vaikutuksista eri sektoreilla. Sidosryhmähaastatteluisissa, työpajoissa ja -kyselyssä tuotiin kuitenkin esille seuraavia vetyarvoketjujen työvoiman kysyntää lisääviä osa-alueita, jotka tulisi huomioida vetytalouden työllisyysvaikutusten kokonaisarvioinnissa:

- sähkön, vedyn ja sähköpolttoaineiden tuotantoon, siirtoon (ml. kuljetus, jakelu, logistiikka) ja loppukäyttöön liittyvien investointien elinkaaren vaiheet: suunnittelu, rakentaminen, käyttö ja käytöstä poisto,
- vetyarvoketjun vaiheina tuulivoima (osin myös bioenergia, aurinko- ja ydinvoima), sähköverkot, vetyverkot, vedyn ja sähköpolttoaineiden tuotanto, vetyä hyödyntävän teollisuuden uudet investoinnit, vedyn ja sähköpolttoaineiden varastointi, hiilidioksidin talteenotto, siirto ja varastointi, vedyn ja sähköpolttoaineiden jakelu ja loppukäyttö liikenteen eri sektoreilla (lentoliikenne, meriliikenne ja raskas tieliikenne) sekä vienti,
- vetytalouteen liittyvä teknologiateollisuus (investoinnit, tuotanto, vienti),

- vetytalouteen liittyvät suunnittelu-, konsultointi- ja kunnossapitopalvelut, TKI-toiminta, rahoituspalvelut, koulutuspalvelut ym. palvelut ja
- em. suorien työllisyysvaikutusten lisäksi epäsuorat työllisyysvaikutukset.

8.8 Sidosryhmien näkemyksiä poliittisista ohjauskeinoista

Skenaarioprosessin aikana keskusteltiin sidosryhmien kanssa yleisellä tasolla Suomen tarvitsemista poliittisista ohjauskeinoista vetysiiirtymän toteuttamiseksi. Koska prosessi ei liittynyt suoraan ilmasto- ja energiastrategian valmisteluun, eikä tehtävänantoon siten kuulunut valintojen tekeminen tiettyä tavoitetta vasten, tai kaikkien näkökulmien ja keinojen käsittely, alla esitetyt tulokset eivät ole kattavia ja vastaukset painottuivat sidosryhmien näkökulmiin:

- Tuulivoiman voimakkaan lisärakentamisen täytyy olla mahdollista.
- Suomessa täytyy olla riittävä sähkönsiirtoinfrastruktuuri. Sähkönsiirto- ja vedynsiirtoinfrastruktuurien rakentaminen on kustannusoptimoitava. Siirtoinfrastruktuurin kehittämistarpeet on tutkittava ja rakentamisesteitä poistettava.
- Suomessa täytyy olla riittävästi osaavaa työvoimaa vetyarvoketjujen suunnittelu- ja käyttövaiheita varten.
- Satamien tulee olla valmiita kuljettamaan sekä nestemäisiä sähköpolttoaineita että hiilidioksidia.
- Tarvitaan investointitukia.
- Tarvitaan kysynnän luominen esim. jakeluvaihtojen sekä kemianteollisuuden tuotteiden hiili-intensiteetin pienentämisen kautta.
- Verkkosähkön on oltava puhdasta (uusiutuvat, puhdas vety ja ydinvoima).
- Panostuksia TKI-toimintaan on ohjattava alueille, jotka edistäisivät teollisuuden kehittymistä juuri Suomeen sekä teknologiakehitystä ja -vientä.
- Vety on tuotava kansalliseen ilmasto- ja energiastrategiaan sekä perustettava kansallinen toimenpideohjelma.
- Yliopistojen ja ammatillisen koulutuksen ohjelmia on päivitettävä vetytalouteen suunnaten.
- Uudelleen- ja täydennyskoulutusmahdollisuuksia on edistettävä.
- Vedyn tarvitsema kansallinen lainsäädäntö on kehitettävä.
- Tärkeintä on vähentää päästöjä, eikä keskittyä siihen, mikä on vedyn alkuperä.

9 Johtopäätökset

Tässä selvityksessä on luotu näkemys Suomen mahdollisuuksista ja rajoitteista vetytaloudessa perustuen vetytalouden kansainväliseen kehittymiseen ja suhteessa Suomen erityispiirteisiin. Tässä luvussa esitetään selvityksen keskeiset johtopäätökset.

9.1 Hiilineutraali yhteiskunta tarvitsee vetytaloutta

Vetytalous nousee pitkällä aikavälillä kiinteäksi osaksi kehittyneiden hiilineutraalien yhteiskuntien energiajärjestelmiä, teollisuutta, liikennettä ja taloutta. Puhtailla ja vähähiilillä energianlähteillä tuotettu vety voi toimia energiantantajana ja välillisenä raaka-aineena siellä, mihin muut ratkaisut eivät sovellu.

Vetytalouden kehittäminen vaatii päämäärätietoisuutta, pitkäjänteisyyttä ja kokonaisvaltaista yhteiskunnalliset tavoitteet huomioivaa suunnittelua ja poliittista ohjausta, koska edellä mainitun ehdon toteutuminen on varmistettava, arvoketjut eivät olisi kilpailukykyisiä ilman ohjausta ja arvoketjujen eri osat riippuvat toistensa kehitymisestä. Tämän jälkeen ohjaustoimenpiteiden suuntaamisesta ja teknisestä kehityksestä riippuu, kuinka nopeaa siirtymää voidaan odottaa milläkin loppukäyttösektorilla. Tässä yhteydessä poliittisten **ohjaustoimenpiteiden suunnitteluun on kiinnitettävä riittävästi huomiota, jotta toimenpiteet johtaisivat perusteltuihin vaikutuksiin,** eivätkä esimerkiksi vääristäisi kansainvälistä kilpailua tai johtaisi päästökehityksen kannalta ei-toivottuihin ratkaisuihin.

Tuotannon ja loppukäytön kehittyminen tapahtuvat käynnistysvaiheessa paikallisten teollisuuskeskittymien ympärillä. Pitkällä aikavälillä hiilineutraali kehitys väistämättä **johtaa muiden hyödykkeiden tavoin vedyn ja sen jatkojalosteiden kansainvälisen markkinan syntymiseen,** koska teollistuneiden maiden lähtökohdat vetytalouteen vaihtelevat. Markkinakehitys osaltaan ohjaa tuotantoa ja loppukäyttöä kustannustehokkaimpiin ratkaisuihin, vaikka tällä hetkellä tulevan markkinan kokoon ja muihin yksityiskohtiin liittyykin epävarmuuksia.

9.2 Vetytalous nopeaan kasvuun EU-lainsäädännön valmistuttua

Vedyn roolia on määritelty tarkemmin maailmanlaajuisten (mm. IPCC, IEA), alueellisten (EU) ja maakohtaisten ilmasto- ja energiaskenaarioiden avulla ja luomalla skenaarioiden

pohjalta tiekarttoja ja strategioita. Erot suunnitelmissa ovat suuria maakohtaisesta ja alueellisesta lähtötilanteesta riippuen. Teollisuuden ja liikenteen lisäksi vetyä on suunniteltu osaratkaisuksi rakennusten lämmitykseen ja sähköjärjestelmän tasapainottamiseen säävaihtelevan uusiutuvan sähkön tuotannon lisääntyessä. Nämä täydentävät osa-alueet nähdään tärkeiksi etenkin maissa, jotka ovat tänä päivänä riippuvaisia maakaasusta (Saksa, Alankomaat, Iso-Britannia). Tietyt maat ovat ilmoittaneet tarpeistaan tuoda suuria määriä vetyä maahan (Saksa, Japani, Etelä-Korea), kun taas vientimaiksi on ilmoittautunut maailmanlaajuisesti lukuisia maita (mm. Australia, Chile, Venäjä, Saudi-Arabia, Marokko, Namibia, Tunisia ja Tanska).

Vedyn tuotannosta suurin osa keskittyisi tulevaisuudessa aurinko- tai tuulivoiman avulla elektrolyysiprosessissa tuotettavaan puhtaaseen vetyyn. Tämän rinnalla vähähiilinen vety tuotettuna maakaasusta ja varastoimalla syntyvä hiilidioksidi on kilpaileva teknologia, jossa hyödynnetään olemassa olevaa maakaasun tuotanto- ja siirtoinfrastruktuuria ja fossiilisen vedyn tuotantolaitoksia. Tästä syystä maakaasuintensiiviset maat, joilla on lähialueillaan mahdollisuus hiilidioksidin laajamittaiseen varastointiin, ovat rakentamassa ratkaisujaan vähähiilisen vedyn varaan puhtaan vedyn lisäksi (mm. Iso-Britannia ja Alankomaat). Tämän lisäksi Venäjän maakaasuvientiyhtiö Gazprom on ilmoittanut julkisuuteen mahdollisuuksistaan toimittaa suoraan vähähiilistä vetyä Eurooppaan (Hydrogen Central, 2021) ja Saksa tukee tässä vaiheessa voimakkaasti sekä oman tuotantonsa ylösajoa että tuontia Euroopan lähialueilta. Edellisestä seuraa, että **vedyn ja sen jatkojalosteiden markkinoille on odotettavissa alusta saakka voimakas kansainvälinen kilpailu**, vaikka kasvuvaihe kestääkin seuraavat 20 vuotta.

Eurooppa johtaa vetyprojektien kansainvälistä kehitystä elektrolyyserikapasiteetissa mitattuna. Euroopan Unionin vetystrategia, laaja-alainen julkinen yhteistyö, taloudelliset tuet vetyprojekteille ja valmisteilla oleva lainsäädäntö ovat luoneet vetyprojekteille kiinnostavan kehitysympäristön Euroopassa ja sen lähialueilla. Valmisteilla on julkisten tietojen perusteella tuhansia teollisuus- ja demonstraatiokokoluokan hankkeita niin vedyn tuotantoon, jalostamiseen, siirtoon ja jakeluun kuin loppukäyttöön eri sektoreilla. Julkistamattomien hankkeiden määrän arvioidaan olevan tähän nähden monikymmenkertainen. Lopullisia investointipäätöksiä on toistaiseksi tehty vähän, koska EU-lainsäädäntö on vielä valmisteilla ja julkista rahoitusta on myönnetty vain pienelle osalle kehitteillä olevista hankkeista.

Vetytalouden nopea kansainvälinen kasvu alkaa, kun EU-lainsäädäntöön liittyvät kriittiset epävarmuudet saadaan ratkaistua. Euroopan Unioni tähtää hiilineutraalisuuteen vuoteen 2050 ja 55 % päästövähennemään vuoden 1990 tasosta vuoteen 2030 mennessä. Tällä hetkellä valmistelussa oleva EU:n lainsäädäntöpaketti luo määritelmät puhtaalle ja vähähiiliselle vedylle, kestäville investoinneille sekä sääntelyedellytykset kilpaillun vetymarkkinan ja kansainvälisen vedynsiirtoinfrastruktuurin syntymiselle. Tämän lisäksi EU

sallii valtiontueta vetyprojekteille tietyin edellytyksin sekä jakaa suoria tukia ja myöntää lainaa yhteiskunnallisesti tärkeille infrastruktuurihankkeille.

Politiikkatoimien kansallisen soveltamisen näkökulmasta **keskeisiä seurattavia maita Suomen kannalta ovat ainakin Ruotsi, muut Pohjoismaat ja Saksa**. Ruotsin kansallisessa vetystrategiassa on asetettu 5 GW tavoite elektrolyyserikapasiteetille vuoteen 2030 ja tähän 10 GW lisää vuoteen 2045 mennessä. Strategiassa käsitellään taloudellisia kannustimia, TKI-toimintaa ja osaamisen kehittämistä, sääntelyn kehittämistä sekä uusien arvo- ketjujen kehittämistarpeita. Saksa on korvamerkinnyt 7 mrd. euroa vihreän vedyn tuotantohankkeille Saksassa. Tavoitteena on saavuttaa 5 GW elektrolyyserikapasiteettia vuoteen 2030 mennessä ja 5 GW lisää aikavälillä 2035–2040. Valtio tukee teollisuutta mm. 10-vuotisilla Carbon-Contract-for-Difference-sopimuksilla, joiden avulla helpotetaan teollisuudenalojen siirtymää vähähiilisiin teknologioihin. Tämän lisäksi Saksa panostaa kansainvälisiin yhteistyöhankkeisiin 2 mrd. euroa tavoitteenaan mahdollistaa vedyn tuonti Saksaan. Tästä 900 milj. euroa on varattu Euroopan ulkopuolisiin maihin. Mahdollisten taloudellisten kannustimien osalta on kiinnostavaa seurata myös Iso-Britanniaa, jossa uusia taloudellisia kannustimia otettaneen käyttöön vuoden 2023 alussa. Lisäksi Tanskan strategia on kiinnostava viennin kehittämisen näkökulmasta. Tanskan vahvuutena on perinteisesti ollut tiivis kansainvälinen yhteistyö viennin ja kansallisten etujen edistämiseksi. Pohjoismaat ovat myös käynnistäneet keskinäistä vetytalouteen liittyvää yhteistyötään toiminnan kaikilla tasoilla tutkimus, yritystoiminta, siirtoverkot ja poliittinen taso (mm. Pohjoismaiden ministerineuvosto) mukaan lukien. Esimerkiksi yhteispohjoismaisen meriliikenteen vähähiilisyystiekartan valmistelu käynnistyy nelivuotisella ohjelmalla kevään 2022 aikana.

9.3 Suomen mahdollisuutena suuri puhtaan sähkön tuotantopotentiali ja vientiteollisuus

Tässä selvityksessä luotujen vetytalousskenaarioiden **lähtökohtana on käytetty Suomen hiilineutraalisuustavoitteen saavuttamista vuoteen 2035 mennessä** ottamatta kantaa hiilineutraaliin siirtymään muuten kuin vedyn ja sen jatkojalosteiden osalta. Suomen hiilineutraalisuustavoite voidaan toteuttaa useita reittejä riippuen kotimaisen terästeollisuuden ja kemianteollisuuden investointipäätöksistä. Myös Suomen itselleen asettamat liikenteen päästötavoitteet voidaan saavuttaa erilaisin yhdistelmin vaihtoehtoisia käyttövoimia ja polttoaineita.

Suomen hiilineutraalisuustavoitteen saavuttamisen ja kansantalouden kannalta **tärkeimmät puhtaan tai vähähiilisen vedyn loppukäyttäjät olisivat terästeollisuus ja öljyn- ja biopolttoaineiden jalostus**. Vetyä tarvitaan pieniä määriä myös muussa teollisuudessa korvaamaan fossiilisia kaasuja. Tämän lisäksi vetyä ja sähköpolttoaineita tarvitaan

raskaaseen tieliikenteeseen sekä Suomen kotimaiseen ja kansainväliseen lento- ja vesiliikenteeseen. Muun teollisuuden ja liikenteen polttoaineiden tarve on kuitenkin vähäinen verrattuna teräs- ja kemianteollisuuden tarpeisiin.

Vetyskenaarioissa esitetty kotimainen vedyn ja sähköpolttoaineiden kysyntä muodostaa vain osan Suomen kokonaistuotantopotentiaalista, koska **Suomessa on merkittävä tuulivoiman lisärakentamispotentiaali**. Tämä kannattaisi hyödyntää rakentamalla Suomeen lisää korkean jalostusasteen tuotteita valmistavaa ja hiilineutraaliin tuotantoon perustuva teollisuutta. Suomessa tulisikin ensin huolehtia **teollisuuden kilpailukyvästä Suomessa** ja toiseksi luoda edellytykset vastata kotimaisella vedyn ja sähköpolttoaineiden tuotannolla kansainväliseen kysyntään. Priorisointi tarvitaan, koska hiilineutraalisuustavoitteen saavuttaminen vaatii suuria investointeja teräs- ja kemianteollisuudessa. Tällä varmistettaisiin, että teollisuuden investoinnit suuntautuisivat kotimaahan. Kilpailukykytekijät vedyn ja sähköpolttoaineiden tuotannossa ovat pitkälle samat, mutta tämän lisäksi viennin kehittäminen vaatii ohjaavien toimenpiteiden jatkuvaa tarvearviointia markkinan muuttuessa.

Sähköpolttoaineiden jalostusarvo on korkeampi kuin pelkän vetykaasun. Sähköpolttoaineiden/-raaka-aineiden kansainvälisen markkinan kehittyminen vie kuitenkin aikaa ja vaatii pakottavaa lainsäädäntöä (mm. tiukentuva päästökauppa, jakeluvaihtoehdot), koska sähköpolttoaineet eivät ole tuotantokustannuksiltaan kilpailukykyisiä fossiilisiin vastineisiinsa verrattuna. Tästä syystä on todennäköistä, että Suomessa riittää potentiaalia myös vetykaasun vientiin sähköpolttoaineiden lisäksi. Tämä edellyttäisi, että Suomesta rakennettaisiin kansainvälinen vientiputki Ruotsiin, Baltiaan ja/tai suoraan Keski-Eurooppaan. Niin pitkään kuin vedyn putkiyhteyttä ei ole ja Suomessa edelleen käytetään fossiilisia polttoaineita, vedystä voidaan käydä kansainvälistä kauppaa myös alkuperätakuilla, joskin tuotettu vetykaasu on silloin kulutettava Suomessa fossiilisena polttoaineena.

Vedyn ja sähköpolttoaineiden tuotantolaitokset kannattaa Suomessa integroida läheisesti teollisuuslaitoksiin ja yhdyskuntien energiantuotantoon, koska vetyelektrolyysissa syntyy sivutuotteina happea ja lämpöä, joita voidaan hyödyntää. Hiilivetyjen ja metanolin tuotanto puhtaasta vedystä edellyttää myös biogeenista hiilidioksidia, jota on tarjolla biomassaa polttavista energialaitoksista ja mm. sellu- ja paperiteollisuuden tuotantolaitoksista. Tuotantolaitosten integroinnin lisäksi **Suomessa on optimoitava sähkönsiirtoverkkojen vahvistaminen ja vedynsiirtoverkkojen rakentaminen**. Jos tuuli-voimalat ja vedyntuotantolaitokset sijaitsevat fyysisesti kaukana toisistaan, tämä edellyttää merkittäviä investointeja sähköverkkoon. Suuria määriä vetyä on edullisempaa siirtää vetyputkilla kuin investoida sähköverkon vahvistamiseen. Vetyputkistot auttaisivat osittain kysynnän ja tuotannon välisten vaihtelujen tasaamisessa, mutta haasteena on, syntyykö niin suuria tuotanto- ja kysyntävolyymeja sellaisiin sijainteihin, joiden välille vetyputkien rakentaminen olisi kannattavaa. Vedyn tuotannon fyysistä sijoittamista, vedyn

tuotantoteknologian valintaa ja joustavan kapasiteetin sijoittamista voi myös tarkastella siirtoinfrastruktuurin kokonaiskustannusten minimoimisen näkökulmasta – esimerkiksi olemassa olevilla fossiilisen vedyn tuotantolaitoksilla CCS voi toimia ratkaisuna, jos siirtoinfrastruktuurissa on merkittäviä pullonkauloja joiden poistaminen olisi liian kallista.

9.4 Vetytalouden kehittymisen haasteita ja rajoitteita

Teollisuuden ja liikenteen siirtymä fossiilisesta vedystä ja muista fossiilisista polttoaineista ja raaka-aineista puhtaaseen ja vähähiiliseen vetyyn edellyttävät sähköpolttoaineiden tavoin vielä voimakkaita poliittisia ohjaustoimenpiteitä. Vetytalouteen liittyvät suurimmat riskit ovat siksi poliittisia, koska vetytaloutta ei syntyisi ilman poliittista ohjausta. Vedyn ja sen johdannaistuotteiden markkinan koko ja muutostempo riippuvat siitä, mihin toimenpiteitä suunnataan. Vetyä ja sähköpolttoaineita koskevien vaatimusten keskeneräisyys ja niiden muuttuminen tulevaisuudessa luovat epävarmuuksia koko Euroopan alueelle. Suomen kannalta riskinä on EU-lainsäädäntö, joka ei ottaisi huomioon Suomen erityispiirteitä, tai loisi kilpailuasteita. Suomen kilpailukyvyyn kannata herkkiä kysymyksiä ovat mm. ydinvoiman ja biomassalla tuotetun sähkön sallittavuus vedyn tuotannossa, vähähiilisen vedyn ja maakaasun hyväksyttävyyden siirtymävaiheen ratkaisuna sekä vaatimukset, joita asetetaan uusiutuvalla sähköllä tuotetuille polttoaineille mm. sähkönhankinnan lisäisyydestä ja sähköntuotannon ja sähkönkulutuksen tasapainottamisesta, sekä vaatimukset EU:n ulkopuolelta EU-alueelle tuotavan vedyn alkuperästä ja sen todentamisesta.

Riskinä on myös poliittisten ohjaustoimenpiteiden suuntaaminen kestävyiden kannalta heikkoihin ratkaisuihin. Tällä hetkellä hiilidioksidin talteenotto fossiilisen vedyn tuotannossa on kannattavampaa kuin puhtaan vedyn tuotanto, vaikka puhdas vety on ilmaston kannalta pitkällä aikavälillä kestävämpi ratkaisu. **Kestävyyttä tulisi tarkastella kokonaisvaltaisesti koko energijärjestelmän ja loppukäyttösektorien elinkaaripäästöjen kannalta.** Suora sähköistäminen on aina ensisijainen vaihtoehto vetyyn ja sen jatkojalosteisiin verrattuna. Tämän lisäksi sähköpolttoaineiden kokonaishyötysuhde on aina heikompi kuin vedyllä. Vetyä ei kannata sekoittaa maakaasuun tai jalostaa muiksi tuotteiksi, jos vetykaasulla voitaisiin korvata fossiilisia polttoaineita suoraan. Sähköpolttoaineet voivat myös syrjäyttää biopolttoaineita markkinoilta, jos ohjauksessa ei huomioida, kuinka paljon molempia tarvitaan. Esimerkiksi sähköpolttoaineiden tuotannolle on Pohjoismaissa korostettu ratkaisuna synteettistä metaania, jonka tuotantokustannukset ovat sähköpolttoaineista edullisimpia ja nykyiset maakaasuteknologiat ovat suoraan käytettävissä synteettisen metaanin jakeluketjuihin (Wråke *et al.*, 2021). Edellinen tulisi kuitenkin laittaa tarkasti kontekstiin suhteessa liikenteen sähköistymiseen, biokaasun loppukäyttöön teollisuudessa ja liikenteessä, pyrkimykseen vähentää kaikkien fossiilisten polttoaineiden käyttöä sekä metaanin vuotoriskiä (metaanin päästökerroin on suoraan ilmakehään

vuotaessaan 25-kertainen hiilidioksidiin verrattuna) ja kustannuksiin koko energiajärjestelmän näkökulmasta.

Vedyn ja sähköpolttoaineiden **vientimahdollisuuksia rajoittavat ennen kaikkea kansainvälisen kysynnän kehittyminen ja kilpailu**, sekä tällä hetkellä vedyn siirtoyhteyksien puute. Euroopassa ja Euroopan lähialueilla on monia maita, jotka tähtäävät vedyn ja sähköpolttoaineiden vientiin. Vaikka Suomessa on suuri tuulivoiman lisärakentamispotentiaali, tämä ei yksin takaa, että Suomi saisi tätä potentiaalia vastaavaa markkinaosuutta kansainvälisiltä markkinoilta. Projekteja kehittävät yritykset ja näitä rahoittavat sijoittajat ratkaisevat mihin maihin tuotanto sijoittuu. Investointipäätöksiin vaikuttavat sähkönhankinnan lisäksi monet muut tekijät, kuten muiden käyttöhyödykkeiden saatavuus ja hankintakustannukset, rakentamiskustannukset, verot ja tuet, tuotantolaitoksen sijainti ja logistiikka kysyntään nähden, mahdollisuudet solmia pitkäaikaisia offtake-sopimuksia, sijaintimaan talous, ilmasto- ja energiapolitiikka ja kustannuskilpailukyky pitkällä tähtäimellä, mahdollisuudet skaalata tuotantoa jne.

Kansainväliseen kilpailuun liittyy markkinariskejä hinnan, tarjonnan ja kysynnän suhteen. Esimerkiksi kilpailuun vedyn ja sähköpolttoaineiden fossiilisia vastineita vastaan vaikuttaa voimakkaasti päästöoikeuksien hintakehitys. Tämän lisäksi kansainvälinen kilpailu voi alkaa suosia tuontia markkinoille muista maista kuin Suomesta. Näin voi käydä esimerkiksi silloin, jos EU:ssa laajasti hyväksytään sinisen vedyn maahantuonti EU:n ulkopuolelta.

Laajamittaisen energiatuotteiden viennin riskinä (sähkö, vety, sähköpolttoaineet) on heikentää kotimaisen teollisuuden kilpailukykyä nostamalla energianhankintakustannuksia. Suomi altistuu vetytaloudessa jo nyt niin Euroopan sisäiselle kuin Euroopan ulkopuolisista maista tulevalle kilpailulle. Tästä johtuen energiatuotteiden viennin marginaali saattaa pitkällä aikavälillä muodostua alhaiseksi, ja vertailukohtana tulisikin käyttää tuotantoja toimituskustannuksia viennin kilpailijamaista ennemmin kuin kohdemarkkinan omia tuotantokustannuksia.

Energiajärjestelmän kannalta riskinä on se, että kokonaisuutta ei onnistuta suunnittelemaan oikea-aikaisesti tai yhteensopivaksi, ja kustannukset ja päästöt sen vuoksi nousevat heikentäen kilpailukykyä, tai energiajärjestelmän pullonkaulat rajoittavat tarpeettomasti kasvua. Voi olla, että ohjauskeinojen valikoimaan tulisi siksi lisätä toimenpiteitä tuotannon, varastoinnin ja loppukäytön sijoittamiseksi energiajärjestelmän muodostaman kokonaisuuden kannalta tehokkaasti.

Vedyn loppukäyttöön liittyy teknisiä ja turvallisuusriskejä. Esimerkiksi laivaliikenteessä vetysiirtymä riippuu siitä, miten metanoliin ja ammoniakkiin liittyvä teknologia kehittyy. Raskas tieliikenne voi teknisen kehityksen ansiosta myös sähköistyä, joten vedyn kysyntä tulevaisuudessa ei ole varmaa. Vedyn laajamittainen tuotanto, varastointi ja siirtäminen

herättävät kysymyksiä turvallisuudesta ja häviöistä, koska vety läpäisee terästä ja on tunnetusti räjähdysherkkää.

9.5 Suomen tarvitsemat poliittiset ohjaustoimenpiteet

Tässä selvityksessä esitettyjen vetytalousskenaarioiden perusteella Suomen teollisuuden kilpailukyvyyn ja vetytalouteen liittyvien vientimahdollisuuksien hyödyntämisen kannalta on keskeistä, että:

1. **sähkön markkinahinta Suomessa pysyisi edullisena** ja sähkön siirtoyhteisyyksien rakentamisen esteitä vähennetään Suomen ja Ruotsin välillä ja maiden sisällä,
2. **tuulivoiman lisärakentamisen esteitä olisi mahdollisimman vähän,**
3. **teollisuuden ja teollisen mittakaavan vedyn ja sähköpolttoaineiden tuotantolaitosten rakentamisen esteitä olisi mahdollisimman vähän,**
4. **kotimainen sähkön ja vedyn siirtoinfrastruktuuri rakennettaisiin kustannustehokkaasti ja ennakoiden tarvetta vastaavasti, sisällyttäen tähän ratkaisut, joilla siirtoinfrastruktuurien rakentamisen tarvetta voitaisiin vähentää,** ja
5. vaihtoehdot kansainvälisten vedynsiirtoputkien rakentamiselle selvitetään tarkemmin.

Vetykaasun kansainvälisten siirtoyhteisyyksien rakentaminen edellyttää maidenvälistä yhteistyötä eri vaihtoehtojen kartoittamiseksi. Tässä yhteydessä **vedyn kansainvälisen siirtoinfrastruktuurin vaihtoehtoista on tehtävä riippumaton kustannus-hyötyanalyysi Suomen kannalta** sisältäen myös tarvittavat lisäinvestoinnit kotimaan sähkön- ja vedyn siirtoverkkoihin. Investointipäätöksiä voidaan tehdä vasta, kun siirtoputkille on osoitettavissa riittävä pitkäaikainen tarve ja yksityinen ja/tai julkinen rahoitus ottaen huomioon, mitkä osapuolet vastaisivat investointeihin liittyvistä kustannuksista ja riskeistä ja mitkä osapuolet hyötyisivät investoinneista. Tässä yhteydessä tulisi tarkastella myös tapaukset, joissa maidenvälinen yhdysputki voisi olla tuontia Suomeen, koska Suomen teollisuuden kilpailukyvyyn kannalta vetyä kannattaa hyödyntää kustannustehokkaimmista lähteistä. EU-rahoituksen saaminen yhdysputkihankkeille edellyttää, että **hankkeet on lisäksi pystyttävä perustelemaan Euroopan laajuisen yhteiskunnallisen hyödyn näkökulmasta.**

Suomen **erityispiirteitä on mahdollisuus integroida vedyn ja sähköpolttoaineiden tuotanto metsäteollisuuteen ja yhdyskuntien energiantuotantoon biogeenisen hiilidioksidin, elektrolyysissa sivutuotteena syntyvän hapen ja lämmityksen välillä.**

Monissa muissa Euroopan maissa biogeenista hiilidioksidia ja lämmöntalteenottoa kauko-
lämmöksi ei ole mahdollista hyödyntää yhtä laajasti kuin Suomessa. Tämän erityispiirteen

hyödyntäminen edellyttää tiivistä yritysten välistä yhteistyötä parhaiden toteutuskonseptien ja toimintamallien kehittämiseksi.

Raskaan liikenteen kannattaa Suomessa keskittyä käyttövoimiltaan sähköön, biopolttoaineisiin ja vetyyn, kuten kansainvälisesti useimmissa lähteissä suositellaan. Tie- liikenteessä sähköistäminen on priorisoitava. Raskaassa liikenteessä vety on synteettistä metaania energiataloudellisesti parempi vaihtoehto, kun käytettävissä on polttokennoihin tai vetymootoreihin perustuvaa kalustoa. Fyysinen biokaasu on pakko hyödyntää paikallisesti, kun taas biopolttonesteet ja sähköpolttoaineet soveltuvat myös vientiin. Poliittisten ohjaustoimenpiteiden tulisi edistää sähköön, biopolttoaineisiin ja vetyyn perustuvan jakeluinfraktuurin kehittymistä ja siirtymistä uusiin käyttövoimiin raskaan liikenteen kuljetuskalustossa.

Suomen valtion rooleiksi vetytalouden edistämässä nähdään edellisen perusteella seuraavat:

- Luoda selkeät vetytalouteen liittyvät lyhyen ja pitkän aikavälin kansalliset tavoitteet ja konkreettinen toimenpideohjelma.
 - Luoda loppukäyttösektorikohtaiset tiekartat vetysiirtymälle toimialojen kanssa yhteistyössä päätavoitteenaan tunnistaa, millä toimenpiteillä toimialakohtaisen kehityksen pullonkauloja voisi poistaa.
 - Luoda kansallinen vienninedistämisstrategia Suomessa kestävästi tuotetuille vetytalouteen liittyville tuotteille (mm. terästeollisuuden tuotteet, kemiantuotteet ml. vety ja sähköpolttoaineet, muut tuotteet) ja vetytalouteen liittyville teknologioille.
- Panostaa kansalliseen edunvalvontaan Suomen kilpailukyvyyn ja kansainvälisten hiilineutraalisuustavoitteiden edistämiseksi valtioiden välisellä suoralla yhteistyöllä ja varmistamalla, että Suomi on mukana kansainvälisissä toimialan kehittämiseen vaikuttavissa yhteistyöelimissä ja järjestöissä.
- Edistää vetytalouteen liittyvän koulutetun työvoiman saatavuutta (yliopistot, ammatilliset korkeakoulut, ammattikoulut, täydennyskoulutus).
- Poistaa vetytalouteen liittyvät rakentamisen esteet tuulivoiman lisärakentamisen sekä teollisuuden investointien ja siirto-, varastointi- ja jakeluinfraktuurin osalta.
- Ohjata, että Suomen energiainfraktuurin kehittämisessä huomioidaan rinnakkain sähkönsiirto-, maakaasunsiirto-, LNG- ja biokaasuinfraktuuri sekä tulevaisuuden vedynsiirtoverkot sekä energijärjestelmän huoltovarmuus- ja toimitusvarmuusnäkökohdat. Energijärjestelmää tulee kehittää kokonaisuutena, jossa sekä tuotanto että kulutus joustavat ja resursseja käytetään tehokkaasti. Vedyn osalta vedyn tuotannon sijoittuminen suhteessa infrastruktuuriin on myös kysymys, jota voidaan tarvittaessa ohjata eri keinoin.

- Ohjata vetytalouden edistämistä välillisesti valtionyhtiöiden ja osakkuusyritysten kautta näiden omilla liiketoiminta-alueilla sekä julkisten hankintojen kautta.
- Vetyprojekteihin liittyvien investointien ja tuotannon tukeminen vetysiirtymän mahdollistamiseksi. Tämä tarkoittaa erilaisia kohdennettuja keinoja, joissa huomioidaan, millaisia tukitoimia tarvitaan, että ratkaisu on yhteiskunnan kannalta kustannustehokas ja johtaa todellisiin päästövähennyksiin.
- Tunnistaa Suomen kannalta tärkeimmät vetytalouteen liittyvät TKI-alueet (mm. teräs- ja muu metalliteollisuus, kemianteollisuus, meriteollisuus, elektroniikka- ja sähköteollisuus, energiateollisuus, metsäteollisuus, energian siirron ja liikenteen infrastruktuurit) sekä edistää vetytalouteen liittyvää TKI-toimintaa ja verkostoitumista julkisten tukien, rahoituksen ja verkostoitumispalvelujen kautta (Finnvera, Ilmastorahasto, Business Finland, Suomen Akatemia, valtion tutkimuslaitokset, yliopistot ja ammatilliset korkeakoulut).

9.5.1 TKI ohjattava kilpailukykyyn kannalta merkittäviin teknologioihin ja innovaatioihin

TKI-toimintaan tulee panostaa sekä suorilla teknologian ja palvelujen kehittämiseen liittyvillä tuilla että yritysten ja tutkimuslaitosten välistä kotimaista ja kansainvälistä verkostoitumista ja yhteistyötä edistävin toimenpitein. Suomessa TKI kannattaa keskittää tutkimusohjelmiin niihin **teknologioihin ja innovatiivisiin palveluihin, joissa Suomen kilpailukyky olisi todennäköisesti hyvä** (esimerkiksi vetytalouteen liittyvien toimialojen veturiyritysten kautta, joihin läheisesti liittyy verkosto Suomessa toimivia yhteistyökumppaneita), ja nouseviin uusiin teknologioihin, joissa ei toistaiseksi tehdä laajaa kansainvälistä tutkimusta. Etenkin vedyn ja sen johdannaisten käyttö fossiilisten polttoaineiden korvaajana meriliikenteessä ja metalliteollisuudessa vaatii erittäin paljon sekä prosessien että teknologioiden tutkimusta ja kehitystyötä. **Pilotti- ja demonstraatiohankkeilla** voidaan luoda uusien teknologioiden kaupallistamisen edellyttämä kokeellinen näyttö.

Vetytalous tuo mukanaan tarpeen uudentyyppisille hankintaketjuille ja yritysten väliselle yhteistyölle teollisuudessa, liikenteen eri sektoreilla ja energiainfrastruktuurin rakentamisessa. Eri sektoreihin keskittyvät **yhteistyöverkostot** (klusterit, ekosysteemit) toimivat tärkeinä kotimaan sisäisinä ja kansainvälisinä kehitysyhteistyö- ja tiedonvaihtoalustoina kunakin toimialan vetysiirtymässä yhteisten tavoitteiden asettamisen ja toimenpideohjelmien kautta. Vetytalouteen liittyy myös **uusien toimintamallien kehittäminen**, kun yritykset integroivat toimintojaan. **Julkisesti rahoitetun TKI-toiminnan tulosten tulisi olla mahdollisimman pitkälle julkisia ja monistettavissa kaikkiin toimialan yrityksiin.**

TKI-toimintaa voidaan lähestyä myös temaattisten ohjelmakokonaisuuksien kautta sen varmistamiseksi, että Suomeen syntyy vetytaloudessa tarvittavaa **uutta osaamista**. Tällaisiksi teemoiksi tunnistettiin sidosryhmähaastattelujen yhteydessä mm. vetytalouteen liittyvät turvallisuus- ja standardisointinäkökohdat.

Mitä lähemmäs toiminnassa siirrytään käytäntöä eli teollisen mittakaavan investointihankkeisiin, kaupalliseen toimintaan ja edunvalvontaan, sitä enemmän vetytalouden ohjaaminen edellyttää poliittisen ohjauksen kanavoitua muiden kuin TKI-instrumenttien kautta.

9.5.2 Suositukset jatkoselvityksistä ja tutkimuksesta

Suomessa tarvitaan poliittisen tason päätöksiä Suomen vetytalouden kehittämisen tavoitteista ja sovellettavista toimenpiteistä tavoitteiden saavuttamiseksi. Toimenpiteiden määrittämiseen riittävän konkreettisella tasolla tarvitaan todennäköisesti useita täydentäviä selvityksiä, koska tässä selvityksessä on tuotu esille vain yleisen tason suuntaviivoja ja esimerkkejä toimenpiteistä muissa maissa. Esimerkiksi vetysiirtymää eri loppukäyttösektoreilla Suomessa tukevia kohdennettuja ohjauskeinoja, tarvittavaa koulutuksen kehittämistä ja kansainvälisen viennin edistämisen toimenpiteitä voitaisiin selvittää tarkemmin.

Koko energiajärjestelmän tehokasta yhteensovittamista tulisi selvittää huomioiden vaihtoehtoiset tulevaisuuden kehitykset ml. vedyn tuotannon ja loppukäytön ja joustavan kapasiteetin sijoittuminen siirtoinfrastruktuuriin nähden. Vetytalouden kehittämisessä voitaisiin huomioida myös tiiviimmin yhteistyömahdollisuudet Ruotsin, Saksan ja Baltian kanssa. Suomen sähkönsiirto-, maakaasu-, LNG-, biokaasu- sekä vedynsiirtoinfrastruktuureja tulee kehittää todellisia tarpeita vastaavasti ja kustannustehokkaasti rinnakkain. Kehittämisen osalta tarvitaan riippumattomia hyöty-kustannus-analyysseja Suomen kannalta tarkasteltuina viimeistään siinä vaiheessa, kun siirtoverkonhaltijat esittävät investointiehdotuksiaan.

Liitteet

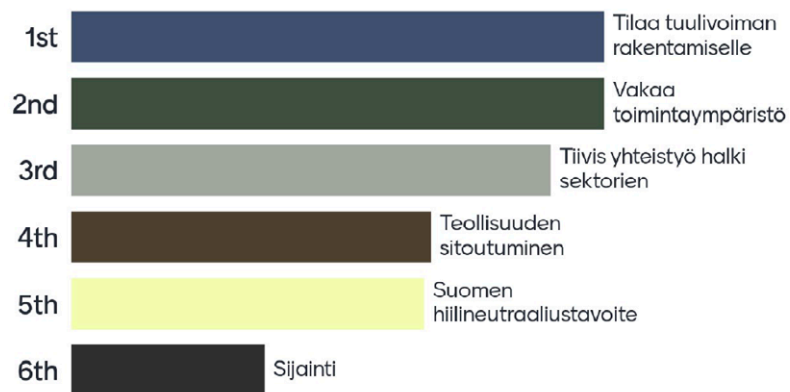
Liite 1. Sidosryhmien osallistaminen

Haastatellut sidosryhmät

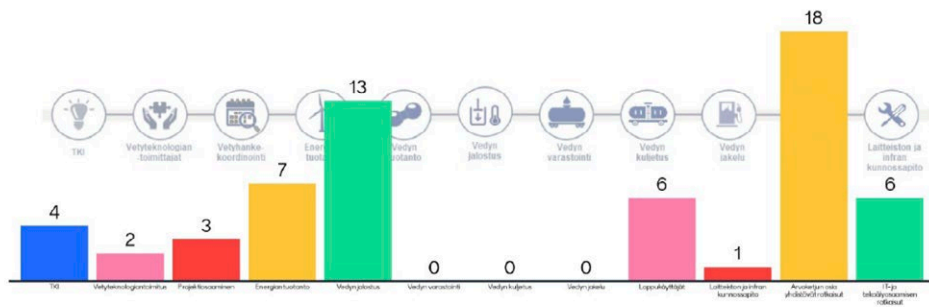
Organisaatio	Haastatellut henkilöt
Aalto-yliopisto	Annukka Santasalo-Aarnio
Business Finland	Helena Sarén
Climate Leadership Coalition	Jouni Keronen, Juha Turkki
Elinkeinoelämän keskusliitto	Matti Kahra
Energiateollisuus	Jukka Leskelä
Fingrid	Jussi Jyrinsalo, Mikko Heikkilä,
Gasgrid	Olli Sipilä
Greenpeace	Kaisa Kosonen, Olli Tiainen
Ilmastopaneeli	Peter Lund
Kemiateollisuus	Mika Aalto, Sami Nikander
LUT-yliopisto	Petteri Laaksonen
Metsäteollisuus	Ahti Fagerblom, Jyrki Peisa, Antti Tahvanainen
Oulun yliopisto	Timo Fabritius
STTK	Antti Koskela
Suomen Ammattiliittojen Keskusjärjestö	Lauri Muranen
Suomen itsenäisyyden juhlarahasto Sitra	Oras Tynkkynen
Teknologian tutkimuskeskus VTT	Antti Arasto
Teknologioteollisuus	Kimmo Järvinen, Mervi Karikorpi, Martti Kätkä
Vetyklusteri	Outi Ervasti, Sakari Kallo, Matti Malkamäki, Simo
Säynevirta	

Liite 2. Sidosryhmätaloudessa esitettyjen kysymysten tuloksia

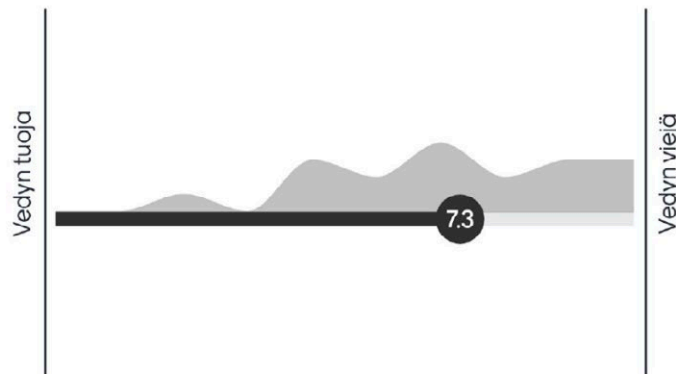
Järjestä tärkeysjärjestykseen seuraavat Suomen kilpailukykytekijät vetytaloudessa



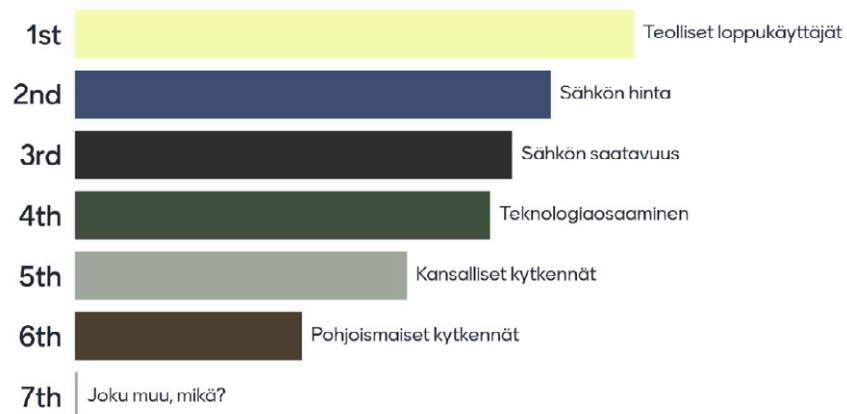
Missä kohtaa arvoketjua ovat Suomen lupaavimmat mahdollisuudet? (valitse 3)



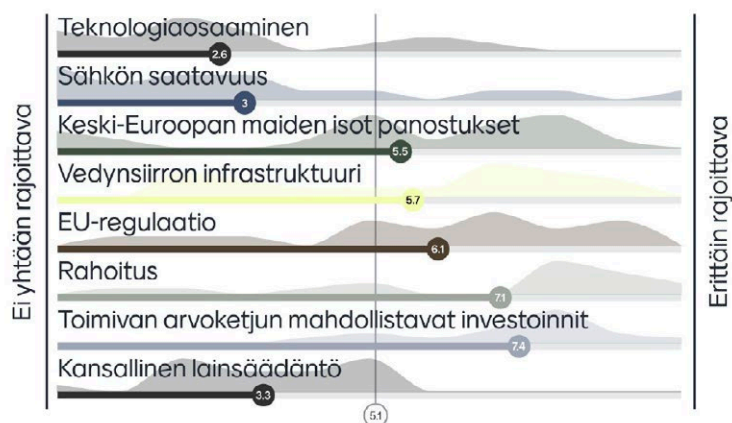
Tulisiko Suomen ennemmin olla vedyn tuoja vai viejä?



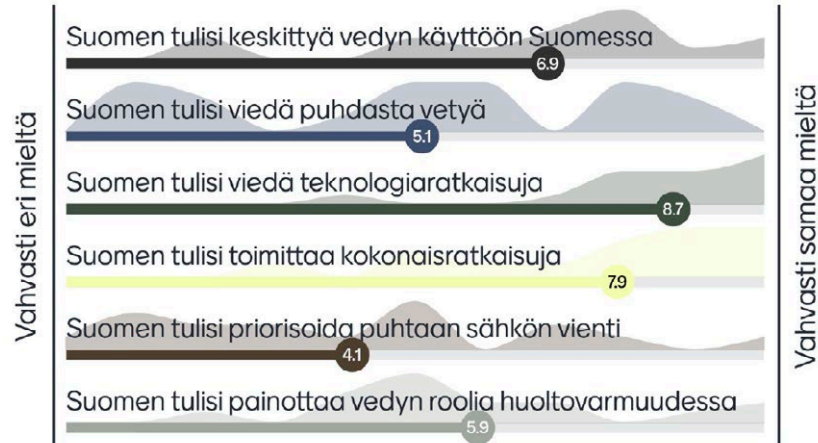
Järjestä Suomen veturitärkeyden mukaan



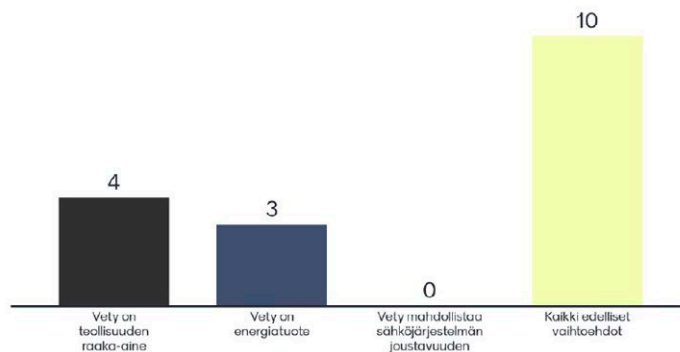
Miten arvioisit kuinka rajoittavia seuraavat haasteet ovat Suomen vetytalouden kehitykselle?



Vetyekosysteemin mahdollisuudet



Mikä seuraavista kuvaa mielestäsi vetyä parhaiten?



Vetytalouden edistämiseksi, Suomeen tulisi perustaa ____ ?

- Projektikehitysyhtiöitä
- Pilot & demo infraa
- Tiekartta/strategia
- Yhteistyötaho vedyn, maakaasun ja sähköistämisen edistämiseksi
- Valtion tukema demo-ohjelma
- LCA arviointitutkimusryhmä
- Ei mitään uutta vetyvirastoa, vaan vety tulisi integroida osaksi kaikkea toimintaa

- Ei mitään uutta, mutta tehostaa jo olemassa olevien instanssien ja yritysten yhteistyötä
- Maakunnallisia aktiviteetteja
- Siirtoinfraa edistävä yhteistyöelin valtion tuella
- Demonstraatorahoitusohjelma (pullonkuloihin)
- Pilot-infraa kautta arvoketjun
- Vetytalouden Piilaakso – integroitu huippututkimus, rahoitus, maailman johtava testimarkkina, valmiit kanavat globaaliin skaalaukseen
- Teollisuuden investointiohjelma
- Yrityksiä ja liiketoimintayksiköitä
- Taho, jossa turvallisuusosaaminen on huipputasoa, vrt. STUK
- Tulevaisuuden markkina- ja regulaatiotutkimusryhmä
- Alueelliset yhteistyöryhmät teollisuuden ympärille
- Infravertailu
- Globaali vetyjärjestö
- Isoja kansallisia hankekokonaisuuksia teollisuuden ja liikenteen muuttamisesta hiilineutraaliksi
- Yhteistyö naapurimaiden kanssa: edellytyksiä rajat ylittävälle siirtoinfralle
- Tulevaisuuden regulaatioryhmä
- Vety-Mankala. Valtion ja yksityisen sektorin yhteinen yritys, joka tuottaa vetyä omakustannehintaan omistajilleen
- Vahva linkitys EU:n ja Keski-Euroopan hankekehitykseen ja rahoitukseen

Liite 3. Skenaariotyöpajojen sidosryhmäasiantuntijat

Jukka Leskelä ja Pekka Salomaa, Energiateollisuus ry

Outi Ervasti, Simo Säynevirta ja Matti Malkamäki, Vetyklusteri ry

Antti Arasto ja Peter Lund, Ilmastopaneeli

Timo Ritonummi, Harri Haavisto, Juho Korteniemi, Jyrki Alkio, Bettina Lemström, työ- ja elinkeinoministeriö

Saara Jääskeläinen, liikenne- ja viestintäministeriö (1. työpajassa)

Petteri Laaksonen, LUT

Tiina Koljonen, VTT (1. työpajassa)

Liite 4. Skenaarioiden taustaoletukset

Raskaan tieliikenteen taustaoletukset

- Kaikissa skenaarioissa oletetaan, että vetyä ja sähköpolttoaineita ei käytetä henkilöautoissa, pakettiautoissa, bussiliikenteessä ja työkoneissa, koska em. sektorit sähköistyvät ja/tai siirtyvät biopolttoaineisiin.
- Vety toimii raskaan tieliikenteen täydentävänä polttoaineena skenaarioissa 'Maksimi A ja B'.
- Skenaarioissa 'Vain välttämätön' raskas liikenne ei käytä vetyä lainkaan.
- Sähköpolttoaineita ei käytetä maantieliikenteessä, koska vedyn kokonaishyötysuhde on sähköpolttoaineita parempi.
- Raskaan liikenteen liikennesuoritteiden oletetaan kasvavan voimakkaimmin 'Maksimi B' ja 'Maltillinen'-skenaarioissa, joissa talouskasvu noudattaisi EU Reference Scenarios 2020 -tasoa. 'Maksimi A' on valittu skenaarioiden puolivälistä.
- Raskaan liikenteen liikennesuorite pysyy vuoden 2019 tasolla skenaarioissa 'Vain välttämätön' perustuen ilmasto- ja energiastrategian WAM-skenaarioon.
- Vetyrekkojen liikennesuorite on kaikissa tapauksissa kokonaisuuteen verrattuna pieni (<0,5 %). 'Maksimi B' skenaariossa oletetaan suurimmat liikennesuoritteet painottuen perävaunullisiin vetyrekkoihin.

Perävaunulliset vetyrekat, liikennesuorite tkm	2019	2030	2040	2050
Maksimi B ja Maltillinen	0	1 200 000	3 600 000	7 200 000
Maksimi A	0	1 200 000	6 000 000	12 000 000
Vain välttämätön A ja B	0	0	0	0

Liikennesuoriteindeksi	2019	2030	2040	2050
Maksimi B ja Maltillinen	100	124	152	152
Maksimi A	100	112	124	124
Vain välttämätön tehdään A ja B	100	97	103	101

Perävaunuttomat vetyrekat, liikennesuorite tkm	2019	2030	2040	2050
Maksimi B ja Maltillinen	0	800 000	4 000 000	8 000 000
Maksimi A	0	800 000	2 400 000	4 800 000
Vain välttämätön A ja B	0	0	0	0

Vesiliikenteen taustaoletukset

- Vesiliikenteen energiatehokkuus paranee 0,3–0,4 % vuodessa.
- Kansainvälisen meriliikenteen polttoaineiden kulutus on moninkertainen kotimaan vesiliikenteeseen verrattuna.
- Kansainvälisen meriliikenteen bunkrausaste (ts. kuinka suuri osuus meriliikenteen polttoaineista tankataan Suomessa) vaihtelee skenaarioittain.
- Kaikissa skenaarioissa oletetaan fossiilisten polttoaineiden jäljellä olevan käytön painottuvan kasvavasti LNG:hen. Sen osuus on oletettu 40 %:iin jäljellä olevasta fossiilisten polttoaineiden käytöstä vuoteen 2050 mennessä.
- Korkeat uusiutuvien polttoaineiden osuudet ovat mahdollisia nopeasti jakeluväylien kautta. Pitkällä aikavälillä myös ammoniakkin ja metanolin 100 % käyttö tulee mahdolliseksi. Suora vedyn käyttö oletetaan skenaarioissa niin vähäiseksi, ettei sitä ole huomioitu erikseen.
- Kotimaan liikennesuorite kasvaa 'Maksimi A'- ja 'Maksimi B'-skenaarioissa 0,5–0,8 % vuodessa ja kv. meriliikenne EU Reference Scenario 2020 mukaisesti. Bunkraus on yleisempää 'Maksimi A' skenaariossa.
- 'Vain välttämätön' skenaariot noudattavat VN periaatepäätöstä meri- ja sisävesiliikenteen päästöjen vähentämisestä (6.5.2021). Muissa skenaarioissa on käytetty vielä kunnianhimoisempia tavoitteita.

Liikennesuoriteindeksi kotimaassa (pohjana tkm)	2019	2030	2040	2050
Maksimi A ja B	100	106	114	124
Vain välttämätön A ja B sekä Maltillinen	100	101	109	115

Liikennesuoriteindeksi kv. meriliikenteessä ja bunkrausaste (%)	2019	2030	2040	2050
Maksimi B	100 / 17 %	106 / 20 %	114 / 25 %	146 / 30 %
Maksimi A	100 / 17 %	120 / 20 %	133 / 30 %	146 / 40 %
Vain välttämätön A ja B sekä Maltillinen	100 / 17 %	110 / 17 %	115 / 17 %	121 / 17 %

Bio- ja sähköpolttoaineiden osuudet kokonais-p.a.:sta	2019	2030	2040	2050
Maksimi B	0	20 / 0	50 / 10	55 / 40
Maksimi A	0	20 / 0	50 / 10	55 / 40
Vain välttämätön A ja B sekä Maltillinen	0	10 / 0	40 / 5	50 / 10

Lentoliikenteen taustaoletukset

- Lentoliikenteen polttoaineiden bio- ja sähköpolttoaineiden osuuksien katsotaan skenaarioissa riippuvan ennen kaikkea Euroopan laajuisista jakeluvaihtoehdoista. Biopolttoaineita katsotaan olevan riittävästi tarjolla, jotta velvoitettiin päästään.
- Kotimaan liikenne muodostaa lentoliikenteen polttoaineiden kulutuksesta vain murto-osan. Skenaarioissa oletetaan, että kansainvälinen lentoliikenne tankkaa aina Suomessa.
- Lentoliikenteen energiatehokkuuden katsotaan paranevan VN lentoliikennettä koskevassa periaatepäätöksessä arvioidun mukaisesti, eli vähemmän kuin esimerkiksi EU:ssa keskimäärin.
- Kotimaan ja kv. lentoliikenteen kasvu noudattaa VN periaatepäätöstä muissa paitsi 'Maksimi B'-skenaariossa, jossa oletetaan EU Reference Scenarios FI 2020 -mukainen kotimaan ja kv. lentoliikenteen vuosikasvu.
- 'Vain välttämätön' noudattaa VN periaatepäätöstä lentoliikenteen päästöjen vähentämisestä. 'Maksimi B' olettaa nopeimman ja voimakkaimman uusiutuvien kasvun.

Liikennesuoriteindeksi kotimaassa	2019	2030	2040	2050
Maksimi B ja Maltillinen kasvu	100	106	114	124
Maksimi A, Vain välttämätön tehdään A ja B	100	102	104	106

Liikennesuoriteindeksi kv. lentoliikenteessä	2019	2030	2040	2050
Maksimi B ja Maltillinen kasvu	100	120	133	146
Maksimi A	100	117	125	145
Vain välttämätön tehdään A ja B	100	117	125	140

Biopolttoaineiden osuus (%) / sähköttoaineiden osuus (%)	2019	2030	2040	2050
Maksimi A ja B		27,3 / 2,7	45 / 10	50 / 15
Maltillinen		27,3 / 0,7	47 / 8	45 / 15
Vain välttämätön A		4,3 / 0,7	33 / 5,0	53 / 10
Vain välttämätön tB		27,3 / 2,7	39,5 / 5	47 / 10

Metalliteollisuuden taustaoletukset

- Valtaosa metalliteollisuuden vedyn käytöstä tulee kohdistumaan vetytelkitykseen teräksen tuotannossa.
 - Osa skenaarioista olettaa koko terästuotannon korvautuvan vetytelkityksellä, osassa skenaarioista muutosta ei tapahdu.
 - Teräksen tuotannon ei oleteta kasvavan.
- Metallien lämpökäsittelyssä käytettävän maakaasun ja nestekaasun oletetaan kaikissa skenaarioissa korvautuvan puhtailla kaasuilla ja osittain sähköistyksellä.
 - Vedyn osuus kaasuista vaihtelee 5 % ja 80 % välillä.
 - Kaasunkäytössä 25 % oletettu korvautuvan sähköistyksellä, huomioiden 0,2 % vuotuinen energiatehokkuuden parantuminen.
- Metallien jalostuksessa nykyisin käytettävä vety korvautuu puhtaalla vedyllä vuoteen 2040 mennessä.
 - Vetyä käyttävä tuotanto kasvaa vuosittain skenaariosta riippuen 0–2 %.

- Esimerkiksi akuissa käytettävien metallien ja kemikaalien tuotanto kasvaa, kuten Kansallisessa akkustrategiassa 2025 esitetään tavoitteeksi.
- Kokonaisvolyymi kuitenkin pientä verrattuna teräksen tuotannon tarpeisiin.

Vetypelkistyksen osuus tuotannosta SSAB Raahe	2030	2040	2050
Maksimi A ja B	50 %	100 %	100 %
Vain välttämätön B	50 %	100 %	100 %
Vain välttämätön A	0 %	0 %	0 %
Maltillinen	0 %	0 %	0 %

Vedyn osuus metalliteollisuuden puhtaiden kaasujen käytöstä	2030	2040	2050
Maksimi A ja B	10 %	40 %	80 %
Vain välttämätön A ja B	5 %	10 %	10 %
Maltillinen	5 %	10 %	30 %

Puhtaan vedyn käyttö muussa metallinjalostuksessa * (100 = vedyn käyttö 2020)	2030	2040	2050
Maksimi A	30	111	181
Maksimi B	28	92	135
Vain välttämätön A	28	92	135
Vain välttämätön B	25	75	100
Maltillinen	28	92	135

* Luku on suhteessa sektorin kokonaisvedynkäyttöön vuonna 2020. Luvun ollessa alle 100, vain osa vedyn käytöstä on korvattu puhtaalla vedyllä. Luvun ollessa yli 100, puhdasta vetyä käytetään enemmän kuin vedyn kokonaiskäyttö oli vuonna 2020.

Lähteet

- Acar, C., Bicerbc, Y., Emre Demir, M., Dincer, I., 2019. International Journal of Hydrogen Energy 44(47), 25347-25364. ([linkki](#))
- Acar, C., Dincer, I., 2019. Journal of Cleaner Production 218, 835-849. ([linkki](#))
- Adler, K., 2020. Carbon storage key to scaling-up hydrogen energy in California. IHS Markit. Julkaistu 23.12.2020. Viitattu 27.1.2022. ([linkki](#))
- Agora, 2018. The Future Cost of Electricity-Based Synthetic Fuels. Agora Verkehrswende, Agora Energiewende, Frontier Economics. Berlin. ([linkki](#))
- Akhlaghi, N., Najafpour-Darzi, G., 2020. A comprehensive review on biological hydrogen production. International Journal of Hydrogen Energy 43, 22492-22512. ([linkki](#))
- Anderson, T., 2020. COVID 19 and the oxygen bottleneck: The COVID 19 pandemic is exposing an important weakness in health systems: medical oxygen production and delivery. Bulletin of the World Health Organization 98(9), 586-. ([linkki](#))
- Asetus kestävää sijoittamista helpottavasta kehyksestä ja asetuksen (EU) 2019/2088 muuttamisesta. EU/2020/852. Tehty Brysselissä 18.6.2020. ([linkki](#), [linkki liitteeseen 1](#), [linkki liitteeseen 2](#))
- Bakker, S., Budde, B., 2012. Technological hype and disappointment: lessons from the hydrogen and fuel cell case. Technology Analysis & Strategic Management, 24:6, 549-563. DOI: 10.1080/09537325.2012.693662. ([linkki](#))
- BMWi, 2020. The National Hydrogen Strategy. Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, Berlin. ([linkki](#))
- BP, 2020. Energy Outlook 2020 edition. British Petroleum. ([linkki](#))
- CEM, 2022a. About the Clean Energy Ministerial. Clean Energy Ministerial. Viitattu 17.1.2022. ([linkki](#))
- CEM, 2022b. Hydrogen Initiative. Clean Energy Ministerial. Viitattu 17.1.2022. ([linkki](#))
- CEM, 2022c. Clean Energy Ministerial – Hydrogen Initiative (H2I) Work Plan 2021–2022. Viitattu 17.1.2022. ([linkki](#))
- Cihlar, J., Villar Lejarreta, A., Wang, A., Melgar, F., Jens, J., Rio, P., van der Leun, K., 2020. Hydrogen generation in Europe: Overview of costs and key benefits. ISBN 978-92-76-20677-4. ([linkki](#))
- CME, 2020. National Green Hydrogen Strategy. Government of Chile, Ministry of Energy, Santiago. ([linkki](#))
- Creos, 2022. European Hydrogen Backbone. Creos, DESFA, Elering, Enagas, Energinet, Eustream, FGSZ, Fluxys, Gas Connect Austria, Gasgrid, Gasunie, Gaz-System, Gas Networks Ireland, GRTgaz, National Grid, Nordion Energi, Net4gas, OGE, Ontras, Plinovodi, Snam, TAG, Terega. Viitattu 17.1.2022. ([linkki](#))
- CSIS, 2021. Russia's Hydrogen Energy Strategy. Center for Strategic & International Studies. Julkaistu 14.10.2021. Viitattu 27.1.2022. ([linkki](#))
- DEA, 2017. Technology data: Renewable fuels. Danish Energy Agency, Energinet. ([linkki](#))
- EAS, 2022. Vesinikuteknologia suurprojektide huvi kaardistamine (H-IPCEI). Viitattu 27.1.2022. ([linkki](#))
- EC, 2018a. Puhdas maapallo kaikille Eurooppalainen visio kukoistavasta, nykyaikaisesta, kilpailukykyisestä ja ilmastoneutraalista taloudesta. Komission tiedonanto. COM(2018) 773 final. Euroopan komissio, Bryssel. ([linkki](#))
- EC, 2019a. Euroopan vihreän kehityksen ohjelma. Komission tiedonanto. COM(2019) 640 final. Euroopan komissio, Bryssel. ([linkki](#))
- EC, 2020a. Commission staff working document, Impact assessment accompanying the document "Communication from the Commission – Stepping up Europe's 2030 climate ambition: Investing in a climate-neutral future for the benefit of our people". SWD(2020) 176 final. Euroopan komissio, Bryssel. ([linkki](#))
- EC, 2020b. Vetystrategia ilmastoneutraalille Euroopalle. Komission tiedonanto. COM(2020) 301 final. Euroopan komissio, Bryssel. ([linkki](#))
- EC, 2020c. Käyttövoimaa ilmastoneutraalille taloudelle: EU:n energiajärjestelmän integrointistrategia. COM(2020) 299 final. Komission tiedonanto. Euroopan komissio, Bryssel. ([linkki](#))
- EC, 2021a. Valmiina 55:een: vuoden 2030 ilmastotavoitteesta totta matkalla kohti ilmastoneutraaliutta. COM(2021) 550 final. Komission tiedonanto. Euroopan komissio, Bryssel. ([linkki](#))
- EC, 2021b. Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on common rules for the internal markets in renewable and natural gases and in hydrogen. COM(2012) 803 final. Euroopan komissio, Bryssel. ([linkki](#) päädokumenttiin ja [linkki](#) liitteeseen)
- EC, 2021c. Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on the internal markets for renewable and natural gases and for hydrogen (recast). COM(2021) 804 final. Euroopan komissio, Bryssel. ([linkki](#) päädokumenttiin ja [linkki](#) liitteeseen)
- EC, 2021d. Ehdotus asetukseksi vaihtoehtoisten polttoaineiden infrastruktuurin käyttöönotosta ja Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2014/94/EU kumoamisesta. COM(2021) 559 final. Euroopan komissio, Bryssel. ([linkki](#) päädokumenttiin ja [linkki](#) liitteeseen)
- EC, 2021e. Proposal for a Regulation on ensuring a level playing field for sustainable air transport. COM(2021) 561 final. Euroopan komissio, Bryssel. ([linkki](#))

- EC, 2021f. Proposal for a regulation on the use of renewable and low-carbon fuels in maritimetransport and amending Directive 2009/16/EC. COM(2021) 562 final. Euroopan komissio, Bryssel. ([linkki](#))
- EC, 2021g. Ehdotus Direktiivin 98/70/EY muuttamisesta uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämiseksi. COM(2021) 557 final. Euroopan komissio, Bryssel. ([linkki](#) päädokumenttiin ja [linkki](#) liitteeseen)
- EC, 2021h. Ehdotus Neuvoston direktiiviksi energiatuotteiden ja sähkön verotusta koskevan unionin kehyksen uudistamisesta (uudelleenlaadittu). COM(2021) 563 final. Euroopan komissio, Bryssel. ([linkki](#) päädokumenttiin ja [linkki](#) liitteeseen)
- EC, 2021i. Komission delegoitu asetus asetuksen (EU) 2020/852 täydentämistä vahvistamalla tekniset arviointikriteerit, joilla määritellään, millä edellytyksillä taloudellista toimintaa pidetään ilmastomuutoksen hillintää tai ilmastomuutokseen sopeutumista merkittävästi edistävänä ja aiheuttaako kyseinen taloudellinen toiminta merkittävää haittaa millekään muulle ympäristötavoitteelle. C(2021) 2800 final. Annettu 4.6.2021. Euroopan komissio, Bryssel. ([linkki](#))
- EC, 2021j. The European Clean Hydrogen Alliance: Overview of projects collected. ([linkki](#))
- EC, 2021k. Mission Innovation launches a new global coalition to support the clean hydrogen economy, 2 June 2021. Viitattu 17.1.2022. ([linkki](#))
- EC, 2021l. Fist call for large-scale projects, list of proposal pre-selected for a grant. Euroopan komissio, Bryssel. ([linkki](#))
- EC, 2022a. EU programmes and funds financed from the EU budget and NexGenerationEU. Euroopan komissio. Viitattu 17.1.2022. ([linkki](#))
- EC, 2022b. European Clean Hydrogen Alliance. Euroopan komissio. Viitattu 17.1.2022. ([linkki](#))
- EC, 2022c. Third European Hydrogen Forum. Euroopan komissio. Viitattu 17.1.2022. ([linkki](#))
- ECF, 2018. Net zero by 2050: from whether to how. European Climate Foundation. ([linkki](#))
- Energiavirasto, 2021. Sähkön toimitusvarmuus vuonna 2021. Energiavirasto, Helsinki. ([linkki](#))
- Energimyndigheten, 2021. Förslag till Sveriges nationale strategi för vätgas, eletrobränslen och ammoniak. ER 2021:34. ISBN (pdf) 978-91-7993-004-8. ([linkki](#))
- ET, 2020. Energia-alan vähähiilisyystiekartta. Energiateollisuus, Helsinki. ([linkki](#))
- Eurelectric, 2018. Decarbonisation pathways. Bryssel. ([linkki](#))
- Eurofer 2020. European Steel in Figures Covering 2011–2020. ([linkki](#))
- Eurooppa-neuvosto, 2020. Council conclusions "Towards a hydrogen market for Europe". 13976/20. Bryssel. ([linkki](#))
- Eurooppa-neuvosto, 2021. Eurooppa-neuvosto. Viitattu 15.1.2021. ([linkki](#))
- Eurooppa-neuvosto, 2021. Proposal for a regulation on guidelines for trans-European energy infrastructure and repealing Regulation (EU) No 347/2013. 15036/21. Bryssel. ([linkki](#))
- European Commission, Directorate-General for Energy, Cihlar, J., Krabbe, O., Deng, Y., et al., 2021. Assistance to the impact assessment for designing a regulatory framework hydrogen, Publications Office. ([linkki](#))
- European Hydrogen Backbone, 2021. Analysing future demand supply, and transport of hydrogen. ([linkki](#))
- Eurostat 2021. Internet lähde. Nominal GDP. <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/tec00001/default/table?lang=en>. Viitattu 28.1.2022. ([linkki](#))
- Eurostat, 2019. Final energy consumption by sector. ([linkki](#))
- ExxonMobil, 2019. 2019 Outlook for energy: A perspective to 2040. ([linkki](#))
- FCH JU, 2019. Hydrogen roadmap Europe. Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking, Luxembourg. ([linkki](#))
- Fennovoima, 2021. Fennovoima uudelleenorganisoi toimintaansa – uusia jäseniä johtoryhmään. Julkaistu 28.12.2021. Viitattu 23.1.2022. ([linkki](#))
- Fimea, 2021. Lääkkeelliset kaasut. Viitattu 17.1.2022. ([linkki](#))
- Fingrid, 2021a. Verkkovisio. ([linkki](#))
- Fingrid, 2021b. Fingridin sähkönsiirtoverkko. Viitattu 23.1.2022. ([linkki](#))
- Forsman, J., Närhi, J., Uimonen, H., Semkin, N., Miettinen, V., Toivola, S., 2021. Hiilineutraalisuustavoitteen vaikutukset sähköjärjestelmään. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2020:4. Valtioneuvoston kanslia, Helsinki. ISBN PDF 978-952-383-029-5. ([linkki](#))
- Fuels Europe, 2021. Statistical Report 2021. ([linkki](#))
- Government of Namibia, 2021. Harambee Prosperity Plan II – 2021 Quarter 1 Report. Performance Delivery Unit. ([linkki](#))
- Guidehouse, 2020. Gas decarbonisation pathways 2020–2050. Utrecht. ([linkki](#))
- Heikkilä, M., 2021. Kommentti vetytalousskenaarioiden sidosryhmätyöpajassa 14.12.2021.
- Hydrogen Central, 2021. Gazprom: Russia will be world's leading blue hydrogen exporter by 2030. Julkaistu 5.8.2021. Viitattu 23.1.2022. ([linkki](#))
- Hydrogen Council, 2021a. Hydrogen decarbonization pathways: potential supply scenarios. ([linkki](#))
- Hydrogen Council, 2021b. Hydrogen insights: A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness. Hydrogen Council, McKinsey & Company. ([linkki](#))
- HYPHEN, 2021. Namibia announces HYPHEN as preferred bidder to implement US\$9.4bn green hydrogen project. Julkaistu 4.11.2021. Viitattu 10.2.2022. ([linkki](#))

- IEA, 2019. Future of hydrogen. International Energy Agency, Paris. ([linkki](#))
- IEA, 2020. World Energy Outlook 2020. International Energy Agency, Paris. ([linkki](#))
- IEA, 2021a. World energy model. International Energy Agency. ([linkki](#))
- IEA, 2021b. World Energy Outlook 2021. International Energy Agency. ([linkki](#))
- IEA, 2021c. Energy Technology Perspectives 2020. International Energy Agency. ([linkki](#))
- IEA, 2021d. Global hydrogen review 2021, revised version in November 2021. International Energy Agency. ([linkki](#))
- IPCC, 2018. Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. ([linkki](#))
- IPCC, 2021. Climate change widespread, rapid, and intensifying. IPCC press release, 9 August 2021. ([linkki](#))
- IPHE, 2021. Current deployments in the Republic of Korea. International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy. Julkaistu heinäkuussa 2021. Viitattu 27.1.2022. ([linkki](#))
- IRENA, 2019. Global energy transformation: A roadmap to 2050 (2019 edition). International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. ([linkki](#))
- IRENA, 2020. Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. ([linkki](#))
- IRENA, 2021. Green hydrogen supply: A guide to policy making. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. ([linkki](#))
- IRENA, 2022. Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi ([linkki](#))
- Kakoulaki G., Kougiass I., Taylor N., Dolci F., Moya J., Jager-Waldau A., 2021. Green hydrogen in Europe – A regional assessment: Substituting existing production with electrolysis powered by renewables. Energy Conversion and Management 228. ([linkki](#))
- Kato, T., Kubota, M., Kobayashi, N., Suzuoki, Y., 2005. Effective utilization of by-product oxygen from electrolysis. Energy 30(14), 2580–2595. ([linkki](#))
- Kauranen, P., Solin, J., Törrönen, K., Koivula, J., Laurikko, J., 2013. Vetytiekartta – vetyenergian mahdollisuudet Suomessa. Tekes, Helsinki. ([linkki](#))
- Keramidas, K., Fosse, F., Diaz Vazquez, A., Schade, B., Tchung-Ming, S., Weitzel, M., Vandyck, T. and Wojtowicz, K., 2021. Global Energy and Climate Outlook 2020: A New Normal Beyond Covid-19, EUR 30558 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg. ISBN 978-92-76-28417-8, doi:10.2760/608429, JRC123203. ([linkki](#))
- Kouri, M., 2020. Kestävä rahoitus – taksonomia ja strategia. Valtiovarainministeriö 15.12.2020. ([linkki esitykseen](#))
- Laki energian alkuperätakuista 1050/2021. Annettu Helsingissä 3.12.2021. ([linkki](#))
- Laurikko, J., Ihonen, J., Kiviho, J., Himanen, O., Weiss, R., Saarinen, V., Kärki, J., Hurskainen, J., 2020. National hydrogen roadmap for Finland. Business Finland, Helsinki. ISBN 978-952-457-657-4. ([linkki](#))
- Lehtilä, A., Koljonen, T., Laurikko, J., Markkanen, J., Vainio, T., 2021. Energiajärjestelmän ja kasvihuonekaasujen kehitykset Hiilineutraali Suomi 2035 – ilmasto- ja energiapolitiikan toimet ja vaikutukset. Valtioneuvoston kanslia, Helsinki. ISBN pdf: 978-952-383-318-0. ([linkki](#))
- Lin, M.T., 2021. To jumpstart hydrogen economy, China needs more than subsidies for fuel-cell vehicles. HIS Markit. Julkaistu 29.11.2021. Viitattu 27.1.2022. ([linkki](#))
- LME, 2017. The vision of the Lithuanian energy sector: complete independence from fossil fuels by 2050. Julkaistu 22.6.2017. Viitattu 27.1.2022. ([linkki](#))
- LME, 2021. Ministry of Energy takes the lead in preparing national hydrogen development guidelines. Julkaistu 8.6.2021. Viitattu 27.1.2022. ([linkki](#))
- LVM, 2021. Fossiilittoman liikenteen tiekartta: Valtioneuvoston periaatepäätös kotimaan liikenteen kasvihuonepäästöjen vähentämisestä. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisu 2021:15. Liikenne- ja viestintäministeriö, Helsinki. ([linkki](#))
- Mazza, P., Hammerschlag, R., 2004. Carrying the energy future: comparing hydrogen and electricity for transmission, storage and transportation. Institute for Lifecycle Environmental Assessment, Seattle. ([linkki](#))
- METI, 2017. Basic hydrogen strategy determined. Ministry of Economy, Trade and Industry. Julkaistu 26.12.2017. Viitattu 27.1.2022. ([linkki](#))
- Moradi, R., Groth, K.M., 2019. Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis. International Journal of Hydrogen Energy 44(23), 12254-12269. ([linkki](#))
- Navigant, 2019. Gas for climate: the optimal role for gas in a net-zero emissions energy system. Utrecht. ([linkki](#))
- NER, 2021. Invitation to tender: Hydrogen, electro-fuels, CCU and CCS in a Nordic context. Nordic Energy Research. Viitattu 17.1.2022. ([linkki](#))

- Neste 2021. Neste to receive funding from the EU Innovation Fund to develop its Porvoo refinery through green hydrogen production and carbon capture & storage. Internet lähde. Viitattu 28.1.2022. ([linkki](#))
- Nikolaïdis, P., Poullikas, A., 2017. A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67, 597-611. ([linkki](#))
- Nordpool, 2022. Historical Market Data. Internet lähde. Viitattu 27.1.2022. ([linkki](#))
- NRCAN, 2020. Hydrogen strategy for Canada: Seizing the opportunities for hydrogen, a call to action. Natural Resources Canada. ([linkki](#))
- NWP, 2021. Nationaal Waerstof Programma. Viitattu 18.1.2022. ([linkki](#))
- OIES, 2021. Contrasting European hydrogen pathways: An analysis of differing approaches in key markets. Oxford Institute for Energy Studies, Institute of Energy Economics at the University of Cologne. ISBN 978-1-78467-155-6. ([linkki](#))
- Öko-Institut, 2018. The vision scenario for the European Union, 2017 update for the EU-28. Berlin. ([linkki](#))
- Outokumpu, 2021a. Outokumpu etenee ilmastotoimissaan uusien Science Based Targets -aloitteen hyväksymien ilmastotavoitteiden avulla. Julkaistu 21.12.2021. Viitattu 23.1.2022. ([linkki](#))
- Outokumpu, 2021b. Outokumpu osallistuu merkittävään hiilineutraaliustavoitteita tukevaan tutkimushankkeeseen. Julkaistu 16.2.2021. Viitattu 23.1.2022. ([linkki](#))
- Pörtner, H.O., Scholes, R.J., Agard, J., Archer, E., Arneth, A., Bai, X., Barnes, D., Burrows, M., Chan, L., Cheung, W.L., Diamond, S., Donatti, C., Duarte, C., Eisenhauer, N., Foden, W., Gasalla, M. A., Handa, C., Hickler, T., Hoegh-Guldberg, O., Ichii, K., Jacob, U., Insarov, G., Kiessling, W., Leadley, P., Leemans, R., Levin, L., Lim, M., Maharaj, S., Managi, S., Marquet, P. A., McElwee, P., Midgley, G., Oberdorff, T., Obura, D., Osman, E., Pandit, R., Pascual, U., Pires, A. P. F., Popp, A., Reyes-García, V., Sankaran, M., Settele, J., Shin, Y. J., Sintayehu, D. W., Smith, P., Steiner, N., Strassburg, B., Sukumar, R., Trisos, C., Val, A.L., Wu, J., Aldrian, E., Parmesan, C., Pichs-Madruga, R., Roberts, D.C., Rogers, A.D., Díaz, S., Fischer, M., Hashimoto, S., Lavorel, S., Wu, N., Ngo, H.T., 2021. Scientific outcome of the IPBES-IPCC co-sponsored workshop on biodiversity and climate change; IPBES secretariat, Bonn, Germany, DOI:10.5281/zenodo.4659158. ([linkki](#))
- Power Technology, 2021. Saudi Arabia moves on \$5bn hydrogen project. Julkaistu 9.4.2021. Viitattu 24.1.2022. ([linkki](#))
- Qin, N., Raissi, A., Brooker, P. 2014. Analysis of Fuel Cell Vehicle Developments. FSEC Report Number: FSEC-CR-1987-14. University of Central Florida, Cocoa. ([linkki](#))
- Reuters, 2020. China rolls out fresh policies to boost hydrogen vehicle sales. Julkaistu 21.9.2020. Viitattu 27.1.2022. ([linkki](#))
- Roland Berger. 2021. Hydrogen transportation is key to unlocking the clean hydrogen economy. ([linkki](#))
- Roques F. Le Thieis Y., Aue G., Spodniak P., Pugliese G., Cail S., Peffen A., Honkapuro S., Sihvonen V. 2021. Enabling cost-efficient electrification in Finland. *Sitra studies* 194. ([linkki](#))
- Saba, S.M., Müller, M., Robinus, M., Stolten, D., 2018. The investment costs of electrolysis – A comparison of cost studies from the past 30 years. *International Journal of Hydrogen Energy* 43(3), 1209-1223. ([linkki](#))
- Shell, 2019. Shell scenarios – Sky: meeting the goals of the Paris Agreement. ([linkki](#))
- Soimakallio, H., 2020. Teknologiateollisuuden vähähiilitiekartta 2035: tulokset. Teknologiateollisuus, Helsinki. ([linkki](#))
- SSAB, 2021. HYBRITin ja fossiilivapaan teräksen aikataulu. Viitattu 23.1.2022. ([linkki](#))
- SSAB, 2022. SSAB suunnittelee uutta tuotantojärjestelmää pohjoismaisille toimintoilleen ja aikaistaa vihreää siirtymäänsä. Julkaistu 28.1.2022. Viitattu 28.1.2022. ([linkki](#))
- Stenborg, J., Huovari, J., Kiema, I., Maliranta, M., 2020. Tuottavuus ja kilpailukyky suomessa: Mistä kilpailukyky koostuu ja mihin sitä tarvitaan? Valtiovarainministeriön julkaisuja 2020:81. Valtiovarainministeri, Helsinki. ISBN PDF: 978-952-367-694-7. ([linkki](#))
- Tanksale, A., Norberto Beltramini, J., Qing, g., Lu, M., 2010. A review of catalytic hydrogen production processes from biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14(1), 166-182. ([linkki](#))
- TEM, 2020a. Komissio julkisti sektori-integraatiota ja vetyä koskevat strategiat. Viitattu 15.1.2021. ([linkki](#))
- TEM, 2020b. Yhteenveto toimialojen vähähiilitiekartoista. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 2020:52. Työ- ja elinkeinoministeriö, Helsinki. ISBN PDF: 978-952-327-525-6. ([linkki](#))
- TEM, 2021. Sektori-integraatiotyöryhmän loppuraportti. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 2021:47. Työ- ja elinkeinoministeriö, Helsinki. ISBN pdf: 978-952-327-697-0. ([linkki](#))
- Teske, S. (toim.), 2019. Achieving the Paris Climate Agreement goals. Springer, Cham. ISBN: 978-3-030-05842-5. ([linkki](#))
- Traficom, 2022. CORESIA -kansainvälisen lentoliikenteen päästöjärjestelmä. Viitattu 23.1.2022. ([linkki](#))
- Tuulivoimayhdistys, 2021. Suunnittelussa oleva hankkeet. Viitattu 23.1.2022. ([linkki](#))
- Ueckerdt, F., Bauer, Ch., Dirnacher, A., Everall, J., Sacchi, R., Luderer, G., 2021. Potential and risks of hydrogen-based e-fuels in climate change mitigation. *Nature Climate Change* 11, 384-393. ([linkki](#))
- Ullah, H., 2021. Tunisia aims for the export-oriented hydrogen industry. Julkaistu 11.2.2021. Viitattu 24.1.2022. ([linkki](#))
- UNECE, 2021. Draft roadmap for production and use of hydrogen in Ukraine. United Nations Economic Commission for Europe. ([linkki](#))

- USDE, 2002. A national vision of America's transition to a hydrogen economy – to 2030 and beyond. United States Department of Energy. ([linkki](#))
- USDE, 2020. Hydrogen strategy: Enabling a low-carbon economy. United States Department of Energy. ([linkki](#))
- USDE, 2022. DOE Hydrogen Program Plan. United States Department of Energy. ([linkki](#))
- Vasara, P., Lehtinen, H., Laukkanen, O., 2020b. Tie vähähiiliseen liikenteeseen – liikenteen ja logistiikan tiekartta. Pöyry, Vantaa. ([linkki](#))
- Vasara, P., Nyman, Lehtinen, H., Aktüre, I., Laukkanen, O., 2020a. Roadmap to reach carbon neutral chemistry in Finland 2045. Kemianteollisuus, Helsinki. ([linkki](#))
- Vasara, P., Patronen, J., Lehtinen, H., Laukkanen, O., 2020c. Tiekartta metsäteollisuudelle vähähiilistyvässä yhteiskunnassa osa: päästöt. Pöyry, Vantaa. ([linkki](#))
- VN, 2021a. Yli 64 miljoonaa euroa investointitukea neljälle uuden energiateknologian suurelle demohankkeelle. Viitattu 17.1.2022. ([linkki](#))
- VN, 2021b. Suomen kestävä kasvun ohjelma: Elpymis- ja palautumissuunnitelma. Valtioneuvoston julkaisu 2021:52. Valtioneuvosto, Helsinki. ([linkki](#))
- VN, 2022. Suomen kestävä kasvun ohjelman yritysrahoitushaut TEM:n hallinnonalalla. Valtioneuvosto. Viitattu 17.1.2022. ([linkki](#))
- Voldsund, M., Jordal, K., Anantharaman, R., 2016. Hydrogen production with CO2 capture. International Journal of Hydrogen Energy 41(9), 4969-4992. ([linkki](#))
- Volvo, 2021. Volvo Group and Daimler Truck AG fully committed to hydrogen-based fuel-cells – launch of new joint venture cellcentric. Viitattu 18.1.2021. ([linkki](#))
- Wang, A., Jens, J., Mavins, D., Moultak, M., Schimmel, M., van der Leun, K., Peters, D., Buseman, M., 2021. European Hydrogen Backbone: Analysing future demand, supply, and transport of hydrogen. Creos, DESFA, Elering, Enagas, Energinet, Eustream, FGSZ, Fluxys, Gas Connect Austria, Gasgrid, Gasunie, Gaz System, Gas Networks Ireland, GRTgaz, National Grid, Nordion Energi, Net4gas, OGE, Ontras, Plinovodi, Snam, TAG, Teréga. ([linkki](#))
- WEC, 2019. World energy scenarios 2019. World Energy Council, London. ([linkki](#))
- Weichenhain, U., Kaufmann, M., Benz, A., Matute, G., 2021. Hydrogen valleys: Insights into the emerging hydrogen economies around the world. Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking, Roland Berger, Inycom. Publications office of the European Union, Luxembourg. ISBN: 978-92-9246-370-0. ([linkki](#))
- Wengenmayr, R., Bührke, T. (toim.), 2013. Renewable energy: Sustainable energy concepts for the energy change. John Wiley & Sons. ISBN: 978-3-527-67136-6. ([linkki](#))
- Wind Europe, 2018. Breaking new ground: wind energy and the electrification of Europe's energy system. Bryssel. ([linkki](#))
- WNN, 2021. Nuclear stands out for clean hydrogen, says French parliamentary report. World Nuclear News. Julkaistu 21.5.2021. Viitattu 23.1.2022. ([linkki](#) uutiseen ja [linkki](#) ranskankieliseen taustadokumenttiin)
- Wråke, M., Karlsson, K., Kofoed-Wiuff, A., Folsland Bolkesjø, T., Lindroos, T.J., Hagberg, M., Bosack Simonsen, M., Unger, T., Tennbakk, B., Ognér Jåstad, E., Lehtilä, A., Putkonen, N., Koljonen, T., 2021. Nordic clean energy scenarios: Solutions for carbon neutrality. Nordic Energy Research, Copenhagen. ([linkki](#))
- YK, 2015. Pariisin ilmastopöytäkirja. Yhdistyneet kansakunnat, Pariisi. ([linkki](#))
- YLE, 2021. Olkiluoto 3:n reaktori on käynnistetty. Julkaistu 21.12.2021. Viitattu 23.1.2022. ([linkki](#))

tietokayttoon.fi

ISBN PDF 978-952-383-413-2
ISSN PDF 2342-6799