

Energian siirtoverkot vetytalouden ja puhtaan energiajärjestelmän mahdollistajina

Fingridin ja Gasgrid Finlandin yhteishankkeen loppuraportti

7.11.2023

Esipuhe

Puhdas sähkö ja puhtaasta sähköstä valmistettu vety jatkojalosteineen ovat keskeisiä ratkaisuja päästöjen vähentämiseksi kaikilla yhteiskunnan sektoreilla. Suomella on erinomaiset edellytykset olla edelläkävijä, ja saavuttaa johtava asema Euroopan vetytaloudessa.

Suomalainen sähköntuotanto on jo nykyisin yksi maailman puhtaimmista ja meillä on kaikki edellytykset vähintään kaksinkertaistaa tai jopa moninkertaistaa puhtaan sähkön tuotantomme. Etenkin Suomeen rakennettavan maatuulivoiman kustannuskilpailukyky on erittäin hyvä, ja se, yhdistettynä monipuoliseen sähköntuotantorakenteeseen, antaa maallemme kilpailuetua puhtaan sähkön ja vedyn tuotannossa.

Myös vahvasta energiansiirtoinfrastruktuurista on muodostumassa kansallinen kilpailukykytekijä. Varma sähkön kantaverkko ja hyvät teollisen sähkökulutuksen liityntämahdollisuudet ovat tärkeitä tekijöitä suunniteltaessa vihreän siirtymän teollisia investointeja. Samaan tapaan vedynsiirtoinfrastruktuuri voi tukea investointien sijoittumista Suomeen. Samalla vedynsiirtoinfrastruktuuri mahdollistaa kansallisen ja edelleen kansainvälisen vetymarkkinan syntymisen sekä tarjoaa mahdollisuuden vedyn varastointiin. Suurten energiamäärien siirtäminen vetynä on kustannustehokasta, ja näyttää selvältä, että korkeimpien kasvuskenaarioiden toteutumiseksi pelkästään investoinnit sähkönsiirtoverkkoon eivät riitä, vaan tarvitsemme myös vahvan vedynsiirtoinfrastruktuurin. Yhdessä sähkö- ja vedynsiirtoinfrastruktuurit mahdollistavat sektori-integraation avulla puhtaan ja kustannustehokkaan energiajärjestelmän.

Fingrid ja Gasgrid Finland ovat tutkineet yhteistyössä sähkön ja vedyn siirtoinfrastruktuurin tarjoamia mahdollisuuksia syksystä 2021 alkaen. Tämän *Energian siirtoverkot vetytalouden ja puhtaan energiajärjestelmän mahdollistajina* -yhteistyöhankkeen tulokset esitellään tässä hankkeen loppuraportissa. Yhteishanke on ollut osa laajempaa Business Finlandin rahoittamaa HYGCEL (Hydrogen and Carbon Value Chains in Green Electrification) -hankekokonaisuutta, jonka julkisessa hankeosuudessa yliopistot ja yritykset tutkivat yhdessä energiamurroksen, energiajärjestelmän ja vetytalouden järjestelmätason vaikutuksia.

Kiitämme hankkeen mahdollistamisesta Business Finlandia sekä arvokkaasta osallistumisesta markkinatoimijoita ja sidosryhmiä, jotka ovat antaneet tärkeää palautetta hankkeen eri vaiheissa tutkimustyön ohjaamiseen ja kehittämiseen. Esitämme lämpimät kiitokset myös hankkeen toteutukseen osallistuneille tutkimus- ja kehitystahoille – sekä ennen kaikkea projektitiimille. Olette kaikki vieneet osaltanne Suomen energiajärjestelmän kehitystä merkittävän askeleen eteenpäin!

Vaikka yhteistyöhanke tulee tältä erää päätökseen, yhtiöiden välinen yhteistyö sähkö- ja vetyinfrastruktuurin suunnittelussa jatkuu. Yhtiöiden yhteisenä tavoitteena on edistää Suomen kilpailukykyä suunnitteleamalla ja toteuttamalla tehokkaimmat siirtoratkaisut kehittyvässä energiajärjestelmässä.

Mikko Heikkilä

Sara Kärki

Päällikkö, strateginen verkkosuunnittelu
Fingrid OyjJohtaja, vetykehitys
Gasgrid Finland Oy

7.11.2023

Raportin sisältö

Esipuhe.....	2
Raportin sisältö	3
Lyhenneluettelo	5
Tiivistelmä.....	6
1 Hankkeen tavoitteet ja loppuraportin sisältö	7
2 Toimintaympäristön ja vetytalouden kuvaus.....	9
2.1 Vedyn rooli muuttuvassa energiajärjestelmässä	9
2.2 Vetytalouden arvoketjut	9
2.3 Toimintaympäristö on merkittävän muutoksen keskellä	10
2.4 Suomella on edellytykset kehittyä vetytalouden edelläkävijäksi	11
2.5 Infrastruktuurin rooli muuttuvassa energiajärjestelmässä	13
2.6 Gasgridin ja Fingridin energiainfrastruktuurin kehitystoimet	13
3 Säätely ja lainsäädäntö.....	16
3.1 Säätely ja sen vaikutukset vetytalouden kehitykseen	16
3.2 Vedyn turvalliseen käsittelyyn, varastointiin ja siirtoon liittyvä lainsäädäntö	17
4 Vedyn putkisiirron tekniset ratkaisut ja suunnitteluperiaatteet	19
4.1 Vedyn ominaisuudet	19
4.2 Vedyn siirron vaihtoehdot	20
4.3 Vedyn siirtoinfrastruktuurin kehittäminen markkinan tarpeisiin	22
4.4 Vedyn putkisiirtoinfrastruktuurin tekniset ratkaisut	23
4.5 Vetyputkiston suunnitteluun ja kustannuksiin vaikuttavat tekijät.....	24
5 Skenaarioiden ajurina merkittävän uuden vientiteollisuuden syntyminen	26
5.1 Suomen vetytalouden kehityksen suuntaviivat – kolme skenaariota	26
5.2 Puhdasta vetyä kotimaan käyttöön ja vientiin	30
5.3 Sähköntuotannon kasvu eri skenaarioissa - Suomen edullinen tuulisähkö kilpailukyvyyn ajurina.....	31
5.4 Vetyvarastojen rooli eri skenaarioissa - Vedyn varastoinnilla joustoa energiajärjestelmään	32
6 Siirtoinfrastruktuuri mahdollistaa investoinnit Suomeen	34
6.1 Siirtotarpeeseen vaikuttavat tekijät	34
6.2 Suomen sisäinen energiansiirtotarve moninkertaistuu nykyisestä	36
6.3 Sähkö- ja vetyinfrastruktuurin yhteiskehitys mahdollistaa siirrot	37
6.4 Suomen potentiaalın hyödyntämiseksi tarvitaan sijaintiin perustuvia kannustimia.....	43
6.5 Joustoa energiajärjestelmään varastoinnin avulla.....	47

7.11.2023

7	Vetytalouden investoinnit ja markkinat	49
	7.1 Valtavilla investoinneilla kohti puhdasta energiajärjestelmää	49
	7.2 Investoinneilla kiinni miljardien arvoiseen vetymarkkinaan	51
8	Johtopäätökset	53
	Liite 1: Skenaarioiden mallinnus ja taustaoletukset	56
	Liite 2: Skenaariomallinnuksen yksityiskohtaiset tulokset	59
	Liite 3: Vetytalouden kehitykseen vaikuttava regulaatio ja strategiat	61
	Vetytalouteen liittyvä EU-tason regulaatio	61
	Vetystrategiat keskeisissä jäsenvaltioissa	65
	Liite 4: Vedynsiirtoinfrastruktuurin osien kuvaus.....	69
	Liite 5: Vedyn jatkojalostuksen arvoketjut.....	74

7.11.2023

Lyhenneluettelo

AFIR	Alternative Fuels Infrastructure regulation
BHC	Baltic Hydrogen Collector
CCfD	Carbon Contracts for Difference
CBAM	Carbon Border Adjustment Mechanism
CO2	Hiilidioksidi
DA	Delegated Act
EED	Energy Efficiency Directive
EHB	European Hydrogen Backbone
ENTSO-E/G	European Network of Transmission System Operators for Electricity / Gas
ETD	Energy Taxation Directive
ETS	Emission Trading System
EU	European Union
FT	Fischer-Tropsch
IEA	International Energy Agency
LRC	Lined Rock Cavern
NHR	Nordic Hydrogen Route
NBHC	Nordic-Baltic Hydrogen Corridor
PEM	Polymer Electrolyte Membrane
PPA	Power Purchase Agreement
RED	Renewable Energy Directive
RFNBO	Renewable Fuels of Non-Biological Origin
rWGS	Reverse water-gas shift reaction
SMR	Steam Methane Reforming

7.11.2023

Tiivistelmä

Suomella on kaikki edellytykset saavuttaa Euroopan johtava asema vetytaloudessa. Suomessa on suuri uusiutuvan sähkön tuotannon potentiaali, vahva sähkön kantaverkko, osaavaa työvoimaa, sekä useita yrityksiä toimimaan osana vetytalouden arvoketjuja. Uusiutuvalla tai päästöttömällä sähköllä tuotettu vety sekä siitä jatkojalostetut tuotteet mahdollistavat fossiilisista polttoaineista eroon pääsemisen, ja niistä voi kehittyä Suomelle merkittävä vientiteollisuus. Suomessa on käynnistetty useita kymmeniä teollisia vetyhankkeita liittyen muun muassa fossiilivapaan teräksen tuotantoon ja vedystä jatkojalostettuihin sähköpolttoaineisiin.

Vetytalouden kasvun mahdollistamisessa energiansiirto ja investointien sijainti ovat keskeisessä roolissa sähkön ja vedyn saatavuuden varmistamiseksi. Energian siirtotarpeet kasvavat sähkön ja vedyn tuotannon ja kulutuksen jakautuessa eri puolille Suomea. Suomen potentiaalinen saavuttamisessa sähkön ja vedyn siirtoinfrastruktuurien kehittäminen on avainasemassa. Suuret siirtotarpeet ovat hallittavissa vain sähkö- ja vetyinfrastruktuurin yhteissuunnittelulla, jossa hyödynnetään molempia infrastruktuureja tehokkaasti. Tämän mahdollistamiseksi vetytalouden investointien sijainnin merkitys korostuu. Vetyverkkoa hyödyntämällä vedyn tuotanto voi sijoittua lähemmäs sähkön tuotantoa ja energiaa voidaan siirtää vetynä kauempana sijaitseviin vedyn käyttö- ja jatkojalostuskohteisiin. Suurten energiamäärien siirto vetynä on myös selvityksen perusteella kustannustehokkaampaa, jos energian loppukäyttö on vetynä. Lisäksi kansainvälisten vedynsiirtoyhteyksien rakentaminen laajentaa vetymarkkinaa ja luo toimijoille uusia liiketoimintamahdollisuuksia vedyn arvoketjujen eri vaiheisiin.

Suuren kokoluokan vedyn putkisiirtoinfrastruktuuri on teknisesti toteutettavissa. Käyttökokemuksia vedyn suuren kokoluokan putkisiirrosta ei pohjoismaisessa toimintaympäristössä vielä ole, mutta suunnittelun, toteutuksen ja käytön lähtökohtana voidaan käyttää vuosikymmenten kokemusta metaaniputkistoista. Lisäksi vedylle suunniteltua ja käytössä olevaa siirtoputkistoa on maailmassa, yhteensä noin 5000 km. Avoimia kysymyksiä liittyen muun muassa teknisen toteutuksen yksityiskohtiin, vedyn teknisiin standardeihin, asiakkaiden liityntäperiaatteisiin sekä vedyn laatuvaatimuksiin, on kehitettävä eteenpäin lähivuosina vetyinfrastruktuurin ja markkinan mahdollistamiseksi.

Vetytalouden investoinneilla päästään kiinni miljardien arvoiseen vetymarkkinaan. Vetytalouden investoinnit voivat ylittää 2030-luvun alussa useisiin kymmeniin miljardeihin euroihin. Vetyteollisuudesta voi kehittyä Suomen hyvinvointiyhteiskunnan uusi tukijalka, merkittävien investointien mahdollistaessa uusien työpaikkojen syntymistä, verotuloja sekä kestäväää kasvua. Vetytalouden arvoketjut ovat laajoja ja monikerroksisia. Ne mahdollistavat laitosten ja infrastruktuurin suunnittelun, rakentamisen ja operoinnin lisäksi paljon uusia mahdollisuuksia myös teknologiateollisuudelle kuin uusien palveluiden kehitykseen. Vaikka investoinnit vetytalouden kehityksen mahdollistavaan energiainfrastruktuuriin ovat merkittäviä, niin ne ovat suhteellisesti maltillisella tasolla verrattuna potentiaaleihin kokonaisinvestointeihin vetyarvoketjuissa. Edistämällä vetytalouden investointeja Suomeen voimme saavuttaa tavoitellun johtavan aseman Euroopan vetytaloudessa ja tuottaa yli 10 % EU:n tarvitsemasta vedystä sekä sen jatkojalosteista.

Gasgrid Finland ja Fingrid näkevät vedyn ja sähkön siirtoinfrastruktuurien yhteissuunnittelun tärkeänä mahdollisimman kustannustehokkaan energiajärjestelmän kehittämiseksi. Yhtiöiden yhteisenä tavoitteena on edistää Suomen kilpailukykyä kehittämällä energiainfrastruktuuria kokonaisvaltaisesti tulevaisuuden asiakastarpeet huomioiden sekä suunnittelemalla ja toteuttamalla tehokkaimmat siirtoratkaisut kehittyvässä energiajärjestelmässä.

7.11.2023

1 Hankkeen tavoitteet ja loppuraportin sisältö

Fingrid ja Gasgrid Finland ovat Suomen siirtoverkkotoimijoita, jotka vastaavat sähkön ja kaasun siirtoinfrastruktuurista ja niiden operoinnista. Lisäksi Gasgrid Finland on saanut valtiolta tehtäväksi edistää kansallisen vetyverkon, kansainvälisen infrastruktuuriyhteistyön sekä Itämeren alueen vetymarkkinan kehittymistä mahdollisimman nopeasti. Tätä tehtävää varten Gasgrid on perustanut Gasgrid Vetyverkot Oy -nimisen yhtiön. Yhtiöt seuraavat ja osallistuvat aktiivisesti Suomen energiajärjestelmien ja markkinoiden kehitykseen. Siirtoverkkoyhtiöinä Gasgridin ja Fingridin tavoitteena on myös kehittää markkinoita sekä järjestelmiä palvelemaan suomalaista yhteiskuntaa, teollisuutta ja yrityksiä sekä kuluttajia laajemminkin.

Fingrid ja Gasgrid Finland aloittivat syksyllä 2021 yhteisen tutkimushankkeen, jonka tarkoituksena on tutkia ja luoda uutta osaamista energian siirtojärjestelmien roolista ja mahdollisuuksista vetytaloudessa. Yhteishanke on ollut osa laajempaa Business Finlandin rahoittamaa HYGCEL (Hydrogen and Carbon Value Chains in Green Electrification) -hankekokonaisuutta, jonka julkisessa hankeosuudessa yliopistot ja yritykset tutkivat yhdessä energiamurroksen, energiajärjestelmän ja vetytalouden systeemitason vaikutuksia. Fingrid ja Gasgrid ovat toteuttaneet yhteisen tutkimushankkeensa julkisen hankekokonaisuuden rinnalla.

Tutkimushankkeen tavoitteena on ollut luoda uutta tietoa ja kasvattaa yritysten ja ekosysteemin osaamista vetytalouden, sektori-integraation sekä energiajärjestelmien yhteiskehityksen alalla.

Hankkeen päätavoitteena on ollut tutkia ja luoda uutta osaamista energian siirtojärjestelmien roolista ja mahdollisuuksista vetytalouden tukena sekä viennin mahdollistamisessa. Hankkeen tarkempina tavoitteina oli:

- Luoda vetytalouden mahdolliset skenaariot ja tutkia niiden vaikutukset energiajärjestelmiin (sähkö, kaasu/vety)
- Analysoida ja määrittää mitkä ovat Suomen yhteiskunnan kannalta kustannustehokkaimmat siirtoverkkojen kehityspolut
- Määritellä vetytalouden mahdollistama kasvu- ja vientipotentiaali Suomelle, mikäli siirtoverkot tukevat kehitystä
- Tutkia ja kehittää vedyn siirtoverkon rakentamisen tekniset edellytykset sekä rakentamiskustannukset
- Analysoida vetytalouden markkinoiden mahdollisia toimintamalleja ja arvoketjussa toimijoiden rooleja
- Tutkia mitkä ovat sähkön ja vedyn siirtoverkkojen kehitystarpeet perustuen markkina- ja asiakastarpeisiin

Gasgridin konkreettisenä projektitavoitteena on ollut osaamisen kasvattaminen ja tulevaisuuden liiketoiminnan tarpeiden parempi ymmärrys. Alla on listattu osaamisen kehittämisen kannalta keskeiset kysymykset ja projektissa tuotettavat tulokset ymmärryksen luomiseksi:

1. Mikä on vetytalouden luoma kasvu- ja vientipotentiaali, mikäli siirtoverkot tukevat kehitystä? Mitä konkreettisia toimia vetytalouden luoman kasvu- ja vientipotentiaalın mahdollistaminen vaatii?
2. Miten kaasuverkko voi tukea sähköverkkoa kasvavan sähköistymisen ja energiansiirtotarpeiden myötä? Mitä konkreettisia toimia tarvitaan?

7.11.2023

3. Mitkä ovat suomalaisen yhteiskunnan kannalta energian siirtoverkkojen kokonaistaloudellisimmat kehityspolut?
4. Mitä konkreettiset toimet tarkoittavat Gasgridin kannalta? Mikä on Gasgridin rooli vetytaloudessa ja Suomen energian ja raaka-aineiden siirrossa tulevaisuudessa?

Fingridin konkreettisenä projektitavoitteena on ollut myös osaamisen kasvattaminen sekä kasvattaa ymmärrystä sähköä käyttävän vetytalouden vaikutuksista sähkön siirtotarpeeseen. Konkreettisenä tavoitteena on ollut myös tuoda hankkeessa saadut opit osaksi Fingridin jatkuvaa sähköverkon suunnittelutyötä. Alla on listattu osaamisen kehittämisen kannalta keskeiset kysymykset ja projektissa tuotettavat tulokset ymmärryksen luomiseksi:

1. Mikä on vetytalouden luoma kasvu- ja vientipotentiaali, mikäli siirtoverkot tukevat kehitystä? Mitä konkreettisia toimia vetytalouden luoman kasvu- ja vientipotentiaalin mahdollistaminen vaatii?
2. Miten kaasuverkko voi tukea sähköverkkoa kasvavan sähköistymisen ja energiansiirtotarpeiden myötä? Mitä konkreettisia toimia tarvitaan?
3. Mitkä ovat suomalaisen yhteiskunnan kannalta energian siirtoverkkojen kokonaistaloudellisimmat kehityspolut?
4. Miten vetytalous vaikuttaa sähkön kulutus- ja tuotantorakenteeseen sekä näiden kautta sähkön siirtotarpeeseen ja siirtoverkon investointeihin.

Yhteishankkeessa on pyritty luomaan kattavaan tutkimus- ja mallinnustyöhön perustuen uutta tietoa ja vastaamaan näihin edellä listattuihin kysymyksiin. Yhteishankkeen alussa haastattelimme useita suomalaisia yrityksiä selvittääksemme heidän näkemyksiään vetytaloudesta. Yritysten näkemyksissä korostui tarve kehittää sähkö- ja vetyinfrastruktuuria yhtäaikaaisesti ja kokonaisuus huomioiden. Suomalaiset yritykset näkivät vetyverkolla useita mahdollisia rooleja Suomen teollisuudessa. Toimijat toivat esiin yhteistyön merkitystä sekä infrastruktuurin kehityksessä että teollisuuden arvoketjujen muodostamisessa.

Olemme tutkineet yhteishankkeessa energian siirtoverkkojen roolia vetytalouden kasvun ja puhtaan energiajärjestelmän mahdollistajina sekä analysoineet investointitarpeita ja mahdollisen tulevan vetymarkkinan arvoa. Olemme hahmotelleet erilaisia skenaarioita tulevaisuuden vetytalouden kehittymisestä Suomessa sekä energiainfrastruktuurin kehittymisestä. Lisäksi olemme tutkineet vetytalouden arvoketjuja, selvittäneet vetyinfrastruktuuriin liittyviä teknisiä kysymyksiä, vetyinfrastruktuurin rakentamista ja sen kustannuksia sekä vetytalouteen liittyvän regulaation tilaa ja kehitystarpeita.

Tässä raportissa kuvaamme ensin nykyisen vetytalouden toimintaympäristöä (luku 2) ja vetytalouden rakentamiseen vaikuttavaa sääntelyä sekä lainsäädäntöä (luku 3). Tämän jälkeen siirrymme vedyn putkisiirron teknisiin ratkaisuihin ja suunnitteluperiaatteisiin (luku 4). Näiden pohjalta olemme laatineet kolme skenaariota vetytalouden ja siirtoinfrastruktuurin kehitykselle Suomessa (luku 5), joihin saimme myös arvokasta palautetta sidosryhmiltä. Skenaarioiden pohjalta olemme tarkastelleet siirtoinfrastruktuurin kehitystarpeita ja roolia Suomen energiajärjestelmässä (luku 6) sekä tarvittavia investointeja vetytalouden kasvuun (luku 7). Lopuksi olemme koostaneet yhteishankkeesta saadut johtopäätökset ja kuvanneet yhteistyömme jatkoa (luku 8).

7.11.2023

2 Toimintaympäristön ja vetytalouden kuvaus

2.1 Vedyn rooli muuttuvassa energiajärjestelmässä

Yhteiskunnan sähköistyminen nähdään tärkeänä talouskasvulle ja ilmastotavoitteiden saavuttamiselle. On kuitenkin aloja, joiden sähköistäminen on haastavaa. Vety tai vedyn jatkojalosteet, potentiaalisina skaalautuvina ratkaisuin, ovat tärkeässä roolissa päästöjen vähentämisessä sekä hiilineutraalisuustavoitteiden saavuttamisessa näillä aloilla. Vety on myös tärkeä energian tehokkaan siirron ja varastoinnin mahdollistamisessa. Vetyteollisuuden kasvumahdollisuudet perustuvat siihen, että uusiutuvalla tai päästöttömällä sähköllä tuotettu vety mahdollistaa fossiilisten raaka-aineiden ja polttoaineiden käytön lopettamisen monilla teollisuuden ja liikenteen sektoreilla. Puhtaan vedyn rooli Suomen sekä koko Euroopan hiilidioksidivähennämätavoitteiden saavuttamisessa on merkittävä.

Vetytalouden kehityksen nopeuteen vaikuttaa esimerkiksi EU-tason sääntely. Kuten Euroopan unionin vetystrategiassa vuodelta 2020¹ todetaan, vety voi toimia raaka-aineena, polttoaineena, energiavektorina ja varastona. EU:n vetystrategian julkaisemisen jälkeen Euroopan komissio on julkaisut suuren määrän asiaan liittyviä poliittisia aloitteita, erityisesti Fit for 55 -paketissa, vedyn ja hiilidioksidipäästöttömän kaasun markkinapakettissa. Toukokuussa 2022, vastineena Venäjän aloittamalle sodalle Ukrainassa, Euroopan komissio julkaisi REPowerEU-suunnitelman², jonka tavoitteena on vähentää fossiilisen venäläisen energian tuontia, lisätä merkittävästi uusiutuvaa energiantuotantoa ja nopeuttaa uusiutuvan vedyn käyttöönottoa EU:ssa. REPowerEU-suunnitelmassa on asetettu tavoitteeksi, että EU-maat tuottavat vuosittain 10 Mt (333 TWh) puhdasta vetyä ja lisäksi tuovat vuosittain 10 Mt vetyä unionin ulkopuolelta vuoteen 2030 mennessä. Yhteenlaskettuna tämä tarkoittaisi noin 670 TWh suuruista Euroopan vetymarkkinaa. Lisäksi on myös merkittävät sitovat meri- ja lentoliikenteen tavoitteet päästövähennystavoitteet ja tavoitteet korvata yli puolet fossiilisesta vedystä puhtaalla vedyllä vuoteen 2035 mennessä.

2.2 Vetytalouden arvoketjut

Uusiutuvalla sähköllä tuotetusta puhtaasta vedystä voidaan jatkojalostaa tuotteita erilaisissa vetyarvoketjuissa, joita on havainnollistettu kuvassa 1.

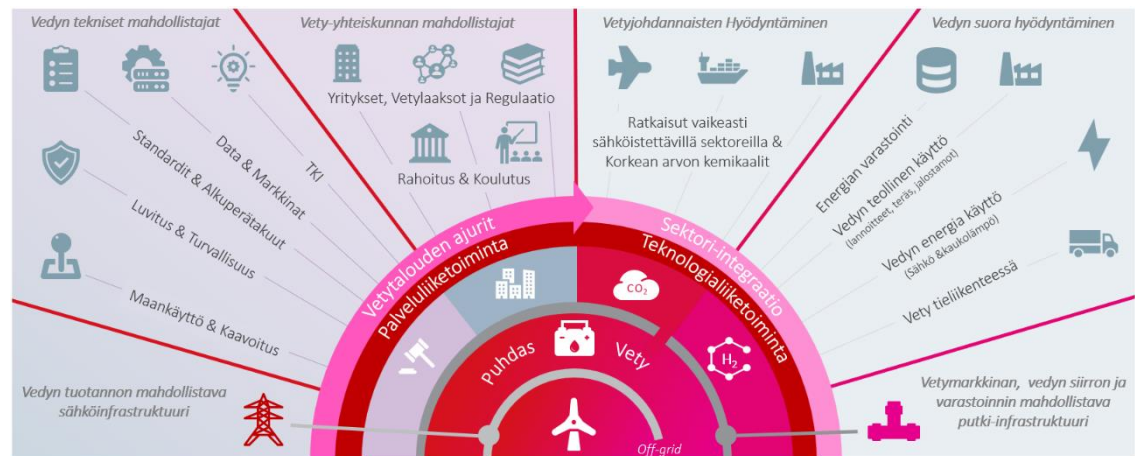
Sähköntuotannon ja elektrolyysin jatkeena on lukematon määrä vedyn hyödyntämisen kohteita niin teollisuudessa kuin liikenteessä, jotka moninkertaistavat vetyarvoketjujen määrän. Vedyn arvoketjujen arvonluonnissa korostuvat eri sektoreiden mahdollisuudet integroitua keskenään. Tästä esimerkkinä on vedyn tuotannon sivutuotteena syntyvän lämmön hyödyntäminen kuntien kaukolämpöverkoissa sekä kulutus- ja tuotantokapasiteetin joustava operointi markkinoita ja infrastruktuuria hyödyntämällä.

Vetytalouden arvoketjuihin liittyy runsaasti mahdollisuuksia ja siinä on useita erilaisia dimensioita. Koska vetyä voidaan hyödyntää moneen eri tarkoitukseen, ja eri käyttökohteilla on erilaiset teknologiset tarpeet sekä markkinat, tuotteiden, markkina-alustojen ja teknologioiden jatkuvalla kehityksellä on oleellinen rooli vetyarvoketjujen tulevaisuudessa.

¹ COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe - COM/2020/301 final

² REPowerEU (europa.eu)

7.11.2023



Kuva 1 Vetyarvoketjujen kehittämisen dimensiot

Vedyn arvoketjun voi jaotella vedyn mahdollistajiin, jotka toimivat vedyn tulevaisuuden ajureina, sekä vetyä hyödyntäviin arvoketjun teknisiin osiin, missä vedyn hyödyntäminen korostuu eri käyttösektoreilla. Vedyn tuotannon ja siitä tehtävien jatkojalosteiden lisäksi myös palvelu- ja teknologia-liiketoiminnot ovat tärkeitä vetyarvoketjujen uusia mahdollisuuksia sekä hankkeiden nopean kehitysaikataulun mahdollistajia.

Vetyarvoketjujen keskeisessä roolissa toimii myös energiainfrastruktuuri ja sen päälle rakentuvat markkinat, joita siirtymä fossiilisesta uusiutuvaan energiaan haastaa uudella tavalla. Uudet ratkaisut ja yhteiskunnan sähköistyminen asettavat merkittäviä kehitystarpeita energian siirtojärjestelmille ja syväälle sektori-integraatiolle. Tämä puolestaan asettaa vaatimuksia sekä vedyn että sähkön siirtoinfrastruktuurin kehitykselle.

2.3 Toimintaympäristö on merkittävän muutoksen keskellä

Suomessa käytetään tällä hetkellä noin 150 000 tonnia vuodessa (~5 TWh) fossiilisesta metaanista höyryreformoimalla tuotettua vetyä. Suomessa vedyn teollinen käyttö liittyy suurimmalta osin liikennepolttoaine- ja petrokemian teollisuuteen sekä lannoitteiden teolliseen valmistukseen. Sähköä Suomessa käytettiin vuonna 2021 noin 86 TWh ja sähköntuotannon kapasiteetti oli noin 18 000 MW.³

Toimintaympäristö energia-alalla on kuitenkin ollut erittäin merkittävässä muutoksessa viimeiset kaksi vuotta. Suomen hallitus linjasi syksyllä 2021, että Suomi luo vetystrategian ja tekee periaatepäätöksen vetytalouden tukemisesta ja tavoittelee jopa 10 % kaikesta EU:n puhtaasta vedyntuotannosta vuoteen 2030 mennessä. Toteutuessaan tämä tarkoittaisi, että Suomessa tuotettaisiin jopa miljoona tonnia puhdasta vetyä.

Tämän hankkeen aikana Fingridin saamien liityntäkyselyiden tahti on huomattavasti kiihtynyt⁴. Hanketta aloitettaessa vuonna 2021 Fingrid oli saanut noin 100 000 MW liityntäkyselyitä⁵. Kun Gasgrid ja Fingrid julkaisivat maaliskuussa 2022 hankkeen väliraportin liityntäkyselyitä oli jo 150 000 MW. Nyt hankkeen päättyessä Fingrid on saanut yli 300 000 MW:n edestä tiedusteluja kantaverkkoon

³ [Sähkön+toimitusvarmuus+vuonna+2022.pdf \(energiavirasto.fi\)](#)

⁴ [Fingridin sähköjärjestelmävisio 2023 \(Fingrid, 2023\)](#)

⁵ [Fingrid-konsernin puolivuosisikatsaus 1.1.-30.6.2021 - Fingrid](#)

7.11.2023

liittymisestä. Valtaosa liityntäkyselyistä koskee maatuulivoimaa, mutta myös merituulivoiman ja aurinkovoiman rooli on kasvanut.

Hankkeen väliraportissa arvioimme, että Suomen puhtaan vedyn tuotantopotentiaali riittää sekä kotimaan tarpeisiin että vientiin. Silloin laskimme, että mikäli 150 000 MW liityntäkyselyjen taustalla olevat hankkeet toteutuisivat, ne tuottaisivat noin 500 TWh sähköä vuodessa. Tästä olisi hyödynnettävissä lähes 450 TWh uuden teollisuuden tarpeisiin, mikä vastaisi yli 300 TWh puhtaan vedyn tuotantoa.

Lisäksi Suomessa on hankkeen aikana käynnistetty useita kymmeniä vetyyn liittyviä hankkeita⁶. Hankkeen käynnistymisen jälkeen näkymä vedyn roolista tulevaisuuden energiajärjestelmässä on voimistunut jatkuvasti ja vedystä yhtenä hiilineutraalisuuden mahdollistavana ratkaisuna on tullut laajasti hyväksytty perusoletus energia-alan skenaarioissa.

2.4 Suomella on edellytykset kehittyä vetytalouden edelläkävijäksi

Keskeistä vedyntuotannon sijoittumisen kannalta on eri maiden kilpailukyky. Kilpailukykyyn vaikuttavat oleellisesti investointikustannukset uusiutuvan sähkön ja vedyn tuotantoon ja puhtaan vedyn tuotannossa käytettävä sähkön hinta, saatavuus ja vähäpäästöisyys. Näiden lisäksi kilpailukykyyn vaikuttavat esimerkiksi sivutuotteiden hyödyntäminen ja jatkojalostusmahdollisuudet. Lisäksi merkittävää on investointiympäristön muu suotuisuus sääntelyn, luvituksen ja yhteiskunnan vakauden osalta. Keskeistä ovat myös liityntämahdollisuudet energian siirtoverkkoihin, osaavan työvoiman saatavuus ja yritykset osana vedyn arvoketjua.

Aktiivista työtä pullonkaulojen tunnistamisessa ja ratkaisemisessa tarvitaan läpi arvoketjujen, jotta vetytalouden kasvu mahdollistuu. Esimerkiksi hidas luvitus on laajalti tunnistettu asia, johon Suomi puuttuu aktiivisesti luvituksen keskitysohjelmalla⁷. Uusiutuvan energian tavoitteita koskevan sääntelyn pitkäjänteisyys, sääntelyn selkeys, raportointivelvollisuuksien tarkoituksenmukaisuus sekä laaja investointiympäristön kehittäminen ja Suomen kansainvälisen näkyvyyden kehittäminen ovat tärkeitä tekijöitä uusien investointien toteutuksen näkökulmasta. Avainasemassa on uusiutuvan sähköntuotannon rakentaminen Suomeen ja se, miten energiainfrastruktuuri pystyy sopeutumaan kasvavaan sähkön tarjontaan ja volatilitettiin.

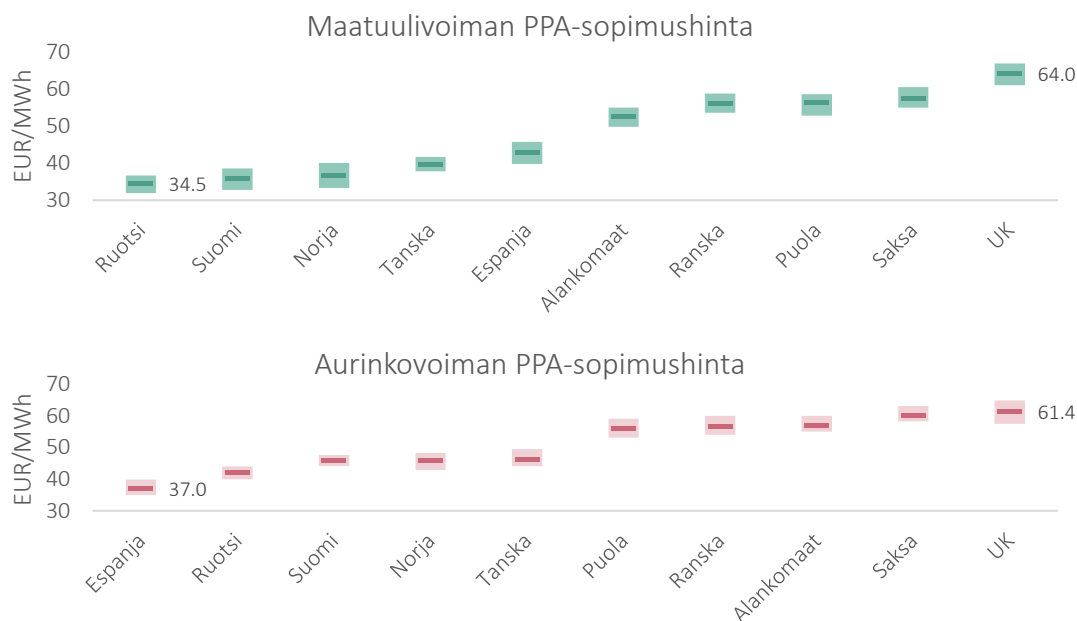
Suomen keskeisenä kilpailuetuna uusiutuvan vedyn tuotannossa on suomalaisen aurinko- ja tuulivoiman kilpailukyky, kuten Bloombergin toteuttama pitkäaikaisten sähkönostosopimusten hintavertailu osoittaa (Kuva 2). Vertailun mukaan Suomen PPA-sopimushinnat ovat Euroopassa kolmen edullisimman maan joukossa. Viime aikoina investointiympäristössä on tapahtunut merkittäviä muutoksia, kuten korkotason nousu ja tuulivoiman kannattavuuden lasku, jotka ovat huomattavasti hidastaneet uusien tuulivoimainvestointien päätöksiä Suomessa vuonna 2023⁸. Toisaalta PPA-sopimushinnat ovat todennäköisesti nousseet kaikissa maissa kevään 2022 jälkeen, mutta oletettavasti Suomen suhteellinen asema muihin maihin verrattuna on säilynyt samankaltaisena.

⁶ Suomen vihreät investoinnit – päivittyvä dataikkuna (Elinkeinoelämän keskusliitto, 8.5.2023)

⁷ <https://ym.fi/-/seurantaryhma-edistamaan-sujuvaa-ymparistollista-luvitusta>

⁸ <https://yle.fi/a/74-20048410>

7.11.2023



Kuva 2 Suomen maatuulivoiman PPA-sopimushinta (power purchase agreement) on vuoden 2022 alkupuoliskolla ollut Euroopan toiseksi edullisin ja aurinkovoiman kolmanneksi edullisin⁹

Gasgrid ja Fingrid ovat hankkeen aikana seuranneet aktiivisesti toimintaympäristön muutoksia ja analysoineet mahdollisia tulevaisuuden kehityspolkuja sekä vetytalouden kehitysmahdollisuuksia. Kiihtynyt kehitystahti ja muut entistä nopeammin toimintaympäristöä muuttavat tekijät johtavat kuitenkin siihen, että lyhyelläkin aikavälillä voi tapahtua merkittäviä energiajärjestelmään vaikuttavia muutoksia, joita voi olla hankala ennustaa. Yhtiöt kuitenkin näkevät, että lyhyen aikavälin suhdannemuutoksista huolimatta Suomella on erinomaiset edellytykset kehittyä vetytalouden edelläkävijäksi.

⁹ Wind and Solar Corporate PPA prices Rise Up To 16.7% Across Europe (BloombergNEF, 28.4.2022)

7.11.2023

2.5 Infrastruktuurin rooli muuttuvassa energiajärjestelmässä

Suomen erinomaisten puhtaan energian resurssien, vahvojen energiansiirtoverkkojen, kilpailukykyisen sähkön hinnan sekä korkean teknologisen osaamisen myötä, Suomella on erinomaiset edellytykset olla vetytalouden kehityksen edelläkävijä. Suomen suuren uusiutuvan energian potentiaalın hyödyntäminen vetytaloudessa vaatii kuitenkin huomattavia investointeja niin sähkön ja vedyn tuottajilta, muilta teollisilta toimijoilta kuin siirtoverkko-yhtiöiltä.

Hankkeen edetessä ja vetytalouden näkymien kasvaessa, on tullut tarve nopeuttaa myös energiainfrastruktuurin kehitystä mahdollistamaan vetytalouden investointien toteutuminen Suomeen ja erilaisten vetytalouden arvoketjujen syntyminen.

Vetytalouden kehitysnäkymien myötä on selvää, että sähköverkkoa on tarpeen laajentaa ja vahvistaa uusiutuvan sähkön tuotannon ja sitä käyttävän puhtaan vedyn tuotannon liittymisen ja sähkön saatavuuden mahdollistamiseksi. Ilman sähköverkon vahvistamista ei vedyn tuotantopotentiaalia saada hyödynnettyä täysimääräisesti, sillä ilman uusiutuvan energian tuotannonlisäystä ja sähkönsiirtoverkon mahdollistamaa siirtoa, vihreän vedyn laajamittainen tuottaminen on kallista ja tehotonta.

Energian siirto ja varastointi vetynä on myös tärkeä mahdollistaja Suomen vetytalouden potentiaalın saavuttamisessa ja kustannustehokkaan energiajärjestelmän kehityksessä. Vetyverkon avulla saadaan siirrettyä vetyä kustannustehokkaasti suuressa mittakaavassa toimijoiden välillä ja mahdollistetaan vetytalouden kasvu sekä uusia liiketoimintamahdollisuuksia arvoketjutoimijoille.

Myös vedyn saatavuuden ja kilpailukykyyn mahdollistamiseksi vedyn tuotanto- ja kulutuskohteiden yhdistäminen fyysisesti on tärkeää. Vetyinfrastruktuuri voi yhdistää useampia tuottajia ja kuluttajia luoden näin edellytykset laajemmalle markkinakehitykselle. Laajan vetymarkkinan muodostuminen vähentää toiminnan riskejä vedyn tuotannossa ja kulutuksessa. Vetyverkko voi myös toimia itsessään vedyn puskurivarastona, kulutusjouston mahdollistajana sekä sähköjärjestelmän tukena energiansiirrossa. Lisäksi kansainvälinen vetyverkko voi mahdollistaa pääsyn useammille loppukäyttömarkkinoille sekä Suomen rajojen ulkopuolella sijaitseviin geologisiin vetyvarastoihin.

2.6 Gasgridin ja Fingridin energiainfrastruktuurin kehitystoimet

Fingrid on laatinut sähköjärjestelmävision¹⁰ sekä päivittänyt sen mukaisesti kantaverkon kehittämissuunnitelman¹¹, jossa esitetään kehitystarpeet ja suunnitellut investoinnit seuraavalle kymmenelle vuodelle. Investoinnit kantaverkkoon kasvavat aiemmin arvioidusta reilusta kolmesta miljardista neljään miljardiin euroon. Kantaverkkoinvestointien tavoitteena on luoda edellytykset Suomen kilpailukykylle teollisuuden investoinneissa sekä mahdollistaa hiilineutraaliustavoitteiden saavuttaminen vuoteen 2035 mennessä. Kehittämissuunnitelma perustuu Fingridin asiakkaidensa kanssa yhteistyössä laatimiin verkko- ja liityntäsuunnitelmiin sekä maiden ja alueiden välisen sähkönsiirron vahvistustarpeisiin. Suunnitelma on sovitettu yhteen Euroopan unionin kymmenvuotisen verkkosuunnitelman kanssa.

¹⁰ Fingridin sähköjärjestelmävisio 2023 (Fingrid, 2023)

¹¹ Kantaverkon kehittämissuunnitelma 2024–2033 – luonnos (Fingrid, 2023)

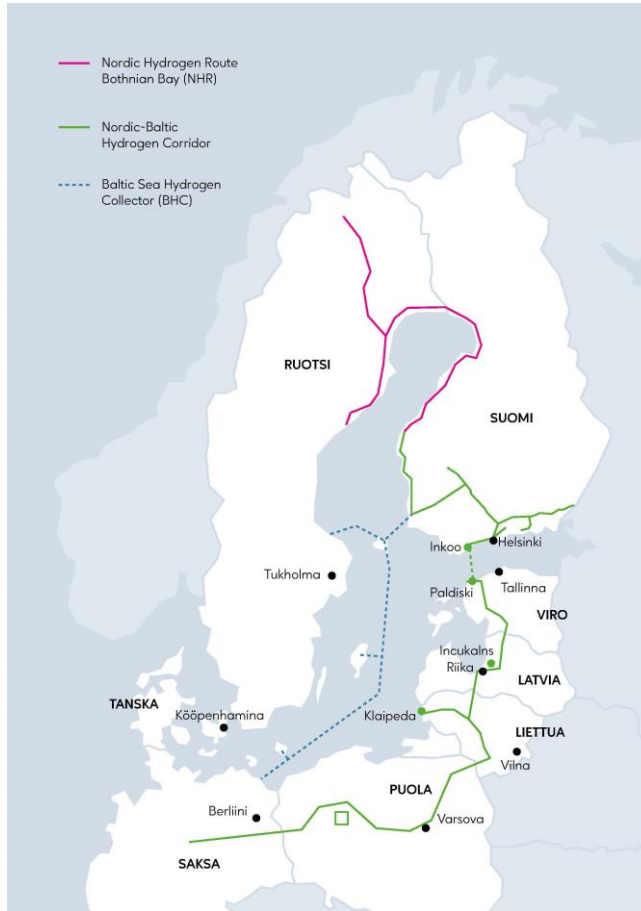
7.11.2023

Gasgrid on aktiivisesti lähtenyt kehittämään siirtoalustaansa ja palveluitaan vastaamaan muuttuvan energiajärjestelmän ja asiakkaidensa tarpeisiin. Gasgrid on osallistunut aktiivisesti European Hydrogen Backbone (EHB) -ryhmän eli 33 eurooppalaisen energiainfrastruktuuryhtiön aloitteeseen, joka edistää visiota yhtenäisestä vetyinfrastruktuurin ja markkinan kehityksestä Euroopassa. Gasgrid on osallistunut Itämeren alueen vetyverkon kehitysvision luomiseen EHB-ryhmässä ja käynnistänyt visioon perustuen kolme konkreettisia suuren kokoluokan vetyinfrastruktuurin kehityshankkeita. Gasgridin käynnistämät vetyinfrastruktuurin kehityshankkeet ovat:

- Nordic Hydrogen Route - Bothnian Bay, Gasgrid Finlandin ja Nordion Energin yhteinen hanke, joka vauhdittaa vetytalouden luomista kehittämällä rajat ylittävän vetyinfrastruktuurin ja avoimen vetymarkkinan Perämeren alueelle. Hankkeen tavoitteena on edistää hiilineutraalisuustavoitteiden saavuttamista, tukea alueellista vihreää teollistumista, talouskehitystä ja Euroopan energiaomavaraisuutta. Lisäksi Nordic Hydrogen Route vauhdittaa vetytalouden luomista ja uusia investointeja, joilla tuetaan Euroopan energiasiirtymää ja parannetaan vihreän ja kilpailukykyisen kotimaisen energian saatavuutta.
- Baltic Sea Hydrogen Collector -hankkeessa tutkitaan mahdollisuutta rakentaa Suomen, Ruotsin ja Keski-Euroopan yhdistävä laajamittainen offshore-vetyputki-infrastruktuuri, joka mahdollistaa puhtaan ja kestäväen vedyn tuottamisen Euroopan tarpeisiin. Hankkeessa ovat mukana Gasgrid Finland, Nordion Energi sekä teollisuusyritykset OX2 ja Copenhagen Infrastructure Partners. Gasgridin osuus keskittyy erityisesti Suomen merialueilla olevan tuulivoiman hyödyntämisen mahdollistamiseen ja Itämeren alueen markkinan kehitykseen.
- Nordic-Baltic Hydrogen Corridor -hanke, jonka tavoitteena on vetyinfrastruktuurin kehittäminen Suomesta Viron, Latvian, Liettuan ja Puolan kautta Saksaan. Gasgridin osuus liittyy erityisesti koko Etelä-Suomen kattavan vetyverkon ja Itämeren alueen markkinan kehittämiseen. Hankkeen tavoitteena on tukea energiahuollon monipuolistamista ja uusiutuvan energian nopeutettua käyttöönottoa. Vetyinfrastruktuurin kehittyessä Itämeren ympäristöön, voidaan lisäksi luoda vahva vedyn markkina-alue, mikä mahdollistaa runsaasti saatavilla olevien ja kilpailukykyisten uusiutuvien energiasurssien laajamittaisen hyödyntämisen.

Kaikki vetyinfrastruktuurin kehityshankkeet tähtäävät Suomen ja Itämeren alueen vetyinfrastruktuurin kehitykseen ja avoimen vetymarkkinan mahdollistamiseen vuoteen 2030 mennessä. Kuva 3 esittelee Gasgrid Finlandin suuren kokoluokan vedynsiirtoinfrastruktuurin kehityshankkeet.

7.11.2023



Kuva 3 Gasgrid Finlandin suuren kokoluokan vedynsiirtoinfrastruktuurin kehityshankkeet kartalla
(Kuva: Gasgrid Finland)

7.11.2023

3 Sääntely ja lainsäädäntö

3.1 Sääntely ja sen vaikutukset vetytalouden kehitykseen

Vetytalouden kehitystä ohjaa vahvasti Euroopan energia- ja ilmastotavoitteet. Joulukuussa 2019 Euroopan komissio julkaisi Green Deal -aloitteensa¹², jossa asetetaan lainsäädäntötavoitteet ja keskitytään ilmastopolitiikkaan ja kiertotalouteen. Green Dealia seurasi Fit For 55 -paketin julkaisu heinäkuussa 2020. Kunnianhimoiset uusiutuvan energian direktiivin päästövähennykset ja uusiutuvan energian tavoitteet vuoteen 2030 mennessä, eivät olisi mahdollista ilman vetyä.

Euroopan komissio on myös esittänyt erilaisia vetymarkkinoita tukevia rahoitusmekanismeja, kuten Covid-19-pandemian aikana käyttöön otetun elpymissuunnitelman NextGenerationEU:n, jonka tavoitteena on nopeuttaa vihreitä investointeja jäsenvaltiotasolla sekä EU:n innovaatorahaston investointituet kasvihuonekaasupäästöjä vähentäviin teknologioihin. Näiden lisäksi esiteltiin Hydrogen Bank, joka pilotoi ensimmäistä 800 miljoonan euron huutokauppaa vuoden 2023 viimeisellä neljänneksellä.

Näillä kaikilla politiikka-aloitteilla on suora tai välillinen vaikutus vetymarkkinoiden kehitykseen Suomessa. Rahoitusmekanismit ovat avoimia suomalaisyritysten haettavaksi ja tarjoavat mahdollisuuden saada lisärahoitusta kansallisten järjestelmien lisäksi. EU-tason lainsäädäntökehyksen täydentämiseksi jäsenvaltiot ovat myös toteuttaneet omia toimia vetymarkkinan toteuttamiseksi.

Koska vedyn rooli on merkittävä päästövähennysten saavuttamisessa, on EU-komissio luonut laajaa sääntelyä puhtaaseen vetyyn liittyen. EU-komissio on säätänyt uusiutuvan vedyn määritelmän sekä sen tuotantosäännöt. Lisäksi on luotu vaatimuksia uusiutuvan vedyn käytölle. Kunnianhimoisimmat tavoitteet vedylle ja etenkin sen johdannaisille, asetettiin meri- ja lentoliikenteeseen, joissa vaatimukset polttoaineen kuluttajalle tai jakelijalle ulottuu aina vuoteen 2050 asti.

Tämän lisäksi vety ja sen johdannaiset tulevat osaksi kunkin jäsenvaltion liikenteen jakeluvuoroitetta vuoteen 2030 mennessä, ja teollisen puhtaan vedyn käytön on korvattava suurin osa fossiilisesta vedystä vuoteen 2035 mennessä. Puhtaan vedyn jatkojalostus- ja loppukäyttömarkkinoille kohdistuvaa käyttöä teollisuus- ja liikennepolttoainesektoreilla ohjaa sääntely, joka ottaa yleisesti kantaa teollisuudessa käytettävän puhtaan vedyn käyttömääriin, sekä liikennepolttoaineiden kohdalla asettaa spesifejä tavoitteita esimerkiksi puhtaan vedyn avulla tuotetulle lentopolttoaineelle.

Moni vetysääntelyyn oleellisesti liittyvä kokonaisuus, kuten uusiutuvan energian direktiivi ja meri- sekä lentoliikenteen sääntelypaketti, ovat valmistuneet tämän vuoden aikana ja ovat siten luoneet vahvempia tulevaisuuden kysynnän näkymiä puhtaalle vedylle. Edellä mainituissa sääntelykokonaisuuksissa korostuu niiden aikajänne, sillä uusiutuvan energian direktiivin tavoitteet keskittyvät pääosin vuoteen 2030, kun taas meri- ja lentoliikenteen tavoitteet ulottuvat aina vuoteen 2050 asti. On myös nähtävissä, että esimerkiksi uusiutuvan energian direktiiviä ja RFNBO-vedyn tuotantosääntöjä (delegoidut säädökset) tullaan päivittämään ennen vuotta 2030, joka luo epävarmuutta vetysääntelyn linjauksista. Vuoden 2023 aikana valmistunee myös Vety- ja vähähiilisen kaasun paketti, joka luo edellytyksiä vetytalouden muodostumiselle, sekä vetykaasun käytöstä

¹² https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_fi

7.11.2023

nykyisissä maakaasuverkoissa. Vetytalouden tueksi on kaavailtu sekä kansallisia- että EU-tukia, tukien määristä ja niiden käytännöistä ei kuitenkaan vielä ole varmuutta. Kuva 4 kuvaa keskeisimpiä vetyyn liittyviä sääntelykokonaisuuksia.

PUHTAAN VEDYN SÄÄNNELTY TOIMINTAYMPÄRISTÖ	INFRASTRUKTUURI (Voimalajat, laiturit, putket ja tankkausasemat)	PUHDAS VETY JA SEN JOHDANNAISET Tuotannon Syötteet (Vesi, Hiilidioksidi, Sähkö)	TOIDANTOPROSESSI	KULUTUS (Teollisuus, liikenne ja kotitaloudet)
Uusiutuvan Energian Direktiivi, RED III		☑	☑	☑
RFNBO ⁽¹⁾ Delegoidut Säädökset	☐	☑	☑	
REfuelEU Aviation & FuelEU Maritime		☐	☐	☑
EU Päästökauppajärjestelmä, EU ETS		☑	☐	☑
Energiatotehokkuusdirektiivi, EED		☑	☑	☑
Hiilirajamekanismi, CBAM		☑	☑	☑
Vaihtoehtoisten polttoaineiden infra, AFIR	☑			
Energiaverotusdirektiivi, ETD		☑		
Kaasupaketti ⁽²⁾	☑	☐	☑	

(1) RFNBO = Renewable fuels of non-biological origin = EU:n määrittelemä uusiutuvalle vedylle ja vetyjohdannaisille, (2) Kaasupaketti = Direktiivi uusiutuvien kaasujen, maakaasun ja vedyn sisämarkkinoita koskevista säännöistä

Kuva 4 Puhtaan vedyn oleelliset sääntelykokonaisuudet, sekä niiden vaikutusalue vetyarvoketjussa

Liitteessä 3 kuvataan tarkemmin puhtaan vedyn säänneltyyn toimintaympäristöön vaikuttavat monet eri sääntelykokonaisuudet.

3.2

Vedyn turvalliseen käsittelyyn, varastointiin ja siirtoon liittyvä lainsäädäntö

Suurin osa vetyyn liittyvästä lainsäädännöstä syntyy EU-tasolla ja se implementoidaan kansalliseen lainsäädäntöön. Kaasujen turvalliseen käsittelyyn, varastointiin ja siirtoon säädetään jo kansallisen lain ja asetuksin (Taulukko 1), mutta vedyn siirtoon ei ole vielä säädetty yksityiskohtaisesti. Ensimmäisten tapausten tullessa ajankohtaiseksi käydään aktiivista keskustelua kansallisten viranomaisten kuten Tukesin kanssa, noudatetaan olemassa olevia asetuksia soveltuvin osin ja tehdään lisätarkasteluja ja -suunnitelmia vedyn turvallisen käsittelyn varmistamiseksi.

Siirtoon liittyvän lainsäädännön oletetaan tulevaisuudessa pohjautuvan maakaasun siirron lainsäädäntöön, sillä se tarjoaa lähimmän referenssin vakiintuneesta lainsäädännöstä ja asetuksista kaasujen siirrolle. Tukes valmistelee Vetyopasta, jossa tullaan käsittelemään myös laitosalueen ulkopuolella tapahtuvaa vedyn siirtoa.¹³ Koska vedyn siirto ja siihen liittyvä lainsäädäntö kehittyvät myös muualla, on tärkeää seurata kansainvälistä kehitystä. Kansainvälisellä tasolla on jo olemassa standardeja vedyn siirrolle. Suoraan vetyyn liittyvän lainsäädännön, standardien ja ohjeiden lisäksi otetaan huomioon myös sähköturvallisuuteen, tarkastuksiin, huoltoon ja asentamiseen liittyvä lainsäädäntö ja standardit.

¹³ Tukes. (27.9.2023). Vedyn turvallinen käsittely ja käyttö. Kaasuyhdistyksen kurssi Vetytalouden perusteet – Vety ja synteettinen metaani.

7.11.2023

Taulukko 1 Kaasujen turvalliseen käsittelyyn, varastointiin ja siirtoon liittyvä lainsäädäntö, ohjeistus ja kansainväliset standardit.

Lait ja asetukset	Ohjeet	Standardit
Valtioneuvoston asetus maakaasun käsittelyn turvallisuudesta 551/2009 ("Maakaasuasetus")	Tukesin soveltamisohje Maakaasuasetukseen ¹⁴	ASME B31.12-2019 Hydrogen Piping and Pipelines
Laki vaarallisten kemikaalien ja räjähteiden käsittelyn turvallisuudesta 390/2005 ("Kemikaaliturvallisuuslaki")	Tukesin suositukset pohjautuen Kemikaaliturvallisuuslakiin ja -asetukseen ¹⁵	ASME Code for Pressure Piping, B31
Valtioneuvoston asetus vaarallisten kemikaalien teollisen käsittelyn ja varastoinnin turvallisuusvaatimuksista (856/2012) ("Kemikaaliturvallisuusasetus")		EN 1594 Gas Infrastructure – Pipelines for maximum operating pressure over 16 bar
Valtioneuvoston asetus vaarallisten kemikaalien teollisen käsittelyn ja varastoinnin turvallisuusvaatimuksista (856/2012) ("Kemikaaliturvallisuusasetus")		EN ISO 3183 Steel pipe for pipeline transportation systems
Valtioneuvoston asetus vaarallisten kemikaalien käsittelyn ja varastoinnin valvonnasta (685/2015)		EIGA/IGC Doc 121/14 Hydrogen Pipeline Systems
Valtioneuvoston asetus vaarallisten kemikaalien käsittelyn ja varastoinnin valvonnasta (685/2015)		EIGA/IGC Doc 75/07/E Determination of Safety Distances
Valtioneuvoston asetus räjähdyskelpoisten ilmaseosten työntekijöille aiheuttaman vaaran torjunnasta (576/2003)		CGA G-5.5 – 2021 Standards for Hydrogen Vent Systems
Painelaitelaki 1144/2016		ISO/TR 15916:2004 Basic considerations for the safety of hydrogen systems
Valtioneuvoston asetus painelaitteista 1548/2016		NFPA 55 Compressed Gases and Cryogenic Fluids Code
		NFPA 50A Standard for Gaseous Hydrogen Systems at Consumer Sites
		API 521 7th Ed. 2020 Pressure-relieving and Depressuring Systems

¹⁴ Tukes. (2015). Maakaasun käsittelyn turvallisuus. Tukes-ohje 7/2015. Osoitteesta: <https://gasgrid.fi/wp-content/uploads/Tukes-ohje-7-2015-Maakaasun-k%C3%A4sittelyn-turvallisuus.pdf>

¹⁵ Tukes. (2015). Tuotantolaitosten sijoittaminen. Opas. ISBN 978-952-5649-67-3. Osoitteesta: <https://tukes.fi/documents/5470659/6406815/Tuotantolaitosten+sijoittaminen/ab664564-66f7-49b7-96bb-316dfefe4517/Tuotantolaitosten+sijoittaminen.pdf?t=1516707669000>

7.11.2023

4 Vedyn putkisiirron tekniset ratkaisut ja suunnitteluperiaatteet

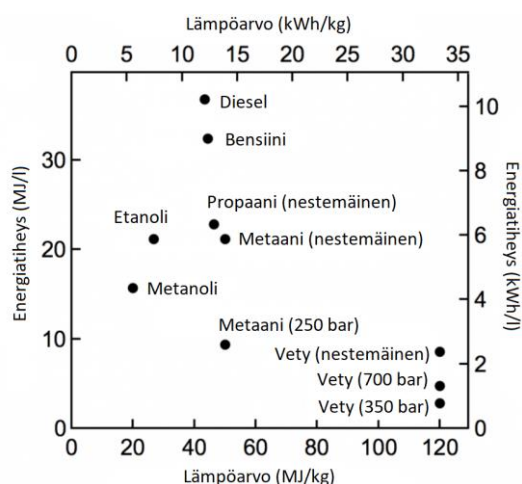
Tässä luvussa käsitellään vetykaasun ominaisuuksia ja näiden vaikutusta vedyn putkisiirron teknisiin ratkaisuihin. Luvussa esitellään myös vedynsiirtoinfrastruktuurin suunnittelun ja rakentamisen periaatteita.

4.1 Vedyn ominaisuudet

Vetykaasu (H₂) on väritön, hajuton, ilmaa kevyempi, helposti syttyvä ja räjähdysherkkä kaasu. Kaasun ominaisuuksiin kuuluu, että se lämpenee paineen alentuessa. Vedyn ja ilman seoksen sytyttämiseen riittää 0,02 mJ:n energia (vrt. 0,25 mJ hiilivedyillä). Vety syttyy 4–75,6 % pitoisuudessa. Paineistetun vedyn vuoto voi muodostaa niin paljon staattista varausta, että vuoto syttyy näennäisesti itsestään. Myös muuten muodostunut staattinen varaus, kipinät, kuumat pinnat ja liekit sytyttävät vedyn helposti. Ruosteinen pinta voi sytyttää vedyn huomattavasti itsesytytmislämpötilaa (560 °C) alemmassa lämpötilassa.¹⁶

Pienen molekyylikokonsa takia vety on vuotojen hallinnan suhteen yksi haastavimmista kaasuista. Puhdas vetykaasu ei ole myrkyllistä, mutta suurina pitoisuuksina se voi aiheuttaa tukehtumisen vaaran, sillä se syrjäyttää hapen. Vety palaa ilmassa vaaleansinisellä, lähes näkymättömällä liekillä, mikä hankaloittaa liekin havaitsemista ja lisää siten tulipalon sattuessa loukkaantumiseriskä. Suljetussa tilassa vetyvuoto aiheuttaa räjähdysvaaran.

Vedyn alempi lämpöarvo, 120 MJ/kg, on korkea verrattuna esimerkiksi metaanin alempaan lämpöarvoon 50 MJ/kg. Vedyn energiatiheys on kuitenkin suhteellisen alhainen, sillä esimerkiksi nestemäisen vedyn energiatiheys on 8 MJ/l, kun vastaava luku nestemäiselle metaanille on 22 MJ/l (Kuva 5).¹⁷ Alhainen energiatiheys aiheuttaa eroavaisuuksia vedyn ja metaanin siirrossa, sillä vedyn nesteytyminen vaatii erittäin matalan lämpötilan ja paineistuksen energiankulutus on metaaniin verrattuna suurempi.



Kuva 5 Polttoaineiden energiatihetyksiä ja alempia lämpöarvoja. (Kuva: U.S. Department of Energy¹⁷)

¹⁶ Työterveyslaitos. (12.7.2022). Vety. Osoitteesta: <https://ova.ttl.fi/vety>

¹⁷ U.S. Department of Energy. (2022). *Hydrogen Storage*. Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office. Osoitteesta: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>

7.11.2023

Metalliseoksen altistuessa vedylle ja vedyn päästessä materiaaliin voi syntyä vetyhauraudeksi (*hydrogen embrittlement*) kutsuttu ilmiö, jolle ovat alttiita erityisesti hitsaussaumamat. Tämä on vedylle ominainen korroosiomekanismi. Kun kaasun joukkoon sekoittuu edes pieniä määriä (ppm) epäpuhtauksia voivat korroosio-ongelmat moninkertaistua puhtaaseen vetyyn verrattuna. Vetyhaurastuminen on yleiskäsite useille ilmiöille, joille on yhteistä väsymissärönkasvu (*hydrogen assisted fatigue crack growth*) ja murtumisitkeyden ja murtumiskuormituksen heikentyminen.¹⁸ Sen lisäksi, että vety voi tunkeutua putkimateriaaliin siirron aikana, sitä voi päästä rakenteisiin myös esimerkiksi teräksen valmistuksen yhteydessä.

4.2 Vedyn siirron vaihtoehdot

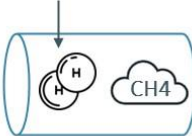
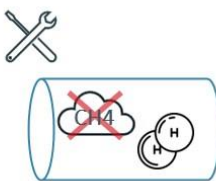
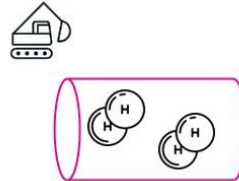
Maailmalla on sekä toteutettu että käynnissä lukuisia puhtaan vedyn tuotantoon ja käyttöön tähtääviä hankkeita. Vety voidaan joko käyttää tuotantopaikassa tai kuljettaa kauempana sijaitsevalle käyttökohteelle, jolloin tarvitaan vedyn siirtoratkaisuja. Hajautetun vedyn tuotannon ja kulutuksen sekä suuren kokoluokan vetyvarastojen käyttöönoton uskotaan kasvattavan vedyn siirtotarvetta.

Vetyä voidaan siirtää rekoilla maantiekuljetuksina paineistettujen (200-700 bar) konttien tai putkiperävaunujen avulla. Kuljetus voi tapahtua joko paineistettuna vetykaasuna tai nesteytettynä vetyä. Kuljetettava energiamäärä jää vedyn maantiekuljetuksessa suhteellisen alhaiseksi ja tästä syystä soveltuukin pääsääntöisesti lyhyiden matkojen (alle 500 km) ja pienien vetymäärien (alle 10 tonnia vetyä/päivä) kuljetukseen.

Vetyä voidaan siirtää putkia pitkin joko hyödyntäen olemassa olevaa metaaniverkkoa tai rakentamalla uutta vedylle suunniteltua verkkoa (*greenfield*) (Kuva 6). Olemassa olevaa metaaniputkistoa voidaan hyödyntää joko sekoittamalla vetyä metaanin joukkoon (*blending*) tai korvaamalla metaanin käyttö vedyllä (*repurposing*). Molemmat ratkaisut vaativat tapauskohtaista toteutettavuuden selvittämistä esimerkiksi teknisten ratkaisuiden ja putkistomateriaalin osalta. Eri putkikuljetusvaihtoehdot eroavat toisistaan esimerkiksi laitteiden muutostarpeiden, investointikustannuksen ja siirrettävän vedyn volyymin osalta. Vedyn sekoittamiseen perustuvassa ratkaisussa vedyn osuuden kasvaessa myös tarvittavat laitteiden muutostarpeet kasvavat kohti uusiokäytön vaatimia muutoksia.

¹⁸ Zafra, A., et al. Hydrogen-assisted fatigue crack growth: Pre-charging vs in-situ testing in gaseous environments. *Materials Science and Engineering: A* 871:144885 (2023).

7.11.2023

			
	Sekoittaminen (Blending)	Uusiokäyttö (Repurposing)	Uuden rakentaminen (Greenfield)
Vedyn osuus	Määritellään tapauskohtaisesti*	100%	100%
Investointitarve	Kaasun mittalaitteet, kompressori riippuen vedyn osuudesta ja kompressorin mitoituksesta ja eliniästä	Kaasun mittalaitteet, kompressori, venttiilien toimilaitteet, kaavinloukut, ulospuhallusjärjestelmä, venttiilien soveltuvuus täytyy tarkistaa	Koko järjestelmä
Reititys	Ennalta määrätty reititys, joka ei ole määriteltä vedyn tuotanto- ja kulutuspaikkojen mukaisesti	Ennalta määrätty reititys, joka ei ole määriteltä vedyn tuotanto- ja kulutuspaikkojen mukaisesti	Suunniteltu vedyn tuotanto- ja kulutuspaikkojen tarpeiden mukaisesti
*Vedyn sallittu osuus metaaniverkossa on Suomessa 1%. Vetyä sekoitetaan metaaniin joukkoon useissa projekteissa Euroopassa, esimerkiksi 5%:n osuudella.			

Kuva 6 Kolme eri tapaa toteuttaa vedyn putkikuljetus. (Kuva: Gasgrid Finland)

Vedylle suunniteltua ja käytössä olevaa siirtoputkistoa on maailmassa, lähinnä Yhdysvalloissa ja Euroopassa, yhteensä noin 5000 km (Taulukko 2)¹⁹. Vanhin käytössä oleva putkisto on 1930-luvulta. Näillä putkistoilla on tyypillisesti yhdistetty nykyisiä tuotantolaitoksia ja teollisia käyttökohteita maalla kulkevilla putkilla, joiden halkaisija on pieni (<DN450) ja paine matala. Air Liquiden omistama Euroopan laajin vetyputkisto on yli 1000 km ja toimii korkeassa paineessa, mutta putkikoko on pieni. Suunnitellut uudet vetyputket, jotka yhdistävät maita tai jopa mantereita, ovat halkaisijaltaan huomattavasti suurempia ja niitä on suunniteltu rakennettavan myös merelle.

Taulukko 2 Vetyputkistot omistajan ja sijainnin mukaan jaoteltuna.¹⁹

Vetyputkistot, 2016			
Yritys	Pituus	Maanosa	Pituus
Air Liquide	1936	USA	2608
Air Products	1140	Eurooppa	1598
Linde	244	Muu maailma	337
Praxair ²⁰	739	Yhteensä	4542
Muut	483		
Yhteensä	4542		

¹⁹ Hydrogen Tools. (2016). Hydrogen Pipelines. Osoitteesta: <https://h2tools.org/hyarc/hydrogen-data/hydrogen-pipelines>²⁰ Praxair on nykyisin osa Air Products -yritystä.

7.11.2023

4.3 Vedyn siirtoinfrastruktuurin kehittäminen markkinan tarpeisiin

Uusiutuvan vedyn markkinan kehityksen ollessa vasta alkutaipaleella kansallisen vetyverkon suunnitteluun ja mitoittamiseen liittyy paljon avoimia kysymyksiä. Vetyinfrastruktuurin suunnitteluprosessia on pyritty edistämään etupainotteisesti, jotta voidaan luoda edellytyksiä arvoketjun eri toimijoiden omille investoinneille ja esimerkiksi vetylaaksojen muodostumiselle ja näin tukea laajemmin vedyn ympärille muodostuvan markkinan kehitystä. Vetyverkon suunnittelu voidaan nähdä monivaiheisena ja iteratiivisena prosessina (Kuva 7), jossa lähtötiedot jatkuvasti tarkentuvat teknisten reunaehtojen ja toimintaympäristöön vaikuttavien tekijöiden, kuten kansallisten tavoitteiden, markkinatoimijoiden ja arvoketjujen, regulaation ja turvallisuusvaatimusten selvennyessä.

Vetyverkon arkkitehtuurin rakentumista voidaan kuvata yksinkertaistaen seuraavasti:

1. **Skenaariot putkilinjan reititykselle ja liityntäpisteiden volyymeille ja paineille.** Skenaariot vaihtelevat esimerkiksi uusiutuvan energian kapasiteetin sijoittumisen ja kasvuodotusten, vedyn tuotanto- ja kulutusodotusten, asiakkaiden tarvitsemien painetasojen, tarvittavan varastokapasiteetin, kaavoituksen ja verkon tulevaisuuden kehityksen mukaan. Osana vety- ja sähköverkon yhteiskehitystä myös sähköverkon ja uusiutuvan sähköntuotannon nykytila ja kehityssuunnitelmat otetaan huomioon. Tässä vaiheessa sidosryhmäkeskustelut ovat avainasemassa.
2. **Teknologiset mahdollisuudet ja reunaehdot skenaarioiden mukaisille volyymeille ja paineille.** Vedyn metaanista poikkeavat ominaisuudet tarkoittavat sitä, että kaikki metaanin siirrossa käytettävät laitteet eivät ole sellaisenaan hyödynnettävissä vedyn siirrossa. Lisäksi ratkaisuiden kokoluokka ja ajotapa vaikuttavat laitteiden sopivuuteen. Osa ratkaisuista, kuten keskipakokompressorit, ovat kehitystyön alla. Tässä vaiheessa keskustelut teknologiatoimittajien kanssa ovat avainasemassa sopivien ja saatavilla olevien vaihtoehtojen kartoittamiseksi ja valitsemiseksi.
3. **Mitoitus ja teknologiavalinnat valituille skenaarioille.** Vetyverkko ja sen laitteet mitoitetaan skenaarioiden mukaisesti teknisten reunaehtojen puitteissa, mikä mahdollistaa saatavilla olevien teknologioiden, laitteiden ja materiaalien kartoituksen ja valinnat. Teknologiset reunaehdot sekä vetyverkon kehitysprosessin aikana mahdollisesti tarkentuneet tiedot vetymarkkinan tarpeista ohjaavat tarkentamaan putkiston ja reitityksen suunnittelua.



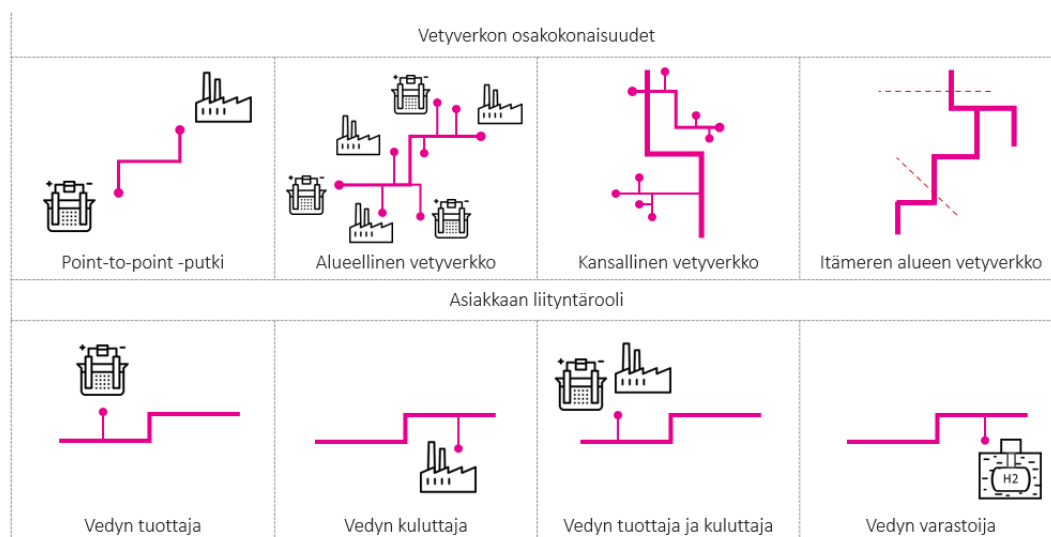
Kuva 7 Vetyverkon iteratiivisen suunnittelun päävaiheet. (Kuva: Gasgrid Finland)

7.11.2023

Myös tarkastelussa olevan vetyverkon osan käyttötarkoitus ja asiakkaan liityntärooli vaikuttavat suunnitteluprosessiin (Kuva 7). Vetyputkiston tarkoitus on yhdistää vedyn tuotanto- ja kulutuspaikkoja maantieteellisesti ja ajallisesti siirtämällä ja varastoimalla vetyä. Siirto ja varastointi tapahtuvat eri laajuudessa niin maantieteellisesti kuin volyymin ja toimijoiden lukumääränkin kannalta. Vetyverkon osakokonaisuudet voidaan jakaa seuraaviin osiin laajuuden kannalta:

- Vetyputki voi olla tiettyyn tarpeeseen vastaava ns. point-to-point putki kahden toimijan tai alueen välillä,
- Vetyputkisto voi muodostaa alueellisen eri toimijoita yhdistävän verkon (ns. vetylaakso),
- Vetyputki voi olla osa kansallista vetyverkkoa, ja
- Kansallinen vetyverkko voi yhdistyä Itämeren alueen vetyverkkoon.

Vetyverkon suunnittelussa täytyy huomioida osakokonaisuuksien mahdollinen yhdistyminen myöhemmässä vaiheessa. Yksi merkittävä infrasuunnittelun ja -kehityksen näkökulma on se, kuinka alueellisia vetylaaksohankkeita ja suurempia kansallisen vetyverkon runkolinjan muodostavia infrahankkeita voidaan edistää ja kehittää samanaikaisesti vastaten siirtoasiakkaiden tarpeisiin. Siirtoasiakas voi toimia vedyn tuottajan, kuluttajan tai varastoinnin roolissa, mutta myös näiden eri yhdistelmät ovat mahdollisia (Kuva 8).



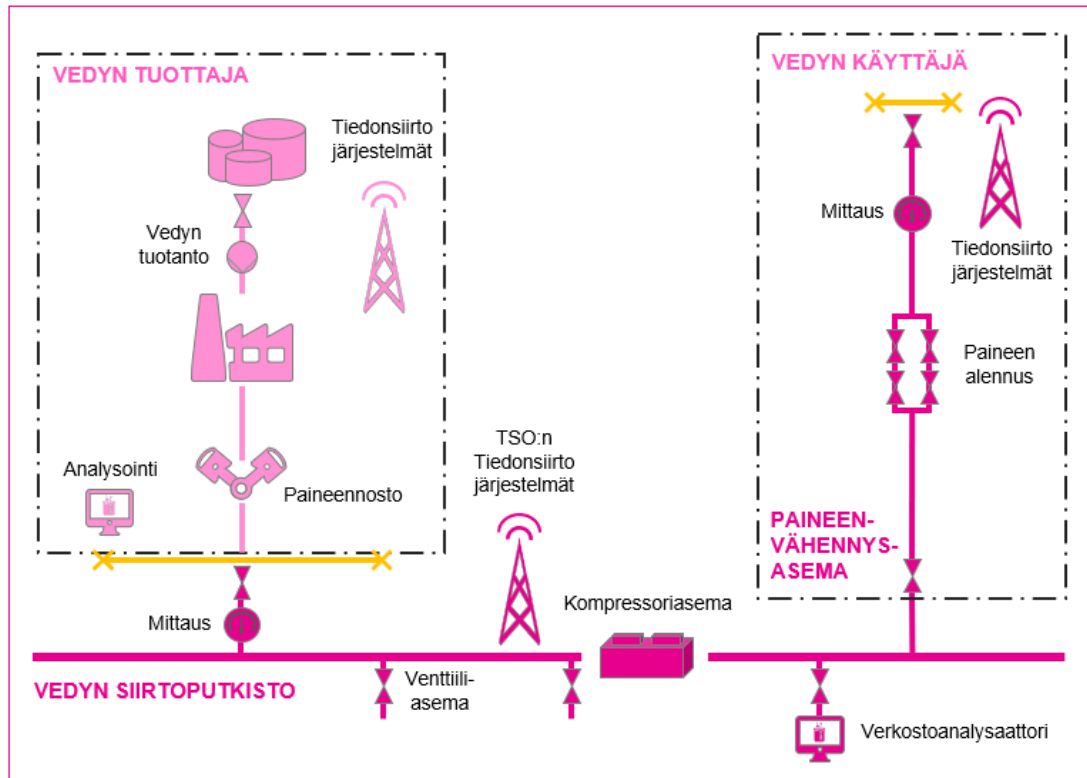
Kuva 8 Vetyverkon suunnitteluun vaikuttavat esimerkiksi vetyverkon käyttötarkoitus sekä asiakkaiden rooli vetyverkossa. Lisäksi suunnittelussa tulee huomioida vetyverkon tulevaisuuden tarpeet (Kuva: Gasgrid Finland)

4.4 Vedyn putkisiirtoinfrastruktuurin tekniset ratkaisut

Vedyn siirtoinfrastruktuurin liittämisperiaatteet ovat vielä kehitysvaiheessa. Kehityksen aikana on kuitenkin nähty yhteneväisyyksiä metaanijärjestelmän teknisiin ratkaisuihin sekä biokaasun syöttöperiaatteisiin. Tämänhetkisen näkemyksen mukaan vedyn siirtoinfrastruktuurissa (Kuva 9) vedyn tuottaja nostaa vedyn paineen sovittuun siirtoverkon kompressorin vaatimaan imupaineeseen. Lisäksi analysoidaan siirtoverkkoon syötettävän vedyn koostumus ja mitataan sen määrä. Tämän jälkeen vedyn paine korotetaan siirtoverkon paineeseen kompressoriasemalla. Vedyn virtaus siirtoverkossa perustuu verkon alueiden välille syntyvään paine-eroon. Paine-eron aiheuttaa yleisimmin syöttö- ja ottopisteiden välisten virtausprofiilien erot. Ennen asiakkaalle toimitusta vedyn paine lasketaan siirtoverkon paineenvähennysasemalla kuluttajan laitosalueen jakeluverkon paineeseen.

7.11.2023

Paineenvähennysasemalla myös suoritetaan vedyn määrämittaus. Järjestelmää operoidaan ja valvotaan etänä Gasgridin valvomosta. Liitteessä 4 on kuvattu tarkemmin siirtoinfrastruktuurin eri osat ja niiden toimintaperiaatteet.



Kuva 9 Vedyn putkisiirtoinfrastruktuurin rakenne. Tummanpunaisella Gasgrid Finlandin vastuulla olevat toiminnot. Vaaleanpunaisella putkistoon liittyvän asiakkaan prosessit. Keltaisella vastuualueiden rajapinnat. (Kuva: Gasgrid Finland)

4.5 Vetyputkiston suunnitteluun ja kustannuksiin vaikuttavat tekijät

Vetyputkiston suunnitteluperiaatteet ovat samankaltaiset metaaniputkistoon verrattuna. Metaaniverkon osalta on kertynyt vuosikymmeninen ajalta kokemuksia turvallisesta ja käyttövarmasta suunnittelusta, rakentamisesta ja operoinnista ja näitä kokemuksia tullaan hyödyntämään Suomen vedyn siirtoverkon ratkaisuihin. Putkiston suunnittelussa otetaan huomioon kaikki tekniset ja ei-tekniset rajoitteet reitin varrella, kuten rakennettavuus, rakenteellinen eheys (*structural integrity*), yleinen turvallisuus, ympäristö- ja sosioekonomiset vaikutukset, luvitus, kunnossapito, kunnonseuranta ja käyttöönottovaatimukset. Lupaprosessien näkökulmasta vedyn infrahankkeen voidaan olettaa olevan samankaltainen metaanin infrahankkeeseen ja voimalinjahankkeeseen²¹ verrattuna.

Putkiston suunnitteluun ja kustannuksiin vaikuttavat mm. seuraavat tekijät:

- **Putkiston reititys.** Putkiston rakentamisaikaksi sopii niin pelto, metsä kuin vesialuekin. Putken reitti ja maaperä vaikuttavat rakentamiskustannuksiin. Reitityksessä huomioidaan mm. asutus

²¹ Sähköverkon osalta voimajohtohankkeen kesto kaikkine vaiheineen on noin 5–8 vuotta. Tarkempi kuvaus sähköverkon rakentamisen hankevaiheista: [Näin etenee voimajohtohanke](#) (Fingrid, 2020).

7.11.2023

ja sen tiheys (alueluokka), olemassa oleva infrastruktuuri (esim. suurjännitevoimajohdot, tiet ja rautatiet) ja luonnonsuojelu- ja pohjavesialueet. Olemassa olevan metaaniputkireitin myötäily voi tuoda synergioita erityisesti maankäytön osalta.

- **Maanhankinta.** Maanhankinnan yhteydessä käydään maanomistajien kanssa keskustelua. Maanmittauslaitos toimivaltaisena viranomaisena vastaa maan käyttö- ja omistusoikeuden muutoksien virallisista prosesseista. Nämä ovat monivaiheisia ja sisältävät lukuisia sidosryhmätahoja. Omistusoikeuksin lunastettavia alueita ovat venttiiliasemien, paineenvähennysasemien, kompressoriasemien, linkkiasemien ja anodikenttien vaatimat alueet. Putkilinjan kohdalla oleville alueille tulee käyttöoikeusalue.
- **Putkisto.** Vetyputki on metaaniputkeen verrattuna paksumpi vetyhaurastumisesta ja paineenvaihteluista johtuen. Putken halkaisija määräytyy suunnitellun siirto- ja varastointikapasiteetin perusteella. Putken massa vaikuttaa mm. materiaalin tarpeeseen, hitsaustarpeeseen ja asennuskustannuksiin.
- **Kompressoriasema** muodostaa merkittävän osuuden projektin kokonaiskustannuksista. Teknologiavalintaan ja mitoittamiseen vaikuttavat esimerkiksi virtausnopeus, painetaso ja säädettävyyden tarve. Huomionarvoista on myös se, että vedyn matalan energiatiheuden takia tilan tarve on huomattavasti suurempi kuin metaanin kompressoriaseman tapauksessa.
- **Paineenvähennysaseman ja venttiiliasemien** kustannukset vaikuttavat myös projektin kokonaiskustannuksiin. Venttiiliasemien lukumäärään vaikuttaa verkon suunnittelu, jossa otetaan huomioon turvallisuusnäkökohdat.
- **Suunnittelupaine ja paineenvaihtelusyklar määrä.** Paineenvaihtelusyklar lukumäärän ja paineen vaihteluvälin vaikutuksesta putkimateriaalin kestävyys ei ole historiallista dataa. Vetyhaurastumisen takia tarvitaan paksumpi putki kuin metaanin tapauksessa.
- **Suunnittelu ja valvonta sekä lupaprosessit** muodostavat pitkässä infrastruktuuriprojektissa merkittävän osan kustannuksista.

Viime kädessä putkiston suunnittelu on optimointia putken reitin, halkaisijan, painetason ja kompressorin tehon välillä siirto- ja varastointikapasiteetin ja kustannusten näkökulmista. Valittavaan putken halkaisijaan vaikuttavia tekijöitä ovat putken siirtokapasiteetti (MW), varastokapasiteetin tarve, paine-ero, putkireitin pituus, kitkakerroin ja suurin sallittu virtausnopeus.

Putken reittiin vaikuttavia tekijöitä ovat sähkön ja vedyn tuotannon sijoittuminen sekä vedyn käyttökohteiden sijoittuminen. Näiden sijoittumiseen puolestaan vaikuttaa soveltuvien tuotanto- ja kulutuslaitosten tonttien sijoittuminen suhteessa muuhun ympäristöön esimerkiksi kaavoituksen ja muun maankäytön näkökulmasta sekä mahdollisuus hyödyntää sivutuotteena syntyvä lämpö. Lisäksi valmistettaessa vedystä jatkojalosteita, kuten synteettisiä polttoaineita tai kemikaaleja, sijoittumiseen vaikuttaa myös hiilidioksidin saatavuus. Satojen miljoonien arvoisten tuotantolaitosinvestointien sijoittumiseen vaikuttaa myös muun investointiympäristön suotuisuus, kuten työvoiman saatavuus, muu logistiikka, yhteiskunnan tarjoamat palvelut sekä muiden käyttöhyödykkeiden saatavuus. Reitityksen suunnittelua edistetään aktiivisen asiakas- ja sidosryhmävuoropuhelun avulla, jotta tulevaisuuden vetyverkko palvelisi toimijoiden tarpeita parhaalla mahdollisella tavalla.

7.11.2023

5 Skenaarioiden ajurina merkittävän uuden vientiteollisuuden syntyminen

Tässä luvussa esittelemme yhteishankkeessa Suomen energian siirtojärjestelmien kehityksen tueksi laaditut kolme skenaariota, joissa huomioidaan erityisesti vetytalouden mahdolliset kehityspotut. Skenaarioiden keskiössä ovat vetyinfrastruktuurin erilaiset kehitysvaihtoehdot sekä vety-, kaasu- ja sähkönsiirtoinfrastruktuurien välinen sektori-integraatio. Infrastruktuurin kehitystarpeiden kokonaisvaltainen analysointi on tärkeää, jotta tulevaisuuden energiajärjestelmästä saadaan kustannustehokas ja jotta se tukisi kansallista kilpailukykyä parhaalla mahdollisella tavalla.

Yhteishankkeen skenaariot Suomen vetytalouden kehitykselle on esitelty luvussa 5.1. Skenaarioiden mallinnuksessa käytetyt taustaoletukset luvussa on kuvattu liitteessä 1. Tämän jälkeen käydään läpi mallinnuksen keskeisiä tuloksia: Luvussa 5.2 käydään läpi skenaarioiden puhtaan vedyn tuotanto Suomessa, mikä kattaa kotimaan kysynnän ja viennin. Yhteenveto sähkön ja tuotantokapasiteetin tarpeesta on esitetty luvussa 5.3. Lopuksi luvussa 5.4 käsitellään vedyn varastoinnin roolia energiajärjestelmän tasapainottamisessa. Yksityiskohtaisia mallinnustuloksia löytyy lisäksi liitteestä 2.

5.1 Suomen vetytalouden kehityksen suuntaviivat – kolme skenaariota

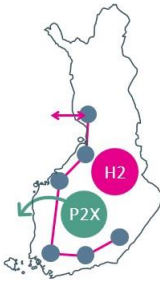
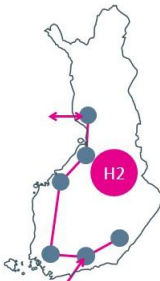
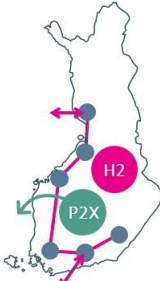
Skenaarioihin on pyritty valitsemaan kunnianhimoiset kasvuoletukset vetytalouden kehityksestä, koska ne haastavat energiajärjestelmän kehittämistä voimakkaasti. Haastavat skenaariot auttavat varmistamaan, että siirtoinfrastruktuurin kehittämistarpeita arvioidaan kattavasti ja ajoissa. Varsinaiset investoinnit infrastruktuuriin toteutuvat tunnistetun tarpeen ja konkreettisten hankkeiden kautta. Skenaariot luovat lisäksi kuvaa Suomen suuresta potentiaalista ja roolista osana Euroopan vetytaloutta ja tuovat näin ollen esiin myös vetytalouden laajempia yhteiskunnallisia vaikutuksia.

Taulukossa 1 kuvataan Gasgridin ja Fingridin kolmen skenaarion suuntaviivat Suomen vetytalouden kehityksestä. Skenaarioissa tutkitaan Suomen energiajärjestelmän kannalta erilaisia kehitysvaihtoehtoja energiansiirtoinfrastruktuurille. Skenaarioissa keskeisenä muuttujana on oletus Suomen roolista vetymarkkinan arvoketjussa: Kehittykö Suomesta merkittävä vedyn jatkojalosteiden, vetykaasun, tai niiden molempien viejä Euroopan markkinoiden kasvavaan tarpeeseen? Tämän muuttujan perusteella skenaarioihin on muodostettu kansallinen vetyinfrastruktuuri sekä ulkomaan vientiin ja tuontiin suuntautuva vetyinfrastruktuuri. Kansallisen ja kansainvälisen vetyinfrastruktuurin muodostuminen vaikuttaa laajasti myös muuhun energiajärjestelmään (kts. Luku 5.4).

Perusoletuksena skenaarioissa on, että Suomi saavuttaa kaikissa skenaarioissa hiilineutraalisuustavoitteen ja puhtaan vedyn tuotanto Suomessa kasvaa voimakkaasti. Vedyntuotantoon ja vedyn jatkojalosteisiin käytettävän sähkön kysynnän kasvun lisäksi myös muun sähkön kysynnän arvioidaan kasvavan. Kysyntä kasvaa liikenteessä, lämmityksessä ja nykyisessä teollisuudessa, kun fossiilisia polttoaineita korvataan sähköllä. Lisäksi Suomeen oletetaan syntyvän uutta sähköintensiivistä teollisuutta, kuten akkujen valmistusta ja datakeskuksia. Näiden sektorien sähkön käytön on oletettu kehittyvän samalla tavalla kaikissa skenaarioissa.

7.11.2023

Taulukko 1. Kuvaus Gasgridin ja Fingridin vetytalouden skenaarioista sekä havainnolliset vedyn alueelliset siirtoyhteydet eri skenaarioissa

SKENAARIO	KUVAUS
Vahvaa alueellista vetytaloutta 	<p>Sähkön tuotanto ja siirto</p> <ul style="list-style-type: none"> Suomeen rakennetaan paljon uutta uusiutuvaa sähköntuotantoa, painopiste maatuulivoimassa Sähkön kantaverkkoa vahvistetaan Suomen sisällä merkittävästi sekä rakennetaan suunnitellut rajasiirtoyhteydet Pohjois-Ruotsiin ja Viroon <p>Vedyn tuotanto ja käyttö</p> <ul style="list-style-type: none"> Suomen nykyinen vetyä käyttävä teollisuus siirtyy puhtaaseen vetyyn Suomesta kehitty merkittävä vedyn jatkojalosteiden viejämaa <p>Vedyn siirtoinfrastruktuuri</p> <ul style="list-style-type: none"> Rakennetaan Suomen sisäistä sekä rajat ylittävää vedyn siirtoinfrastruktuuria Pohjois-Ruotsiin <p>Vedyn varastointi</p> <ul style="list-style-type: none"> Suomeen rakennetaan useita vetyvarastoja Suomi ei voi hyödyntää Keski-Euroopan suuria vetyvarastoja, koska tarvittavaa vedynsiirtoinfrastruktuuria ei skenaariossa rakenneta
Tehokas eurooppalainen vetymarkkina 	<p>Sähkön tuotanto ja siirto</p> <ul style="list-style-type: none"> Suomeen rakennetaan paljon uutta uusiutuvaa sähköntuotantoa, painopiste maatuulivoimassa Sähkön kantaverkkoa vahvistetaan Suomen sisällä merkittävästi sekä rakennetaan suunnitellut rajasiirtoyhteydet Pohjois-Ruotsiin ja Viroon <p>Vedyn tuotanto ja käyttö</p> <ul style="list-style-type: none"> Suomen nykyinen vetyä käyttävä teollisuus siirtyy puhtaaseen vetyyn Suomesta kehitty merkittävä vedyn viejämaa <p>Vedyn siirtoinfrastruktuuri</p> <ul style="list-style-type: none"> Rakennetaan Suomen sisäistä sekä rajat ylittävää vedyn siirtoinfrastruktuuria sekä Pohjois-Ruotsiin että Keski-Eurooppaan <p>Vedyn varastointi</p> <ul style="list-style-type: none"> Suomeen rakennetaan vetyvarastoja Suomi voi hyödyntää Keski-Euroopan suuria vetyvarastoja vedynsiirtoinfrastruktuurin myötä
Vetytalouden kärkimaa Suomi 	<p>Sähkön tuotanto ja siirto</p> <ul style="list-style-type: none"> Suomeen rakennetaan erittäin paljon uutta uusiutuvaa sähköntuotantoa, painopiste maatuulivoimassa Sähkön kantaverkkoa vahvistetaan Suomen sisällä merkittävästi sekä rakennetaan suunnitellut rajasiirtoyhteydet Pohjois-Ruotsiin ja Viroon <p>Vedyn tuotanto ja käyttö</p> <ul style="list-style-type: none"> Suomen nykyinen vetyä käyttävä teollisuus siirtyy puhtaaseen vetyyn Suomesta kehitty erittäin merkittävä vedyn ja vedyn jatkojalosteiden viejämaa <p>Vedyn siirtoinfrastruktuuri</p> <ul style="list-style-type: none"> Rakennetaan Suomen sisäistä sekä rajat ylittävää vedyn siirtoinfrastruktuuria Pohjois-Ruotsiin että Keski-Eurooppaan <p>Vedyn varastointi</p> <ul style="list-style-type: none"> Suomeen rakennetaan vetyvarastoja Suomi voi hyödyntää Keski-Euroopan suuria vetyvarastoja vedynsiirtoinfrastruktuurin myötä

7.11.2023

Skenaarioissa puhtaalla vedyllä korvataan kotimaisen teollisuuden nykyisin käyttämä harmaa vety, ja lisäksi sitä käytetään esimerkiksi fossiilivapaan teräksen ja sähköpolttoaineiden valmistukseen. Kotimaan kysynnän kattamisen lisäksi Suomesta kehittyy merkittävä tekijä eurooppalaisella vetymarkkinalla ja valtaosaa kysynnästä ajaa lopulta vienti joko jatkojalostettuina tuotteina ja/tai vetykaasuna Euroopan markkinoiden tarpeeseen.

Yhteiskunnan sähköistyminen vaatii sähkön siirtoyhteysien laajaa vahvistamista niin Suomen sisäisen kuin rajat ylittävän kapasiteetin osalta. Sähkön kantaverkkoa vahvistetaan merkittävästi Suomen sisällä tuotannon ja kulutuksen liittäminen mahdollistamiseksi sekä siirtokyvyn lisäämiseksi. Pohjois-eteläsuuntaisen kapasiteetin (Keski-Suomen poikkileikkauksen yli, ks. Kuva 15) on oletettu kasvavan 13 gigawattiin vuoteen 2040 mennessä. Lisäksi kaikissa skenaarioissa rakenteilla oleva Aurora Line sähkön rajasiirtoyhteys Pohjois-Ruotsin ja Suomen välillä on käytössä ja 2030-luvulla rakennetaan Aurora Line 2 ja Estlink 3 sähkön rajasiirtoyhteydet.

Kaikissa skenaarioissa on oletettu vetyputkiyhteyden olevan käytössä Suomessa sekä Suomen ja Ruotsin välillä vuodesta 2030 eteenpäin. Vetyputken siirtokapasiteetiksi on oletettu 13 GW vetyä, mikä vastaa halkaisijaltaan 1,2 metrin putkea. Putkiyhteyden kapasiteetti oli skenaarioluonnoksissa 7,2 GW perustuen Bothnian Bay Hydrogen Valley -selvityksessä²² käytettyihin putkikokoihin, mutta vedyn kysynnän kasvun myötä suuremmalle putkelle on tarvetta etenkin vuonna 2040. Lisäksi *Tehokas eurooppalainen vetymarkkina* sekä *Vetytalouden kärkimaa Suomi* -skenaarioissa rakennetaan Suomesta Keski-Eurooppaan suuntautuva putkiyhteys vuoteen 2030 mennessä, jonka siirtokapasiteetiksi on asetettu 13 GW vetyä perustuen European Hydrogen Backbone -selvitykseen²³.

Seuraavissa luvuissa skenaarioita ja niiden oletuksia on kuvattu tarkemmin kunkin skenaarion osalta.

5.1.1 Vahvaa alueellista vetytaloutta

Vahvaa alueellista vetytaloutta -skenaariossa vedyn kysyntää ajaa etenkin Suomen kehittyminen merkittäväksi vedyn jatkojalosteiden, kuten sähköpolttoaineiden, viejämaaksi. Suomeen syntyy paljon uutta teollisuutta vedyn tuotannon ja jatkojalostamisen ympärille paikallisiin vetyklustereihin. Kotimaan teollisuuden tarpeisiin tuotetaan puhdasta vetyä hyödyntämällä etenkin suomalaista maatuulivoimaa, mikä vähentää Suomen nykyisenkin teollisuuden päästöjä.

Tässä skenaariossa Suomen sisäisen energiansiirtoinfrastruktuurin lisäksi ei rakenneta vedyn putkisiirtoyhteyksiä Keski-Eurooppaan, mutta rakennetaan Perämeren alueelle vedyn putkisiirtoyhteys Pohjois-Ruotsiin. Pohjois-Ruotsissa vedyn kysyntä kasvaa myös merkittävästi, kun vetyä käytetään muun muassa raudan suorapelkistykseen terästeollisuutta varten. Siirtoyhteyden tarvetta on kartoitettu muun muassa LUT-yliopiston selvityksessä, jossa rajat ylittävän putken siirtokyvyn on visioitu 7,2 GW vetyä⁹. Gasgridillä on käynnissä yhteistyössä Nordion Energin kanssa Nordic Hydrogen Route -hanke, jossa on meneillään selvitystyö Perämeren alueen rajat ylittävästä vetyinfrastruktuurista²⁴ ja siirtokapasiteetin tarpeesta alueella.

²² [Bothnian Bay Hydrogen Valley – Research report](#). LUT Scientific and Expertise Publications 134. (Karjunen, et al., 2021)

²³ [Extending the European Hydrogen Backbone](#) (EHB, 2021)

²⁴ <https://nordichydrogenroute.com/fi/hanke/>

7.11.2023

Pohjoismaisen vetyvarastoinnin tarve on *Vahvaa alueellista vetytaloutta* -skenaariossa suurin, sillä Suomen vetyjärjestelmää ei ole yhdistetty Keski-Euroopan kausiluonteisen varastoinnin mahdollistaviin suolakiviluoliin. Vedyn varastointi on tarpeellista, jotta vedyn tuotantoa elektrolyysillä voidaan ohjata joustavasti hinnan mukaan, mutta vedyn käyttö voi pysyä tasaisena ympäri vuoden. Kotimaisia vetyvarastoja rakennetaan skenaariossa suuri määrä tämän mahdollistamiseksi.

5.1.2 Tehokas eurooppalainen vetymarkkina

Tehokas eurooppalainen vetymarkkina -skenaariossa korvataan harmaa vety sekä vastataan terästeollisuuden tarpeisiin kotimaassa, mutta vedyn jatkojalostusteollisuus ei kehity vedyn tuotannon kasvua vastaavalla tavalla. Vedyntuotannon kasvua ajaa sen sijaan etenkin vetykaasun vientimahdollisuudet putkiyhteyttä pitkin muualle Eurooppaan, etenkin vuoteen 2040 mennessä.

Suomesta rakennetaan vastaava vedyn putkiyhteys Pohjois-Ruotsiin kuin *Vahvaa alueellista vetytaloutta* -skenaariossa. Ruotsissa vedyn kysyntä kasvaa Suomea nopeammin, jolloin vienti pohjoisen rajansiirtoyhteyden kautta Ruotsiin toimii Suomen vetytalouden kasvun nopeuttajana. Itämeren alueen läpi rakennetaan myös suuri putkiyhteys Keski-Eurooppaan vuoteen 2030 mennessä. Sen myötä vientimäärät kasvavat etenkin pidemmällä aikavälillä huomattavasti. Suomen vetytalouden ajurina toimii siten Itämeren alueen ja Keski-Euroopan puhtaan vedyn suuri kysyntä. Tähän kysyntään ei saada vastattua yhtä kustannustehokkaasti Keski-Euroopan uusiutuvan energian resursseilla kuin Suomen edullisella maatuulivoimalla.

Vedyn siirtoinfrastruktuuri Itämeren alueen läpi Keski-Eurooppaan mahdollistaa alueen kaasuväylien hyödyntämisen. Muualla Euroopassa on jo suuria kaasuväylien, kuten suolakiviluolia, käytössä maakaasun varastointiin. Suurten suolakiviluolien oletetaan olevan hyödynnettävissä myös vedyn varastointiin hyvin alhaisella kustannuksella, ja Itämeren putkiyhteyden avulla niiden tarjoamaa joustavuutta saadaan hyödynnettyä myös Suomessa. Tämä vähentää kotimaisen vedyn varastoinnin tarvetta ja kannattavuutta.

5.1.3 Vetytalouden kärkimaa Suomi

Vetytalouden kärkimaa Suomi -skenaariossa yhdistyvät muiden skenaarioiden kysyntäajurit. Suomeen syntyy vahvaa kotimaan kysyntää kuten *Vahvaa alueellista vetytaloutta* -skenaariossa, minkä lisäksi Suomi vastaa Keski-Euroopan puhtaan vedyn kysyntään viennillä kuten *Tehokas eurooppalainen vetymarkkina* -skenaariossa.

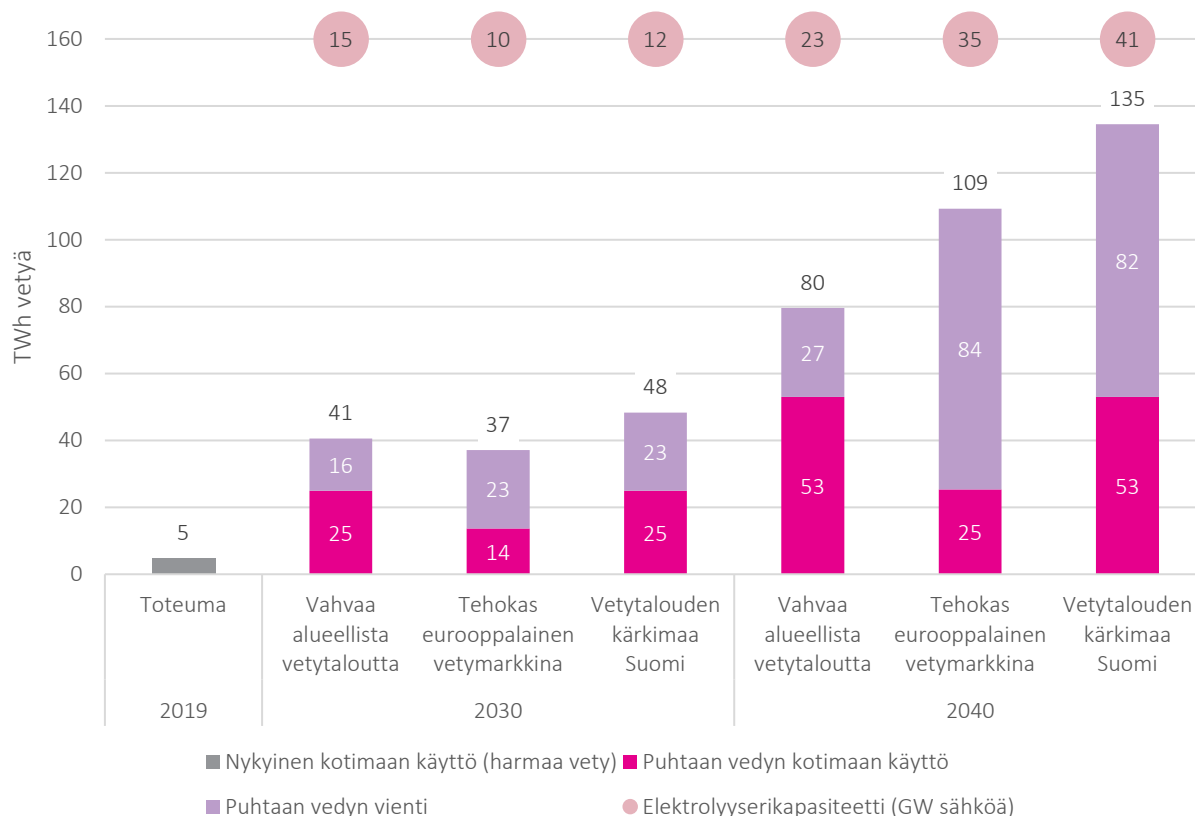
Vientiä varten skenaariossa rakennetaan putkiyhteydet Pohjois-Ruotsiin ja Keski-Eurooppaan, jotka osaltaan myös auttavat energiajärjestelmän joustavuudessa ja vähentävät kotimaisen varastokapasiteetin tarvetta.

Skenaariossa Suomessa tuotetaan erittäin paljon puhdasta vetyä, mikä vaatii vastaavasti paljon puhdasta sähköntuotantoa. Pelkästään maatuulivoimaa rakennetaan Suomeen noin 4 GW vuodessa, mikä vastaa noin kaksinkertaisesti vuoden 2022 rakentamisvauhtia. Tämä tarkoittaisi, että Suomen maatuulivoiman kapasiteetti voisi kasvaa noin 60 gigawattiin vuoteen 2040 mennessä. Skenaariossa hyödynnetään asetettujen rajoitteiden puitteissa kaikki rakennettavissa oleva maatuulivoima ja sen lisäksi rakennetaan merituulivoimaa ja aurinkovoimaa.

7.11.2023

5.2 Puhdasta vetyä kotimaan käyttöön ja vientiin

Skenaarioissa vedyn tuotantokapasiteetti kasvaa merkittävästi mahdollistamaan vedyn jatkojalosteiden ja vedyn viennin Suomesta. Kuva 10 esittää yhteenvedon Suomen nykyisen harmaan vedyn käytöstä sekä eri skenaarioiden puhtaan vedyn kulutuksesta kotimaassa ja viennistä, sekä tämän vedyn tuottamiseen tarvittavasta elektrolyyserikapasiteetista.



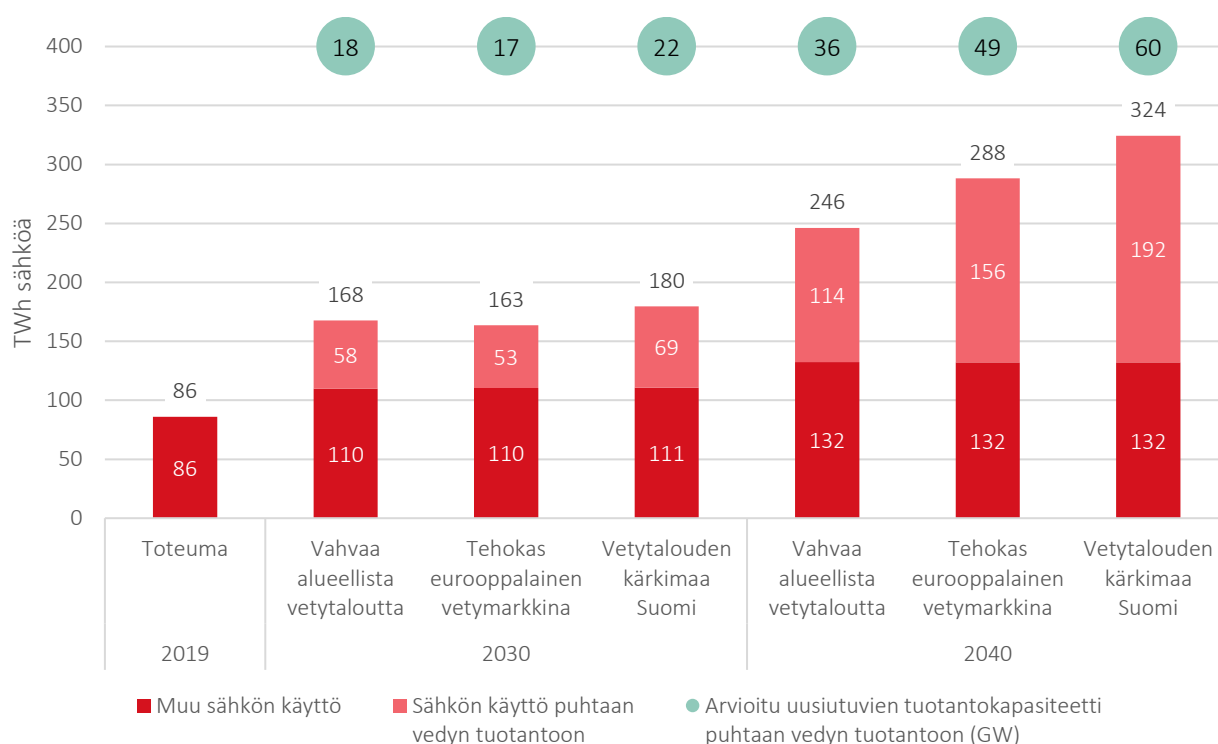
Kuva 10 Suomen harmaan vedyn toteutunut käyttö ja skenaariot puhtaan vedyn kotimaan käytöstä ja viennistä, sekä puhtaan vedyn tuottamiseen tarvittavasta elektrolyyserikapasiteetista

Skenaarioissa puhdasta vetyä tuotetaan Suomessa noin 35–50 TWh vuonna 2030 ja 80–135 TWh vuonna 2040. Näiden määrien tuottamiseksi Suomessa on asennettuna 10–15 GW elektrolyyserikapasiteettia jo vuoteen 2030 mennessä, ja kapasiteetti moninkertaistuu noin 25–40 GW tasolle vuoteen 2040 mennessä.

7.11.2023

5.3 Sähköntuotannon kasvu eri skenaarioissa - Suomen edullinen tuulisähkö kilpailukyvyn ajurina

Skenaarioissa Suomen sähkön kulutus lähes kaksinkertaistuu nykyisestä vuoteen 2030 mennessä ja kolmin-nelinkertaistuu vuoteen 2040 mennessä, pääosin vedyntuotannon tarvitseman sähkön ajamana (Kuva 11). Vedyn tuotannosta tulee skenaarioissa Suomen suurin sähkön käyttökohde. Vuonna 2030 sähköä käytetään vedyntuotantoon 50–70 TWh, ja vuoteen 2040 mentäessä 110–190 TWh skenaariosta riippuen. Vuonna 2040 vedyn tuotantoon käytetään jopa enemmän sähköä kuin kaikissa muissa kulutuskohteissa yhteensä, huolimatta siitä, että myös muun sähkön käytön nähdään kasvavan mm. teollisuuden, liikenteen ja lämmityksen sähköistämisen sekä uuden teollisuuden ja datakeskusten myötä.



Kuva 11 Suomen sähkön käyttö jaoteltuna sähkön käyttöön puhtaan vedyn tuotantoon sekä muuhun käyttöön, sekä arvio puhtaan vedyn tuottamiseen tarvittavasta uusiutuvasta kapasiteetista^{25,26}

Uusiutuvaan sähköntuotantoon tarvitaan hyvin merkittäviä investointeja kasvavaan sähkön kulutukseen vastaamiseksi puhtaalla sähköllä. Maa- ja merituulivoiman sekä aurinkovoiman määrät kasvavat huomattavasti kysyntään vastaamiseksi. Kuva 11 esittää arvion tarvittavasta uusiutuvan sähkön tuotantokapasiteetista puhtaan vedyn tuotantoon. Sen lisäksi uusiutuvilla vastataan myös muuhun kasvaneeseen kysyntään. Suurin osa tästä on maatuulivoimaa, joka on Suomessa kilpailukykyisintä uutta sähköntuotantoa ja johon perustuvia tuotantohankkeita on kehitteillä erittäin paljon.

²⁵ Lähde Suomen sähkön käytölle vuonna 2019: Suomen virallinen tilasto (SVT, 2019): Energian hankinta ja kulutus

²⁶ Uusiutuvalla sähkön tuotantokapasiteetilla viitataan tässä yhteydessä maa- ja merituulivoimaan sekä aurinkovoimaan. Kapasiteetti arvioitu keskimääräisellä 3200 tunnin huipunkäyttöajalla.

7.11.2023

Skenaarioissa maatuulivoiman kapasiteetti kasvaa yli 20 gigawattiin vuoteen 2030 mennessä ja 50–60 gigawattiin vuoteen 2040 mennessä. Tämä edellyttää, että maatuulivoiman kapasiteetti kasvaisi noin 3–4 GW vuodessa 2030-luvulla, kun lähivuosien kasvuvauhdin on ennakoitu olevan maksimissaan noin 2 GW vuodessa. Uusiutuvien tuotantomuotojen rakennusvauhti, etenkin maatuulivoiman, onkin yksi keskeinen epävarmuustekijä skenaarioissa.

Mikäli maatuulivoiman lisärakentaminen olisi nopeampaa, puhtaan vedyn tuotantomäärät Suomessa voisivat olla vielä esitettyäkin suurempia. Toisaalta, mikäli maatuulivoiman lisärakentaminen olisi hitaampaa, rajoittaisi se myös puhtaan vedyn tuotantoa. Tuulivoiman ja sen vaatiman energiansiirtoinfrastruktuurin nopea luovutus sekä Itä-Suomen tuulivoimapotentiaalin hyödyntäminen tukisivat siten vetyinvestointien toteutumisedellytyksiä. Maatuulivoiman lisäksi Suomeen rakennetaan kaikissa skenaarioissa 4–9 GW merituulivoimaa ja 7–15 GW aurinkovoimaa vuoteen 2040 mennessä.

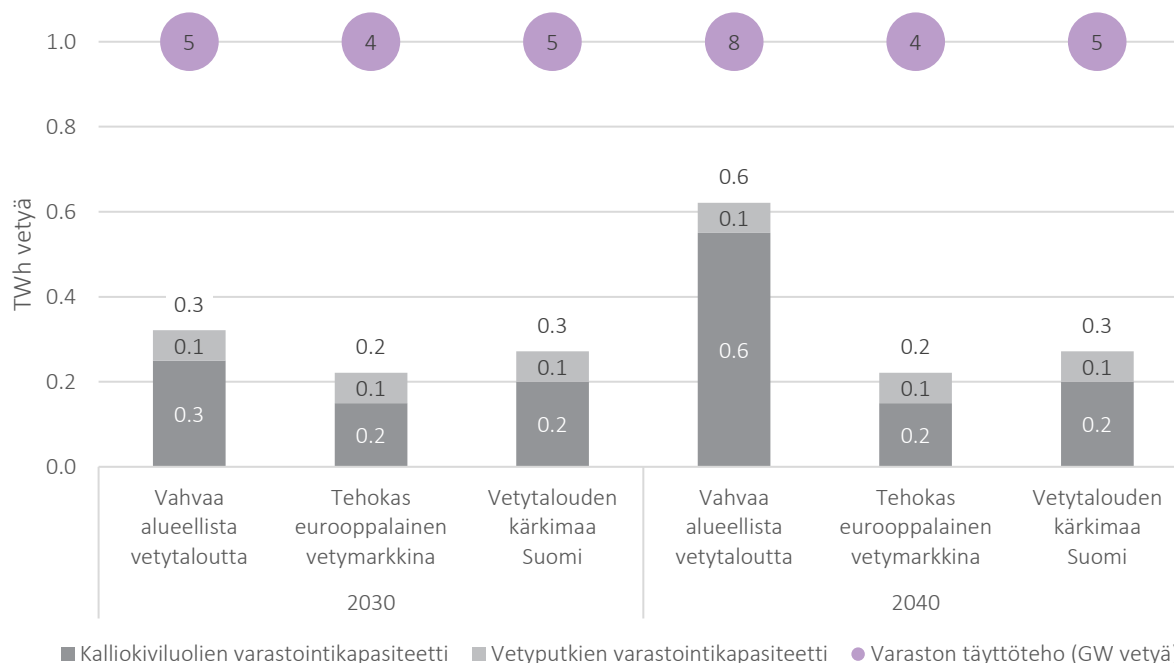
Maa- ja merituulivoiman sekä aurinkovoiman tuotanto ylittää skenaarioissa 100–115 TWh tasolle vuoteen 2030 mennessä ja kasvaa siitä edelleen 215–290 TWh tasolle vuoteen 2040 mennessä. Se tarkoittaa, että valtaosa Suomen tuotannosta vaihtelisi sääolosuhteiden mukaan. Tämä merkitsee valtavaa tarvetta kulutuksen joustolle, jotta sähköjärjestelmä pysyy tasapainossa.

5.4 Vetyvarastojen rooli eri skenaarioissa - Vedyn varastoinnilla joustoa energiajärjestelmään

Vedyn varastot voivat mahdollistaa joustoa ja kustannustehokkuutta energiajärjestelmään. Sähkö- ja vetyjärjestelmän sektori-integraation on mahdollista tuottaa valtavia määriä uusiutuvaa sähköä vedyntuotantoon maa- ja merituulivoimalla sekä aurinkovoimalla, vaikka niiden tuotanto vaihtelee sääolosuhteiden mukaan. Energiajärjestelmässä esimerkiksi laaja vetyverkko jo itsessään voi toimia energiapuskurina.

Skenaarioissa hahmoteltu vedyn tuotannon ja kulutuksen voimakas kasvu edellyttää merkittävää vedyn varastointia, jotta sään mukaan vaihteleva tuulivoima ja luonteeltaan tasaiseksi oletettu teollinen vedyn kulutus voidaan tasapainottaa. Siksi skenaarioissa on yhtenä tekijänä mallinnettu vetyvarastojen roolia energiajärjestelmän tasapainotuksen sekä tuotannon ja kulutuksen välisten erojen tasaamisessa. Kuva 12 esittää näiden vetyvarastojen kapasiteetit energiamääränä sekä täyttötehona.

7.11.2023



Kuva 12 Vetyvarastojen kapasiteetti ja täyttöteho skenaarioissa

Varastomäärissä on huomioitu sekä louhittuihin kivuluoliin perustuvat varastot että vedynsiirtoinfrastruktuurin varastointikapasiteetti eli ns. puskurikapasiteetti. Kaikissa skenaarioissa tarve järjestelmän joustolle ja sitä myöten vedyn varastoinnille kasvaa merkittävästi vuoteen 2040 mennessä, mutta skenaariot erkanevat toisistaan. Kotimainen kivuluolavarastointi on merkittävässä roolissa *Vahvaa alueellista vetytaloutta* -skenaariossa, kun taas muiden skenaarioiden kotimainen varastokapasiteetti perustuu valtaosin putkiverkoston varastokapasiteettiin. Näissä skenaarioissa kotimaisen varastokapasiteetin tarve on pienempi, sillä niissä päästään hyödyntämään Keski-Euroopan suolakiviluolavarastojen kapasiteetti sinne suuntautuvan vetyputken avulla.

Vahvaa alueellista vetytaloutta -skenaariossa kotimaisten vetyvarastojen yhteenlaskettu varastointikapasiteetti vastaa noin 4–5 vuorokauden kotimaista vedynkulutusta. Skenaariossa varastojen täyttöteho vastaa noin puolta elektrolyysereiden vedyn tuotantokapasiteetista. Muissa skenaarioissa kotimaisten vetyvarastojen kapasiteetti on pienempi, sillä joustoa vetyjärjestelmään saadaan hyödyntämällä Keski-Euroopan suuria ja kustannuksiltaan edullisempia suolakiviluolavarastoja vedyn viennin ja tuonnin avulla.

Vedynsiirtoinfrastruktuuri mahdollistaa laajemman vetymarkkinan syntymisen, kun yhteydet ulkomaille rakennetaan. Tämän myötä vedyn toimitusvarmuus paranee, sillä kulutusta ja tuotantoa on tasaamassa useampia toimijoita (tuotanto, kulutus ja varastointi) ja vedyn virtaussuunta voi määräytyä markkinataseen mukaisesti. Huoltovarmuuden näkökulmasta ulkomaisten suolakiviluolavarastojen lisäksi tarvitaan myös kotimaisia vetyvarastoja tasapainottamaan tuotannon vaihtelua. Osa kotimaisesta varastointitarpeesta toteutuu vetyputkiston varastointikapasiteetin kautta, mutta lisäksi skenaarioissa nähdään tarve kalliokiviluolavarastoille.

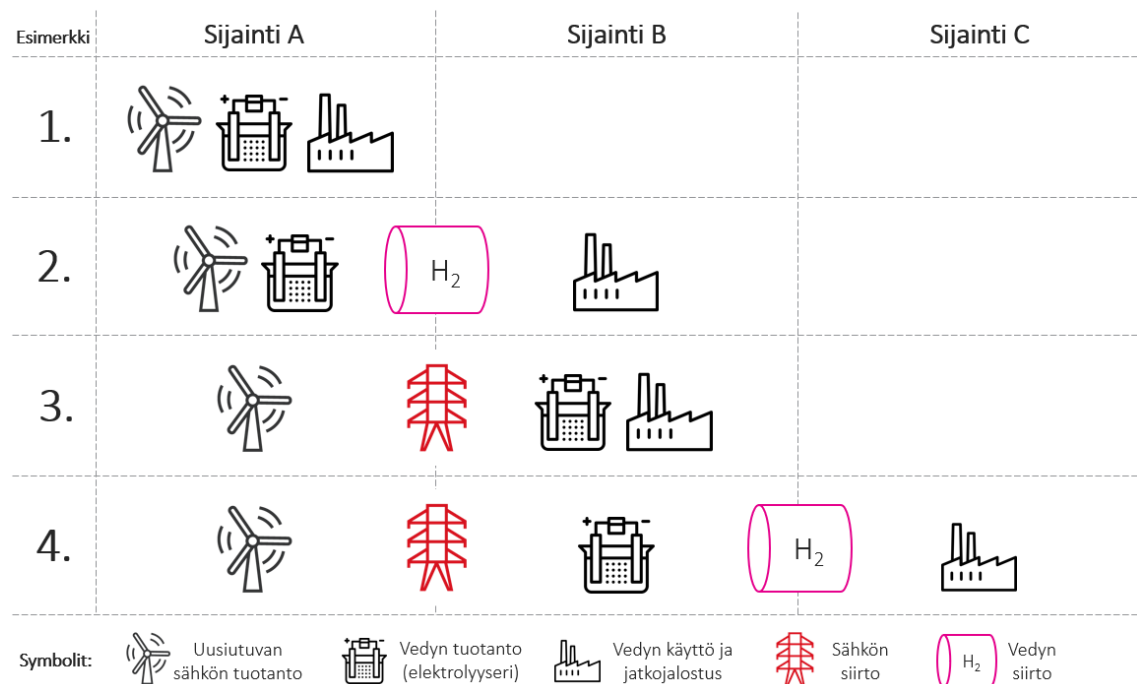
7.11.2023

6 Siirtoinfrastruktuuri mahdollistaa investoinnit Suomeen

Tässä luvussa käsittelemme skenaarioiden asettamia kehitystarpeita siirtoinfrastruktuurille Suomessa. Skenaarioissa energian siirtotarpeeseen vaikuttavia sijaintitekijöitä kuvataan luvussa 6.1, jonka jälkeen kuvataan siirtojen kehitystä luvussa 6.2. Tämän jälkeen kuvataan siirrot sähkönä ja vetynä luvussa 6.3, jos skenaarioiden sähkö- ja vetyverkon rajoitteet huomioidaan ja niitä hyödynnetään kustannustehokkaalla tavalla. Lopuksi luvussa 6.4 perustellaan sijaintiin perustuvien kannustimien tarve esittämällä tilanne, missä siirtoinfrastruktuurien kustannuksia ja käyttöä ei ole ohjattu.

6.1 Siirtotarpeeseen vaikuttavat tekijät

Puhtaan vedyn tuotanto elektrolyysillä vaatii paljon sähköä. Sähköä tarvitaan myös vedyn teolliseen jatkojalostamiseen tuotteiksi. Vaikka tuotanto- ja kulutuslaitosten sijaintiin vaikuttaa useita tekijöitä, kuten hukkalämmön hyödyntämismahdollisuudet, hiilidioksidin saatavuus käytettäessä vetyä synteettisten polttoaineiden valmistukseen, lopputuotteiden logistiikka ja maankäyttöön liittyvät asiat, on sähkön saatavuus keskeisessä roolissa. Siten vedyn tuotantolaitosten ja käyttökohteiden sijainti suhteessa sähkön tuotantoon on hyvin merkittävä tekijä sijoittumisen kannalta ja vaikuttaa ratkaisevasti Suomen sisäisen energiansiirron tarpeeseen. Kuva 13 havainnollistaa siirtotarpeen määräytymistä neljän esimerkin avulla.



Kuva 13 Energiansiirtotarve määräytyy sen mukaan, kuinka uusiutuvan sähkön tuotanto, vedyn tuotanto ja vedyn käyttö ovat sijoittuneet toisiinsa nähden

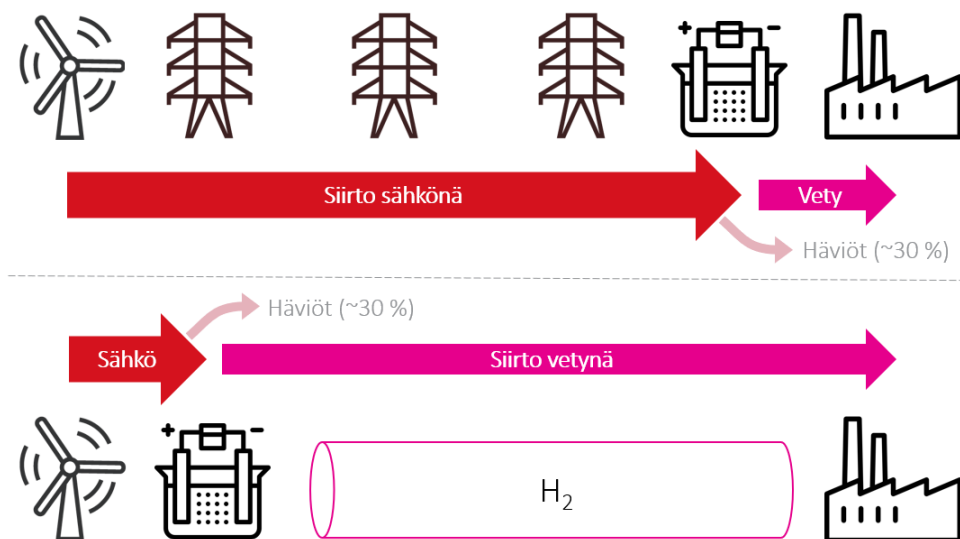
1. Uusiutuvan sähkön tuotanto, vedyn tuotanto ja vedyn käyttökohte sijaitsevat kaikki sijainnissa A: **ei laajamittaista kansallista energiansiirtotarvetta (siirto jatkojalosteina)**
2. Uusiutuvan sähkön tuotanto ja vedyn tuotanto sijaitsevat sijainnissa A, käyttökohte sijainnissa B: **energia siirretään käyttökohteeseen vetynä**

7.11.2023

3. Uusiutuvan sähkön tuotanto sijaitsee sijainnissa A, vedyn tuotanto ja käyttökohde sijainnissa B: **energia siirretään käyttökohteeseen sähkönä**
4. Uusiutuvan sähkön tuotanto sijainnissa A, vedyn tuotanto sijainnissa B, ja vedyn käyttökohde sijainnissa C: **energiaa siirretään sekä sähkönä vedyntuotantoon että vetynä käyttökohteeseen**

Yksinkertaistetusti siirtotarve sähkönä ja vetynä on vähäisin, mikäli sekä uusiutuvan sähkön tuotanto että vedyn tuotanto ja käyttö sijoittuvat mahdollisimman lähelle toisiaan (esimerkki 1). Vedyn siirtotarve korostuu, mikäli vedyn tuotantolaitokset sijoittuvat lähelle uusiutuvan sähkön tuotantoa, mutta kauas vedyn käyttökohteista (esimerkki 2). Sähkön siirtotarve taas korostuu, mikäli vedyn tuotantolaitokset ja käyttökohteet sijoittuvat kauas uusiutuvan sähkön tuotannosta (esimerkki 3). Energiansiirtotarvetta on sekä sähkönä että vetynä, mikäli kaikki tekijät sijaitsevat eri paikoissa (esimerkki 4). Lopulta jatkojalostuksessa käytetyn sähkön ja vedyn energia sitoutuu tuotteisiin, kuten kemikaaleihin ja polttoaineisiin, joita voidaan siirtää esimerkiksi laivarahtina.

Eryyisesti vedyn tuotantolaitosten sijoittuminen vaikuttaa siihen, siirretäänkö energia sähkönä vai vetynä. Esimerkiksi pohjoisessa tuulipuistossa kiinni olevalla elektrolyysillä voitaisiin tuottaa puhdasta vetyä, joka siirretään etelän käyttökohteeseen. Vastaavasti elektrolyyseri voi sijaita kulutuskohteen lähellä kaukana sähkön tuotannosta, jolloin siirto toteutetaan sähkönä. Sähkönä energiaa on kuitenkin siirrettävä enemmän saman vetymäärän tuottamiseksi, sillä elektrolyysissä sähköä kuluu häviöihin arviolta noin 30 % (Kuva 14). Toisaalta häviöistä suurin osa on hyödynnettävissä hukkalämpönä, mikä voi ajaa vedyn tuotannon sijoittamista esimerkiksi lähelle suuria kaupunkeja ja niiden kaukolämpöverkkoja.



Kuva 14 Energiansiirtotarve vetynä on pienempi, jos energian loppukäyttö on vetynä.

Energiainfrastruktuurin tarpeeseen vaikuttaa myös energianvarastointitarpeet, joihin vetynfraktuuri pystyy vastaamaan puskurivarastointikyvyllään ja mahdollistamalla pääsyn muualla sijaitseviin geologisiin varastoihin.

7.11.2023

6.2 Suomen sisäinen energiansiirtotarve moninkertaistuu nykyisestä

Skenaarioiden näyttämän potentiaalın saavuttamiseksi on tärkeää, että Fingrid ja Gasgrid tunnıstavat asiakkaidensa siirtotarpeet ajoissa ja kehittävät energiansiirtoverkkoja etupainotteisesti, mikä mahdollistaa hankkeiden kehityksen. Korkean kasvun skenaarioiden mahdollistamiseksi on tärkeää, että niin uusiutuvan sähköın tuotanto kuin vedyn tuotantolaitokset ja käyttökohteet sijoittuisivat järjestelmän kannalta järkevästi ja joustaisivat tarvittaessa. Markkinan tulisi myös ohjata sähköın ja vedyn siirtoa yhteiskunnan kokonaisoptimin mukaisesti. Sähkö- ja vetyjärjestelmä voivat toimia hyvin yhteen ja tukea toisiaan, mikä mahdollistaisi skenaarioissa nähtävän kasvun mahdollisimman kustannustehokkaasti.

Suomessa suurin osa sähköstä kulutetaan etelässä, kun taas merkittävä osa uusiutuvan sähköntuotannon kasvupotentiaalista on pohjoisessa. Uusiutuvan sähköın tuotannon ja sitä runsaasti tarvitsevan puhtaan vedyn tuotannon sijoittumisella on siirtotarpeeseen erittäin suuri vaikutus. Suomen sisällä tärkeäksi on tunnıstettu etenkin pohjois-eteläsuuntainen siirtotarve, mikä voi muodostua rajoittavaksi tekijäksi energiansiirron osalta.

Skenaarioiden mallinnuksessa Suomi on jaettu pohjoiseen ja eteläiseen alueeseen Keski-Suomen kohdalta (Kuva 15). Tämän ns. Keski-Suomen poikkileikkauksen avulla kuvataan tarvittava energiansiirto Suomen sisällä. Poikkileikkauksen yli tapahtuvaa siirtotarvetta on tärkeää ennakoida, sillä se on määritelty nykyisen sähköverkon mukaan pohjois-eteläsuuntaista siirtokapasiteettia rajoittavana tekijänä. Jo Fingridin sähköjärjestelmävisio²⁷ skenaarioissa pohjois-eteläsuuntainen sähköın siirtokapasiteetti täytyy moninkertaistaa vaiheittain pitkällä aikavälillä.



Kuva 15 Keski-Suomen poikkileikkaus ja tyypillisen siirtotarpeen suuntaa kuvaava nuoli

Suomen nykyisistä tuulivoimaloista suurin osa sijaitsee Pohjanmaalla, kun taas Etelä- ja Itä-Suomessa tuulivoimaloita ei juurikaan ole. Etelä-Suomessa tuulivoiman potentiaalia rajoittaa muun muassa tiheämpi asutus. Itä-Suomessa rajoitteena on vaikutukset tutkavalvontaan, joka rajaa tuulivoiman

²⁷ Fingridin sähköjärjestelmävisio 2023 (Fingrid, 2023)

7.11.2023

rakennusalueita ja hankkeiden kokoa, mikä vähentää toimijoiden kiinnostusta niiden kehittämiseen. Rajoitteiden takia valtaosa uusista tuulivoimahankkeista sijaitsee Länsi- ja Pohjois-Suomessa. Skenaarioissa Itä-Suomen tutkavalvonnan rajoitteiden on kuitenkin oletettu ratkeavan²⁸, jolloin maatuulivoimaa rakennetaan myös Itä-Suomeen. Skenaarioissa valtaosa uusiutuvan sähkön tuotannon kasvusta sijoittuu kuitenkin Keski-Suomen poikkileikkauksen pohjoispuolelle.

Suomessa vetyä käytetään nykyisin kemianteollisuudessa etenkin Etelä-Suomessa²⁹, ja vedyn tuotanto on keskittynyt pitkälti vetyä käyttävien teollisuuslaitosten mukaan samalle teollisuusalueelle. Skenaarioissa harmaan vedyn käyttö korvataan puhtaalla vedyllä nykyisillä teollisuuslaitoksilla, minkä lisäksi tärkeänä ajurina on uuden teollisuuden syntyminen. Tähän mennessä julkistetuista kotimaisista vetyprojekteista suuri osa on etelässä³⁰, mm. Vantaalla, Porvoossa ja Inkoossa³¹. Tämän lisäksi useita suunniteltuja investointeja on Pohjanlahden rannikolla³² ja kasvunäkymiä on myös Itä-Suomessa³³. Skenaarioissa valtaosa vedyn kotimaisesta kysynnästä on kuitenkin sijoittunut etelään.

Nykyisin vety tuotetaan pääosin lähellä käyttökohdetta, mutta tulevaisuuden energiajärjestelmässä vedyn tuotanto ja käyttö voivat sijoittua eri maantieteellisille alueille, mikäli vetyinfrastruktuuri kehittyy mahdollistamaan tarvittavan siirron näiden välillä. Vedyn tuotannon sijoittuminen maantieteellisesti onkin skenaarioiden yksi merkittävimmistä kysymyksistä, mikä vaikuttaa hyvin paljon tarvittavaan energiansiirtoinfrastruktuuriin.

Skenaarioissa kasvavan uusiutuvan sähkön tuotanto painottuu pohjoiseen osaan ja vedyn kysyntä eteläiseen osaan Suomea. Ratkaisevana tekijänä Suomen sisäiselle siirtotarpeelle pohjoisen ja eteläisen alueen välillä jää vedyn tuotannon eli elektrolyysereiden sijoittuminen.

6.3 Sähkö- ja vetyinfrastruktuurin yhteiskehitys mahdollistaa siirrot

Skenaarioiden siirtotarpeet ovat mahdollisia toteuttaa kustannustehokkaasti hyödyntämällä sekä sähkön että vedyn siirtoinfrastruktuurin kapasiteettia ja huomioimalla sijainnin merkitys etenkin vedyn tuotannon sijoittumisessa. Skenaarioissa vedyn tuotannon sijoittumista Suomessa on ohjattu annetun siirtokapasiteetin puitteissa huomioiden energiansiirron rajoitteet ja kustannukset.

Tässä luvussa esitetään skenaarioittain Suomen sähkön ja vedyn vuotuinen tuotanto sekä kulutus ja vedyn varastointi pohjoisella ja eteläisellä alueella. Tuotannon ja kulutuksen erotuksena saadaan vuositaseet, jotka määräävät muodostuvan energiansiirtotarpeen alueiden välillä. Alueiden sisällä on myös tarvetta siirrolle, mikäli tuotanto- ja kulutuskohteet eivät sijaitse samassa pisteessä. Lisäksi esitetään nettona sähkön ja vedyn vienti tai tuonti, mikä vaikuttaa myös kotimaan siirtotarpeisiin.

²⁸ Mahdollisia ratkaisukeinoja on esitetty keväällä 2023 julkaistussa selvityksessä [Itäisen Suomen tuulivoimarakentamisen tehostaminen](#) (Räty, 2023)

²⁹ [Business Finland, National Hydrogen Roadmap for Finland](#): (Laurikko, et al., 2020)

³⁰ [Valtioneuvoston kanslia, Vetytalous – mahdollisuudet ja rajoitteet](#) (Sivill, et al., 2022)

³¹ [Neljän miljardin euron investointi suunnitteilla Inkooseen – Tiedote](#) (Business Finland, 3.1.2023)

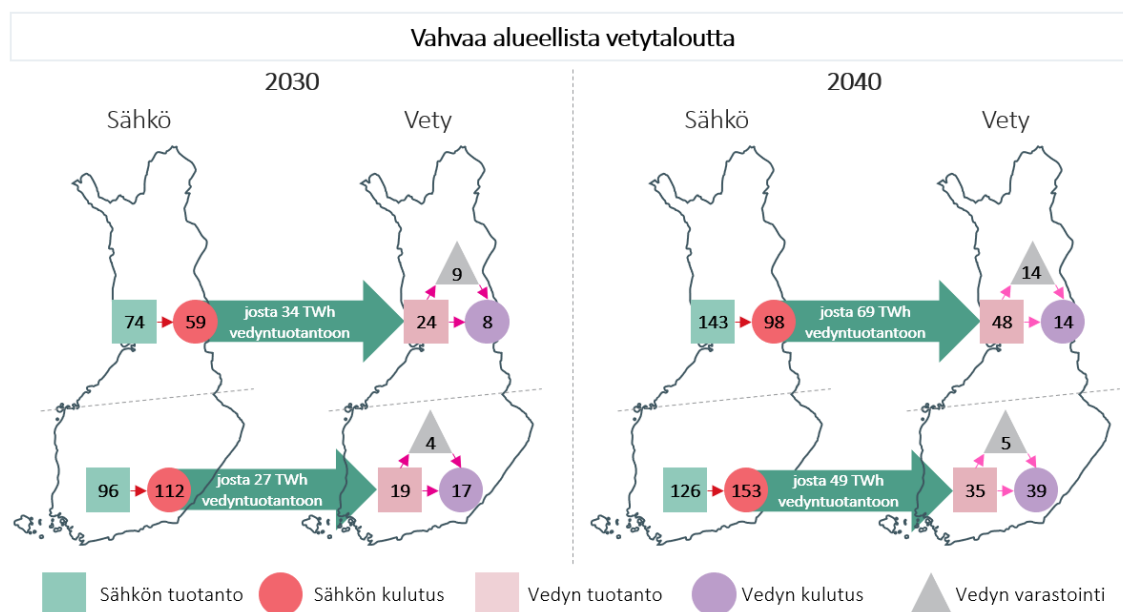
³² BotH₂nia-verkosto (lisätietoja: <https://www.both2nia.com/fi/verkosto>)

³³ Suomen Vetylaakso ry perustettu edistämään itäisen Suomen elinvoimaa ja teollisia investointeja (Lappeenranta.fi, 2.2.2023)

7.11.2023

6.3.1 Vahvaa alueellista vetytaloutta

Kuva 16 ja Taulukko 3 näyttävät Suomen sähkön ja vedyn tuotannon ja kulutuksen sekä vedyn varastoinnin vuositason Vahvaa alueellista vetytaloutta -skenaariossa. Uusiutuvan sähkön tuotanto kasvaa etenkin pohjoisella alueella, kun valtaosa kulutuksesta on etelässä. Tämän sähkön hyödyntämiseksi vedyn tuotanto painottuu pohjoiseen, mikä vähentää sähkön siirtotarvetta pohjoisesta etelään. Etelässä on myös merkittävää vedyn tuotantoa, ja vedyn tuotanto ja kulutus ovat etelässä lähes tasapainossa.



Kuva 16 Suomen sähkön ja vedyn tuotanto ja kulutus sekä vedyn varastointi vuositason Vahvaa alueellista vetytaloutta -skenaariossa. Luvut TWh sähköä/vetyä.

Taulukko 3 Suomen sähkön ja vedyn tuotanto ja kulutus alueittain Vahvaa alueellista vetytaloutta -skenaariossa. *sähkö vedyntuotantoon, **pyöritys vaikuttaa taseeseen. Luvut TWh sähköä/vetyä.

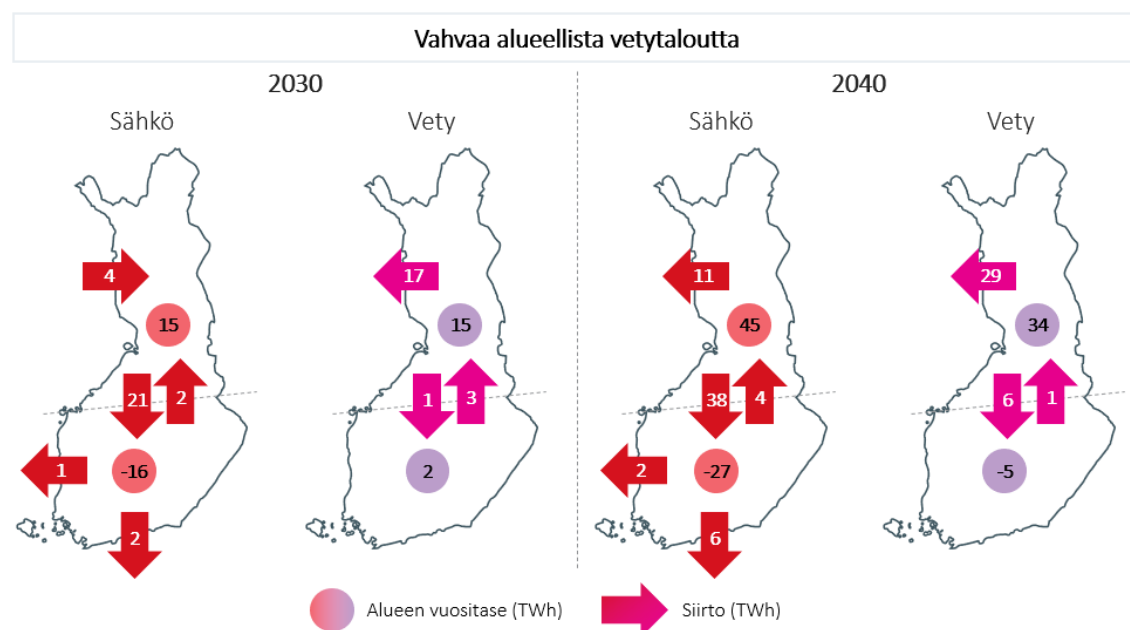
VAHVAA ALUEELLISTA VETYTALOUTTA		2030		2040	
		SÄHKÖ	VETY	SÄHKÖ	VETY
POHJOINEN ALUE	Tuotanto	74	24	143	48
	Kulutus (josta H2*)	59 (34*)	8	98 (69*)	14
	Tase	+15	+15**	+45	+34
ETELÄINEN ALUE	Tuotanto	96	19	126	35
	Kulutus (josta H2*)	112 (27*)	17	153 (49*)	39
	Tase	-16	+2	-27	-5**

Kuva 17 esittää Vahvaa alueellista vetytaloutta -skenaariossa sähkö- ja vetytaseen (tuotanto – kulutus) Suomen pohjoisella ja eteläisellä alueella sekä siirtotarpeen näiden välillä. Tasapainon myötä siirtotarpeen alueiden välillä vähenee, mutta alueen sisällä siirrolle on tarvetta tuotannon ja kulutuksen välillä, mikäli ne eivät sijaitse samassa pisteessä. Lisäksi vedynsiirtoinfrastruktuuri mahdollistaa varastoinnin kaikille alueen toimijoille sekä putken puskurikapasiteetissa että suurissa kalliokiviluolissa. Vedyn varastointia on huomattava määrä etenkin pohjoisessa osassa Suomea. Sähkön osalta pohjoisen alueen ylijäämä

7.11.2023

kasvaa uusiutuvan sähkön tuotannon myötä, kun taas eteläisen alueen alijäämä kasvaa kulutuksen noustessa. Tämä johtaa kasvavaan siirtotarpeeseen sähköä pohjoisesta etelään.

Vedyn tuotanto ja kulutus ovat eteläisellä alueella lähestulkoon tasapainossa, kun taas pohjoisella alueella on ylijäämää. Skenaariossa vetyä viedään vuositasolla Pohjois-Ruotsiin suuria määriä, mikä käytännössä vaatisi vetyputken ulottumaan pohjoisella alueella Ruotsin rajalta Pohjanmaalle saakka, jotta alueen vedyn tuotanto saadaan hyödynnettyä. Alueiden välinen pohjois-eteläsuuntainen siirtotarve jää kuitenkin pienemmäksi kuin muissa skenaarioissa vedyn tuotannon sijoittuessa pääosin pohjoiselle alueelle.



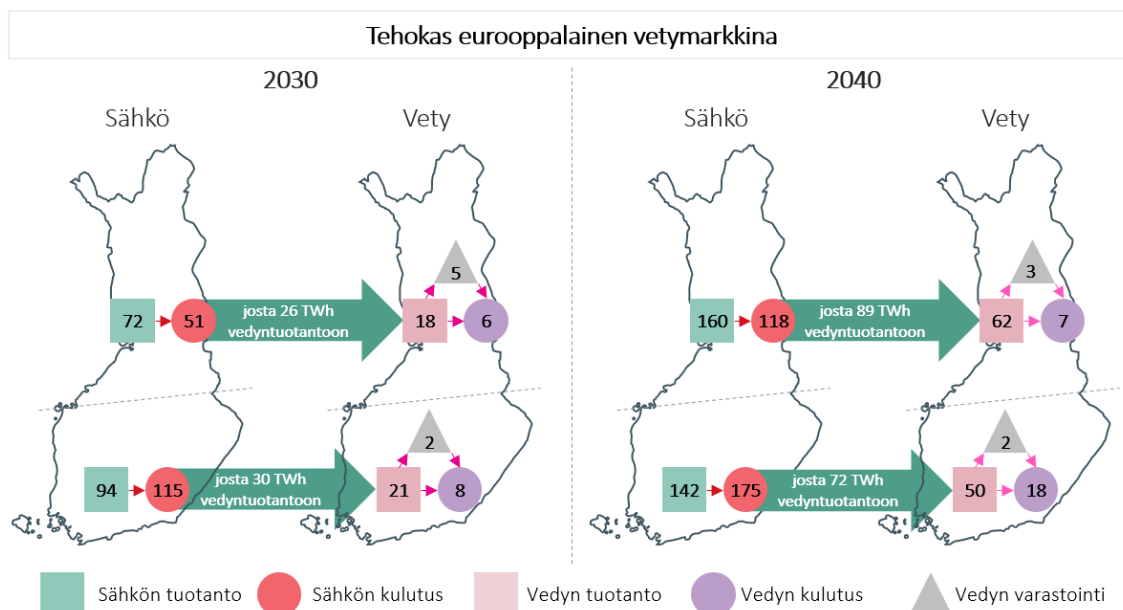
Kuva 17 Suomen sähkön ja vedyn vuositaseet (alueittainen tuotanto-kulutus) sekä siirrot Vahvaa alueellista vetytaloutta -skenaariossa. Luvut TWh sähköä/vetyä.

6.3.2 Tehokas eurooppalainen vetymarkkina

Kuva 18 havainnollistaa sähkö- ja vetyjärjestelmän alueellisen tuotannon ja kulutuksen Tehokas eurooppalainen vetymarkkina -skenaariossa, minkä lisäksi Taulukko 4 esittää alueiden taseet sähköä ja vetynä. Sähkön tuotannon ja kokonaiskulutuksen suhteen kehitys on pitkälti samankaltainen Vahvaa alueellista vetytaloutta -skenaariossa: valtaosa tuotannosta pohjoiseen ja kulutuksesta etelään. Skenaariossa Suomen vedyn kulutus on kuitenkin huomattavasti pienempää, mutta kulutus painottuu kuitenkin eteläiselle alueelle.

Suuri osa sähköstä käytetään vedyn tuotantoon, mikä jakaantuu melko tasaisesti alueille etenkin vuonna 2030. Vedyn tuotannon sijoittumista etelään ajaa elektrolyysin hukkalämmöstä saatava hyöty sekä pienempi siirtotarve Suomen sisällä etelän kulutuskohteisiin sekä siirtoon Suomen ja Keski-Euroopan välillä. Toisaalta vedyn tuotannon sijoittumista pohjoiseen ajaa etenkin sähköntuotannon hyvä saatavuus alueella.

7.11.2023



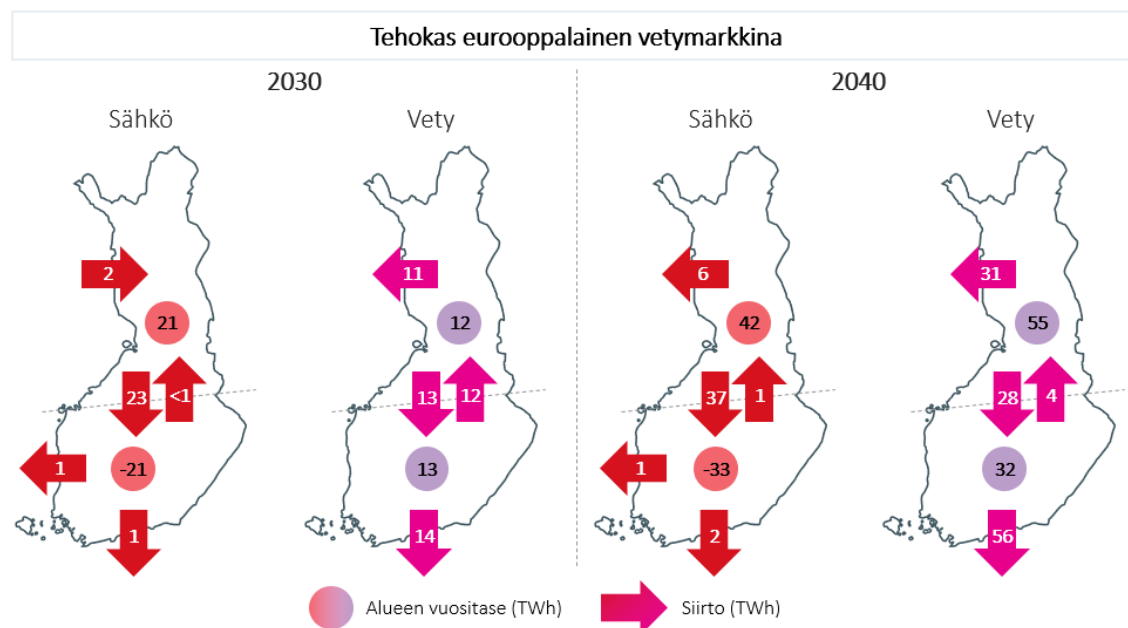
Kuva 18 Suomen sähkön ja vedyn tuotanto ja kulutus sekä vedyn varastointi vuositasolla Tehokas eurooppalainen vetymarkkina -skenaariossa. Luvut TWh sähköä/vetyä.

Taulukko 4 Suomen sähkön ja vedyn tuotanto ja kulutus alueittain Tehokas eurooppalainen vetymarkkina -skenaariossa. *sähkö vedyntuotantoon. Luvut TWh sähköä/vetyä.

TEHOKAS EUROOPPALAINEN VETYMARKKINA		2030		2040	
		SÄHKÖ	VETY	SÄHKÖ	VETY
POHJOINEN ALUE	Tuotanto	72	18	160	62
	Kulutus (josta H2*)	51 (26*)	6	118 (89*)	7
	Tase	+21	+12	+42	+55
ETELÄINEN ALUE	Tuotanto	94	21	142	50
	Kulutus (josta H2*)	115 (30*)	8	175 (72*)	18
	Tase	-21	+13	-33	+32

Kuva 19 näyttää Suomen sähkö- ja vetytaseen sekä siirrot skenaariossa. Sähkötaseen osalta ylijäämä pohjoisessa ja alijäämä etelässä kasvavat ja sen myötä myös siirtotarve pohjoisesta etelään kasvaa huomattavasti. Vetytase on vahvasti positiivinen ja vedynsiirtoinfrastruktuuri mahdollistaa kilpailukykyisen vedyn nettoviennin vuositasolla. Vedynsiirtoinfraalla pystytään myös tasapainottamaan alueiden hetkellinen yli- tai alijäämä.

7.11.2023



Kuva 19 Suomen sähkön ja vedyn vuositus (alueittainen tuotanto-kulutus) sekä siirrot Tehokas eurooppalainen vetymarkkina -skenaariossa. Luvut TWh sähköä/vetyä.

Vuonna 2030 Suomen pohjois-eteläsuuntainen vedynsiirto on lähes tasapainossa. Vetyä siirretään molempiin suuntiin riippuen alueiden sen hetkisestä taseesta tuotannon, varastoinnin ja kulutuksen osalta. Vedyn siirtoa on molempiin suuntiin myös rajat ylittävällä siirtoinfraalla, etenkin Keski-Euroopan putkiyhteydellä, jonka avulla voidaan hyödyntää Euroopan laajoja vedyn suolakiviluolavarastojen tuomaa joustoa. Tuontia on esimerkiksi ajanjaksoina, jolloin Suomessa on vähän sähkön tuotantoa ja sen hinta vedyn tuottamiseen olisi kalliimpaa kuin tuontivetyä.

Vuoteen 2040 mennessä sekä sähkön että vedyn siirtotarve pohjoisesta etelään kasvaa huomattavasti. Siirtotarve pelkästään sähköinä on lähes nelinkertainen nykyiseen verrattuna eteläisen alueen alijäämän kasvun myötä. Mikäli vedyn tuotantoa sijoituisi enemmän etelään, tämä tarkoittaisi vielä suurempaa siirtotarvetta sähköinä. Vuoteen 2040 mennessä myös vedyn vientimäärät kasvavat huomattavasti Suomen kilpailukykyisen vedyn tuotannon myötä.

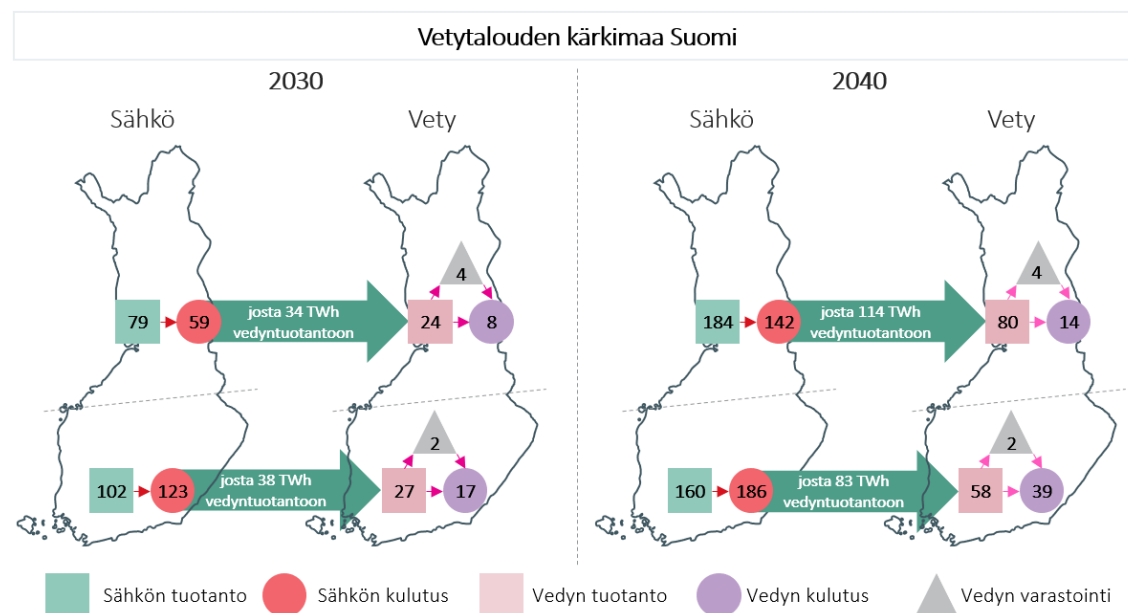
Vastaavan nettoenergiämäärän siirto sähköinä Eurooppaan (56 TWh vetyä vastaa noin 80 TWh sähköä) samalla huipunkäyttöajalla vaatisi lähes 19 GW sähkönsiirtokapasiteettia eli noin 19 kappaletta nykyisen kaltaista sähkön rajasiirtoyhteyttä, mikä ei olisi sähköjärjestelmän näkökulmasta tehokasta. Vetyverkko mahdollistaa erittäin suuren energian siirron ja siten vedyn tuotannon sijoittumisen tasapainoisemmin Suomeen, pääsyy Keski-Euroopan varastoihin sekä vedyn viennin ja tuonin markkinatilanteen mukaan.

6.3.3 Vetytalouden kärkimaa Suomi

Kuva 20 ja Taulukko 5 näyttävät Vetytalouden kärkimaa Suomi -skenaariion sähkön ja vedyn tuotannon, varastoinnin ja kulutuksen alueittain Suomessa. Skenaariossa sekä sähköä että vetyä tuotetaan huomattavasti enemmän muihin skenaarioihin nähden. Sähkön tuotannon kasvu painottuu samaan tapaan pohjoiseen ja vedyn kulutuksen kasvu etelään. Vedyn tuotantomäärät ovat suhteellisen tasapainossa vuonna 2030, mutta vuoteen 2040 mennessä suuri osa vedystä tuotettaisiin pohjoisessa

7.11.2023

lähellä sähköntuotantoa. Näin osa energiansiirrosta, jossa energian loppukäyttö on vetynä, voidaan hoitaa tehokkaammin pohjoisesta etelään vetynä.



Kuva 20 Suomen sähkön ja vedyn tuotanto ja kulutus sekä vedyn varastointi vuositasolla Vetytalouden kärkimaa Suomi -skenaariossa. Luvut TWh sähköä/vetyä.

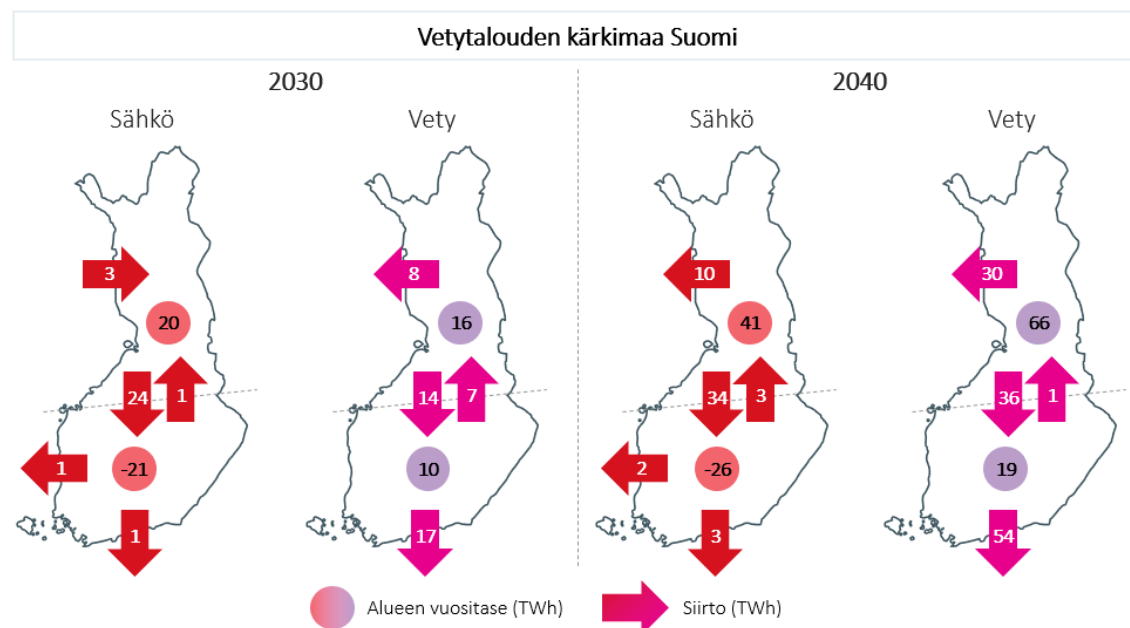
Taulukko 5 Suomen sähkön ja vedyn tuotanto ja kulutus alueittain Vetytalouden kärkimaa Suomi -skenaariossa. *sähkö vedyntuotantoon, **pyöristys vaikuttaa taseeseen. Luvut TWh sähköä/vetyä.

VETYTALouden KÄRKIMAA SUOMI		2030		2040	
		SÄHKÖ	VETY	SÄHKÖ	VETY
POHJOINEN ALUE	Tuotanto	79	24	184	80
	Kulutus (josta H2*)	59 (34*)	8	42 (114*)	14
	Tase	+20	+16	+41**	66
ETELÄINEN ALUE	Tuotanto	102	27	160	58
	Kulutus (josta H2*)	123 (38*)	17	186 (83*)	39
	Tase	-21	+10	-26	+19

Kuva 21 näyttää alueellisista sähkön ja vedyn taseista muodostuvat siirrot bruttona Suomessa pohjois-eteläsuunnassa ja nettona vienti- tai tuontimäärät. Skenaariossa hyödynnetään tehokkaasti sekä sähkön että vedyn siirtoinfrastruktuuria Suomen sisällä: siirrot sekä sähkönä että vetynä ovat samassa mittaluokassa molempina tarkasteluvuosina.

Sähkönä siirto painottuu etenkin pohjoisen ylijäämäiseltä alueelta etelän alijäämäiselle alueelle. Vetynä molemmat alueista ovat ylijäämäisiä ja siirtoja on vuonna 2030 tasaisemmin molempiin suuntiin niin Suomen sisällä kuin myös rajat ylittävillä yhteyksillä. Vuoteen 2040 mennessä Suomen sisällä pohjois-eteläsuuntaiset siirrot kasvavat huomattavasti sekä sähkönä että vetynä. Vedyn siirtotarve painottuu myös pohjoisesta etelään sekä myös yhä suurempaan vientiin Pohjois-Ruotsiin ja Keski-Eurooppaan.

7.11.2023



Kuva 21 Suomen sähkön ja vedyn vuositaseet (alueittainen tuotanto-kulutus) sekä siirrot Vetytalouden kärkimaa Suomi -skenaariossa. Luvut TWh sähköä/vetyä.

6.4 Suomen potentiaalin hyödyntämiseksi tarvitaan sijaintiin perustuvia kannustimia

Suuren kasvun mahdollistamiseksi on Fingridin ja Gasgrid Finlandin tärkeää pystyä ennakoimaan siirtotarpeiden kasvua, jotta investoinnit pystytään kohdistamaan sen mahdollistamiseksi. Riittävän energiansiirron varmistamiseksi on tärkeä saada kokonaiskuva investoinneista sähkön ja vedyn tuotantoon sekä kulutukseen, jotta myös siirtoinfrastruktuurien investointien sijainti ja laajuus saadaan suunniteltua mahdollisimman optimaalisesti. Siirtotarpeet sekä sähkönä että vetynä kasvavat skenaarioissa merkittävästi huolimatta siitä, että investointien sijainnissa on huomioitu siirtokyky sekä tehokkuus ohjaavina tekijöinä. Ilman sijaintia ohjaavia tekijöitä vaarana on, että siirtotarpeet ylittävät siirtokyvyn ja siirtoa ei saada tehtyä kustannustehokkaasti.

Nettosiirto sähkönä Suomen pohjoisen ja eteläiseen osaan jakavan poikkileikkauksen yli on nykyisin noin 10 TWh vuodessa. Nettosiirto tarkoittaa, että pohjoisesta siirretään etelään sähköä 10 TWh enemmän kuin etelästä pohjoiseen, vaikka siirtoa esiintyy käyttötilanteen mukaan molempiin suuntiin. Edellisen luvun mukaan energiansiirtotarve poikkileikkauksen yli vähintään kaksinkertaistuu vuoteen 2030 mennessä ja kasvaa moninkertaiseksi vuoteen 2040 mennessä jokaisessa skenaariossa.

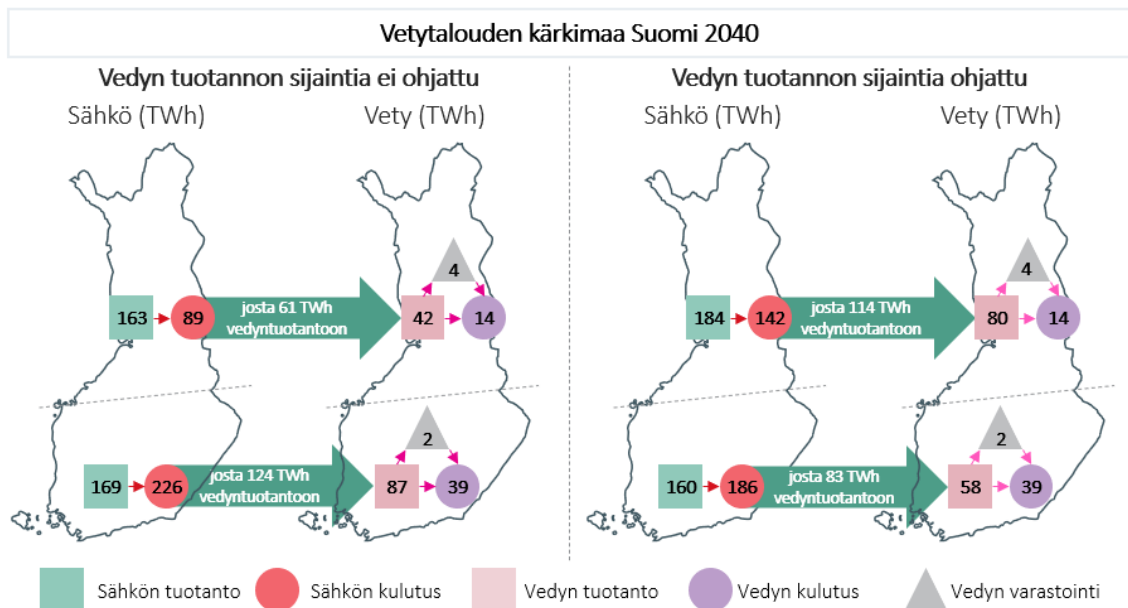
Skenaarioissa tarvittava pohjois-eteläsuuntainen siirto Suomessa ei ole mahdollista pelkästään sähköverkkoa hyödyntäen. Skenaarioissa sähkön ja vedyn siirtoinfrastruktuurien tehokas hyödyntäminen mahdollistaa Suomen kasvun puhtaan vedyn ja sen jatkojalosteiden tuottajamaana. Siirtoinfrastruktuurien tehokas hyödyntäminen skenaarioiden mittakaavassa vaatii kuitenkin tuotannon ja kulutuksen sijaintien ohjausta energiansiirtotarpeet huomioiden.

Skenaarioissa vedyn tuotannon sijaintia on ohjattu annetun siirtokapasiteetin puitteissa huomioiden energiansiirron rajoitteet ja kustannukset. Nämä antavat kannustimen elektrolyysereiden sijoittumiseen siten, että Suomen pohjois-eteläsuuntaiseen siirtoon ei muodostu energiansiirron pullonkauloja.

7.11.2023

Käytännössä tällöin hyödynnetään tehokkaammin skenaariossa rakennettua sähkön ja vedyn siirtoinfrastruktuuria. Esimerkiksi vetyä voidaan tuottaa pohjoisella alueella lähellä sähkön tuotantoa ja siirtää etelän kulutuskohteisiin (kuten Kuva 13 esimerkissä 2).

Suomen sisäistä siirtotarvetta poikkileikkauksen yli on tarkasteltu skenaarioissa myös vaihtoehdossa, jossa vedyn tuotanto sijoittuisi Suomessa samalle alueelle kuin vedyn käyttö ja jatkojalostus ”ei ohjatusti”. Tässä vaihtoehdossa suurempi osa vedyn tuotannosta painottuu eteläiseen osaan Suomea. Kuva 22 havainnollistaa tätä eroa vedyn tuotannossa Vetytalouden kärkimaa Suomi -skenaariossa vuonna 2040.



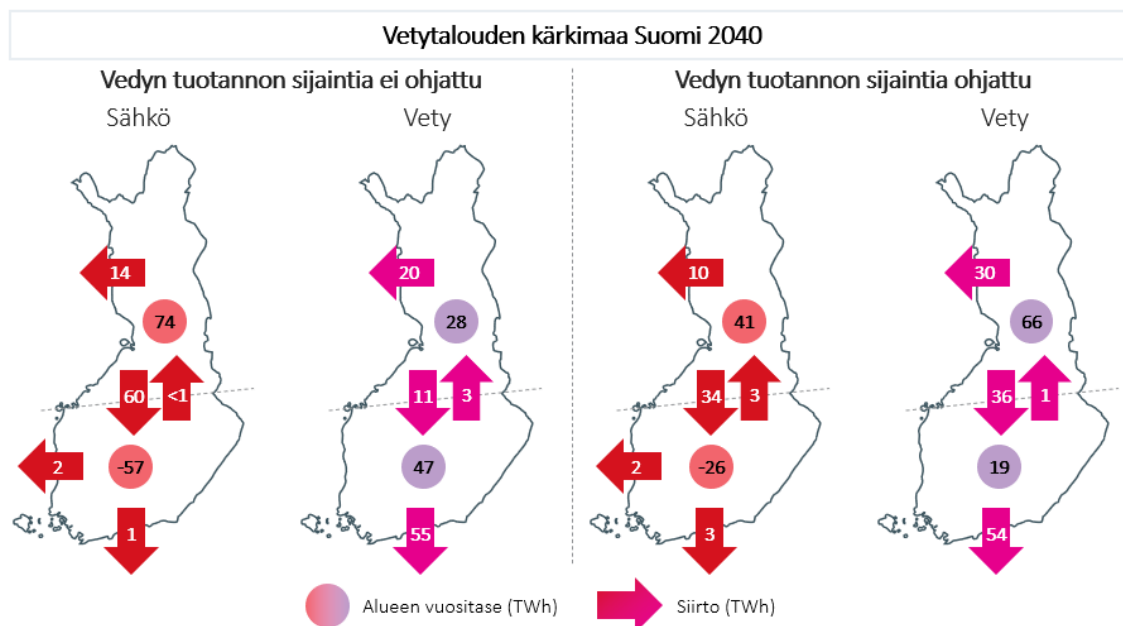
Kuva 22 Vertailu Suomen sähkön ja vedyn tuotannon ja kulutuksen sekä vedyn varastoinnista vuositasolla Vetytalouden kärkimaa Suomi -skenaariossa vuonna 2040. Luvut TWh sähköä/vetyä.

Tämän myötä sähkötaseen ylijäämä pohjoisessa ja alijäämä etelässä kasvaa (Taulukko 6). Seurauksena suurin osa siirrosta on sähköä (kuten Kuva 13 esimerkissä 3), mikä haastaa etenkin sähköverkon pohjois-eteläsuuntaista siirtokykyä. Kuva 23 esittää vuotuiset sähkön ja vedyn siirtomäärät Vetytalouden kärkimaa Suomi -skenaariossa vuonna 2040 näissä kahdessa vaihtoehdossa.

Taulukko 6 Suomen sähkön ja vedyn tuotanto ja kulutus alueittain Vetytalouden kärkimaa Suomi -skenaariossa 2040. *vedyn tuotantoon alueella kuluva sähkö **huom. pyöritys vaikuttaa taseeseen Ei ohjattu: Vedyn tuotanto painottuu etelään.

VETYTALOUDEN KÄRKIMAA SUOMI 2040		EI OHJATTU		OHJATTU	
		SÄHKÖ	VETY	SÄHKÖ	VETY
POHJOINEN ALUE	Tuotanto	163	42	184	80
	Kulutus (josta H2*)	89 (61*)	14	142 (114*)	14
	Tase	+74	+28	+41**	66
ETELÄINEN ALUE	Tuotanto	169	87	160	58
	Kulutus (josta H2*)	226 (124*)	39	186 (83*)	39
	Tase	-57**	+48**	-26	+19

7.11.2023



Kuva 23 Vertailu Suomen sähkön ja vedyn vuositaseista sekä siirroista Vetytalouden kärkimaa Suomen skenaariossa vuonna 2040

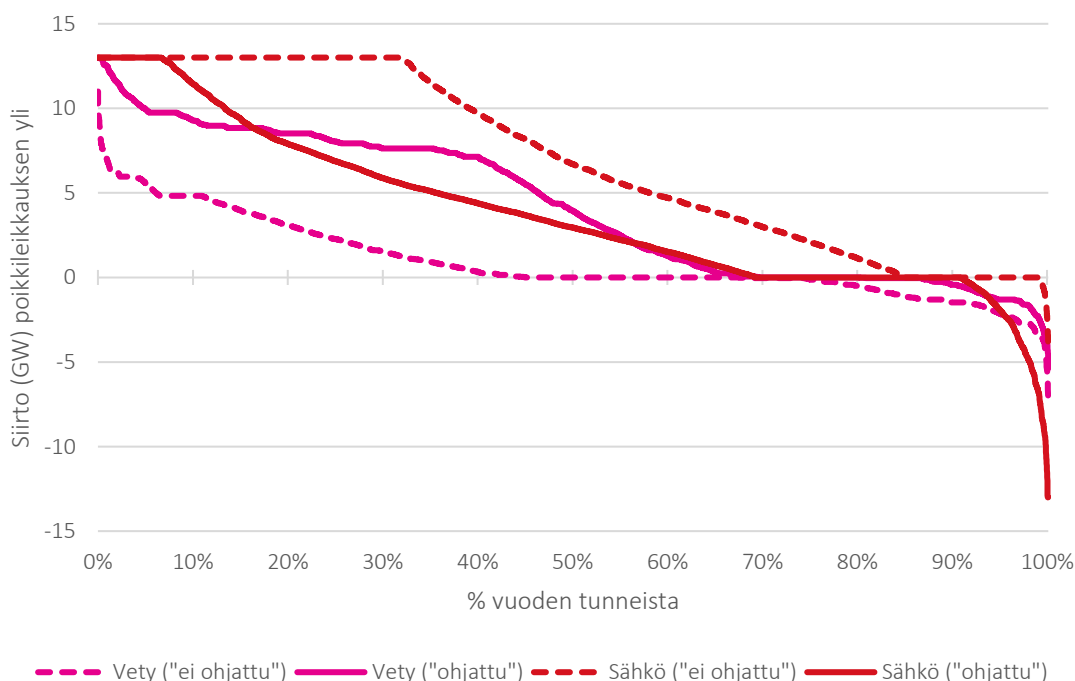
Käytännössä ”ei ohjattu” vaihtoehto johtaa siihen, että kaikkea pohjoisen uusiutuvaa sähköntuotantoa ei saada hyödynnettyä puhtaan vedyn tuotantoon, kun elektrolyysarit sijoittuvat suurimmaksi osaksi etelään. Tämän vuoksi ohjatussa vaihtoehdossa sähkön ja vedyn tuotantomäärät ovat korkeammat ja vedyn vientimäärät suurempia (Kuva 23).

Kun vedyn tuotannon sijaintia ohjataan, siirrot pohjoisesta etelään ovat enemmän tasapainossa sähkön ja vedyn välillä. Skenaariossa suurempi osa vedystä tuotetaan pohjoisessa lähellä uusiutuvaa sähköntuotantoa, ja alueen ylijäämäinen vety pystytään suurella vetyputkella siirtämään etelän kulutuskohteisiin. Näin siirrettävä energiamäärä on myös kokonaisuudessaan pienempi, sillä sähköä tulisi siirtää enemmän huomioiden myöhemmin vedyn tuotannossa tapahtuvat häviöt (elektrolyysin hyötysuhde).

Mikäli skenaarioissa vedyn tuotantoa olisi enemmän etelässä, tarkoittaisi tämä yhä suurempaa sähkön siirtotarvetta pohjoisesta etelään vedyn tuotantoa varten. Tämä voisi myös johtaa tilanteeseen, jossa ensin siirrettäisiin sähköä pohjoisesta etelään ja sen jälkeen vetyä etelästä pohjoisen kulutuskohteisiin ja vientiin. Tällöin siirrettäisiin energiaa sähkönä ja vetyä vastakkaisiin suuntiin suuria määriä, mikä ei ole tehokasta siirtoinfrastruktuurin näkökulmasta.

Kuva 24 havainnollistaa edelleen Suomen poikkileikkauksen yli tarvittavaa siirtokapasiteettia pysyvyyssäyrän avulla. Pysyvyyssäyrä näyttää siirtotarpeen osuutena vuoden tunneista suurimmasta siirrosta pohjoisesta etelään (+) suurimpaan siirtoon etelästä pohjoiseen (-).

7.11.2023



Kuva 24 Pysyvyyskäyrä energiansiirrosta vetynä ja sähkönä Suomen sisäisen poikkileikkauksen yli Vetytalouden kärkimaa Suomi -skenaariossa 2040³⁴

Vedyn tuotannon painottuessa etelään ("ei ohjattu") siirtoa sähkönä pohjoisesta etelään on yli 80 % vuoden tunneista, ja sähkönsiirto on täydellä kapasiteetilla kolmasosan vuoden tunneista. Siirtotarvetta sähkönä olisi tällöin enemmän, mutta verkon rajoitteet muodostavat pullonkaulan siirtomäärälle. Samaan aikaan vedynsiirtoinfrastruktuurin käyttö on vähäistä ja siirtoa pohjoisesta etelään vain noin 40 % vuoden tunneista, eikä siirtoinfrastruktuureja siten hyödynnetä tehokkaasti.

Ohjatussa vaihtoehdossa siirtotarve on yhä vahvasti pohjoisesta etelään, mutta siihen hyödynnetään myös tehokkaasti vedynsiirtoinfrastruktuuria. Tällöin sekä vedyn että sähkönsiirto pohjoisesta etelään on noin 70 % vuoden tunneista, eikä sähköverkkoon muodostu samaan tapaan pullonkautaa. Vedyn tuotannon eli elektrolyysereiden sijoittuminen energiansiirron tarpeet huomioiden vähentäisi olennaisesti siirtotarvetta sähkönä ja siten riskiä mahdollisten pullonkaulojen muodostumisesta.

Pelkästään maankäytöllisesti yhden suuren vetyputken rakentaminen on järkevämpää kuin useamman sähkönsiirtolinjan. Sama pätee jo vuonna 2030 ja myös muissa skenaarioissa, vaikkakin suuri siirtotarve Suomen sisäisen poikkileikkauksen yli kasvaa huomattavasti vuoteen 2040 mennessä ja korostuu etenkin Tehokas eurooppalainen vetymarkkina ja Vetytalouden kärkimaa Suomi -skenaarioissa.

Järjestelmän kehittämisen kannalta Fingridin ja Gasgridin on ensisijaisen tärkeää tunnistaa asiakkaidensa energiansiirtotarpeet ajoissa, ja vastata niihin suunnittelemalla ja rakentamalla tarvittavaa siirtoinfrastruktuuria. Sähkönsiirto- ja vedyn sektori-integraation edetessä yhtiöiden tulee huomioida suunnittelussa myös toistensa siirtoinfrastruktuurin kehitys, ja pyrkiä yhteissuunnittelulla luomaan Suomeen kokonaisuudessaan mahdollisimman kustannustehokas energiajärjestelmä.

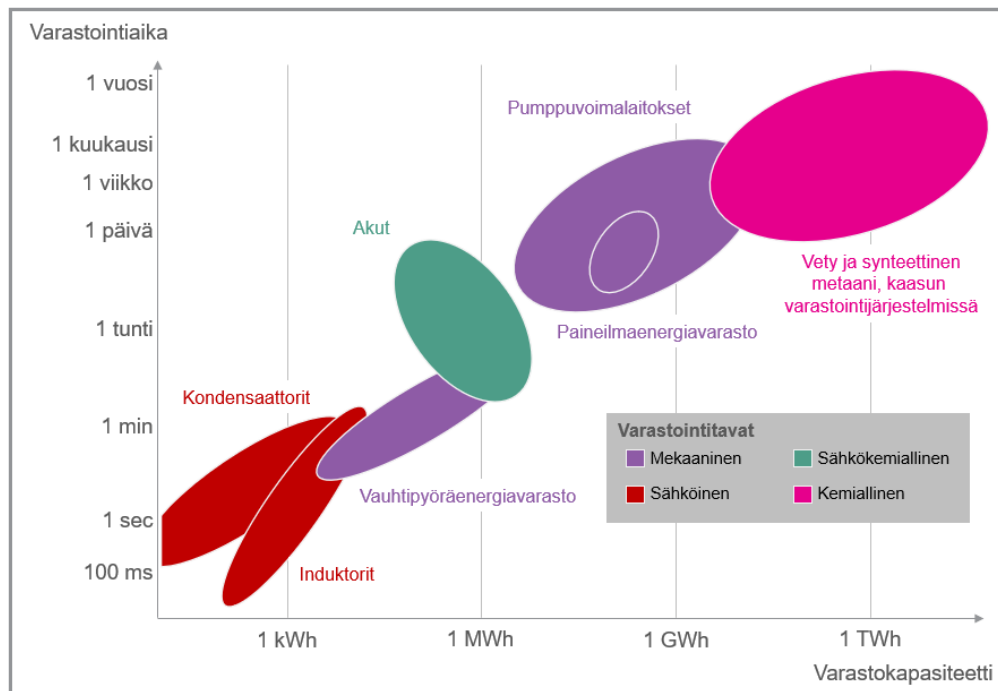
³⁴ Esimerkit tunitason siirtotarpeista ovat yhdeltä sääolosuhteiltaan keskimääräiseltä säävuodelta

7.11.2023

Järjestelmän kokonaiskustannusten kannalta on tärkeää kannustaa tuotanto- ja käyttökohteita sijoittumaan tai joustamaan myös siirtoinvestoinnit huomioiden optimaalisella tavalla. Näin mahdollistetaan mahdollisimman suuren kasvupotentiaalin toteutuminen kustannustehokkaasti.

6.5 Joustoja energiajärjestelmään varastoinnin avulla

Elektrolyysin ajo seuraten uusiutuvan vaihtelevan sähkön tuotantoa ja sähkön hintaa on yksi mahdollinen laitteiston ajotapa. Vedyn kulutus ei oletettavasti kuitenkaan seuraa vaihtelevaa tuotantoprofiilia, vaan on enemmän tasaista, erityisesti teollisessa käytössä. Tästä syystä on tärkeää erottaa sähkön käyttö elektrolyysiin ja vedyn loppukäyttö suuren kokoluokan vedyn varastoinnin avulla. Energiajärjestelmään tarvitaan muutenkin enenevissä määrin suuren kokoluokan energiavarastoja, tasaamaan jopa kausivaihteluita, kun vaihtelevan uusiutuvan tuotannon määrä kasvaa nopeasti ja energiaomavaisuuden ja -turvallisuuden merkitys korostuvat. Energian varastointi kaasumaisessa muodossa tarjoaa jopa TWh-kokoluokan varaston (Kuva 25).



Kuva 25 Energiajärjestelmien varastointitekniikoiden kapasiteetti ja purkuaika. (Muokattu lähttestä: ETIP SNET³⁵)

Vetyä voidaan varastoida kaasuna korkeassa paineessa, nesteytettynä, kylmäkompressoituna tai toiseen aineeseen sidottuna. Kaasumaista vetyä voidaan varastoida esimerkiksi suolakiviluolissa, kalliokiviluolissa, terästankeissa ja vetyputkissa. Vedyn matalan energiatihyden takia se paineistetaan. Kasvava varastointitiheys kasvattaa myös energiantarvetta ja varastoinnin teknisiä vaatimuksia. Suomessa ei ole geologisesti sopivia muodostumia vedyn suolakivivarastointiin, kuten muualla

³⁵ ETIP SNET. (2023). Hydrogen's impact on grids – Impact of hydrogen integration on power grids and energy systems. Osoitteesta: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/34a5ce58-42fb-11ee-a8b8-01aa75ed71a1>

7.11.2023

Euroopassa.³⁶ Suomessa potentiaalisena suuren kokoluokan varastointiratkaisuna nähdään kalliokiviluolat. HYBRIT-projektissa Ruotsissa on onnistuneesti pilotoitu Lined Rock Cavern (LRC) - teknologiaan perustuvaa kalliokivivarastoa 100 m³:n kokoluokassa, varastoiden vetyä 250 bar maksimipaineessa.^{37,38} Myöhemmässä vaiheessa HYBRIT-hankkeessa tullaan arvioimaan täysimittaisen kalliokiviluolavaraston rakentamista, jolloin kyseessä on 100 000-120 000 m³:n kokoluokka.³⁹

Vetyputki itsessään tarjoaa varastointikapasiteettia (*linepack*⁴⁰). Putken halkaisija ja paine-ero määräävät varastokapasiteetin suuruuden. Luolavarastot eivät aina sijaitse tai niitä ei voida kaivaa vedyn tuotannon ja käytön kannalta optimaalisiin paikkoihin, mutta tämä haaste voidaan ratkaista vedyn putkikuljetuksella.

Koska vetyratkaisut kytkevät yhteen eri sektoreita, niillä on mahdollisuus tarjota koko järjestelmää hyödyttäviä järjestelmäpalveluita erityisesti joustavuuden muodossa. Joustavuus voidaan jakaa karkeasti kahden eri aikavälin ratkaisuihin⁴¹:

- 1) **Lyhyen aikavälin joustavuus:** Elektrolyysereitä voidaan ajaa sähkön hinnan funktiona, jolloin sähkön kulutus ohjautuu ajanhetkiin, joina sähköä on enemmän tarjolla ja sen hinta on matala. Tällainen jousto on mahdollista, mikäli vedyn kulutus voi seurata tuotantoprofiilia tai vetyvarasto on käytettävissä. Vedyn varastointi on mahdollista esimerkiksi vedynsiirtoinfrastruktuurissa, joka tarjoaa vedyn siirto- ja varastointimahdollisuuksia vedyn tuotannolle. Vaihtoehtona on myös vedyn tuottajan oma säiliövarasto tai vastaava varastoratkaisu vedylle. Elektrolyysarit voivat myös tarjota joustopalveluita sähköverkolle osallistumalla reservimarkkinoille.
- 2) **Keskipitkän- ja pitkän aikavälin joustavuus:** Vety voi toimia sähkön kemiallisena viikko- tai kuukausitason varastona tai jopa kausivarastona palvellien eri sektoreita kulutushuippuina tai ajanhetkinä, kun sähköä ei ole riittävästi tarjolla. Tämä vaatii elektrolyyserien lisäksi investointeja vedynsiirto- ja varastointi-infrastruktuuriin.

³⁶ Business Finland. (2020). National Hydrogen Roadmap for Finland. Osoitteesta:

https://www.businessfinland.fi/4abb35/globalassets/finnish-customers/02-build-your-network/bioeconomy--cleantech/alykas-energia/bf_national_hydrogen_roadmap_2020.pdf

³⁷ HYBRIT. (23.9.2022). HYBRIT: Milestone reached – pilot facility for hydrogen storage up and running. Osoitteesta:

<https://www.hybriddevelopment.se/en/hybrid-milestone-reached-pilot-facility-for-hydrogen-storage-up-and-running/>

³⁸ Vattenfall. (16.10.2023). HYBRIT: Hydrogen storage reduces costs by up to 40 per cent. Osoitteesta:

<https://group.vattenfall.com/press-and-media/pressreleases/2023/hybrid-hydrogen-storage-reduces-costs-by-up-to-40-per-cent>

³⁹ HYBRIT: A unique, underground, fossil-free hydrogen gas storage facility is being inaugurated in Luleå - SSAB (3.11.2023)

⁴⁰ Linepack tarkoittaa putkeen varastoitua kaasun volyyymia.

⁴¹ ETIP SNET. (2023). Hydrogen's impact on grids – Impact of hydrogen integration on power grids and energy systems.

Osoitteesta: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/34a5ce58-42fb-11ee-a8b8-01aa75ed71a1>

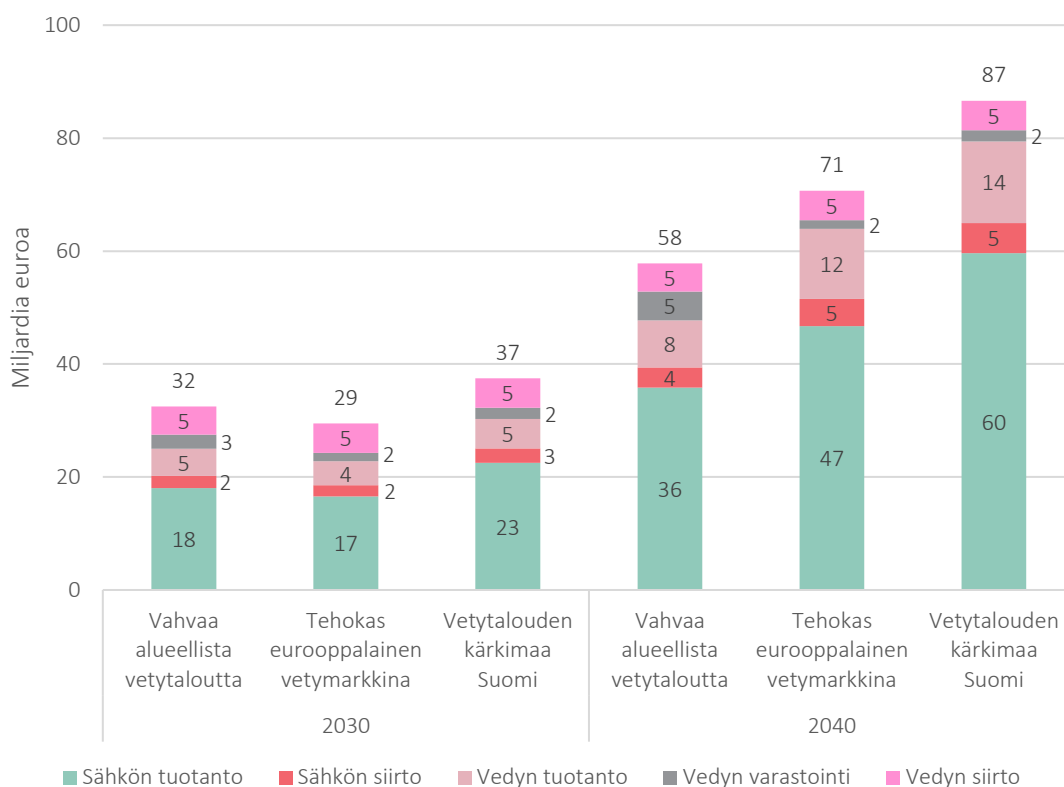
7.11.2023

7 Vetytalouden investoinnit ja markkinat

Puhtaan vedyn tuottaminen esitetystä mittakaavassa vaatii valtavat investoinnit uusiutuvaan sähköntuotantokapasiteettiin, sähkön ja vedyn siirtoinfrastruktuuriin, elektrolyysereihin ja energian varastointiin. Lisäksi tarvitaan investointeja puhtaan vedyn jatkojalostamiseen tuotteiksi. Luvussa 7.1 on esitetty skenaarioissa vaaditut investoinnit puhtaan vedyn tuottamiseksi Suomessa ja luvussa 7.2 näiden investointien Suomelle mahdollistama rooli osana EU:n miljardien arvoista vetymarkkinaa. Lisätietoa teollisista arvoketjuista ja vedyn vaihtoehtoisista jatkojalostusprosesseista voi lukea liitteestä 5.

7.1 Valtavilla investoinneilla kohti puhdasta energiajärjestelmää

Kuva 26 havainnollistaa skenaarioissa tarvittavien investointien mittakaavan puhtaan vedyn tuottamiseen, siirtoon ja varastointiin vuosiin 2030 ja 2040 mennessä. Kokonaisinvestoinnit ovat noin 30–40 miljardia vuoteen 2030 mennessä ja nousevat noin 60–90 miljardiin vuoteen 2040 mennessä.



Kuva 26 Arvio investoinneista puhtaan vedyn tuottamiseen Suomessa vuosiin 2030 ja 2040 mennessä, kumulatiivinen – ei huomioi investointeja vedyn käyttöön tai jatkojalostamiseen

Edellä mainittujen investointien lisäksi mittavia investointeja tarvitaan myös vetyä käyttävään teollisuuteen ja vedyn jatkojalostamiseen. Nykyisten vetytaloushankkeiden arvo on VTT:n selvityksen⁴² ja EK:n Vihreiden investointien dataikkunan⁴³ mukaan noin 10–20 miljardia euroa, joissa erottuvat

⁴² Pre-study on transition to hydrogen economy, specifically in Northern Ostrobothnia (Kiviranta et al., 2023)

⁴³ <https://ek.fi/tutkittua-tietoa/vihreat-investoinnit/> (Elinkeinoelämän keskusliitto, haettu 30.10.2023)

7.11.2023

etenkin investoinnit vetypelkistykseen fossiilivapaan teräksen tuottamiseksi ja metanointi- ja ammoniakkilaitoksiin sähköpolttoaineiden tuottamiseksi.

Sähkön tuotanto vaatii valtaosan investoinneista, ja investoinnit siihen kasvavat vuoteen 2030 mennessä noin 15–25 miljardiin euroon ja vuoteen 2040 mennessä 35–60 miljardiin euroon. Nämä investoinnit vastaavat uusiutuvaa sähköntuotantokapasiteettia, joka tarvitaan puhtaan vedyn tuotantoon kuluvaan sähkön tuottamiseksi (ks. kapasiteetit, Kuva 11). Arvion perustana on maa- ja merituulivoiman sekä aurinkovoiman kehitys ja investointikustannukset skenaarioissa. Valtaosa investoinneista kohdistuu maatuulivoimaan, mutta myös merituulivoima saa jalansijaa 2030-luvulla. Käytännössä investoinnit tarkoittaisivat vuoteen 2040 mennessä noin 100–200 maatuulivoimapuiston, 2–6 merituulivoimapuiston ja useiden kymmenien suuren kokoluokan aurinkovoimapuistojen rakentamista⁴⁴.

Vedyn tuotannossa investoinnit vuoteen 2030 mennessä ovat noin 5 miljardin euron suuruusluokkaa ja kasvavat vuoteen 2040 mennessä yhteensä 8–14 miljardiin. Arvio perustuu skenaarioissa rakennettuun elektrolyyserikapasiteettiin ja käytettyihin investointikustannuksiin. Tiedossa olevien projektien elektrolyyserikapasiteetti vaihtelee muutamasta megawatista satoihin megawatteihin, ja tyypillisesti hankekoossa on ollut kasvava trendi. Joka tapauksessa investoinnit kohdistuisivat käytännössä useisiin kymmeneen ellei satoihin vedyn tuotantokohteisiin.

Vedyn varastoinnissa on arvioitu kalliokiviluolien (ks. kapasiteetit, Kuva 12) vaatimien investointien kokoluokaksi 2–3 miljardia euroa vuoteen 2030 mennessä, mikä vastaisi useampaa suuren kokoluokan kalliokiviluolaa. Näiden lisäksi putken puskurikapasiteetti luo arvokasta joustoa järjestelmään ja tämä investointi on kuvattu osana vedyn siirtoinfrastruktuurin investointia. Vuoteen 2040 mennessä kotimaisen vedyn varastoinnin tarve kasvaa vain *Vahvaa alueellista vetytaloutta* -skenaariossa, jossa kokonaisinvestoinnit varastointiin kasvavat noin 5 miljardiin euroon. Varastoinvestoinnit ovat siten hyvin merkittävät verrattuna esimerkiksi elektrolyyseri-investointeihin, mutta tuovat skenaarioissa hyötyjä edullisemman vedyn tuotantokustannuksen ja toimitusvarmuuden muodossa. Vedyn varastoinnin kehitykseen liittyy kuitenkin huomattavia epävarmuuksia⁴⁵.

Sähkön siirron osalta arvio perustuu Fingridin kantaverkon kehittämissuunnitelmaan⁴⁶, jonka 4 miljardin kantaverkon kokonaisinvestoinneista on arvioitu skenaarioiden vetytalouden kehityksen vaativan noin puolet vuoteen 2030 mennessä. Tämän lisäksi 2030-luvun kehityksen on arvioitu vaativan nykyistä kehittämissuunnitelmaa vastaavat investoinnit 10 vuoden ajanjaksolla, joista vetytalouden kasvu vaatii huomattavan osan. Yhteensä investoinnit sähkön kantaverkkoon vetytaloutta varten ovat arviolta 4–5 miljardia euroa vuoteen 2040 mennessä, minkä lisäksi myös muu sähkön tuotannon ja kulutuksen kasvu lisää investointitarpeita. Investointien kokoluokka on useita tuhansia kilometrejä uusia 400 kV voimajohtoja ja kymmeniä sähköasemahankkeita vuoteen 2040 mennessä.

⁴⁴ Perustuen arvioon keskimääräisestä puistokoosta: 200 MW maatuulivoima, 1000 MW merituulivoima, 100 MW aurinkovoima

⁴⁵ On huomioitava, että vetyvarastojen investointeihin liittyy merkittäviä epävarmuuksia mm. vetyvarastojen rakentamiskustannuksiin ja teknisiin ratkaisuihin liittyen. Erilaisia varastointiratkaisuja on rakennettu maakaasua varten, mutta vetyä varten rakennettavat suuren kokoluokan varastot ovat vielä pilottivaiheessa. Esimerkiksi Ruotsissa pilotoidaan kalliokiviluolaa vedyn varastointiin osana HYBRIT-hanketta⁴⁵

⁴⁶ [Kantaverkon kehittämissuunnitelma 2024–2033 \(Luonnos\)](#) (Fingrid, 2023).

7.11.2023

Vedyn siirron investoineissa on huomioitu sekä Suomeen rakennettava vedynsiirtoinfrastruktuurin runko-osuus sekä puolet meriputki-investoinnista Suomen ja Viron välille. Investoinnit perustuvat alustaviin arvioihin Gasgridin edistämistä Nordic Hydrogen Route ja Nordic-Baltic Hydrogen Corridor hankkeiden⁴⁷ Suomeen kohdistuvista osuuksista. Vetyputken kokonaisinvestointi olisi arviolta noin 6 miljardia euroa sisältäen kompressori-investoinnit ja se toteutuu kaikissa skenaarioissa vuoteen 2030 mennessä. Skenaarioissa oletuksena on kapasiteetiltaan 13 GW vetyputki ja sen kustannusarvio perustuu EHB-ryhmän selvitykseen⁴⁸. Käytännössä tämä tarkoittaisi yhtä halkaisijaltaan 1.2 metrin kokoista teräsputkea, jonka kokonaispituus Suomen maaperällä olisi 1500 kilometrin luokkaa. Lisäksi vedynsiirron ja -varastoinnin mahdollistaminen vaatisi kuvatus mukaisen runkolinjan lisäksi pienempiä putkihaaroja tai muita ulkomaille suuntautuvia putkiyhteyksiä, mutta näitä ei ole huomioitu skenaarioiden investointiarvioissa.

Investoinnit energiansiirtoon ovat merkittäviä, mutta suhteellisesti skenaariossa kuvattuihin vetyarvoketjujen alkupään kokonaisinvestointeihin verrattuna maltillisella tasolla. Esitettyjen investointien suuruusluokassa ei ole otettu huomioon vetytalouden arvoketjujen (esimerkiksi vedyn jatkojalostuksen) lisäinvestointeja, jotka edelleen korostavat siirtoinfrastruktuuri-investointien kerrannaisvaikutuksia uuden teollisuuden syntymisessä.

7.2 Investoinneilla kiinni miljardien arvoiseen vetymarkkinaan

Suomen roolia vedyn ja sen jatkojalosteiden tuottajamaana arvioitaessa on tärkeää huomioida EU:n tavoitteet puhtaan vedyn markkinasta. Vuonna 2030 EU:n vetymarkkinan kooksi on arvioitu noin 670 TWh⁴⁹ ja vastaavasti vuonna 2040 noin 1300 TWh⁵⁰. REPowerEU -suunnitelmassa tavoitteeksi vuodelle 2030 on asetettu, että puolet EU:n vedyn kysynnästä katettaisiin vedyn tuotannolla EU:ssa ja puolet tuotaisiin muilta alueilta.

Huomioiden nämä tavoitteet ja puhtaan vedyn tuotanto Suomessa skenaarioiden mukaan, Suomen osuus EU:ssa tuotetusta vedystä on 11–14 % vuonna 2030 ja 12–21 % välillä vuonna 2040 (Kuva 27). Skenaariot näyttävät, että Suomella on edellytykset kehittyä kokoaan suuremmaksi, Euroopan johtavaan asemaan vetytaloudessa, ja tuottaa yli 10 % EU:ssa tuotetusta puhtaasta vedystä hallituksen periaatepäätöksen mukaisesti.

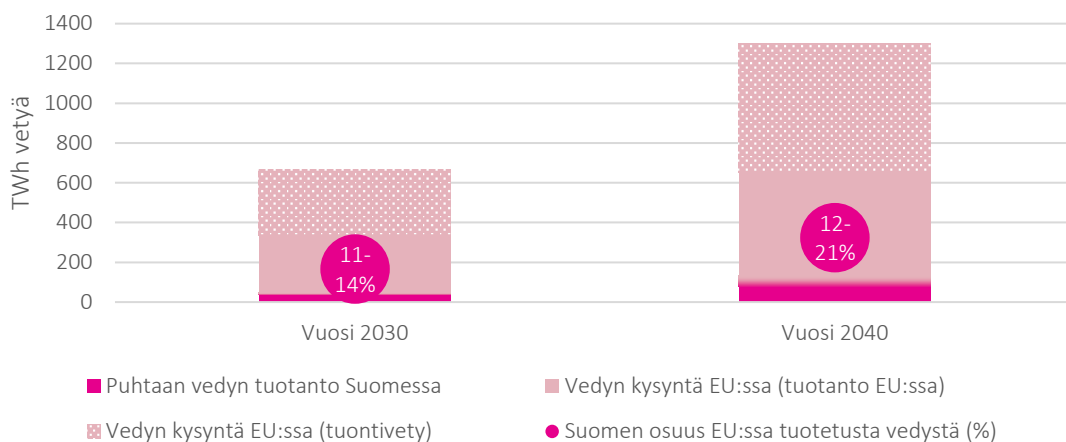
⁴⁷ [Nordic Hydrogen Route](#) ja [Nordic-Baltic Hydrogen Corridor](#) hankkeet (Gasgrid Finland, 2023).

⁴⁸ [Extending the European Hydrogen Backbone](#) (EHB, 2021)

⁴⁹ Perustuen EU:n [REPowerEU -suunnitelmaan](#), huomioiden sekä EU:n 10 Mt tuotantotavoitteen että 10 Mt tuontitavoitteen vuoteen 2030 mennessä (Euroopan Komissio, 2022)

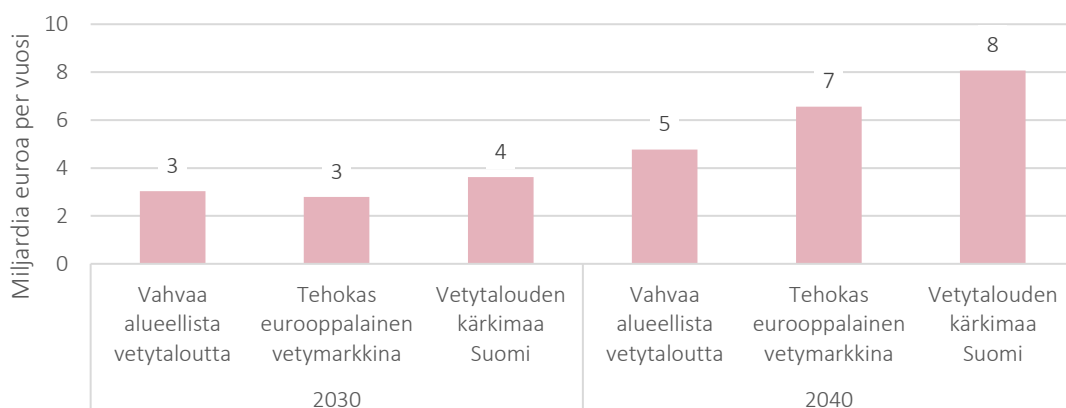
⁵⁰ Perustuen [Euroopan sähkön ja kaasun verkko-yhtiöiden kehittämissuunnitelman](#) skenaarioihin. Huom. skenaarioissa ei ole huomioitu REPowerEU -suunnitelman vaikutusta, mihin nähden vedyn kysyntäarvio vaikuttaa alhaiselta. (ENTSO-E, ENTSOE, Ten Year Network Development Plan 2022)

7.11.2023



Kuva 27 Arvio Suomessa tuotetun puhtaan vedyn osuudesta EU:ssa tuotetusta vedystä⁵¹

Suurilla investoinneilla puhtaan vedyn tuotantoon mahdollistuu osallistuminen EU:n miljardien eurojen arvoiseen puhtaan vedyn markkinaan (Kuva 28). Kilpailukykyisen puhtaan vedyn hinta on arviolta 2,5 EUR/kg vuonna 2030, laskien noin 2 EUR/kg tasolle vuoteen 2040 mennessä⁵². Näillä hinnoilla laskettuna Suomen puhtaan vedyn tuotannon arvo on vuosittain 3–4 miljardia euroa vuonna 2030, nousten 5–8 miljardiin euroon vuoteen 2040 mennessä. Tämän lisäksi Suomessa tuotetaan lisäarvoa jatkojalostamalla vetyä tuotteiksi, kuten sähköpolttoaineiksi, joiden arvo on selvästi pelkän vedyntuotannon arvoa suurempi. Tätä lisäarvoa ei ole arvioitu tässä raportissa, koska hankkeen puitteissa ei ollut mahdollisuutta syventyä lopputuotemarkkinoihin ja niiden vaatimien jalostusprosessien investointeihin riittävällä tarkkuudella. Guidehouse⁵³ on kuitenkin arvioinut, että vetytalouden kehitys voisi kokonaisuudessaan tuoda 16–34 miljardia euroa vuonna 2035 ja 41–69 miljardia euroa vuonna 2045 Suomen taloudelle.



Kuva 28 Arvioitu Suomen puhtaan vedyn tuotannon vuotuinen arvo – huomioi vain arvion vetykaasun arvosta, ei huomioi vedyn jatkojalosteiden lisäarvoa

⁵¹ Arvio huomioi em. lähteet EU:n vedyn kysynnäksi, ja että puolet kysynnästä katettaisiin tuonnilla EU:n ulkopuolisilta alueilta perustuen REPowerEU -suunnitelman tavoitteisiin vuodelle 2030, mikä tarkoittaa että puolet kysynnästä katettaisiin vedyn tuotannolla EU:ssa. Kuvassa on esitetty tämän selvityksen skenaarioiden vaihteluväli Suomen puhtaan vedyn tuotannossa.

⁵² Five Hydrogen supply corridors for Europe in 2030, s. 115 (EHB, 2022)

⁵³ Clean hydrogen economy strategy for Finland supporting analysis report. Unpublished. (Guidehouse, 2023)

7.11.2023

8 Johtopäätökset

Suomella on erittäin hyvät edellytykset kehittyä vetytalouden edelläkävijäksi. Puhtaasta sähköstä tuotetusta vedystä sekä siitä jatkojalostetuista tuotteista voi kasvaa Suomelle merkittävä vientiteollisuus. Suomen uusiutuvan sähköntuotannon potentiaali on merkittävä ja sitä voidaan hyödyntää sekä yhteiskunnan sähköistämiseen että uusien sähköintensiivisten teollisuudenalojen käyttöön. Uusiutuvan sähkön tuotannon resurssien lisäksi Suomesta löytyy vahva sähkön kantaverkko, osaavaa työvoimaa, sekä useita yrityksiä toimimaan osana vetytalouden arvoketjuja. Suomella on vetytalouden edistämiseksi vahva tahtotila ja valtioneuvoston periaatepäätöksen mukaan Suomi tavoittelee Euroopan johtavaa asemaa vetytaloudessa läpi koko arvoketjun.

Tunnistettujen vahvuuksien lisäksi tarvitaan silti edelleen aktiivista kehitystyötä. Merkittävää on investointiympäristön suotuisuus sääntelyn, luvituksen ja yhteiskunnan vakauden osalta. Johdonmukaisen ja selkeän sääntelykokonaisuuden merkitys korostuu vetytalouden kehityksessä. Suuri osa vedyn tulevaisuudesta nojaa hyvin suunniteltuun, tuettuun ja toteutettuun sääntelyyn, niin EU:ssa, kuin myös globaalisti. Onnistuessaan sääntely luo vedylle ja sen johdannaisille vahvaa kysyntää ja antaa yrityksille investointivarmuutta tulevaisuuteen. Tähän kokonaisuuteen liittyy oleellisesti myös puhtaan vedyn määritelmät, standardit ja markkinasääntelyt, joihin referoidaan paljon jo hyväksi todettua ja sovellettua EU sääntelyä esimerkiksi biopolttoaineista ja maakaasusta. Keskeistä ovat myös liityntämahdollisuudet energian siirtoverkkoihin, osaavan työvoiman saatavuus ja yritykset osana vedyn arvoketjua.

Hankkeessa tutkituissa skenaarioissa esitettiin kolme kehityspolkua Suomen roolista eurooppalaisen vetymarkkinan arvoketjussa. Skenaarioissa Suomesta kehitty joko vedystä jatkojalostettujen tuotteiden tai vetykaasun tai näiden molempien merkittävä tuottajamaa Euroopan markkinoiden kasvavaan tarpeeseen. Kaikissa skenaarioissa päästään Valtioneuvoston periaatepäätöksen tavoitteeseen Suomen johtavasta asemasta Euroopan vetytaloudessa ja Suomen markkinaosuus kasvaa yli 10 prosenttiin EU:ssa tuotetusta puhtaasta vedystä vuoteen 2030 mennessä. Skenaarioiden kasvuoletukset haastavat energiajärjestelmän kehittämistä voimakkaasti ja auttavat siten varmistamaan, että niin sähkön kuin vedyn siirtoinfrastruktuurin kehittämistarpeita arvioidaan kattavasti ja ajoissa.

Skenaarioiden näyttämän potentiaalin saavuttamiseksi on tärkeää, että Fingrid ja Gasgrid tunnistavat asiakkaidensa siirtotarpeet ajoissa ja kehittävät energiansiirtoverkkoja etupainotteisesti, mikä mahdollistaa hankkeiden kehityksen Energiansiirto skenaarioissa kasvaa merkittävästi, kun sekä sähkön että vedyn tuotanto ja kulutus jakautuvat eri puolille Suomea. Vetyteollisuuden tarvitsema energiansiirto voi tapahtua joko sähköinä, kuten nykypäivänä, tai tulevaisuudessa osa siirrosta voidaan toteuttaa myös vetynä, kuten skenaarioissa. Skenaarioissa kehitetään niin kotimaista kuin rajat ylittävää sähkönsiirto- ja vedynsiirtoinfrastruktuuria. Vedynsiirtoinfrastruktuurin muodostuminen mahdollistaa myös skenaarioissa olennaisen puhtaan vetykaasun viennin ja tuonnin, mikä vaikuttaa laajasti myös muuhun energiajärjestelmään.

Vetyä voidaan siirtää sekoittamalla sitä metaanin joukkoon metaanin siirtoputkistoon, muuntamalla olemassa olevia metaanin siirtoon tarkoitettuja putkia vedyn siirtoon sopiviksi tai rakentamalla uusia vetyputkia. Kahta ensimmäistä vaihtoehtoa toteutetaan Keski-Euroopassa useissa projekteissa, mutta Suomessa ratkaisuna nähdään lähinnä uuden vedynsiirtoinfrastruktuurin kehitys, koska Suomessa ei ole

7.11.2023

laajaa maakaasuverkkoa, jossa olisi rinnakkaisia vähällä käytöllä olevia putkiosuuksia. Lisäksi nykyinen kaasuverkko sijaitsee vain eteläisessä Suomessa, eikä lähellä potentiaalisia vedyntuotantopaikkoja. Suuren kokoluokan vedyn putkisiirto on teknisesti toteutettavissa, vaikka käyttökokemuksia pohjoismaisessa toimintaympäristössä ei vielä ole. Suunnittelun, toteutuksen ja käytön lähtökohtana voidaan käyttää vuosikymmenten kokemusta metaani-infrastruktuurista ja sen operoinnista. Teknisessä toteutuksessa on kuitenkin eroavaisuuksia, jotka tulee huomioida suunnittelussa.

Skenaarioiden siirtotarpeet ovat mahdollisia toteuttaa kustannustehokkaasti sähkö- ja vetyinfrastruktuurin yhteissuunnittelulla, jossa hyödynnetään sekä sähkön että vedyn siirtoinfrastruktuurin kapasiteettia ja huomioidaan sijainnin merkitys etenkin vedyn tuotannon sijoittumisessa. Pelkästään sähköverkkoa hyödyntämällä skenaarioiden energiansiirtomäärät eivät olisi hallittavissa tai mahdollisia. Vetyverkon kehitys onkin avainasemassa Suomen potentiaalini hyödyntämisessä. Vetyverkkoa hyödyntämällä vedyn tuotanto voi sijoittua lähemmäs sähkön tuotantoa huolimatta vedyn käyttö- ja jatkojalostuskohteiden sijainnista, mikä vähentää energiansiirtotarvetta sähkönä. Tämän lisäksi vedynsiirtoinfrastruktuuri mahdollistaa vedyn laajamittaisen varastoinnin, mikä auttaa myös sähköjärjestelmän tasapainottamisessa. Lisäksi kansainvälisten vedynsiirtoyhteyksien rakentaminen laajentaa vetymarkkinaa ja luo toimijoille uusia liiketoimintamahdollisuuksia vedyn arvoketjujen eri vaiheisiin.

Gasgrid Finland ja Fingrid pitävät vedyn ja sähkön siirtoinfrastruktuurien yhteissuunnittelua tärkeänä mahdollisimman kustannustehokkaan energiajärjestelmän kehittämiseksi ja Suomen vetytalouden mahdollisimman suuren potentiaalini saavuttamiseksi. Vetytalouden kehityksessä on vielä runsaasti avoimia kysymyksiä ja paljon tutkittavaa liittyen mm. markkinan toimintamalleihin, regulaatioon, sektori-integraatioon, laitosten konsepteihin ja operointimalleihin, investointien toteutumisenopeuteen ja sijaintiin liittyen sekä teknisiin standardeihin, asiakkaiden liityntäperiaatteisiin, vedyn laatuvaatimukseen ja niin edelleen. Yhtiöt jatkavatkin hankkeen päätyttyä aktiivista yhteistyötä näiden kysymysten parissa ja energiajärjestelmän yhteiskehityksen osalta ja edistävät energiainfrastruktuurin kokonaisvaltaista suunnittelua mahdollisimman ennakoivasti ja avoimesti.

7.11.2023

7.11.2023

Liite 1: Skenaarioiden mallinnus ja taustaoletukset

Skenaarioiden mallinnuksessa tavoitteena on ennakoida markkinaehtoisesti tehtävät investoinnit sähkön ja vedyn tuotantoon, mikäli toimintaympäristö kehittyisi skenaariossa kuvatulla tavalla. Fingrid on tehnyt hankkeen skenaarioiden mallinnuksen AFRY:n kehittämällä BID3-sähkömarkkinamallilla⁵⁴, joka on käytössä Fingridillä myös laajemmin. Mallin avulla analysoidaan markkinan toimintaa sekä tuntitasolla että erilaisten tuotanto- ja kulutuslaitosten investointihorisonttien tasolla. Mallinnuksessa on huomioitu Itämeren alue sekä pääosa Keski- ja Länsi-Euroopasta. Siten esimerkiksi vedyn vienti Suomesta edellyttää, että Suomessa tuotettu vety olisi vientihetkellä edullisempaa kuin kohdemaassa tuotettu vety.

Skenaarioiden ajavana tekijänä on vedyn kasvava kysyntä. Vedyn kotimainen kysyntä kasvaa luvussa 5.1 esitettyjen kehityspolkujen mukaan. Ruotsin vedyn kysyntää on arvioitu perustuen mm. Energiforsk⁵⁵ ja Fossilfritt Sverige⁵⁶ -raportteihin muokattuna siten, että vedyn ja vetyjalosteiden viennin kysyntäajurit olisivat Suomessa ja Ruotsissa samankaltaiset. Muiden Euroopan maiden vedyn kysyntä on määritetty perustuen ENTSO-E:n skenaarioon⁵⁷. ENTSO-E:n skenaariossa ei ole huomioitu viimeaikaisia toimintaympäristön muutoksia, jonka vuoksi skenaarioihin on päivitetty mm. RePowerEU-ohjelman vaikutukset puhtaan vedyn ja uusiutuvien määriin.

Sähkön tuotantokapasiteetin kehityksen lähtökohtana on skenaarioissa pyritty huomioimaan uusiutuvalle sähköntuotannolle asetetut kansalliset minimitalvotit eri Euroopan maissa. Kansallisten tavoitteiden saavuttamiseen tarvittavia investointeja oletetaan tarvittaessa tuettavan, mikäli ne eivät näyttäyty markkinaehtoisesti kannattavilta. Toisaalta skenaarioissa on määritetty myös enimmäismäärät uusiutuvan sähköntuotannon kapasiteetille ja vuotuiselle rakentamisnopeudelle, johon maiden on oletettu korkeimmillaan pystyvän. Nämä enimmäismäärät tulevat vastaan markkinaehtoisilla investoinneilla etenkin Keski-Euroopassa, mikä heijastaa uusiutuvan sähköntuotannon resurssien riittävyyden haasteita verrattuna korkeaan kysyntään alueella.

Suomessa tuotannon kasvua rajoittaa oletus, että maatuulivoimaa voidaan rakentaa korkeintaan 4 GW vuodessa. Itä-Suomen tutkavalvonnan rajoitteiden on kuitenkin oletettu ratkeavan, jolloin maatuulivoimaa saa rakentaa myös vapaammin Itä-Suomeen. Tämä mahdollistaa Suomen maatuulivoimapotentialin maksimaalisen hyödyntämisen. Tuulivoiman maantieteellinen hajauttaminen parantaa myös kannattavuutta, sillä tuulisuuden paikallinen vaihtelu parantaa tuulivoimainvestointien kannattavuutta. Samalla tuulivoiman tuotanto kokonaisuudessaan näyttää tyytä tasaisempaan, kun tuotantoa saadaan hajautettua tuuliolosuhteiltaan erilaisille alueille.

Markkinaehtoiset investoinnit tuuli- ja aurinkovoimaan, elektrolyysereihin sekä vetyvarastoihin on määritetty siten, että investointien sama käyttökate tukkumarkkinoilta kattaisi tasoitettut investointikustannukset sekä pääoman tuottovaatimuksen⁵⁸. Sähkön ja vedyn tuotannon, kulutuksen ja

⁵⁴ <https://afry.com/en/service/bid3-power-market-modelling>

⁵⁵ [The role of gas and gas infrastructure in Swedish decarbonisation pathways 2020-2045](#). (Energiforsk, 2021)

⁵⁶ [Strategy for fossil free competitiveness – Hydrogen](#). (Fossil Free Sweden, 2021)

⁵⁷ [Ten Year Network Development Plan 2022 – Scenario report](#) (ENTSO-E, 2022)

⁵⁸ Oletuksena pääoman tuottovaatimukselle 5 % reaalisesti

7.11.2023

varastoinnin optimointi tapahtuu laskentamallissa alueiden laajuisella yhteismarkkinalla, jonka simuloinneissa on oletettu täydellinen kilpailu sekä 10 päivän aikahorisontilla täydellinen informaatio.

Investointikustannukset

Oletukset sähkön tuotannon investointi- sekä käyttö- ja kunnossapitokustannuksista perustuvat pääosin edellä mainittuun ENTSO-E:n skenaarioon. Uusiutuvien maa- ja merituulivoiman sekä aurinkovoiman investointikustannukset laskevat, mutta näistä kilpailukykyisimpänä pysyy maatuulivoima. Investoinneissa on huomioitu liittymiskustannukset. Esimerkiksi merituulivoimalla tarvittavan liittymiskaapelin pituus aiheuttaa kustannuksiin vaihtelua. Taulukko 7 esittää yhteenvedon investointikustannusten kehityksestä uusiutuvaan tuuli- ja aurinkovoimaan. Kiinteiksi käyttökustannuksiksi on arvioitu vuosittain 1–2 % investointikustannuksesta. Käyttöäksi tuulivoimalle on oletettu 30 vuotta ja aurinkovoimalle 40 vuotta.

Taulukko 7 Investointikustannusten kehitys uusiutuvaan sähkön tuotantokapasiteettiin (capex, EUR 2021/kW)

Teknologia	2030	2040
Maatuulivoima	960	880
Merituulivoima	1710–1920	1560–1750
Aurinkovoima	380	330

Mallinuksissa elektrolyysille on valittu 70 % hyötysuhde ja kustannuskehitys alkalelektrolyserin mukaan. Muita elektrolyysiteknologioita ovat mm. polymeerimembraani- sekä kiinteäoksidikeno-elektrolyysit, mutta näiden kustannus on arvioitu alkalelektrolyseriä korkeammaksi. Arvio kustannuskehityksestä on koottu mm. Suomen vetytiekartassa käytetystä IEA:n selvityksestä⁵⁹ sekä muista lähteistä^{60,61}. Taulukko 8 esittää skenaarioissa käytetyt oletukset elektrolyserin investointikustannusten kehityksestä. Elektrolyserin kiinteiksi käyttökustannuksiksi on arvioitu vuosittain 4 % investointikustannuksista, sisältäen ”stack replacement” -kustannukset. Käyttöä on arvioitu teknologian kehittyessä kasvavan noin 26 vuodesta 32 vuoteen.

Taulukko 8 Investointikustannusten kehitys vedyn tuotantokapasiteettiin (capex, EUR 2021/kWe)

Teknologia	2030	2040
Alkaalelektrolyseri	400	300

⁵⁹ Business Finland, National Hydrogen Roadmap for Finland: (Laurikko, et al., 2020)

⁶⁰ https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Analyser/technology_data_for_renewable_fuels.pdf

⁶¹ https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2018_06_27_technology_pathways_-_finalreportmain2.pdf

7.11.2023

Vetyä voidaan varastoida esimerkiksi suolakiviluolissa, kalliokiviluolissa, terästankeissa ja vetyputkissa. Näistä etenkin suuremmat luolaratkaisut voivat olla kustannustehokas ja pidempiaikaiseen energian varastointiin sopiva ratkaisu verrattuna esimerkiksi sähkövarastoihin, joiden kapasiteetti on yleensä rajallinen vastaamaan pidempiaikaiseen jouston tarpeeseen kustannussyistä⁶².

Kustannustehokkaimmaksi, suuren mittakaavan vedyn varastointimuodoksi Suomessa on oletettu kalliokiviluolavarastot.

Vedyn varastoinnin kustannusarviot perustuvat useisiin lähteisiin, kuten Tanskan energiaviranomaisen selvitykseen⁶³, LUT-yliopistolta tilattuun selvitykseen⁶⁴ ja HYBRIT-hankkeessa tehtyihin tutkimuksiin⁶⁵, mutta ne sisältävät silti suuria epävarmuuksia varastointitekniologioiden uutuuden vuoksi. Taulukko 9 esittää skenaarioissa käytetyt oletukset vedyn varastoinnin investointikustannusten kehityksestä Suomen kannalta oleellisille kalliokiviluolille sekä terästankeille. Varastoinnin kiinteiksi käyttökustannuksiksi on arvioitu vuosittain 2 % investointikustannuksista. Varastointikyvyksi kalliokiviluolille on oletettu 168 tuntia ja terästankeille 12 tuntia sekä käyttöäksi molemmille 30 vuotta. Näiden lisäksi vetyä on kustannustehokasta varastoida siirtoputkistossa.

Taulukko 9 Investointikustannusten kehitys vedyn varastointikapasiteettiin (capex, EUR 2021/kW)

Teknologia	2030	2040
Kalliokiviluolavarasto (168 h)	500	380
Terästankkivarasto (12 h)	540	320

Vetyverkon investointikustannukset ja tekniset tiedot perustuvat EHB-selvitykseen⁶⁶ ja siinä esitettyyn suurimpaan, halkaisijaltaan 1,2 metrin ja kapasiteetiltaan 13 GW putkikokoon. Investointikustannukset suurelle vetyputkelle ovat noin 0,26 EUR/kW/km. Vetyputken käytössä olevaksi bufferikapasiteetiksi vedyn varastointia varten on arvioitu 50 GWh/1000 km. Sähköverkon kustannukset perustuvat Fingridin toteutuneisiin 400 kV vaihtosähköajojohtoverkon investointeihin. Karkeasti arvioituna investointikustannus on noin 0,3 EUR/kW/km.

⁶² https://gasgrid.fi/wp-content/uploads/Gasgrid_Study-on-the-Potential-of-Hydrogen-Economy-in-Finland_ENG-FINAL.pdf

⁶³ https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Analyser/technology_data_catalogue_for_energy_storage.pdf

⁶⁴ Electrolysis Technologies (Liikanen & Moilanen, 2022) – kirjallisuusselvitys, julkaisematon

⁶⁵ <https://www.hybriddevelopment.se/en/research-project-1/researchlibrary/>

⁶⁶ [Extending the European Hydrogen Backbone \(EHB, 2021\)](#)

7.11.2023

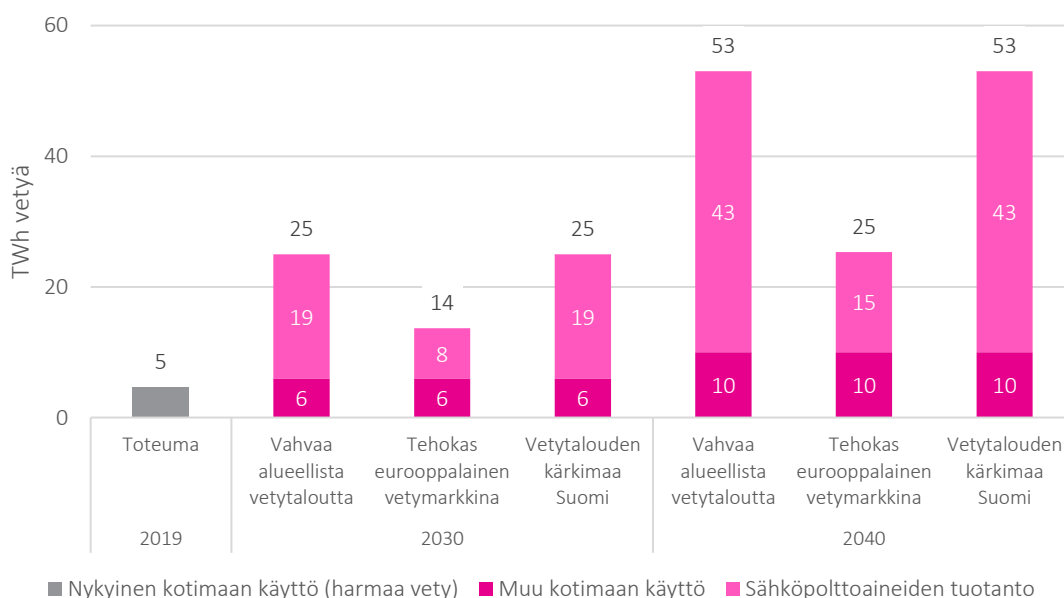
Liite 2: Skenaariomallinnuksen yksityiskohtaiset tulokset

Puhdasta vetyä kotimaiseen teollisuuteen ja vientituotteisiin

Skenaarioiden vedyn kotimainen kysyntä perustuu nykyisen teollisuuden siirtymiseen puhtaan vedyn käyttöön ja uuden vetyteollisuuden puhtaan vedyn kysyntään, mutta määrät vaihtelevat skenaariosta riippuen (Kuva 29). Vuoden 2030 kotimaisen kysynnän tason on oletettu perustuvan kaikissa skenaarioissa harmaan vedyn käytön korvaamiseen puhtaalla vedyllä sekä julkisuudessa esitettyihin tavoitteisiin^{67,68,69}, joissa puhdasta vetyä hyödynnettäisiin uusissa käyttökohteissa kuten terästeollisuudessa ja polttoaineiden jalostuksessa. Valtaosa kulutuksesta olisi uutta vetyteollisuutta ja vetyä tuotettaisiin erityisesti sähköpolttoaineiden valmistamiseen.

Vahvaa alueellista vetytaloutta ja Vetytalouden kärkimaa Suomi -skenaarioissa sähköpolttoaineiden valmistukseen käytettäisiin 19 TWh vetyä vuonna 2030 ja 43 TWh vuonna 2040. *Tehokas eurooppalainen vetymarkkina* -skenaariossa kotimainen sähköpolttoaineiden tuotanto olisi pienempimuotoista ja vaatisi vetyä 8 TWh vuonna 2030 ja 15 TWh vuonna 2040. Kaikissa skenaarioissa muun kuin sähköpolttoaineiden valmistukseen käytetyn vedyn kysyntä olisi samalla 6 TWh vuotuisella tasolla vuonna 2030 ja kasvaisi maltillisesti 10 TWh tasolle vuoteen 2040 mennessä.

Skenaarioiden perusteella vedyn kokonaiskysyntä kasvaisi vähintään kolminkertaiseksi ja jopa nelinkertaiseksi nykyiseen verrattuna vuoteen 2030 mennessä. Tämä tarkoittaisi noin 3–5 TWh vuotuista puhtaan vedyn kysynnän kasvua, mikäli kasvu ajoittuisi pääosin vuosille 2025–2030.



Kuva 29 Suomen vedyn toteutunut kysyntä 2019 ja puhtaan vedyn kotimainen kysyntä skenaarioissa

⁶⁷ Ren-Gas: 2,5 TWh uusiutuvia kaasupolttoaineita raskaan liikenteen käyttöön. (Yhtiön nettisivut, luettu 27.5.2022)

⁶⁸ P2X Solutions: 1000 MW elektrolyysitehoa seuraavan kymmenen vuoden aikana. (P2X Solutions, 2022)

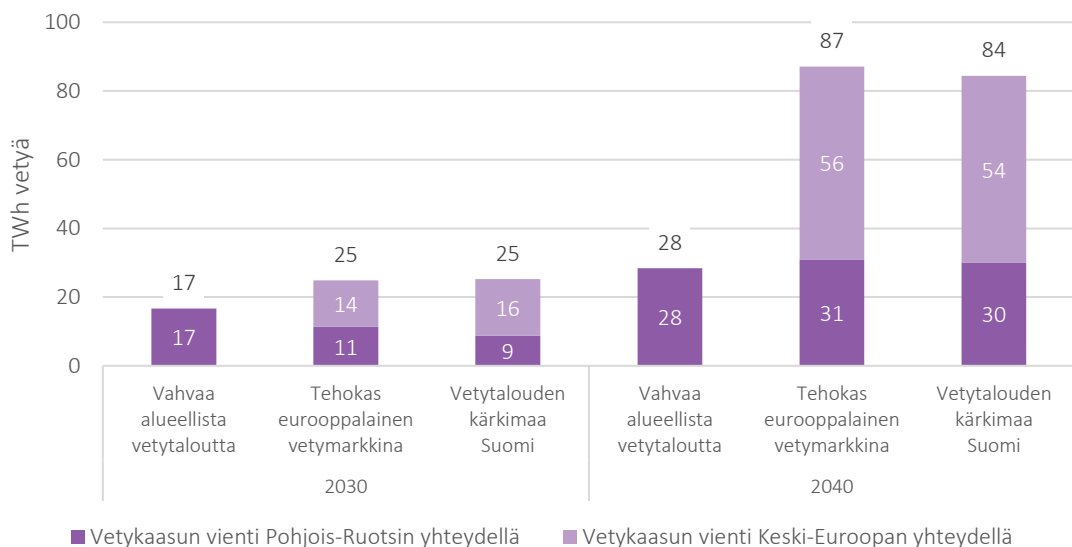
⁶⁹ Business Finland, National Hydrogen Roadmap for Finland: noin 170 kt/a (~6 TWh) vedynkäytön kasvua etenkin öljynjalostus- ja terästeollisuudessa (Laurikko, et al., 2020)

7.11.2023

Vuoden 2040 arvio puhtaan vedyn kotimaisesta käytöstä *Vahvaa alueellista vetytaloutta ja Vetytalouden kärkimaa Suomi* -skenaarioissa on yli 50 TWh. Tämä arvio perustuu Valtioneuvoston kanslian teettämän vetytalousselvityksen⁷⁰ korkeimman skenaarion kysyntätasoon, jota on käytetty edellä mainittujen skenaarioiden mallintamisessa. Tämä tarkoittaisi noin 3 TWh kysynnän vuotuista kasvuvauhtia 2030-luvun aikana. *Tehokas eurooppalainen vetymarkkina* -skenaarioiden kotimaan kysyntä jää 25 TWh:iin, sillä skenaariossa Suomen vetytalouden kasvu perustuu pääosin vetykaasun vientiin.

Vedyn vientimäärät vetykaasuna eri skenaarioissa

Skenaarioissa vedyn siirtoa on mallinnettu perustuen oletettuihin putkiyhteyksiin sekä vedyn kysyntä-tarjontatasapainoon Suomessa ja muissa Itämeren alueen maissa. Kaikissa skenaarioissa rakennetaan putkiyhteys Pohjois-Ruotsiin, minkä lisäksi *Tehokas eurooppalainen vetymarkkina* ja *Vetytalouden kärkimaa Suomi* -skenaarioissa rakennetaan putkiyhteys Keski-Eurooppaan. Kuva 30 esittää minkälaisia määriä puhdasta vetyä viedään kaasuna Itämeren alueen maihin. Skenaarioissa Suomesta tulee kilpailukykyinen vedyn tuottajamaa ja kotimaan kysynnän kattamisen lisäksi vetyä viedään sekä Pohjois-Ruotsiin että Keski-Eurooppaan.



Kuva 30 Suomen nettomääräinen vetykaasun vienti Pohjois-Ruotsin ja Keski-Euroopan putkiyhteyksillä

Vuonna 2030 vetyä viedään nettomääräisesti noin 7–14 TWh Pohjois-Ruotsin teollisuuden tarpeisiin putkiyhteyttä pitkin ja lisäksi kahdessa skenaariossa Keski-Euroopan putkiyhteydellä 13–16 TWh muihin Euroopan maihin. Vuoteen 2040 mentäessä viennin määrä Pohjois-Ruotsiin nousee noin 25–27 terawattituntiin. Merkittävimmin vedyn viennin määrä kasvaa Keski-Eurooppaan, etenkin *Tehokas eurooppalainen vetymarkkina* -skenaariossa, jossa vienti nousee noin 80 TWh tasolle. *Vetytalouden kärkimaa Suomi* -skenaariossa vedyn vienti vetykaasuna jää hieman alhaisemmalle tasolle, sillä jo erittäin korkea kotimaan kysyntä sitoo suuren osan saatavilla olevista resursseista ja etenkin uusiutuvasta sähköstä.

⁷⁰ Valtioneuvoston kanslia, Vetytalous – mahdollisuudet ja rajoitteet, s. 162 (Sivill, et al., 2022)

7.11.2023

Liite 3: Vetytalouden kehitykseen vaikuttava regulaatio ja strategiat

Tässä liitteessä koostetaan vetymarkkinaa koskevaa EU-tason lainsäädäntöä ja rahoitusmekanismeja, joilla on suora tai välillinen vaikutus vetytalouden muodostumiseen. Lisäksi liitteessä tarkastellaan Suomen ja naapurimaiden Ruotsin, Tanskan, Viron ja Saksan kansallisia aloitteita, joilla on suora vaikutus Suomen vetytalouteen. Koosteen toteutti KREAB Oy.

Vetytalouteen liittyvä EU-tason regulaatio

EU-päästökauppajärjestelmä, EU-ETS

Fit for 55 -paketin merkittävin lainsäädäntöehdotus on EU-päästökauppajärjestelmän, EU-ETS⁷¹, päivittäminen. Uudistus poistaa ilmaisia päästöoikeuksia markkinalta, joka johtanee päästöoikeuksien hinnannousuun. Nousevat kustannukset kannustavat teollisuutta investoimaan puhtaaseen ja päästöttömään teknologiaan. Päästökaupamaksut kohdennetaan eri rahoitusmekanismeihin, sosiaaliseen ilmastorahastoon, modernisointirahastoon ja EU:n innovaatorahastoon. Varoilla pyritään tukemaan aluekehitystä ja puhtaan energian markkinoiden kehittymistä. Uutena osana päästökauppajärjestelmää otettiin käyttöön uusi EU-ETS II, joka lisää uusia sektori päästökauppajärjestelmän piiriin, mukaan lukien meri-, tieliikenne ja rakennukset. Uusi järjestelmä on käytössä vuodesta 2025 alkaen, ja ohjaa sektorit puhtaaseen teknologiaan, kuten synteettisiin polttoaineisiin, vihreään teräkseen ja vihreään betoniin.

Ehdotuksen päivitys on valmistunut ja astunut voimaan. EU-ETS II:ssa päästöoikeuksien kustannukset rajoitetaan vuoteen 2027 asti 45 euroon/CO₂t. Jäsenvaltioilla on mahdollisuus olla panematta ETS II:ta täytäntöön, jos hiilidioksidipäästöjä verotetaan ETS II -kustannustason yli. Suomessa kyseinen verotustaso ylittyy ja siksi ETS II:n vaikutukset jäävät Suomessa vähäisiksi.

Uusiutuvan energian direktiivin päivitys, RED III

ETS I & II:n suorat vaikutukset ovat marginaalisia Suomen vetyekosysteemin rakentamiselle, mutta uusiutuvan energian direktiivin, RED:n, päivityksen vaikutukset ovat keskeisiä vedyn tulevaisuudelle. EU:n toimielinten välinen alustava sopimus hyväksyttiin maaliskuussa 2023, ja kansallisen täytäntöönpanon määrä valmistua vuoteen 2025 mennessä. Tarkistetussa direktiivissä asetetaan uusiutuvan energian vähimmäiskiintiöt vuoteen 2030 mennessä, vähimmäiskiintiöt RFNBO:lle (ei-biologista alkuperää olevat uusiutuvat nestemäiset ja kaasumaiset polttoaineet, mukaan lukien uusiutuvalla energialla tuotettu vety), teollisuudelle ja tieliikenteelle. RED sisältää myös valtuudet Euroopan komissiolle antaa delegoituja säädöksiä (DA). Direktiivin mukaan teollisuuden on lisättävä uusiutuvan energian käyttöä 1,6 prosenttia vuosittain. Jäsenvaltiot sopivat, että 42 % teollisuudessa käytetystä vedystä tulee olla peräisin ei-biologista alkuperää olevista uusiutuvista polttoaineista (RFNBO:t) vuoteen 2030 mennessä ja 60 prosenttia vuoteen 2035 mennessä. Tieliikenteessä RED III asettaa sitovan tavoitteen vähentää kasvihuonekaasupäästöjä 14,5 % tai nostaa uusiutuvien energialähteiden osuutta vähintään 29 %:iin vuoteen 2030 mennessä. Siinä asetetaan myös yhdistetty

⁷¹ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32003L0087>

7.11.2023

5,5 %:n alataavoite kehittyneille biopolttoaineille ja RFNBO:lle, josta vähintään 1 % on saavutettava RFNBO:lla.

Vedyn osalta Euroopan komissio on jo antanut delegoituja säädöksiä RFNBO-vedyn tuotantosäännöistä lisäisyysperiaatteen mukaisesti. 27 artiklan 3 kohdan mukaisessa DA:ssa todetaan, että vuoteen 2030 mennessä puhtaan vedyn tuottamiseen käytettävä uusiutuva sähkö on tuotettava saman kalenteritunnin sisällä. Toisessa 28 artiklan 5 kohdan mukaisessa DA:ssa määritellään, miten kasvihuonekaasujen vähennykset lasketaan, jotta vety lasketaan uusiutuvaksi saavuttamalla 70 % CO₂-vähennykset⁷². Delegoidut säädökset tarkistetaan vuosina 2028-2029.

Suomi päivittää syksyllä 2023 tieliikenteen jakeluvuittelainsäädäntöään ja alentaa kehittyneiden biopolttoaineiden (mukaan lukien RFNBO) vähimmäiskiintiöitä. Lainsäädäntöä muutettiin vuonna 2022, ja se tarkistetaan uudelleen vuonna 2024 vastaamaan RED III:ta. Sääntelyn epävarmuus voi vaikeuttaa alan investointeja. Epävarmuus kysyntä- ja tarjontapuolella sekä raaka-aineiden saatavuudessa luo kana ja muna -skenaarion, jossa alkusijoitukset on tehtävä suuremmalla riskillä kuin mihin pääomasijoituksiin on totuttu. Sääntelyvarmuus on avainasemassa sijoitusriskin vähentämisessä.

Energiatehokkuusdirektiivi, EED

Energiatehokkuusdirektiivi pyrkii vähentämään energian loppukulutusta EU:ssa asettamalla sekä EU, että jäsenvaltiotason tavoitteita energian loppukulutuksen vähentämiselle. EU:n toimielimet hyväksyivät direktiivin uudistuksen kesällä 2023, ja se siirtyy kansalliseen täytäntöönpanoon⁷³.

Uudistetun energiatehokkuusdirektiivin mukaan energian loppukulutuksen tulee jäsenvaltiotasolla olla 11,7 % pienempi vuonna 2030 kuin mitä vuonna 2020 arvioitiin. Suomen tapauksessa tämä tarkoittaisi sitä, että energian loppukulutusta tulisi laskea lähes 50 TWh nykyisestä 290 TWh:sta.⁷⁴

Puhtaan vedyn tuotanto vaatii päästötöntä sähköä. Mikäli Suomi pyrkii vetyteknologian, osaamisen, tuotannon ja vedyn ja sen johdannaisten viejäksi, on EED:n toteuttaminen ratkaisevan tärkeää. Direktiivissä ei juurikaan anneta liikkumavaraa hakea kansallista poikkeusta vedyn tuotannon energiankulutukselle, mutta yleisen lisäisyysperiaatteen perusteella Suomi voisi hakea poikkeusta, jonka mukaan vain vedyn tuotantoon rakennettu ja käytetty uusiutuva energia voitaisiin poissulkea energian loppukulutuksen arvosta. Tämä auttaisi myös EU:ta saavuttamaan EED-uudistuksen päätavoitteen, joka on todellisten energiansäästöjen löytäminen.

Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM

CBAM tähtää hiilivuotojen vähentämiseen, tällä EU-komissio haluaa estää yrityksiä siirtämästä päästöintensiivistä tuotantoa EU:n/ETA:n ulkopuolelle. Käytännössä soveltamisalaan kuuluvien materiaalien osalta olisi maksettava EU:n rajalla voimassa oleva EU-päästöoikeus. CBAM, joka tuli voimaan 1.10.2023, ottaa käyttöön tuoteluokat, joihin kuuluu: rauta ja teräs, alumiini, sähkö, tietyt lannoitteet, sementti ja vety sekä tietyt katodiaktiiviset materiaalit ja rajoitettu määrä tuotantoketjun loppupään tuotteista, kuten ruuveista ja pulteista. Vihreän teräksen, sementin ja lannoitteiden

⁷² https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_23_595

⁷³ <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/07/25/council-adopts-energy-efficiency-directive/>

⁷⁴ <https://tem.fi/-/tyoryhma-valmistelemaan-energiatehokkuusdirektiivin-toimeenpanoa>

7.11.2023

kapasiteetin rakentaminen Euroopassa lisää puhtaan vedyn kysyntää EU:ssa⁷⁵. Tämä ajaa investointeja EU:hun.

Suomelle tämä avaa hyvän mahdollisuuden saada johtava asema EU:n sisäisillä vetymarkkinoilla. Puhtaan vedyn suurin kuluttaja on todennäköisesti Saksa. Ratkaisevaa on tapa, jolla Suomi pääsee Saksan markkinoille viedessään esimerkiksi vetyä mahdollisten siirtoputkien kautta, viemällä vetyjohdannaisia, puhdasta sähköä PPA-sopimusten kautta, teknologiaa jne. Tämä tarkoittaa, että Suomen tulisi keskittyä vedyn osalta strategisesti tärkeille markkinoille.

Energiaverodirektiivi, ETD

Energiaverodirektiivissä (ETD) asetetaan EU:n tason verojen vähimmäistasot kaikille energiamuodoille ja raaka-aineille. ETD:n tarkistus eroaa muista Fit For 55 -paketin sääntelykokonaisuuksista, koska se ei mene lainkaan Euroopan parlamenttiin. Direktiiviehdotus menee Eurooppa-neuvoston päätettäväksi.

Koska Euroopan markkinat ovat voimakkaasti jakautuneet energiankulutus pohjansa suhteen, yhteisymmärryksen löytäminen ei ole helppoa. Pohjoismaat ovat vahvasti riippuvaisia uusiutuvista energialähteistä, kun taas unionin itäiset osat ovat riippuvaisia maakaasusta, hiilestä ja öljystä. Ydinenergian roolissa on myös suuri ero jäsenvaltioiden välillä.

ETD:n eteneminen on pysähtynyt neuvostossa näiden erojen vuoksi. Asiaa saattaa olla vaikea viimeistellä ennen Espanjan neuvoston puheenjohtajakauden päättymistä vuoden 2023 loppuun mennessä. Belgia toimii puheenjohtajana nykyisen vaalikauden loppuun ja pyrkinee löytämään yhteisymmärryksen. Suomelle verotuslaki asettaa vain vähimmäisverotuksen. ETD ei vaikuta vetytalouden rakentamiseen Suomessa. Ainoa negatiivinen vaikutus voi olla, jos biopohjaisten raaka-aineiden käyttöä verotettaisiin ankarammin tai biogeenistä hiilidioksidia kohdeltaisiin epäedullisesti.

Vaihtoehtoisten polttoaineiden infrastruktuuriasetus, AFIR ja CO2-standardit

AFIR asettaa EU:ssa vaatimuksen vedyn jakeluverkon ja sähköautojen latausinfrastruktuurin rakentamisesta⁷⁶. Toinen osa tätä yhtälöä ovat äskettäin käyttöön otetut maantieajoneuvojen CO2-standardit⁷⁷. Molemmat asiakirjat tähtäävät tieliikenteen päästöjen vähentämiseen. Pohjimmiltaan uusi CO2-standardeja koskeva asetus tekisi lähes mahdottomaksi fossiililla polttoaineilla toimivien polttomoottoreiden myynnin vuoden 2035 jälkeen. Tätä tosiasiallista kieltoa saatetaan kuitenkin vielä muuttaa. CO2-standardiasetus velvoittaa seuraavan Euroopan komission antamaan vetyjohdannaisia RFNBO-polttoaineita koskevan asetuksen, joka sallisi pelkästään RFNBO-polttoaineilla toimivien polttomoottoreiden myynnin vuoden 2035 jälkeen. Tämä avaa markkinat Suomessa tuotetuille RFNBO-polttoaineille. AFIR velvoittaa Suomen rakentamaan kapasiteettia myös muille vaihtoehtoisille polttoaineille.

Jäsenvaltioilla on joitakin vaihtoehtoja sen suhteen, miten asetus pannaan täytäntöön ja mitkä osapuolet ovat valtuutettuja tai kannustettuja rakentamaan lataus- ja tankkausverkostoja. Yksi ratkaisu on, että nykyiset yritykset, joilla on velvoitus toimittaa uusiutuvia biopolttoaineita tieliikenneverkkoon,

⁷⁵ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52021PC0564&from=DE>

⁷⁶ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0559>

⁷⁷ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0556>

7.11.2023

rakentaisivat myös nämä vaihtoehtoiset polttoaineverkostot. Toinen vaihtoehto tämän toteuttamiseksi olisi järjestää huutokauppapohjainen malli yrityksille, jotka kilpailevat rakennusoikeuksista ja osana huutokauppaa kannustetaan hakemaan rahoitusta tai takauksia valtiolta. Nykyinen ongelma vaihtoehtoisten polttoaineiden infrastruktuurin rakentamisessa on kysynnän puute. Jos autoa ei voi missään ladata tai tankata, miksi ostaa auto, ja jos kukaan ei osta ajoneuvoa, miksi rakentaa infrastruktuuria. Siksi tarvitaan valtion väliintuloa.

REFuelEU Aviation & FuelEU Maritime

Osana Fit For 55:tä Euroopan komissio ehdotti myös tiukempien päästövähennystavoitteiden asettamista lento- ja meriliikenteelle. REFuel Aviation asettaa uusiutuvien ja RFNBO-polttoaineiden vähimmäistasot vuoteen 2050 asti. FuelEU Maritime asettaa alusten päästövähennystavoitteet ja määrää, kuinka alusten ja satamien tulee jatkossa järjestää lataus- ja polttoaineiden bunkkerointikykyä.⁷⁸

Molemmat poliittiset aloitteet ohjaavat merenkulkua ja lentoliikennettä kohti uusiutuvia energialähteitä ja lisäävät vedyn kysyntää. REFuelEU Aviation asettaa sitovan 70 % tavoitteen kestäville lentopolttoaineille, SAF:ille (Sustainable Aviation Fuel), vuoteen 2050 mennessä, josta vähintään 32 % on oltava synteettistä lentopolttoainetta. FuelEU Maritime asettaa sitovan tavoitteen vähentää CO₂-päästöjä 80 % vuoteen 2050 mennessä. Tällä hetkellä vedyn ja sen johdannaisten, kuten RFNBO:n, kustannukset ovat korkeammat kuin fossiilisten polttoaineiden. Suomen on löydettävä ratkaisuja siirtymävaiheen ja tuotannon skaalautuvuuden nousun kielteisten vaikutusten hillitsemiseksi.

Vety- ja vähähiilisen kaasun paketti

Kaasudirektiivin 2009/73/EY ja kaasusetuksen (EY) N:o 715/2009 uudistusta kutsutaan usein kaasupaketiksi, jonka tavoitteena on helpottaa vedyn siirtojärjestelmien rakentamista, tukea vedyn tuotannon kasvua ja mahdollistaa vedyn siirtoa nykyisissä kaasunsiirtoverkoissa. Paketti on EU:ssa kolmikantaneuvotteluvaiheessa ja sen arvioidaan valmistuvan vuoden 2023 loppuun mennessä. Paketti tuo selkeyttä kaasu- ja vetymarkkinoiden hallintomalliin ja siihen, miten olemassa olevaa verkkoa voidaan käyttää vedyn siirtämiseen sekoittamalla vetyä maakaasuun. Paketissa määrätään myös, kuinka rajat ylittäviä tariffeja käytetään vedyn kuljetukseen sen määrittelyn mukaan.⁷⁹

Kaasupaketin lopputuloksella on suora vaikutus Suomen teollisuuteen ja vetytalouteen. Riippuen vedyn sekoitussuhteista maakaasun siirtoputkissa, teollisuuden on kyettävä hyödyntämään kyseistä sekoitussuhdetta. Korkeat vedyn sekoituskiintiöt EU:ssa pidentäisivät myös maakaasuputkien toimintaa ja mahdollisesti hidastaisivat uusien vetyputkien rakentamista. Biometaanin rooli ja sekoitussuhde on myös Suomelle tärkeää.

⁷⁸ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0561> & <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0562>

⁷⁹ https://energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/market-legislation/hydrogen-and-decarbonised-gas-market-package_en

7.11.2023

Vetystrategiat keskeisissä jäsenvaltioissa

Suomi

Suomi toimitti kansallisen energia- ja ilmastosuunnitelmansa päivitysluonnoksen komissiolle⁸⁰ (NECP) kesäkuussa 2023. Hallitus on asettanut vedylle kunnianhimoisia tavoitteita hallitusohjelmassaan. Vaikka erityisiä tuotantotavoitteita ei ole, on ei-sitova tavoite saavuttaa 200 MW:n elektrolyysikapasiteetti vuoteen 2025 mennessä. Myös hiilidioksidin varastointi- ja käyttöratkaisut (CCS/CCU) voisivat tarjota Suomelle kilpailuedun vetyjohdannaistaloudessa. Suomessa syntyy myös runsaasti biogeenistä CO₂:ta, jota voitaisiin käyttää synteettisten polttoaineiden tuotantoon, kun CO₂ yhdistetään puhtaaseen vetyyn. Laajemmin tavoitteena on nostaa Suomi keskipitkällä ja pitkällä aikavälillä eurooppalaisen vedyn arvoketjun kärkeen hyödyntäen runsasta ja puhdasta sähkön tarjontaa.

Lisäksi NECP korostaa pohjoismaisista viranomais- ja energia-asiantuntijoista koostuvan Uusiutuvan energian ja vetytyöryhmän (NAFH) kriittistä roolia. Ryhmä on sitoutunut muotoilemaan uusiutuvan energian politiikkaa Pohjoismaissa. Sen tavoitteena on lisätä uusiutuvan energian ja vihreän vedyn käyttöä, keskittyen niiden sujuvaan integrointiin olemassa oleviin järjestelmiin ja teknologisiin innovaatioihin.

Suomen Vetyklusteri julkaisi Puhtaan vetytalouden strategiansa⁸¹ 27.6.2023. Strategian mukaan Suomen tavoitteena on olla EU:n johtava vedyntuottaja vuoteen 2035 mennessä, toisin kuin hallituksen NECP-luonnoksessa, jonka tavoitteena on vuosi 2030. Konkreettisten tuotantotavoitteiden asettamisen sijaan Suomen tavoitteena on toimia nopeasti ja tehokkaasti hyödyntääkseen vahvuutensa ja tarttuakseen mahdollisuuksiin koko arvoketjussa. Vetystrategiassa hahmotellaan neljä keskeistä toimenpidettä. Ensinnäkin on luotava suotuisat markkinat vetytalouden kehityksen nopeuttamiseksi. Toiseksi on edistettävä vetylaaksojen muodostumista ja kansainvälistä ylittävää yhteistyötä. Kolmanneksi päätöksentekoa on nopeutettava ja yhdenmukaistettava. Neljänneksi Suomen tulee profiloitua vetytalouden kärkimaaksi houkuttelemalla sijoittajia ja vaikuttamalla EU:n vetykehitykseen.

Puhtaan vetytalouden strategiassa tunnistetaan, että vaikka Suomessa on pitkälle kehittynyt ja vahva sähköverkko, puhtaan energian ja vedyn tuotannon nopea ja laajamittainen käyttöönotto, vaatii aktiivisia tekoja. Gasgrid Finlandin ja Fingridin yhteistyötutkimus osoittaa, että vetyputket ja -varastot voivat nopeuttaa uusiutuvan sähkön käyttöönottoa ratkaisemalla energiansiirron pullonkauloja. Siksi on tärkeää, että Suomi tekee yhteistyötä Itämeren alueen maiden kanssa vetyputkien rakentamiseksi. Hankkeilla varmistetaan pääsy avoimille, luotettaville ja turvallisille vetymarkkinoille.

Saksa

Liittohallitus päivitti 26. heinäkuuta 2023 kansallisen vetystrategiansa⁸², joka hyväksyttiin alun perin kesäkuussa 2020. Päivitetty versio on nostanut Saksan vetytavoitteita. Saksan tavoitteena on nopeuttaa markkinoiden ylösajoa tullakseen vetyteknologian johtavaksi toimittajaksi vuoteen 2030 mennessä. Kansallinen vetyneuvosto on tukenut hallituksen työtä. Päivitetyn strategian mukaan Saksan

⁸⁰ <https://valtioneuvosto.fi/en/-//1410877/finland-submits-its-draft-update-of-the-national-energy-and-climate-plan-to-the-commission>

⁸¹ <https://h2cluster.fi/wp-content/uploads/2023/06/H2C-H2-Strategy-for-Finland.pdf>

⁸² https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/fortschreibung-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=3

7.11.2023

tavoitteena on kaksinkertaistaa kotimainen vihreän vedyn tuotantokapasiteetti 5GW:sta 10GW:iin. Vuoteen 2027/2028 mennessä Saksa aikoo perustaa 1 800 km:n "vedyn start-up-verkon" IPCEI⁸³-tuen kautta ja yhdistää sen European Hydrogen Backboneen⁸⁴. Vetysovellukset kattavat teollisuuden, liikenteen, sähkön ja lämmön. Saksa on sitoutunut tehokkaaseen suunnitteluun, standardoituihin prosesseihin ja sertifiointeihin kansallisella ja Euroopan tasolla edistääkseen strategiaansa.

Saksan liittohallitus hahmottelee toimenpiteitä kolmelle eri aikavälille: lyhyen aikavälin, keskipitkän aikavälin ja pitkän aikavälin (vuoteen 2030), painopisteenä vedyn tarjonnan turvaaminen. Strategiassa ennakoidaan vihreän vetyenergian kysynnän kasvavan voimakkaasti 55 TWh:sta 95–130 TWh:iin vuoteen 2030 mennessä. Tämä edellyttää 50–70 prosentin tuontia vuoteen 2030 mennessä, pääasiassa merikuljetuksin ja vuoden 2030 jälkeen putkistoissa. Pitkän aikavälin skenaariot ennustavat teollisuuden vedyn kysynnän kasvavan 290–440 TWh vuoteen 2045 mennessä. Tuontilähteiden monipuolistaminen on keskeinen tavoite. Jää kuitenkin nähtäväksi, mihin energiaa vieviin maihin Saksa tulee tukeutumaan. Toistaiseksi Saksa ei ole tehnyt selväksi, jatkaako se monipuolistamista pitämällä Euroopan ulkopuoliset energiantoimittajat, kuten Saudi-Arabia ja Arabiemiirikunnat, vaihtoehtoina vai suuntaako se ensisijaisesti huomionsa EU/ETA:han. Erillinen vedyn tuontistrategia julkaistaan myöhemmin tänä vuonna.

Saksan markkinoille sijoittamisen houkuttelevuutta lisää sen suunnittelemat valtiontuet. Saksa pyrkii tasaamaan vihreän ja vähähiilisen vedyn kustannuseroja lyhyellä ja keskipitkällä aikavälillä. Lisäksi he ovat ottaneet käyttöön ilmastonsuojelusopimukset⁸⁵, kysyntäpuolen rahoitusmekanismin, joka on sidottu EU:n hiilidioksidin hinnoittelujärjestelmään (CCfD⁸⁶). Lisäksi on olemassa H2Global-ohjelma⁸⁷, kansainvälinen vihreän vedyn ostojärjestelmä.

PwC:n⁸⁸ tutkimus herättää kuitenkin huolta vedyn siirrosta Saksan eteläisillä alueilla, kuten Freiburg-München-akselilla, mikä saattaa johtaa riittämättömään vedyn tarjontaan. Mielenkiintoista on, että juuri tällä alueella odotetaan vedyn kysynnän olevan suurta. Saksan strategia on kiistatta kunnianhimoinen, sen kyky saavuttaa tavoitteensa jää kuitenkin nähtäväksi.

Saksasta tulee todennäköisesti Euroopan suurin vedyn kuluttaja tulevaisuudessa. Sen raskas teollisuus tarvitsee valtavia määriä vetyä, määriä, joihin sen kotimainen tuotanto ei riitä. Suomen ja sen vetyekosysteemin kannalta Saksan vedyn ja energian tuonti- ja tuontistrategia on ratkaisevassa roolissa. Saksa on jo allekirjoittanut yhteisymmärryspöytäkirjat Saudi-Arabian⁸⁹ ja Algerian⁹⁰ kanssa sekä ilmoittanut tiivistä yhteistyöstä Norjan ja muiden maiden kanssa. Suomen tulisi aktiivisesti pyrkiä saman tyyliseen rooliin edellä mainittujen maiden tavalla.

⁸³ https://competition-policy.ec.europa.eu/state-aid/legislation/modernisation/ipcei_en

⁸⁴ <https://ehb.eu/>

⁸⁵ <https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Pressemitteilungen/2023/06/20230605-start-of-the-carbon-contracts-for-difference-funding-programme.html>

⁸⁶ <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Wasserstoff/Foerderung-National/018-pilotprogramm.html>

⁸⁷ <https://www.h2-global.de/project/h2g-mechanism>

⁸⁸ <https://www.strategyand.pwc.com/de/en/hydrogen-economy.html>

⁸⁹ <https://saudiarabien.ahk.de/en/themes/hydrogen>

⁹⁰ <https://www.arabnews.com/node/2219361/business-economy>

7.11.2023

Tanska

Tanska pyrkii lisäämään vihreän vedyn tuotantoa ja käyttöä merenkulussa, lentoliikenteessä ja raskaassa liikenteessä. Lisäksi hallitus haluaa edistää vihreän vedyn vientiä ja ottaa johtoaseman elektrolyysitekniikan edistämisessä. Tämä on esitetty hallituksen Power-To-X (P2X) -strategiassa⁹¹ vuodelta 2021. Vuoteen 2030 mennessä Tanska suunnittelee rakentavansa 4–6 GW elektrolyysikapasiteettia. Hankintaviranomaisen Danish Energy Agency:n⁹² 1,25 miljardin DKK tarjouskilpailu⁹³ päättyi 1.9.2023 osana P2X-valtiontukiohjelmalla vihreän vedyn tuottamiseksi Tanskassa.

Tanskan tavoitteista huolimatta asiantuntijat⁹⁴ ovat huolissaan P2X-tekniologiasta. Teollisuuden asiantuntijat pelkäävät, että tekniologia ei ehkä ole kustannustehokasta, varsinkin kun otetaan huomioon polttoainemarkkinoiden ja valtion tukien epävarmuus. Toisaalta yliopistotutkijat kiinnittävät enemmän huomiota rajalliseen tuotantokapasiteettiin ja tekniologian tämänhetkisestä kehitystasoon. Heidän mukaansa yksi P2X:n myönteinen puoli on, että se voi vähentää biomassan tarvetta polttoaineiden tuotannossa, tekniologiaa käyttävät eivät kuitenkaan näe tätä merkittävänä etuna. Sekä tutkijat että käyttäjät ovat yhtä mieltä siitä, että P2X:n sääntelyä on parannettava käytön helpottamiseksi.

Suomi kilpailee Tanskan kanssa energiaviennistä energiaintensiivisille alueille. Tanska tekee tiivistä yhteistyötä Saksan kanssa vihreän vedyn alalla. Huomattava painopiste on vihreän vedyn kuljetusreitien luomisessa Jyllannista Pohjois-Saksaan. Tämä saavutetaan rakentamalla vetyputki maiden välille, putkilinjan pitäisi olla käytössä vuoteen 2028 mennessä. Aiemmin valmistuva putkilinja ja maantieteellinen läheisyys Saksaan ovat Tanskalle etu Suomeen verrattuna.

Ruotsi

Marraskuussa 2021 Ruotsin energiavirasto⁹⁵ ehdotti kansallista hiilivapaan vedyn strategiaa⁹⁶, jossa asetetaan tavoitteet sekä vuosille 2030 että 2045 ja samalla edistetään vetykehitystä. Ehdotuksessa vihreän vedyn tuotantotavoitteeksi asetettiin 22-42 TWh vuoteen 2030 mennessä ja 44-84 TWh vuoteen 2045 mennessä. Samainen strategia tavoittelee 5 GW:n kokonaiselektrolyysikapasiteettia vuoteen 2030 mennessä ja 15 GW:n kapasiteettia vuoteen 2045 mennessä. Sähkön kysyntä lisääntyisi noin 60-126 TWh/a strategian seurauksena.

Elektrolyysilaitteiden käytöstä on tulossa yhä tärkeämpää teollisuuden, kuten raudan ja teräksen, sekä kemian- ja jalostusteollisuuden aloilla. Sähkön saatavuus voi kuitenkin olla rajoittava tekijä Ruotsissa, erityisesti teollisuudelle, joka sijaitsee alueilla, joilla sähköverkon kapasiteetti on jo ennestään heikko. Seurauksena näiden teollisuudenalojen on selvitettävä vaihtoehtoja, miten energian saatavuus varmistetaan tuotannon mahdollistamiseksi.

⁹¹ https://ens.dk/sites/ens.dk/files/ptx/strategy_ptx.pdf

⁹² <https://ens.dk/en>

⁹³ <https://ens.dk/en/press/power-x-tender-now-open>

⁹⁴ <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/4/913>

⁹⁵ <https://www.energimyndigheten.se/en/>

⁹⁶ <https://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2021/forslag-till-nationell-strategi-for-fossilfri-vatgas/>

7.11.2023

Suurimpien ruotsalaisten teollisuudenalojen liittäminen sähköverkkoon edellyttää sähköntuotannon hallittua säätämistä ja investointeja elektrolyysilaitteisiin ja vedyn varastointiin, jotta voidaan välttää ylikapasiteetti-investoinnit energiajärjestelmän tasapainottamiseksi esimerkiksi vetyratkaisuille. Koska puhtaan vedyn tuotannon taloudellinen kannattavuus on kiinteästi sidoksissa sähkön hintaan, yrityksiä kehoitetaan mukauttamaan tuotantoaikataulujaan hyödyntämään alhaisen sähkön hintoja.

Merkittävä hanke on BotH2nia, suomalaisten ja ruotsalaisten yritysten, kuntien ja muiden vetytoimijoiden yhteistyö vahvan vetytalouselueen luomiseksi. Samanaikaisesti Suomen ja Ruotsin kaasu-kantaverkonhaltijoiden yhteistyö, Nordic Hydrogen Route (NHR), tukisi alueen kehitystä. NHR vetyverkko vastaisi alueen 65 TWh:n vedynkysyntään vuoteen 2050 mennessä.⁹⁷

Viro

Viro julkaisi 8. maaliskuuta 2023 Viron vetykartan⁹⁸ 2023, jossa hahmotellaan kaksivaiheinen strategia. Vuosina 2021-2030 maa keskittyy pilottihankkeisiin rakentaakseen vihreää vetyinfrastruktuuria ja -teknologiaa tavoitteenaan luoda pitkän aikavälin markkinat. Vuosina 2036-2050 on tarkoitus laajentaa alaa kotimaisen kulutuksen ulkopuolelle hyödyntämällä kohtuuhintaista uusiutuvaa energiaa ja teknologioita. Tiekartan tavoitteiden ja toimien oikea-aikaisuus arvioidaan vähintään kolmen vuoden välein.

Pilottihankkeet ovat suuri investointimahdollisuus vihreään vetyyn. Gasgrid Finlandin koordinoiman rajat ylittävän BalticSeaH2-hankkeen rinnalla toimii Estonian Hydrogen Valley, jota koordinoi Estonian Hydrogen Association⁹⁹. Vetylaakson tavoitteena on luoda sopivat olosuhteet vihreiden vetyteknologian käyttöönotolle. Ensimmäiset tuotantoyksiköt, jakeluratkaisut ja sovellukset on tarkoitus tehdä seuraavan kuuden vuoden aikana, aloitteella on laaja tuki yli 30 paikalliselta ja kansainväliseltä instituutiolta.

Viro on tällä hetkellä energian maahantuojaja. EU:n päästökauppajärjestelmän kustannusten nousun vuoksi Viro on siirtynyt energian viejästä maahantuojaksi. Tämä johtuu suurelta osin siitä, että Viro on voimakkaasti riippuvainen hiili-intensiivisestä öljyliuskeesta energiantuotannossa. Tämä on heikentänyt sen kilpailukykyä puhtaampia tuottajia vastaan, mikä on johtanut siihen, että noin 42 % sähköstä tuotiin vuonna 2020 ja 30 % vuonna 2021. Tilanteen muuttamiseksi Viro pyrkii lisäämään uusiutuvan energian kapasiteettiaan.

Virolla ja muilla Baltian mailla on selkeä intressi tehdä tiivistä yhteistyötä Suomen kanssa vetyverkoston rakentamisessa. Vakaat vedyn hinnat voidaan saavuttaa tekemällä yhteistyötä, mikä osaltaan vähentää kalliiden vetyvarastojen tarvetta. Kun vedyn verkosto on rakennettu koko Itämeren alueelle, Suomella on käytettävissään kustannustehokkaita, vedyn varastointiin soveltuvia suolaluelastoja. Näin ollen maat hyötyvät toistensa ponnisteluista.

⁹⁷<https://nordichydrogenroute.com/fi/>

⁹⁸<https://www.mdpi.com/1996-1073/14/4/913>

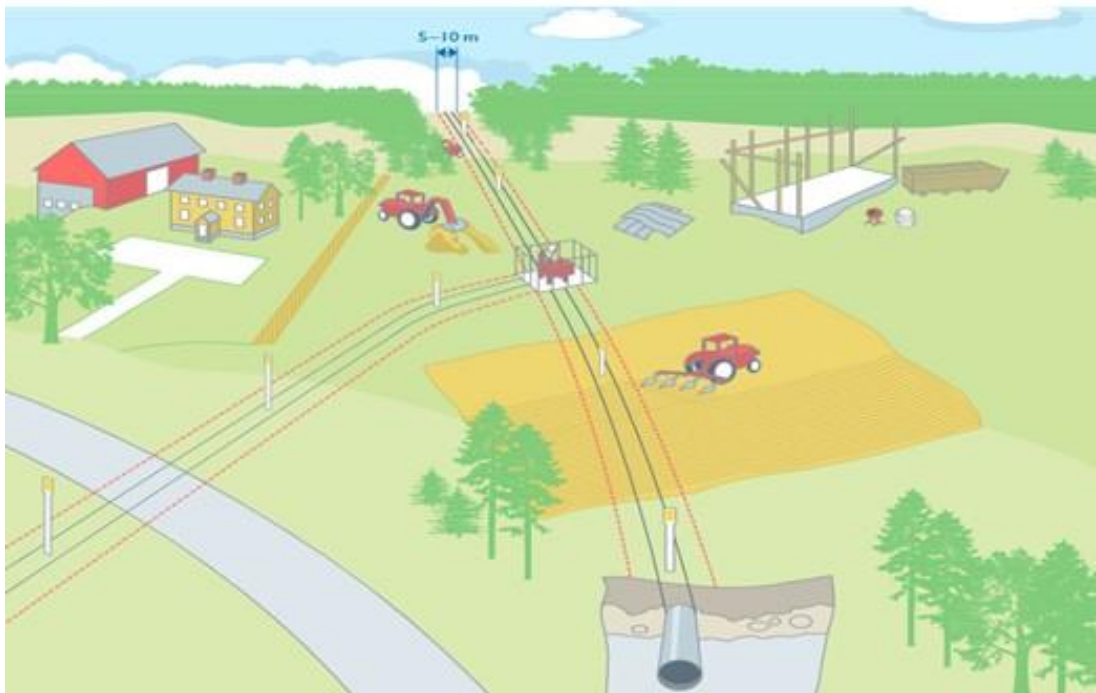
⁹⁹<https://h2est.ee/en/>

7.11.2023

Liite 4: Vedynsiirtoinfrastruktuurin osien kuvaus

Siirtoputkisto

Vetyä on suunniteltu siirrettävän pitkiä matkoja korkeapaineisessa maanalaisessa putkistossa (Kuva 31). Lisäksi voi rakentua matalapaineisempaa vedyn jakeluverkkoa esimerkiksi teollisuuslaitosten tai niin kutsuttujen vetylaaksojen läheisyyteen. Vetykaasu siirretään tuotantolaitokselta käyttökohteeseen pääsääntöisesti teräsputkissa, jotka on korroosion estämiseksi pinnoitettu ulkopuolelta esimerkiksi polyteenimuovilla (2-3 mm). Lisäksi putkiston korroosiota estetään sähkökemiallisesti katodisella suojausjärjestelmällä. Putki voidaan myös tarvittaessa pinnoittaa sisäpuolelta epoksilla (80 µm) kitkahäviöiden vähentämiseksi. Siirtoputki ulottuu molemmissa päissä asiakkaiden prosessien läheisyyteen, ja asiakkaat vastaavat prosessiensa yhdistämisestä putkeen. Putkisto asennetaan 1-2 metrin peitesyvytyteen. Metaaniputkien sijainti merkitään maastoon keltaisilla merkintäpylväillä. Vedyn siirtoputkelle tulee vastaavat vetysesifit merkinnät. Lisäksi maanpäälliset putkistonosat tulee maalata merkkivärillä.



Kuva 31 Metsäalueilla ja taajamissa on havaittavissa 5–10 metriä leveä puuton vyöhyke, jonka keskellä sijaitsee maanalainen vetyputkisto (Kuva: muokattu lähteestä Gasum¹⁰⁰).

Metaanin olemassa olevassa siirtoputkistossa kaasun paine on normaalisti 30-54 bar ja putkien halkaisija vaihtelee DN100-DN1000 välillä. Vetyputkiston painetaso ja halkaisija tarkentuvat suunnittelun edetessä. Alustavissa tarkasteluissa vetyputkiston suunnittelupaine on ollut 80 bar, kuten metaaniputkissakin. Putken koko ja painetaso yhdessä määrittävät verkoston kyvyn energian varastointiin ja siirtoon. Alustavasti on suunniteltu, että siirtoputki mitoitetaan niin, että se mahdollistaa ensimmäisille asiakkaille lyhytaikaisen varastokapasiteetin (*linepack*) hyödyntämisen. Lisäksi kaikissa putken osissa on merkittävää lisäsiirtokapasiteettia uusia mahdollisia siirtoasiakkaita varten. Siirto- ja

¹⁰⁰ Gasum. Maakaasuputkiston rakentaminen. Esite 2003.

7.11.2023

varastokapasiteetti varmistuvat, kun siirtoverkkoon liittyvien asiakkaiden tuotanto- ja kulutusprofiilit sekä putkiston painetaso tarkentuvat. Putkiston suunnittelu on optimointia putken halkaisijan, painetason ja kompressoritehon välillä.

Vetyputken suuri halkaisija ja korkea paine aiheuttavat putkelle kuormituksia ja asettavat uudenlaisia vaatimuksia putken paksuudelle ja materiaalin vahvuudelle metaaniputkiin verrattuna. Nämä voivat asettaa rajoituksia kaasun varastointipotentiaalille putkistossa. Lisäksi putkisto altistuu toistuville paineenvaihteluille, jos sitä käytetään vedyn varastointiin tasaamaan vaihtelevaa uusiutuvan sähkön tuotantoa ja kysynnän vaihtelua. Paineenvaihteluilla on vetyputken tapauksessa suurempi merkitys kuin metaaniputken tapauksessa, sillä väsymissäronkasvu voi tapahtua jopa kymmenkertaisella nopeudella.¹⁰¹

Yleisen käsityksen mukaan vetyhaurastumisen riski on sitä suurempi mitä lujemmasta teräksestä on kyse. Erityisesti suurlujuusteräket sekä titaani- ja alumiiniseokset ovat alttiita vetyhaurastumiselle. Suomessa metaaniputkissa käytetään tyypillisesti materiaaleja X42, X52, X60 ja X70. Vetyputkissa tullaan käyttämään samantyyppisiä materiaaleja, mutta mahdollisesti suositaan matalampia lujuuksia vetyhaurastumisriskin minimoimiseksi. Matalampi lujuus yhdessä korkean painetason ja paineen vaihteluiden kanssa johtaa todennäköisesti vetyputkien suurempaan paksuuteen metaaniputkiin verrattuna. Suuren kokoluokan vetyjärjestelmistä ja korkeista paineista ei kuitenkaan ole vielä saatavilla pitkän aikavälin kokemuksia ja dataa ja siksi ensimmäisissä järjestelmissä varaudutaan suurempiin varmuuskertoimiin kuin mahdollisesti myöhemmin rakennettavissa putkistoissa.

Alustavien analyysien ja viranomaiskeskusteluiden perusteella metaaniputkien tekniset asetukset ovat hyvä lähtökohta suojaetäisyyksien arviointiin (Kuva 32). Näihin kuuluvat Laki vaarallisten kemikaalien ja räjähteiden käsittelyn turvallisuudesta 390/2005 (Lainsäädännön runko teknisen käytön ja turvallisuuden osalta) ja Valtioneuvoston asetus maakaasun käsittelyn turvallisuudesta 551/2009 ("Maakaasuasetus"), johon Tukes on antanut soveltamisohjeet. Vedyn lainsäädännön vielä kehittyessä suojaetäisyydet vedyn osalta tullaan arvioimaan erikseen.

¹⁰¹ Wesselink, O., Krom, A., van Agteren, M. (2022). Balancing Hydrogen Networks Safely: A Method for Calculating Linepack Potential Without Causing Integrity Risk Due to Hydrogen-Enhanced Fatigue. Proceedings of International Pipeline Conference, 26-30 September 2022, Calgary, Canada. <https://doi.org/10.1115/IPC2022-86674>

7.11.2023

Etäisyys maanalaiseen siirtoputkistoon

Putken nimellishalkaisija mm	Ryhmä A etäisyys	Ryhmä B etäisyys
DN ≤ 200	10 m	5 m
200 < DN ≤ 500	16 m	8 m
DN > 500	20 m	10 m

Etäisyys siirtoputkiston maanpäällisiin osiin

Siirtoputkiston laite/rakennelma	Ryhmä A etäisyys	Ryhmä B etäisyys	Moottori-, moottoriliikenne-, valta- ja kantatie, rautatie; etäisyys
Paineenvähennys-, linjansulkuventtiili- ja kaavinasema	50 m	25 m	25 m
Paineenlisäysasema	100 m	50 m	50 m

Kuva 32 Maakaasuasetus määrittelee suojaetäisyydet metaanin siirtoputkesta ja siirtoputkiston maanpäällisistä osista. Ryhmä A: Yleiset kokoontumiseen tarkoitetut rakennukset, kuten majoitushuoneistot, kokoontumishuoneistot ja asuinhuoneistot sekä räjähteitä valmistava, varastoiva tai käytävä laitos sekä vaarallisia kemikaaleja teollisesti käsittelevä laitos. Ryhmä B: asuinhuoneistot, työpaikkahuoneistot, muut kuin asumiseen tarkoitetut rakennukset, missä ihmisiä oleskelee säännöllisesti ja erillisen rajattu alue. (Lähde: Gasgrid Finland¹⁰²)

Kompressoriasemat

Kompressoriasemien avulla ylläpidetään ja nostetaan siirtoputkiston painetasoa ja siten lisätään vetykaasuverkon siirto- ja varastointikapasiteettia. Kompressorien käyttötarve riippuu siirtoputkiston painetilanteesta, johon vaikuttavat kulloinkin siirto- ja varastointitarve ja asiakkaiden syöttö- ja käyttöpaine. Metaaniputkistoon verrattuna tuotannon oletetaan olevan epätasaisempaa, koska se perustuu suurelta osin vaihtelevaan uusiutuvan sähkön tuotantoon. Kompressorin valintaan vaikuttavat mm. vedyn tilavuusvirta, painesuhde, kaasun ominaisuudet ja operointitapa (joustavuuden tarve). Kompressoriasemilla vedyn komprimointiin voidaan käyttää mäntä- tai keskipakokompressoria.^{103,104} Suurin ero vedyn ja metaanin komprimoinnin välillä aiheutuu vedyn huomattavasti matalammasta energiatiheydestä. Tästä johtuen sekä vedyn komprimoinnin energiantarve että kompressorin ja kompressorilaitoksen tilantarve ovat huomattavasti suurempia kuin metaanin tapauksessa.

Keskipakokompressori (*centrifugal/turbo compressor*) on suositeltu vaihtoehto suuremmille virtausnopeuksille ja sitä käytetään metaanin paineen nostoon. Metaanin komprimointiin soveltuvat keskipakokompressorit eivät kuitenkaan suoraan sovellu vetykäyttöön, koska pyörimisnopeuden tulee olla jopa kolminkertainen. Keskipakokompressoreissa rajoitteita aiheuttaa niin kutsuttu kuristus- ja ylijänniteilmiö (*choke and surge phenomenon*). Myös vetyhäviöt ovat haaste keskipakokompressorin

¹⁰² Gasgrid Finland. (2023). Kaasuputken tunnistaminen. Osoitteesta: <https://gasgrid.fi/kaasuverkosto/tunnistaminen-ja-toiminta/>

¹⁰³ Witkowski, A., Rusin, A., Majkut, M., Stolecka, K. Comprehensive analysis of hydrogen compression and pipeline transportation from thermodynamics and safety aspects. *Energy*, 141 (2017), pp. 2508-2518.

¹⁰⁴ Gaseous Hydrogen Compression. U.S. Department of Energy. (2022).

7.11.2023

tapauksessa. Keskipakokompressorien etuihin taas kuuluu mahdollisuus suureen tilavuusvirtaan, mitä vedyn tapauksessa tarvitaan matalan tiheyden takia.

Mäntäkompressori (*reciprocating compressor*) soveltuu parhaiten alhaisille virtausnopeuksille (≤ 1700 m/h) ja sillä saavutetaan korkea painesuhde.¹⁰⁴ Mäntäkompressori tarjoaa tilavuusvirralle paremman säädettävyyden keskipakokompressoriin verrattuna. Metaanin komprimointiin soveltuvat mäntäkompressorit soveltuvat vetykäyttöön pienin muutoksin. Vedyn suuret tilavuusvirrat aiheuttavat haasteen mäntäkompressorien käytölle. Minimi- ja maksimivirtausta rajoittavat männän koko ja sylinterin nopeus. Mäntäkompressori vaatii puhdasta ja kuivaa vetyä.

Alustavien suunnitelmien mukaan vedyn paineennosto tullaan toteuttamaan mäntäkompressoreilla, joiden käyttövoimana toimii sähkö. Korkea painesuhde vaatii useita kompressorivaiheita. Kun halutaan suuri toiminta-alue tilavuusvirran osata, mäntäkompressoreita voidaan kytkeä useita rinnakkain. Tämä on tärkeää myös laitteistojen redundanttisuuden kannalta.

Venttiiliasemat

Kuten metaanin siirtoputkistoon, myös vedyn siirtoputkistoon asennetaan venttiili- ja kaavin asemia, joiden linjasulkuventtiileillä voidaan ohjata kaasun virtausreitit sekä tarvittaessa katkaista kaasun siirto ja jakelu ja tyhjentää siirtoputkiosuusia vedystä. Venttiiliasemilla voidaan suorittaa putken kunnonvalvontaan liittyviä puhdistus- ja tarkastusajoja tietoa keräävällä luotaimella (eli ns. älypössulla). Metaanin siirtoputkistossa venttiiliasemia on 8-32 km välein. Kaukovalvotut venttiiliasemat lisäävät siirtoverkon käyttöturvallisuutta ja niiden linjasulkuventtiileitä voidaan operoida siirtoverkonhaltijan eli Gasgridin valvomosta. Vedyn osalta ei ole vielä kansallista lainsäädäntöä ja standardeja, joiden avulla voitaisiin suunnitella vetyputkiston jako osioihin ja näin ollen määritellä venttiiliasemien maksimietäisyys toisistaan. ASME B31.12 määrittelee venttiiliasemien väliset maksimietäisyydet sijaintiluokan mukaisesti (32, 24, 16 ja 8 km) samalla tavalla kuin metaaniputkiston venttiiliasemille Maakaasuasetuksessa.

Metaaniputki voidaan tyhjentää ulospuhalluksena suoraan ilmaan, kun taas vedyn tapauksessa ulospuhalluksen syttymismahdollisuuden takia määritellään vedylle soveltuvia ratkaisuja. Koska putkiosan tyhjentämisaika tulee olla kohtuullinen, venttiiliasemia saatetaan sijoittaa tiheämmin kuin metaaniputkiston tapauksessa. Venttiiliasemille tullaan sijoittamaan jatkuvatoimisia vedyn vuodonilmaisimia ja liekkivahteja. Venttiiliasemien läheisyyteen sijoitetaan yleensä myös putkiverkon omaan tiedonsiirtojärjestelmään kuuluvat linkkiasemat, joiden kautta välitetään valvonta- ja hälytystiedot keskusvalvomoon.

Paineenvähennysasemat

Siirtoputkiston ja jakeluputkiston tai käyttökohteen rajapintaan rakennetaan paineenvähennysasema, jossa vetykaasun paine lasketaan asiakkaalle sopivaksi. Paineenvähennysasemien suunnittelussa huomioidaan tulevien huoltojen tai laitteiden mahdollisten vikaantumisten vaikutus kaasun siirtoon ja niihin ennalta varautuminen. Metaanin tapauksessa paineenvähennysasemalla suoritetaan kaasun suodatus, lämmitys, paineensäätö ja määrämittaus. Kaasunmäärämittarien avulla määritetään toimitettu kaasumäärä laskutuksen perustaksi. Metaani hajustetaan paineenvähennysasemalla ennen toimitusta asiakkaille. Erityistapauksissa kaasu voidaan toimittaa hajustamattomana, mutta siihen

7.11.2023

tarvitaan viranomaisen lupa. Vedyn tapauksessa paineenvähennysasemalla tapahtuu paineensäätö ja määramittaus. Vedyn hajustaminen on haasteellista ja vaatii jatkoselvitystä.

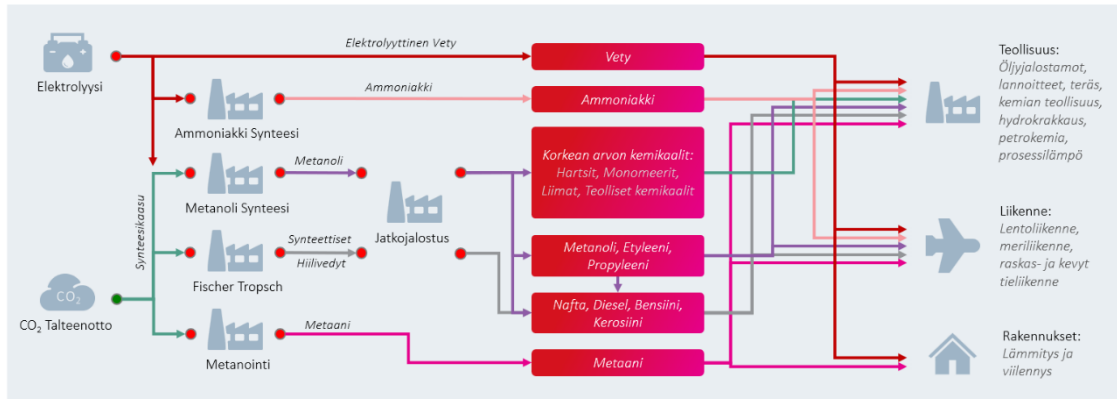
Valvomotoiminnot

Tulevaa vetyverkkoa suunnitellaan operoitavan Gasgrid Finlandin keskusvalvomosta, josta operoidaan myös nykyistä metaanin siirtoverkkoa. Valvomo on toiminnassa vuorokauden ympäri ja sen henkilöstöllä on valmius toimia kaikissa kaasun siirron poikkeustilanteissa. Normaalitilanteessa valvomon tehtävä on operoida siirtoverkkoa niin, että verkon painetaso on aina riittävä kaasutoimitusten toteuttamiseen. Valvomo seuraa ja operoi siirtoverkkoa etäyhteydellä laitteistojen mittareiden, hallintalaitteiden ja automaation avulla. Tarvittaessa valvomon operaattori lähettää kohteeseen asentajan huolto- tai kunnossapitotehtäviin. Poikkeustilanteessa valvomon operaattori käynnistää tarvittavat korjaavat toimenpiteet.

7.11.2023

Liite 5: Vedyn jatkojalostuksen arvoketjut

Kuva 33 havainnollistaa uusiutuvan vedyn vaihtoehtoisia suoria käyttökohteita sekä jatkojalostusreittejä ja niissä käytettäviä teknologiavaihtoehtoja erilaisissa lopputuotteiden käyttösektoreissa.



Kuva 33 Elektrolyysillä tuotetun vedyn vaihtoehtoiset teknologia-arvoketjut ja loppukäytöt

Puhdas vety sähköpolttoainetuotannon mahdollistajana

Fischer-Tropsch -synteesiteknologia (FT) mahdollistaa nestemäisten polttoaineiden valmistuksen erilaisista hiiltä ja vetyä sisältävistä raaka-aineista. Yllä mainitussa kuvassa esitetty, (biogeenisestä prosessista) talteen otettu hiilidioksidi on mahdollista korvata myös kiinteällä hiilen lähteellä (erilaiset jäte- ja sivuvirrat), joka muunnetaan kaasumaiseen muotoon (ns. synteetikaasu, CO ja vety) ollakseen käytettävissä muodossa FT- reaktioon. Puhtaan vedyn arvoketjussa vety tuotetaan elektrolyysin kautta ja hiili on jo valmiiksi kaasumaisessa muodossa. Nämä kaasumaiset komponentit prosessoidaan synteetikaasuksi, joka muunnetaan synteettiseksi hiilivetyseokseksi (synthetic crude) katalyyttisessä FT-reaktiossa. Jatkojalostusprosessissa hapelliset hiilivetykomponentit pelkistetään vedyttämällä ja pitkät hiilivetyketjut pilkotaan toivottuun jakaumaan käyttämällä tarkoitukseen sopivaa katalyyttimateriaalia krakkaamalla. Jatkojalostetusta hiilivetyseoksesta erotetaan toivotut polttoainekomponentit (diesel, bensiini, kerosiini) tai esimerkiksi petrokemian teollisuuden syötteenä käytetty nafta tislaamalla.

Vastaavia polttoainekomponentteja voidaan valmistaa ns. metanolireitin kautta lähtien elektrolyysillä tuotetusta vedystä ja talteen otetusta hiilidioksidista. Tässä reitissä valmistetaan ensimmäisessä vaiheessa metanolia (e-metanoli), joka konvertoidaan jatkojalostusprosessissa katalyyttisesti etyleeniksi ja/tai propyleeniksi. Riippuen tavoitellusta hiilivetyjakaumaprofiilista lopputuotteen suhteen, etyleeni ja/tai propyleeni prosessoidaan pidemmiksi polttoainekomponenteiksi ns. oligomeroituvaiheen kautta. Metanolista voidaan erilaisilla kemiallisilla prosesseilla jalostaa myös erilaisia kemian- ja petrokemianteollisuuden raaka-aineita sekä jatkojalosteita, kuten liimoja, hartseja, polttoaineiden lisäainekomponentteja ja happoja.

FT- prosessin erityispiirteenä voidaan mainita synteettisen hiilivetyseoksen kahden faasin olomuoto. Tuote jakautuu huoneenlämmössä sekä nestemäiseen että kiinteään (vaha) fraktioon. Tämä ominaisuus vaikuttaa FT- prosessin ohjautumista ensisijaisesti keskitettyyn tuotantomalliin, jossa sekä FT- prosessi että jatkojalostus suoritetaan samassa sijainnissa, jolloin vältetään kiinteän vahafraktion kuljettamiselta.

7.11.2023

Metanolireitin tuotantomalli voidaan nähdä toteutettavan ns. hajautetun mallin mukaisesti, jossa e-metanolin tuotanto ja sen jatkojalostukseen liittyvät yksikköoperaatiot voidaan toteuttaa maantieteellisesti erillisissä kohteissa. Tämä luonnollisesti vähentää paikallisen energian ja raaka-aineiden tarvetta sekä niiden yhteishankinnan painetta, toisin kuin FT- reitissä. Tämä on myös merkittävä erottava tekijä kyseisten teknologioiden skaalautuvuuspotentiaalin tarkastelussa.

Metanoli- ja FT- reiteille yhtäläisyyksistä voidaan mainita, että näiden prosessien perustaminen synteettisten polttoaineiden tuotantoon edellyttää olemassa olevien tuotantoprosessien merkittävää muokkaamista ja mittavia uusia investointeja koko arvoketjun yli. Puhtaan energian (sähkö/vety) saatavuuden ja hinnan vakauttaminen ja ennustettavuuden tarve tulee näyttämään isoa roolia tuotannon kannattavuudessa. Tästä syystä esimerkiksi elektrolyyssiteknologian (hyötysuhteen) kehitys tulee olemaan keskeisessä roolissa, kun tarkastellaan laajempaa energiajärjestelmää ja (energia)sivuvirtojen hyödynnettävyyttä sekä valmistusprosessien sisäisesti että laajemman sektori-integraation kautta. Huomion arvoista on myös kemianteollisuuden valmistusprosessien operatiivisen ajoikkunan joustavuus, joka on huomattavasti kapeampi kuin esimerkiksi sähköntuotannossa.

Puhtaan vedyn hyödyntäminen kemian- ja terästeollisuudessa

Puhtaan vedyn suora käyttö nykyisellään käytetyn SMR- eli ns. harmaan vedyn korvaajana jalostamokäytössä sekä lannoiteteollisuuden ns. drop-in -kemikaalina (mm. ammoniakkin tuotannossa) tulee mahdollistamaan mittavat hiilidioksidipäästövähennykset kyseisillä teollisuuden aloilla. Käytetyn vedyn määrää jalostamokäytössä tulee ohjaamaan voimakkaasti regulaation ohjaus RFNBO- vedyn roolista, mikä on vielä tulkinnanvaraista olemassa olevan sääntelyn käytännön tulkintojen ollessa puutteellisia.

Ammoniakin loppukäyttö myös mm. laivaliikenteen tulevaisuuden hiilidioksidipäästöjen vähentäjänä on tunnustettu mahdollisuus muiden fossiilisten meriliikennepolttoaineiden vaihtoehtona. Meriliikenteen regulaatiota ohjataan kokonaispäästövähennyksen kautta (toisin kuin lentoliikenteen tapauksessa), mikä jättää vapauden päästövähennyksen toteuttamistavasta operoijalle, eikä siten aseta jakelutavoitteita tietyille polttoaineille.

Hiilivapaita vetytelkistysteknologioita metalliteollisuuteen sekä vetyohjaista teräksentuotantoa on kehitetty tiiviissä yhteistyössä teollisuuden kanssa sekä Suomessa että Ruotsissa. Fossiilivapaa teräksentuotanto tähtää korvaamaan perinteisesti käytetyn koksen vedyllä rautaraaka-aineen pelkistyksessä. Perinteinen, fossiiliseen hiileen perustuvat pelkistysmenetelmä on tuottanut merkittäviä määriä hiilidioksidia prosessin sivutuotteena. Uusi tuotantoteknologia käytännössä laskee teräksentuotannon hiilidioksidipäästöt lähelle nollaa. Tämä voi osaltaan edesauttaa erityisesti raskaan liikenteen kestävyystavoitteita autoteollisuuden materiaalivalintojen kautta ja lisätä mm. kuorma- ja linja-autojen valmistuksen energiatehokkuutta.

Kemianteollisuuden energiantensiivisimpiin prosesseihin (pl. polttoainevalmistus) lukeutuvat polymerointireaktiot ja erilaiset reaktiokemian tuotantolaitokset. Monia ns. korkean arvon kemikaaleja voidaan tuottaa metanolireitin kautta, jonka kautta saatavia tuotteita voidaan joko käyttää sellaisenaan (hartsit, liimat, polymeerit, polttoainekomponentit ja lisäaineet) tai jatkojalostuksen lähtöaineina (esterit, hapot).

7.11.2023

Teollisuuden peruskemikaalituotanto, esim. vetyperoksidiprosessi, käyttää tällä hetkellä fossiilista vetyä tuotannon raaka-aineena. Vetyperoksidia käytetään laajasti kemianteollisuuden jatkojalosteiden raaka-aineina, mm. peretikkahapon valmistuksessa sekä selluteollisuuden valkaisukemikaalina. Myös ammoniakkituotannon raaka-ainepohja tukeutuu tällä hetkellä täysin fossiiliseen vetyyn ja on kokonaisenergiankulutukseltaan hyvin energiantensiivinen.

7.11.2023

Suomen kaasun siirtoverkkoyhtiö Gasgrid Finland ja sähkön kantaverkkoyhtiö Fingrid aloittivat keväällä 2021 yhteistyön, jonka tavoitteena on selvittää vetytalouden mahdollisuuksia Suomessa, sekä energainfrastruktuurin roolia vetytalouden mahdollistajana. Yhteistyö saa konkreettista jatkoa Gasgridin ja Fingridin yhteisessä tutkimus- ja kehityshankkeessa, joka toteutetaan osana laajempaa, useista suomalaisista yrityksistä ja tutkimuslaitoksista koostuvaa HYGCEL-tutkimushankekonsortiota. Business Finland on 28. lokakuuta 2021 myöntänyt tukea sekä Fingridin ja Gasgridin yhteishankkeelle että laajemmalle kokonaisuudelle.

Gasgrid Finland Oy on valtionyhtiö, joka toimii järjestelmävastaavana kaasun siirtoverkonhaltijana Suomessa. Tarjoamme asiakkaillemme turvallista, luotettavaa ja kustannustehokasta kaasujen siirtoa. Kehitämme aktiivisesti ja asiakaslähtöisesti siirtoalustamme, palveluitamme ja kaasumarkkinoita edistääksemme tulevaisuuden hiilineutraalia energia- ja raaka-ainejärjestelmää. Lue lisää: www.gasgrid.fi

Fingrid on suomalaisten kantaverkkoyhtiö. Turvaamme asiakkaille ja yhteiskunnalle kustannustehokkaasti varman sähkön ja muovaamme tulevaisuuden puhdasta ja markkinaehtoista sähköjärjestelmää. Fingrid välittää. Varmasti. www.fingrid.fi